

## МОДЕЛЬ НЕОДНОРІДНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ БІОСЕРЕДОВИЩА

Герус А. М., студентка; Нелін Є. А., д.т.н., професор  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Швидкий прогрес у радіоелектроніці, інформаційно-комп'ютерній техніці, мобільному зв'язку зумовлений, зокрема, використанням електромагнітних хвиль (ЕМХ). У медицині, крім діагностики та лікування з використанням ЕМХ, набувають розвитку радіосистеми забезпечення безперервного моніторингу фізіологічних даних та терапії на основі імплантованих сенсорів та актуаторів [1]. Віддалений контроль фізіологічного стану органів людини може бути забезпечений надширококутовим радаром [2]. Розвиток застосувань ЕМХ потребує вивчення особливостей їхнього поширення в організмі людини та контролю безпеки впливу ЕМХ на людину.

Організм людини є багатошаровим біологічним середовищем. Задача поширення хвиль у багатошаровому середовищі формулюється як крайова з граничними умовами. Традиційне вирішення такої задачі виконується за моделлю багатопрореєвої інтерференції з урахуванням усіх відбитих хвиль та хвиль, що пройшли [3, 4]. Ця модель громізка, потребує значного обсягу математичних перетворень.

Підхід на основі хвильового імпедансу середовища (зокрема квантово-механічного [5]) дозволяє скористатися апаратом теорії неоднорідних ліній передачі (НЛП). Така модель суттєво спрощує моделювання, оскільки граничні умови враховано автоматично, та дозволяє скористатися аналогіями з теорії НЛП.

Розглянемо застосування моделі НЛП для біосередовища та зіставимо отримані результати з результатами [4].

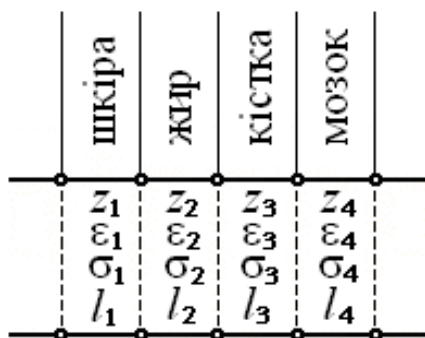


Рисунок 1. Модель голови людини та НЛП, що їй відповідає;  $z$ ,  $\epsilon$ ,  $\sigma$  та  $l$  — хвильовий імпеданс, відносна діелектрична проникність, питома провідність та товщина шару.

Хвильовий імпеданс та постійна поширення ЕМХ дорівнюють [3]

Особливість біотканини як середовища поширення ЕМХ полягає в наявності втрат, у значному діапазоні значень електромагнітних параметрів залежно від типу тканини, а також у частотній залежності цих значень.

На рис. 1 наведено багатошарову модель голови людини [4], а в табл. 1 — значення параметрів шарів згідно з [4]. Діапазон частот становить 8...12 ГГц. Рис. 1 ілюструє НЛП, що відповідає цій моделі.

$$z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon - i\sigma/\omega}}, \quad \gamma = \sqrt{i\omega\mu_0(\sigma + i\omega\epsilon_0\epsilon)}, \quad (1)$$

де  $\epsilon_0, \mu_0$  — електрична та магнітна постійні;  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — частота.

Аналіз НЛП зводиться до послідовного розрахунку вхідного імпедансу на межах шарів, починаючи справа. Вхідний імпеданс на межі між поточним та попереднім шарами визначається формулою

$$Z_i = z_i \frac{Z_{i-1} + z_i \operatorname{th}(\gamma_i l_i)}{z_i + Z_{i-1} \operatorname{th}(\gamma_i l_i)}, \quad (2)$$

де  $Z_{i-1}$  — вхідний імпеданс на попередній межі.

Коефіцієнт відбиття від НЛП (за модулем) дорівнює

$$R = \left| \frac{Z - z_0}{Z + z_0} \right|, \quad (3)$$

де  $Z$  — вхідний імпеданс НЛП;  $z_0$  — хвильовий імпеданс середовища на вході НЛП,  $z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ .

На рис. 2 наведено частотні залежності коефіцієнта відбиття, що відповідають моделі НЛП згідно з (1–3). Для аналізу впливу втрат приведено залежність коефіцієнта відбиття модельної НЛП без втрат зі значеннями  $\sigma_{1-4} = 0$ .

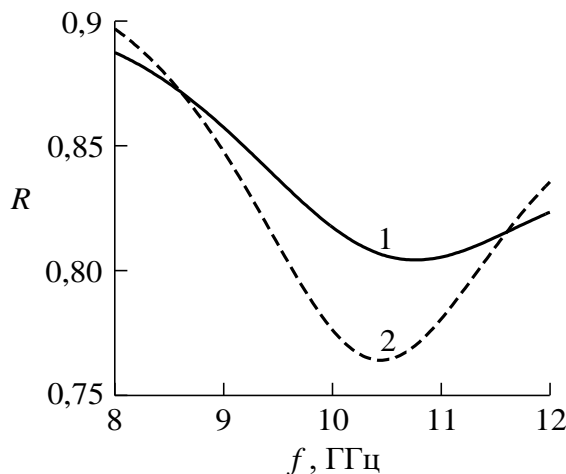


Рисунок 2. Частотні залежності коефіцієнта відбиття з урахуванням (1) та без урахування (2) втрат.

в [4] на частоті 10 ГГц значення  $R = 0,89$ , а згідно з залежністю 1  $R = 0,82$ , що на 8% менше.

Як бачимо з залежності 2, втрати не мають суттєвого впливу на коефіцієнт відбиття. Так, на частоті 10 ГГц без урахування втрат значення

На жаль, повною мірою неможливо зіставити залежність 1 з залежністю, розрахованою за моделлю багатопроменевої інтерференції [4], оскільки в [4] відсутні параметри вихідного середовища. Нами прийнято, що ці параметри такі ж, як і параметри шару, що відповідає мозку. Монотонно спадаючий характер залежності 1 з деяким підйомом на верхніх частотах збігається з характером залежності, наведеної в [4]; числові значення дещо менші. Так,

$R = 0,78$ , що лише на 5% менше ніж згідно з залежністю 1.

Залежність 1 свідчить про відсутність вузькосмугових особливостей поширення ЕМХ крізь багатошарову біоструктуру, що моделюється, у розглянутому діапазоні частот. Як відомо, в електромагнітних та квантово-механічних багатошарових структурах спостерігаються значні резонансні ефекти. Безсумнівний інтерес становить аналіз можливості таких ефектів в біологічних багатошарових структурах.

Модель НЛП є зручною та наочною моделлю для аналізу особливостей поширення ЕМХ у біосередовищі. Ця модель одновимірна. Результати, отримані за моделлю НЛП, можуть слугувати вихідними для тривимірного моделювання поширення ЕМХ у біосередовищі, наприклад за допомогою програмного пакета тривимірного електромагнітного моделювання CST Microwave Studio.

#### **Перелік посилань**

1. Zhao J. F. A Review on Human Body Communication: Signal Propagation Model, Communication Performance, and Experimental Issues / J. F. Zhao, X. M. Chen, B. D. Liang, Q. X. Chen // Hindawi, Wireless Communications and Mobile Computing. — 2017. — Vol. 15.
2. Werfelli H. UWB pulse propagation into layered model of human body / H. Werfelli, K. Tayari, M. Chaou et al. // Journal of Telecommunication Electronic and Computer Engineering. — 2017. — Vol. 9, No 3. — P. 93–99.
3. Gasmelseed A. New development environment for modern bioelectromagnetics signal processing applications / A. Gasmelseed // IEEE Microwave Magazine. — 2013. — Vol. 14, No 5. — P. 134–152.
4. Faktorova D. Modelling of scattering parameters in biological tissues / D. Faktorova, K. Istenikova // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review) –2011–Vol.87, No5–P. 34–36.
5. Нелин Е. А. Импедансная модель для «барьерных» задач квантовой механики / Е. А. Нелин // Успехи физических наук. — 2007. — Т.177, №3. — С. 307–313.

#### **Анотація**

Розглянуто моделювання поширення електромагнітних хвиль у багатошаровому біосередовищі за моделлю неоднорідної лінії передачі. Наведено частотну характеристику коефіцієнта відбиття. Виконано порівняння отриманої залежності з характеристикою за моделлю багатопроменевої інтерференції та з залежністю без урахування втрат.

**Ключові слова:** біосередовище, хвильовий імпеданс, неоднорідна лінія передачі.

#### **Аннотация**

Рассмотрено моделирование распространения электромагнитных волн в многослойной биосреде на основе модели неоднородной линии передачи. Приведена частотная характеристика коэффициента отражения. Выполнено сравнение полученной зависимости с характеристикой согласно модели многолучевой интерференции и с зависимостью без учета потерь.

**Ключевые слова:** биосреда, волновой импеданс, неоднородная линия передачи.

#### **Abstract**

Simulation of electromagnetic waves propagation in multilayer biomedium based on nonuniform transmission line model is considered. Reflection coefficient frequency characteristic is given. A comparison of obtained dependence with characteristic according to multipath interference model and with dependence without losses taking into account is made.

**Keywords:** biomedium, wave impedance, nonuniform transmission line.