

*В.В. СЕМЕНЕЦЬ¹, д-р техн. наук, О.Г. АВРУНІН¹, д-р техн. наук,
О.М. МОРОЗ², д-р техн. наук, Н.Г. КОСУЛІНА², д-р техн. наук,
О.Д. ЧЕРЕНКОВ², д-р техн. наук*

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІМПУЛЬСНИХ РЕФЛЕКТОМЕТРІВ НА ОСНОВІ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛІНІЙНИХ ФУНКЦІОНАЛІВ

Вступ

Аналіз показує, що створення перспективних технологій в медицині, біології та сільському господарстві неможливе без вивчення фізико-хімічних процесів у біологічних об'єктах на мікро- і нанорівнях на основі методу діелектричної спектроскопії [1].

Аналіз діелектричної проникності (ДП) біологічних речовин (кров, сеча та інше) є важливим показником різноманітних патологічних змін в організмі людини та тварини.

Підвищення ефективності застосування електромагнітної терапії різних захворювань людини і тварин неможливо без знань про ДП хворих органів і тканин. Досвід клінічних спостережень показує, що однією з найважливіших причин досягнення максимальних результатів від ЕМ терапії є залежність терапевтичного ефекту від правильно обраної довжини хвилі електромагнітного випромінювання (ЕМВ), яка залежить від діелектричної проникності тканин і органів [2].

Діелектрична спектроскопія біологічних речовин в залежності від температури, параметрів ЕМВ і акустичних полів, вологості, тиску газового середовища та ін. дає інформацію про структуру речовини, типи поляризації, види втрат, розміри молекул і атомів, про резонансні частоти власних коливань. З вивченням ДП пов'язані фізико-хімічні дослідження частоти непровідних рідин, аналіз бінарних і багатокомпонентних сумішей [3].

Питання оптимального застосування ЕМ енергії в сільськогосподарському виробництві пов'язані, перш за все, з вивченням діелектричних властивостей біологічних об'єктів.

З виміром ДП біологічних об'єктів пов'язано створення нових інформаційних електротехнологій для підвищення врожайності зернових культур, лікування тварин, підвищення продуктивності, знищення шкідливих мікроорганізмів і комах [4].

Для вимірювання ДП речовин і матеріалів в широкому частотному діапазоні (від 0 до 10^{13} Гц) існують численні методи і пристрої: метод балістичного гальванометра; мостові вимірювальні методи; методи з резонансними коливальними контурами; методи стоячих хвиль, що використовують коаксіальні і порожнинні резонатори; хвильові і оптичні методи). Такий широкий частотний діапазон не можна охопити єдиним методом вимірювань. Для кожної області діапазону частот існує кращий метод вимірювання ДП [5].

З проведеного аналізу випливає, що розглянутим методам вимірювання ДП матеріалів і речовин, притаманні суттєві недоліки [6]:

1. Обмежена точність:

- похибка вимірювання ϵ – (2 – 3) %;
- похибка вимірювання σ – (3 – 5) %.

Помилки вимірювання складаються:

а) з помилок, обумовлених похибкою вимірювання фізичних величин, необхідних для розрахунків;

б) помилок за рахунок значної зміни добротності контуру НВЧ при введенні в його порожнину досліджуваних зразків (кювети);

- в) помилок за рахунок емпіричності формул розрахунку;
- г) помилок оператора при вимірах і проведення розрахунків (суб'єктивні помилки).

2. Значна трудомісткість процесу вимірювань ε і σ вимагає:

а) складного комплексу засобів виміральної техніки та їх спеціальної підготовки до вимірювань;

б) зняття вимірних значень і проведення розрахунків.

4. Відсутність легкодоступної експрес-інформації.

5. Необхідність спеціально підготовленого технічного персоналу для обслуговування апаратури та проведення вимірювань.

Апаратурна реалізація розглянутих методів вимірювання ДП матеріалів і біологічних речовин являє собою складні радіотехнічні пристрої, що містять велику кількість різних вузлів і елементів: джерела сигналів на необхідний діапазон частот; перетворювачі частоти; спрямовані відгалужувачі і мости; вентилі; пристрої індикації; блоки живлення. Основною проблемою при створенні апаратури такого класу є відсутність широкосмугових джерел сигналу. В даний час ця проблема вирішується шляхом набору необхідної кількості генераторів, що забезпечують необхідний діапазон частот.

Наприклад, для перекриття діапазону частот 1 – 100 ГГц необхідно зібрати лінійку генераторів стандартних сигналів в кількості 15 шт. [7]. Природно, що цей комплект має великі габаритно-масові характеристики, споживану потужність, але головний недолік – відсутність необхідної швидкодії при перебудові частоти і зміні приладів, що призводить до втрати інформації.

Найістотнішим недоліком розглянутих методів вимірювання ДП біологічних речовин є принципова неможливість вимірювання ДП через нелінійні властивості біооб'єктів, нелінійні властивості електронних кіл і пристроїв [8].

Створення імпульсної рефлектометрії в широкому частотному діапазоні неможливе без застосування функціонального методу, який є одним з найбільш зручних і ефективних методів дослідження радіоелектронних кіл і пристроїв, які, як правило, є нелінійними і інерційними системами високої розмірності [9 – 21].

У роботах [10 – 16] для аналізу нелінійних електронних кіл використовуються аналітичні методи, до яких відносяться різні способи інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь: квазістатичні методи (прямий метод, характеристичних функцій або метод контурних інтегралів, метод похідних для нормальних випадкових процесів), метод інтегровальної апроксимації, різні методи лінеаризації (лінеаризація поблизу робочої точки або дотична апроксимація, гармонійна лінеаризація, статистична лінеаризація, метод комбінованих описувальних функцій), метод фазової площини, метод усереднення, метод малого параметра, метод перетворень Тейлора, метод марківських процесів, функціональний метод. У роботах [17 – 21] для дослідження властивостей і параметрів напівпровідникових приладів, які є нелінійними радіотехнічними елементами, був застосований функціональний метод.

На основі аналізу випливає, що завдання аналізу всіх видів нелінійних радіоелектронних систем в загальному вигляді не має поки рішення, так як немає можливості виділити просту загальну властивість таких об'єктів, на основі якої можна було б розробити загальний метод аналізу радіотехнічних елементів [10 – 21]. У зв'язку з цим неможливо також виділити «кращий» метод аналізу, а можна лише судити про ту чи іншу ступінь придатності методу в кожній конкретній ситуації.

Основна частина

Аналіз показав, що в літературі [9 – 21] відсутній повний і систематичний опис методики застосування функціонального методу з дослідження складних нелінійних радіоелектронних систем.

У зв'язку з цим, метою цієї статті є розробка та опис основних етапів методики дослідження нелінійних радіоелектронних елементів і вузлів приймально-передавального тракту рефлектометра за допомогою функціонального методу.

Тому вважаємо за доцільне поширити поняття «нелінійного вхідного сигналу» на нелінійні елементи рефлектометра, порушені сигналами загального вигляду.

Розглянемо спочатку одновимірні нелінійні системи, описувані диференціальними рівняннями виду [10]

$$\sum_{j=0}^{\infty} a_j \frac{d^j y}{dt^j} + \sum_{k=2}^{\infty} c_k (x + y)^k = \sum_{n=1}^{\infty} b_n x^n. \quad (1)$$

Розкладемо y в одновимірний ряд Вольтера $y = \sum_{i=1}^{\infty} y_i$ та підставимо в вираз (1):

$$\sum_{j=0}^{\infty} a_j \frac{d^j}{dt^j} \left(\sum_{i=1}^{\infty} y_i \right) + \sum_{k=2}^{\infty} c_k \left(x + \sum_{i=1}^{\infty} y_i \right)^k = \sum_{n=1}^{\infty} b_n x^n. \quad (2)$$

Прирівнюючи в рівнянні (2) члени, що містять x в однаковому ступені, можна отримати вирази для «нелінійних вхідних сигналів» другого і третього порядків відповідно:

$$x_2 = b_2 x^2 - c_2 (x + y_1)^2;$$

$$x_3 = b_3 x^3 - c_3 (x + y_1)^3 - 2c_2 y_2 (x + y_1). \quad (3)$$

Звідси випливає, що нелінійні елементи і вузли імпульсних рефлектометрів по виду сигналу на їх вході можуть бути розділені на два класи. На вхід нелінійних елементів I класу впливає сигнал Z_y , в загальному випадку відмінний від y (для розглянутого випадку $Z_y = x + y$).

Тоді для нелінійних елементів I класу вираз для «нелінійних вхідних сигналів» може бути записано у вигляді:

$$x_n^I = \sum_{m=2}^n C_m Z_{y_{m,n}} \quad (4)$$

– коефіцієнт m -го порядку розкладання характеристики нелінійного елемента I класу в ряд Вольтера (Тейлора) [13];

$$Z_{y_{m,n}} = \sum_{i=1}^{n-m+1} Z_{y_i} \cdot Z_{y_{n-i,m-1}}, \quad (5)$$

Причому

$$\begin{aligned} Z_{y_{m,m}} &= Z_{y_1}^m; \\ Z_{y_{m,m-1}} &= (m-1) Z_{y_1}^{m-2} \cdot Z_{y_2}; \\ Z_{y_{m,1}} &= Z_{y_m}; \\ Z_y &= \sum_{i=1}^{\infty} Z_{y_i}. \end{aligned}$$

На вхід нелінійних елементів II класу надходить сигнал Z_x (в даному випадку $Z_x = x$) і «нелінійні вхідні сигнали» для таких нелінійних елементів можуть бути записані, як [13]

$$x_n^{II} = b_n \cdot Z_x^n, \quad (6)$$

де b_n – коефіцієнт n -го порядку розкладання характеристики нелінійного елемента II класу в ряд Вольтера (Тейлора).

Сигнал на вході нелінійних елементів I класу Z_y в загальному випадку має вигляд [13]:

$$Z_y = A[B(x) + C(y)], \quad (7)$$

де $A[\cdot]$ та $C[\cdot]$ – довільні лінійні перетворення; $B[x]$ – лінійне або нелінійне перетворення від x .

Сигнал Z_x в загальному випадку являє собою довільне лінійне перетворення $D(x)$, тобто:

$$Z_x = D(x). \quad (8)$$

Доказ справедливості виразів (4) і (6) в загальному випадку проводиться за аналогією з розглянутим вище при $Z_y = x + y$; $Z_x = x$. У разі, якщо на вхід нелінійного елемента надходить сигнал

$$Z_y = E(y),$$

де $E[\cdot]$ – нелінійне перетворення, можна також використовувати вираз (4), враховуючи при цьому, що Z_{y_i} розраховується за формулами для каскадного з'єднання нелінійних елементів. Використовуючи формули (4) і (6), отримуємо рекурентні формули «нелінійних входних сигналів» для широкого класу нелінійних багатовимірних систем. Для нелінійних елементів I класу маємо:

$$x_{n_1, \dots, n_k}^I = \sum_{m=2}^n C_m \cdot Z_{y_{n_1, \dots, n_k}; m_1, \dots, m_k}, \quad (9)$$

де $\sum_{i=1}^k n_i = n$; $\sum_{i=1}^k m_i = m$; $m_i \leq n_i$; $i = 1, 2, \dots, k$; $Z_{y_{n_1, \dots, n_k}; m_1, \dots, m_k}$ – визначається за формулою (6) з заміною y на Z_y .

Аналогічно для нелінійних елементів II класу в багатовимірному випадку можна отримати:

$$x_{n_1, \dots, n_k}^{II} = b_n \cdot F \cdot \prod_1^n Z_{x_{i_1, \dots, i_k}}, \quad (10)$$

де $\sum_{j=1}^k n_j = n$; $\sum_{j=1}^k i_j = 1$.

Розглянемо методику визначення ядер Вольтера за допомогою отриманих вище загальних рекурентних виразів (9), (10). При цьому будемо виходити з припущення, що досліджуване нелінійне коло описується системою неоднорідних рівнянь стану, кожне з яких представляє собою багатовимірний варіант з урахуванням доповнень (7), (8). Ця система може бути записана у вигляді [14]:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \cdot y_1 + \dots + a_{n1} \cdot y_n &= k_{11} \cdot f_1 + \dots + k_{n1} \cdot f_n \\ a_{1n} \cdot y_1 + \dots + a_{nn} \cdot y_n &= k_{1n} \cdot f_1 + \dots + k_{nn} \cdot f_n \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

де a_{ij}, k_{ij} [$i, j = 1, 2, \dots, n$] – в загальному випадку довільні нелінійні аналітичні оператори.

Для зручності перейдемо до матричної форми запису:

$$[A] \cdot [y] = [K] \cdot [f], \quad (12)$$

де $[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{n1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{1n} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{nn} \end{bmatrix}$ – матриця коефіцієнтів системи рівнянь (11);

$[y] = \begin{bmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix}$ – матриця стовбця змінних стану системи;

$[K] \cdot [f] = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & k_{n1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ k_{1n} & \cdot & \cdot & \cdot & k_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}$ – матриця зовнішніх (вхідних) впливів.

На відміну від методу нелінійних струмів [14] в даному випадку необхідно здійснювати лінеаризацію не тільки матриць коефіцієнтів $[A]$, але і матриці $[K]$, що впливає з введеного вище визначення нелінійних елементів II класу. Отже, ядро Вольтера першого порядку може бути визначено з наступного рівняння [14]:

$$[A^*][H_1] = [K^*][I]. \quad (13)$$

Відповідно, ядра Вольтера n -го порядку визначаються з рівнянь виду

$$[A^*][H_m] = [F_n], \quad (14)$$

де H_m – матриця ядер Вольтера m -го порядку; F_n – n -а матриця коефіцієнтів в розкладанні $f(x)$ в ряд Вольтера (Тейлора); * – асоційована лінійна частина матриць [18], тобто лінійні елементи вихідної матриці стоять на своїх місцях, а на місці нелінійних елементів стоять тільки лінійні складові з розкладання їх в ряд Вольтера (Тейлора).

Нелінійні вхідні сигнали записуються в рядках матриці $[F_n]$ з такими ж номерами, як і рядки матриці $[A]$, де стоять нелінійні елементи, що створюють ці сигнали [14]. Матриця нелінійних вхідних сигналів $[x_n]$ в загальному випадку:

$$[x_n] = [x_n^{II}] - [x_n^I], \quad (15)$$

де $[x_n^I]$ – матриця нелінійних сигналів, утворених нелінійними елементами I класу, причому елементи цієї матриці визначаються за формулою (9); $[x_n^{II}]$ – матриця нелінійних вхідних сигналів, утворених нелінійними елементами II класу, і елементи цієї матриці визначаються за формулою (10).

Як і при використанні методу нелінійних струмів ядра Вольтера визначаються шляхом перетворення матриці $[A^*]$ [14, 18]. Таким чином, матриця ядер Вольтера першого порядку

$$[H_n] = [A^*]^{-1} \cdot [F_n]. \quad (16)$$

Відповідно, матриця ядер Вольтера n -го порядку ($n = 2, 3$) визначається як

$$[H_n] = [A^*]^{-1} [F_n].$$

Відзначимо, що ядра Вольтера визначені в багатовимірній області комплексних змінних [14], причому як матриця $[A^*]$, так і матриця $[A^*]^{-1}$ є функцією суми m комплексних змінних s_1, \dots, s_m . ($m = 1, 2, \dots$) – при визначенні матриці Вольтера m -го порядку, тобто [14].

$$[A^*]^{-1} \equiv [B] \equiv [B(s_1 + \dots + s_m)]. \quad (17)$$

Каскадне з'єднання нелінійних систем з лінійною взаємодією між каскадами може бути зведене до каскадного з'єднання без взаємодії шляхом включення між нелінійними системами деякого лінійного пристрою, вплив передавальної функції якого еквівалентний впливу лінійній взаємодії між нелінійними каскадами. Дослідження каскадного з'єднання з нелінійною взаємодією між каскадами досить складне і призводить до неточних результатів. Тому, розбиття системи на каскади необхідно проводити в таких точках системи, щоб між каскадами не було взаємодії або щоб взаємодія між каскадами була лінійною.

Вираз для ядер Вольтера каскадного з'єднання двох нелінійних пристроїв з лінійною взаємодією між каскадами має вигляд:

$$C_n(s_1, \dots, s_n) = \sum_{\vec{k}} A_{k_1}(s_1, \dots, s_{k_1}) \dots A_{k_m}(s_{n-k_m+1}, \dots, s_n) \cdot T\left(\sum_{i=1}^{k_1} s_i\right) \times \\ \times T\left(\sum_{j=n-k_m+1}^{k_1} s_j\right) \cdot B_j\left(\sum_{i=1}^{k_1} s_i, \dots, \sum_{j=n-k_m+1}^n s_j\right). \quad (18)$$

де C_n – n -а нелінійна передавальна функція ядер Вольтера каскадного з'єднання двох каскадів ($n = 1, 2, \dots$); A_k – ядра Вольтера першого каскаду ($k = 1, 2, \dots, n$); B_j – ядра Вольтера другого каскаду ($i = 1, 2, \dots, n$); T – оператор, що характеризує лінійну взаємодію між каскадами.

Підсумовування ведеться по всіх наборах $\vec{k} = (k_1, \dots, k_m)$ при $\sum_{i=1}^m k_i = n$, $m = 1, 2, \dots, n$.

Ядра Вольтера каскадного з'єднання нелінійних пристроїв без взаємодії між каскадами легко отримати з виразу (18), покладаючи $T(\cdot) = 1$. Отримані результати можливо застосовувати не тільки при аналізі схем складних радіоелектронних елементів [6, 7], але і в біомедичній інженерії при розробці нових електронних засобів медичного призначення [17 – 21].

Таким чином, в результаті проведених досліджень отримана можливість визначення ядер Вольтера широкого класу нелінійних багатовимірних систем за допомогою нелінійних вхідних сигналів, що суттєво розширює область практичного застосування функціонального методу дослідження нелінійних радіоелектронних кіл, в тому числі таких, як імпульсні рефлектометричні системи для вимірювання ДП біологічних систем.

При цьому зберігається така важлива якість методу нелінійних струмів, як зручність складання на його основі програм аналізу та синтезу нелінійних пристроїв і систем на ЕОМ. Крім того, метод нелінійних вхідних сигналів дозволяє досліджувати каскадне з'єднання нелінійних систем, як без взаємодії між каскадами, так і з лінійною взаємодією між каскадами.

Отримані результати відрізняються від існуючих тим, що вони дозволяють досліджувати складні нелінійні радіоелектронні елементи і системи за допомогою функціонального методу в широкому частотному діапазоні ($0 - 10^{13}$ Гц).

Висновки

1. Для дослідження широкого класу нелінійних багатовимірних радіоелектронних систем слід застосовувати функціональний метод за допомогою нелінійних вхідних сигналів.
2. Для розробки програм аналізу та синтезу каскадних радіоелектронних пристроїв на ЕОМ слід використовувати метод нелінійних струмів.

Список літератури:

1. Исмаилов Э. Ш. Биофизическое действие. СВЧ-излучения. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 144 с.
2. Бессонов А. Е. Информационная медицина / А.Е. Бессонов, Е. А. Калмыкова. 2-е изд. доп. Москва : Науч. центр информ. медицины «ЛИДО», 2003. 656 с.
3. Бинги В. Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. Москва : МИЛИТА, 2002. 592 с.
4. Комплексная экологическая безопасная система защиты здоровья животных. Москва : ФГНУ «Росинформатех», 2000. 300 с.
5. Потапов А. А. Современные методы и средства измерения параметров диэлектриков: Обзорная информация / Потапов А.А., Гудков О.И. Москва : ВНИИКИ, 1974. 68 с.
6. Абубакиров Б. А. Измерение параметров радиотехнических цепей / Абубакиров Б. А. Москва : Сов. радио, 1984. 245 с.
7. Радиоизмерительные приборы. Москва : НИИ ЭКОС, 1992. 159 с.
8. Бедроян, Райс. Свойства выходного сигнала систем, описываемых рядами Вольтера // ТИИЭР. 1971. Т. 59, № 12. С. 58 – 81.
9. Черенков А. Д. Метод импульсной рефлектометрии для исследования электрофизических параметров биообъектов / А. Д. Черенков, Н. Г. Косулина / Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. госп. ім. Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. 2015. Вип. 164. С. 158 – 160.
10. Пупков К. А. Анализ и расчет нелинейных систем с помощью функциональных степенных рядов / Пупков, К. А. Шмыкова Н. А. Москва : Машиностроение, 1982. 150 с.
11. Блякьер О. Анализ нелинейных систем. Москва : Мир. 1969. 400 с.
12. Lysak V. V. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / V. V. Lysak, H. Kawaguchi, I. A. Sukhoivanov, T. Katayama, A. V. Shulika и др. Москва : Энергия, 1976. 440. С. 5.
13. Пупков К. А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. Москва : Наука, 1976. 448 с.
14. Портер. Обзор теории полиномиальных систем // ТИИЭР. 1976. Т.64. С. 59 – 92.
15. Ultrafast gain dynamics in asymmetrical multiple quantum-well semiconductor optical amplifiers (2005) // IEEE Journal of Quantum Electronics, 41 (6), p. 797 – 807; DOI: 10.1109/JQE.2005.8466944.
16. Volovichev I. N., Gurevich Yu. G. Generation – Recombination processes in semiconductors (2001) Semiconductors, 35 (3), pp. 306-315; DOI: 10.1134/1.1356153.
17. Nosova Y. V. Radio technology in biomedical investigation / Y. Nosova, K. I. Faruk, O. G Avrunin // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol 77 (15). P. 1389 – 1395; DOI: 10.1615/Telecom Rad Eng. v 77. I 15.90.
18. Graham J. Nonlinear System Modeling and Analysis with Applications to Communications Receivers / Graham J. W., Ehrman L. Rome Air Develop. Cen., Rome, N.Y., Fech. Rep., RADC-TR-73-178, June 1973, ASTIA Doc. FD 766 278.
19. Avrunin O. G. The surgical navigation system with optical position determination technology and sources of errors / O. G. Avrunin, M. Alkhorayef, H. F. I. Saied, M. Y. Tymkovych // Journal of Medical Imaging and Health Informatics. 2015. Vol. 5. P. 689 – 696.
20. Avrunin O. G. Analysis of Changes of the Hydraulic Diameter and Determination of the Air Flow Modes in the Nasal Cavity / K. Al Omari, H. F. Ismail Saied, O. G. Avrunin // Image Processing & Communications, challenges3, AISC 102. Springer. Verlag Berlin Heidelberg. 2011. P. 303 – 310.
21. Farouk H., Khaleel A., Avrunin O. An attempt of the Determination of. Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways. Advances in Intelligent and Soft. Computing: Image Processing and Communications. Challenges 3, Springer, 2011, 102, 311 – 322.

¹Харківський національний
університет радіоелектроніки

²Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка

Надійшла до редколегії 27.03.2020