

В.П. Манойлов, д.т.н., проф.
Житомирський державний технологічний університет

РОЗСІЮЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ БІООБ'ЄКТІВ ПРИ ДІЇ НЕГАРМОНІЙНИХ СИГНАЛІВ

Досліджено можливість неконтактного визначення діелектричних характеристик приповерхневих шарів біологічних середовищ. Показано, що для такої задачі можна використовувати метод, заснований на вимірюванні імпеданства антен. Представлено результати чисельного моделювання і експериментів.

Вступ. Постановка проблеми. Для визначення стану біооб'єктів (БО) широко використовується явище інтерференції, що виникає при складанні падаючої і відображеної від БО електромагнітних хвиль [1, 2]. В результаті аналізу тимчасової залежності інтерференційного сигналу або його спектра, можна визначити стан різних органів людини.

Аналіз електричних характеристик людини показав [3–5], що шкіра і м'язова тканина володіють велими схожими характеристиками і мають порівняно великі величини діелектричних проникностей ϵ і провідностей σ , а жирова тканина на відміну від них володіє малими значеннями ϵ та σ . Це означає, що електромагнітна хвиля відчуває велике віддзеркалення при опромінюванні БО не тільки на межі повітря–шкіра, але і на межах жир–м'язова тканина і жир–шкіра. На підставі проведених досліджень характеристик тканин людини [6], встановлено, що в діапазоні частот до 1000 МГц тіло людини можна описати одношаровою моделлю з параметрами шкіри.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз характеристик шкірної тканини показав, що в цьому діапазоні тіло людини можна вважати провідним, а заломлена хвиля в шкірі є плоскою. Таким чином, приблизно людина може бути представлена металевим вібратором [7].

Модель взаємодії випромінювача генератора з людиною (у вигляді вібратора) є системою, що складається з активного випромінювача і пасивного вібратора (людина).

Оскільки людина є об'єктом з нелінійними характеристиками, то тут ефекти розсіювання характеризуються тим, що розсіяне поле містить спектральні компоненти, відсутні в падаючому полі.

При монохроматичній дії спектр розсіяного поля містить частоти, кратні початковій частоті з переважанням тих або інших компонент залежно від типу нелінійності. Спектральна зміна розсіяного поля може служити джерелом для діагностики органів людини.

Метою даної роботи є вивчення можливості дослідження комплексної діелектричної проникності в приповерхневих шарах організму на підставі методу вимірювання опору антени [8, 9]. Метод полягає в реєстрації відмінностей дійсної та уявної частин опорів на основній і комбінаційній частотах лінійної антени, розташованої у вільному просторі і у присутності досліджуваного середовища. Ці відмінності несуть інформацію про діелектричну проникність середовища.

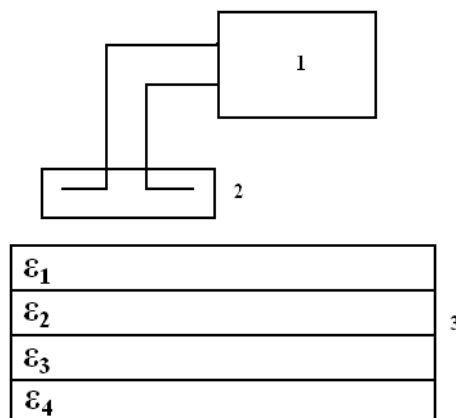


Рис. 1. Схема для вимірювання входного опору антени:
1 – вимірник КСВН, 2 – антена, 3 – шарувате середовище

Викладання основного матеріалу. Розглянемо метод, вважаючи, що існує система з двох вібраторів, розташованих у вільному просторі, причому є передаюча антена 1, завдовжки $2l$ (напівхвильовий вібратор) і друга антена, що є шаруватим діелектричним середовищем (рис. 1).

Вимагається визначити зміну вхідного опору першої антени залежно від її висоти над шаруватим середовищем і параметрів середовища.

Вхідний опір першої антени у разі, коли друга антена є пасивною (шарувате середовище) визначається виразом [10]:

$$Z_1 = Z_{11} + \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}}, \quad (1)$$

де Z_{12} – взаємний опір вібраторів; Z_{11} , Z_{22} – власні опори активного і пасивного вібраторів відповідно.

Для розрахунку опору Z_{12} використовуємо співвідношення, наведені в роботах [9, 10] в такому вигляді:

$$Z_{12} = R_{12} + iX_{12}, \quad (2)$$

де R_{12} , X_{12} – активна і реактивна частини взаємного опору Z_{12} :

$$R_{12} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{R_{11}R_{22}D_1D_2} \cdot \operatorname{Re} \left\{ \int_{4\pi} \Phi_1 \mathbf{e}_0 \cdot \Phi_2 \mathbf{e}_0 d\Omega \right\}; \quad (3)$$

$$X_{12} = \frac{1}{kd} \sqrt{R_{11}R_{22}D_1D_2} \cdot \operatorname{Re} \left\{ \int_{4\pi} \Phi_1 \mathbf{e}_0 \cdot \Phi_2 \mathbf{e}_0 d\Omega \right\}, \quad (4)$$

де R_{11} , R_{22} – активні частини вхідного опору першої і другої антени, D_1D_2 – КНД у напрямі максимуму їх випромінювання, $\Phi_1 \mathbf{e}_0$, $\Phi_2 \mathbf{e}_0$ – нормовані комплексні ДН вібраторів.

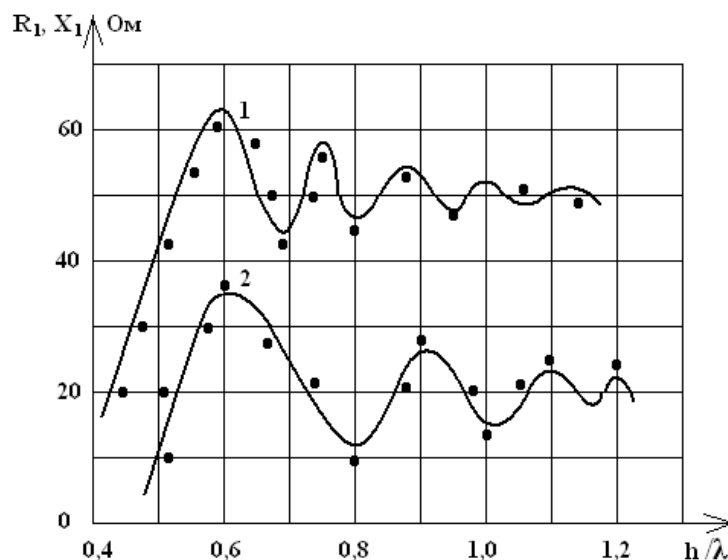
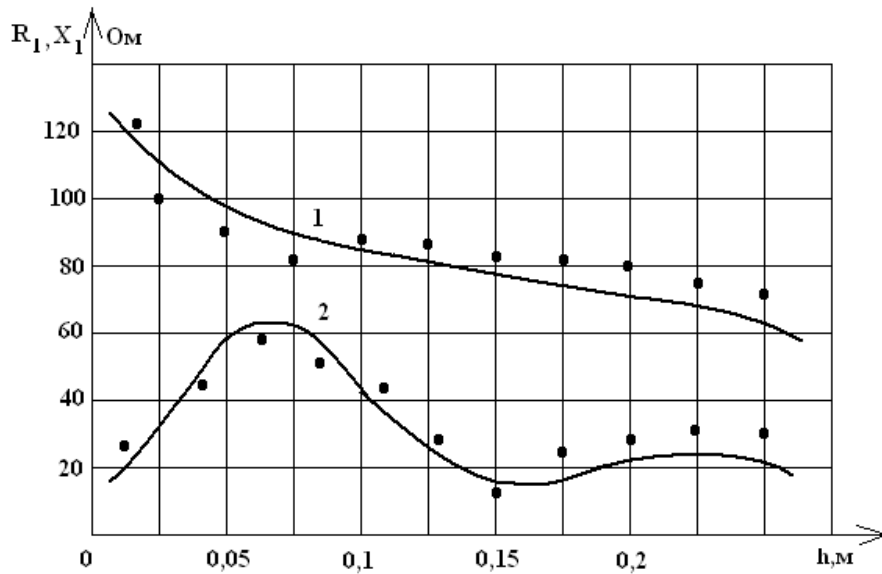


Рис. 2. Залежність опорів R_1 , X_1 від співвідношення h/λ

За допомогою запропонованої моделі можна досліджувати зміни вхідного опору активного вібратора Z_1 залежно від розташування пасивного вібратора, їх розмірів і довжини хвилі. На рисунку 2 представлена залежність вхідного опору Z_1 від відстані до пасивного вібратора. З нього видно, що зміни активного і реактивного опорів R_1 , X_1 носять квазіперіодичний характер, причому їх величина залежить від співвідношення довжини хвилі випромінюваного поля і висоти пасивного вібратора. Зміни як активної, так і реактивної складових вхідного опору випромінювача має максимальні значення при співвідношенні x/λ (x – відстань між вібраторами, λ – довжина хвилі), рівному приблизно 0,6. В даному випадку досліджувався вплив діелектричного тіла циліндрової форми з відносною діелектричною проникністю ϵ , рівною 81, радіусом $r = 0,15\lambda$ і висотою $l_2 = 0,4\lambda$ на вхідний опір випромінювача завдовжки $\lambda/2$. Для перевірки результатів, отриманих при теоретичних дослідженнях, були проведені експериментальні дослідження з використанням панорамного вимірника КСВН. Результати представлені на рисунку 2, де безперервною лінією показані модельні криві R_1 , X_1 , а точками відзначені експериментальні дані.

Рис. 3. Залежність опорів X_1 від висоти h

На рисунку 3 представлена залежність вхідного опору випромінювача Z_1 від висоти розташування антен над шаруватим середовищем (чотири шари), діелектрична проникність якого знижується із зростанням глибини при частоті 1000 МГц. Характерні параметри приповерхневих шарів тіла людини наведені в таблиці 1 [4].

Таблиця 1

Номер шару	Шар i	Товщина, м	ϵ_i
1	Роговий шар	$5 \cdot 10^{-3}$	$53 + j 57,2$
2	Волога дерма	$3 \cdot 10^{-3}$	$52 + j 36,9$
3	Жировий шар	10^{-2}	$49 + j 21$
4	М'язовий шар	10^{-2}	$49 + j 21$

Безперервною лінією показані модельні криві $\langle R_1, X_1 \rangle$, а точками відзначені експериментальні дані. Як видно з рисунка 3 залежність вхідного опору $\langle R_1, X_1 \rangle$ мають квазіперіодичний вигляд. Величина розмаху варіацій залежить від висоти антен над діелектричним шаром, причому R_1 змінюється полого, а X_1 має резонансний характер.

Даний метод може бути використаний для оцінки психічного стану людини, оскільки, як показують проведені дослідження, діелектрична проникність рогового шару шкіри впливає на варіації вхідного опору випромінювача. Річ у тому, що психічний стан організму людини відображається на вогкості цього шару, що зв'язано з ϵ шару.

Результати моделювання вхідного опору Z_1 від h_1 у разі організму, що знаходиться в спокійному стані представлені на рисунку 4, при цьому діелектрична проникність рогового шару шкіри дорівнювала $\epsilon_1 = 53 + j57,4$ [6]. Значення h_1 варіювалося від 0,01 до 0,25 м з кроком 0,01 м.

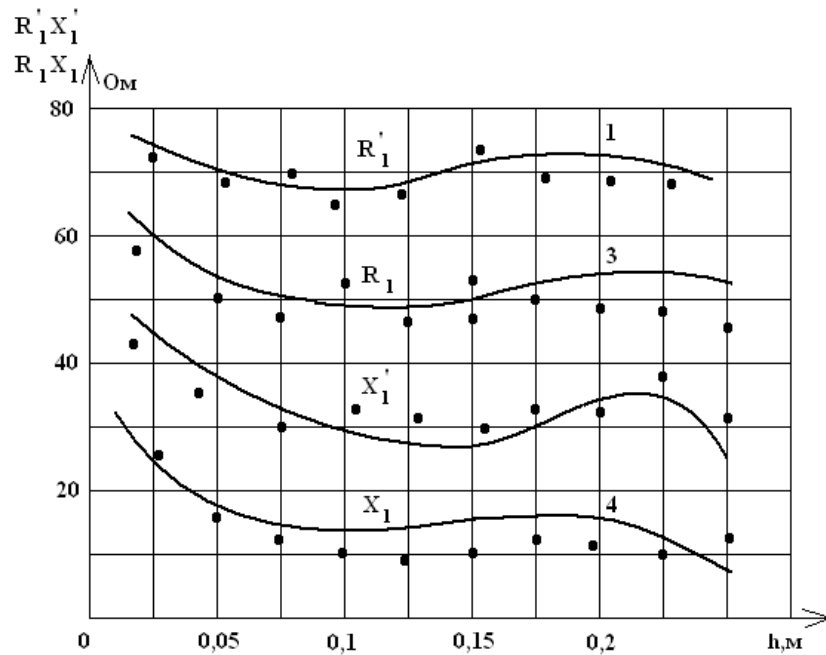


Рис. 4. Залежність опорів R_1 , R_1' , X_1 , X_1' від висоти h

Як видно з рисунка 4, наведена залежність вхідного опору Z_1 має осцилюючий характер.

На тому ж рисунку представлені результати моделювання залежності Z_1 від h_1 у разі організму, що знаходиться в збудженому стані (ϵ_1, X_1') (підвищене значення діелектричної проникності рогового шару $\epsilon_1 = 81 + i57,2$, що обумовлено його зволоженням). З порівняння кривих видно, що спостерігається явна зміна вхідних опорів випромінювача Z_1 і Z_1' .

Як видно з наведених графіків результати експерименту добре співпадають з модельними розрахунками. Отримані результати можуть бути застосовані для вибору оптимальних умов проведення досліджень стану організму людини.

Розглянемо можливість застосування запропонованої моделі для дослідження нелінійних ефектів організму людини.

Більшість опублікованих робіт, присвячених вивченню розсіюючих властивостей антен, пов'язана з визначенням ЕПР при дії гармонійного сигналу, визначення якого базується на зіставленні інтенсивностей падаючого і розсіяного полів:

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{P_2}{P_1} = 4\pi r^2 \frac{|\bar{E}_2|^2}{|E_1|^2}, \quad (5)$$

де P_1, \bar{E}_1 – відповідно густина потоку середньої потужності і напруженість поля зондуючого сигналу в антени; P_2, \bar{E}_2 – напруженість поля розсіяного антеною сигналу; r – відстань від приймача до антени.

Для розрахунку ЕПР антени 1 необхідно розрахувати і врахувати вплив другої антени, при цьому необхідно використовувати рішення інтегрального рівняння Халлена для струмів методом моментів з подальшим визначенням розсіяного поля. На рисунку 5 наведені графіки однопозиційної ЕПР σ_s/λ^2 2-х $(\lambda/2)$ вібраторів залежно від відстані h/λ у вільному просторі при нормальному падінні хвилі. Криві ЕПР мають коливальний характер, коливання згасають у міру збільшення h/λ , що пояснюється зменшенням взаємного зв'язку між антенами.

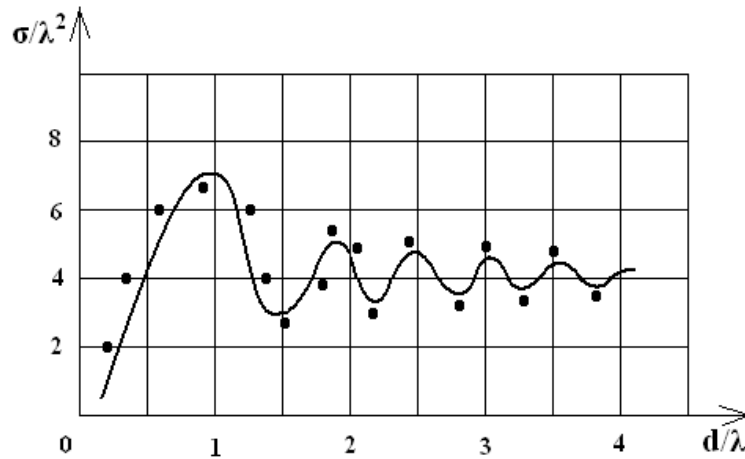


Рис. 5. Залежність ЕПР двох вібраторів у вільному просторі від відношення відстані між ними d/λ (безперервна крива – модельна задача, точки – експеримент)

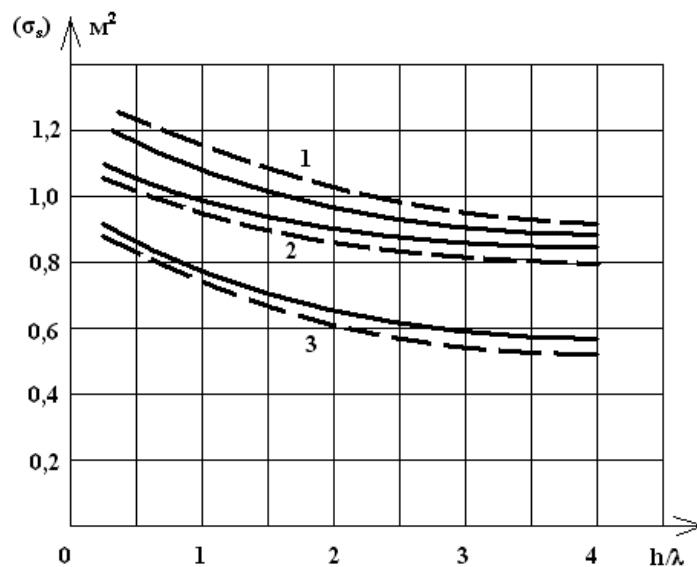


Рис. 6. Модуль ЕПР антени над шаруватим середовищем (одно-, дво-, тришарова моделі)

На рисунку 6 представлені графіки модуля ЕПР $\langle \sigma_s \rangle$ вібратора, що знаходиться над модельним шаруватим середовищем залежно від відношення h/λ , причому наведені криві для антени трьох випадків: 1 – один діелектричний шар; 2 – два діелектричні шари; 3 – три діелектричні шари. Діелектричні проникності шарів узяті з таблиці 1. Суцільною лінією позначені розрахункові дані, а пунктирною – експеримент.

Порівняння одно-, дво- і тришарової моделей показало, що модуль ЕПР відрізняється незначно. Величина отриманої ЕПР над шаруватим середовищем лежить у межах 0,55–1,2 м².

Для розрахунку ЕПР антени при дії негармонійного сигналу необхідно знайти вектори електромагнітного поля, розсіяного іншим вібратором, тобто розв'язати задачу з урахуванням заданих початкових і граничних умов. Така задача може бути вирішена як у часовій, так і в частотній області відомими методами. Для нашої задачі використовуватимемо частотний метод, згідно з яким спочатку необхідно знайти розв'язок граничної задачі в режимі сталих гармонійних коливань, а потім, використовуючи перетворення Фур'є, отримати рішення для негармонійної дії.

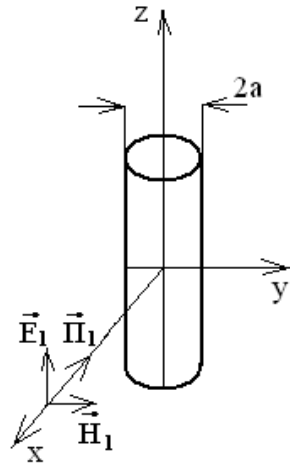


Рис. 7. Вібратор і падаюча на неї плоска хвиля

Нехай плоска лінійно поляризована хвиля падає на вібратор (рис. 7). Вважатимемо, що хвиля розповсюджується вздовж осі x прямокутної системи координат. Для розрахунку ЕПР вібратора використаний вираз, наведений в роботі [12] і має такий вигляд:

$$G_s = 4\pi r^2 \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |F_1(\omega)|^2 |E_{02}|^2 d\omega}{E_{01}^2 \int_{-\infty}^{\infty} |F_1(\omega)|^2 d\omega}, \quad (6)$$

де E_{01} і E_{02} – напруженості електричного поля падаючої і розсіяної електромагнітних хвиль; $F_1(\omega)$, F – спектральна густина прямокутного радіоімпульсу одиничної амплітуди.

Відношення дорівнює:

$$\frac{|E_{02}|^2}{E_{01}^2} = 4 \frac{\sigma(\omega)}{4\pi r^2}, \quad (7)$$

тут $\sigma(\omega)$ – ЕПР вібратора, визначена для режиму гармонійних коливань на частоті ω .

З обліком (7) із виразу (6) маємо:

$$G_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |F_1(\omega)|^2 G(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |F_1(\omega)|^2 d\omega}. \quad (8)$$

Даний вираз показує, що σ_s для негармонійного сигналу залежить від спектра цього сигналу і від розсіюючої здатності антени на різних частотах, що характеризується функцією $\sigma(\omega)$.

Нехай випромінюваний сигнал є прямокутним радіоімпульсом одиничної амплітуди:

$$S(\omega) = \cos(\omega_0 t + \psi_0), \quad 0 < t < \tau, \quad (9)$$

з несучою частотою $\omega_0 = 2\pi c/\lambda$ (де c – швидкість світла), початковою фазою $\psi_0 = -\pi/2$ і тривалістю τ .

В таблиці 2 наведені значення відношення σ_s/λ_0^2 напівхвильового вібратора, коли він опромінюється у напрямі нормалі до його осі $\theta = 90^\circ$ для трьох режимів роботи: коротке замикання (КЗ), зладжене навантаження (ЗН), холостий хід (ХХ).

Таблиця 2

Режим	$f_0 \tau$	σ_s / λ_0^2
КЗ	9	0,584
	3	0,431
	1	0,195
ЗН	9	0,194
	3	0,151
	1	0,082
ХХ	9	0,008
	3	0,0011
	1	0,022

З даних таблиці 2 видно, що зменшення ЕПР σ_s стає все більш значним у міру укорочення радіоімпульсу у всіх трьох режимах.

Висновок. Результати проведених досліджень показують можливість неконтактного визначення характеристик приповерхневих шарів біологічних середовищ. Показано, що для даної задачі можна використовувати метод, заснований на вимірюванні вхідного опору випромінюючої антени і представлений результатом чисельного моделювання застосовності методу для аналізу приповерхневих шарів організму.

Даний метод може бути використаний для оцінки психічного стану людини, шляхом вимірювання вхідного опору Z_1 , залежно від стану рогового шару шкіри.

Порівняння одно- і тришарової моделей середовища показало, що модуль коефіцієнта розсіювання відрізняється незначно і в частотній області до 1200 МГц можна обмежитися одношаровою моделлю.

Показана можливість застосування даного методу для визначення параметрів випромінювача у разі дії негармонійного сигналу.

Список використаної літератури:

1. *Седлецкий Р.М.* Применение подповерхностной радиолокации для обнаружения пораженных тканей молочной железы / *Р.М. Седлецкий* // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 9, № 8. – С. 1120–1128.
2. *Захарія Й.А.* Моделювання впливу діелектричного тіла на параметри випромінювача / *Й.А. Захарія, І.П. Прудіус, В.Г. Сторож* // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2001. – № 2. – С. 3–7.
3. *Онуфриев Н.В.* Электрофизические характеристики биологических объектов для точечного радиоволнового средства обнаружения / *Н.В. Онуфриев, М.А. Соколова, А.В. Скридлевский* // Радиотехника. – 2011. – № 2. – С. 88–91.
4. *Березовский В.А.* Биофизические характеристики тканей человека : справочник / *В.А. Березовский, Н.Н. Колотилов*. – К. : Наукова думка, 1990. – 223 с.
5. *Карвецкий В.Л.* Модель взаимодействия излучателя с посторонним объектом / *В.Л. Карвецкий, М.А. Соколова* // Радиотехника. – 2005. – № 3. – С. 75–76.
6. Вхідний імпеданс ультрависокочастотної лінійної антени, розположеної над трьохшаровою середою / *А.С. Шостак, Б.И. Авдоченко и др.* // Изв. вузов / Физика. – 2005. – С. 71–73.
7. *Волегов К.А.* Исследование возможности использования линейных дипольных антенн для дистанционного измерения комплексной диэлектрической проницаемости приповерхностных слоев организма / *К.А. Волегов, В.М. Сидоренко* // тезисы V Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». – СПб., 2009.
8. *Марков Г.Т.* Антенны / *Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов*. – М. : Энергия, 1975. – 352 с.
9. *Ерохин Г.А.* Особенности расчета взаимных импедансов произвольных антенн по их диаграммам направленности / *Г.А. Ерохин, В.Г. Кочержевский* // Антенны. – 1998. – Вып. 1. – С. 9–14.
10. *Ерохин Г.А.* Вторая антенная теорема в задачах рассеяния электромагнитных волн / *Г.А. Ерохин, В.Г. Кочержевский* // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 8. – С. 955–960.
11. *Бриккер А.М.* Рассеяние электромагнитных волн приемной антенной из нескольких связанных вибраторов / *А.М. Бриккер, Н.М. Зернов, Т.Е. Мартынова* // Радиотехника. – 1999. – № 3. – С. 18–21.
12. *Бриккер А.М.* Рассеивающие свойства антенн при действии негармонических сигналов / *А.М. Бриккер, Н.М. Зернов, Т.Е. Мартынова* // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45. – С. 559–563.

МАНОЙЛОВ В'ячеслав Пилипович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– прилади НВЧ та антени;

– біомедичні прилади та системи.

Тел.: (0412)41-39-63.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2012