

УДК 004:[616-008.9+612.014.42]

В.О. Ярута<sup>1</sup>, В.Д. Ліпанов<sup>2</sup>, В.О. Брусенцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківська державна академія культури, Харків

<sup>2</sup> Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## СТАТИСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ МЕТОДУ ДВОКРИТЕРІЙНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ЙОГО ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЖИВИХ ТКАНИН ЄМНІСНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

*Наведено результати числового експерименту, який дозволив визначити умови незміщеності та спроможності методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних при застосуванні його для вимірювання електричних параметрів живих тканин з використанням ємнісних електродів при урахуванні дії завад. Також визначено умови, при яких змінюється точність оцінювання електричних параметрів живих тканин за цим методом.*

**Ключові слова:** живі тканини, вимірювання, двокритерійна апроксимація, спроможність, незміщеність, точність.

### Вступ та постановка задачі

В сучасній медичній практиці застосовуються різноманітні методи діагностики, серед яких важливе місце посідають методи вимірювання імпедансу тканин. Вони дозволяють здійснювати загальну інтегральну та диференційну діагностику стану хворого [1, 2], слідкувати за масою тіла [3] та процесом регенерації тканин [4], оцінювати кровонаповнення органів та стан їх серцево-судинної системи [5], виявляти новоутворення [6], оцінювати стан донорсь-

кої крові під час її зберігання [7], тканин, які готують для пересаджування [8] та стан людини-оператора [1, 9].

Процедура визначення складових імпедансу за цими методами базується на пропусканні струму крізь живі тканини при одночасному вимірюванні падіння напруги на них. Струм за цих умов змінює стан живих тканин, що призводить до спотворення результатів вимірювання.

Це явище найбільш виявляється при вимірюванні імпедансу шкіри.

Застосування методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних для оцінювання складових імпедансу живих тканин [10] дозволяє зменшувати вимірювальний вплив струму завдяки зменшенню його амплітуди та тривалості вимірювання. В умовах проведення числового експерименту без урахування дії завад [11] метод дає точну оцінку складових імпедансу живих тканин. Але в реальних умовах завжди існують чинники, які призводять до спотворення результатів вимірювання падіння напруги на живих тканинах та, як наслідок, результатів визначення складових їх імпедансу. У цьому разі необхідно оцінити відповідність отриманих результатів, а, отже, й прийнятих співвідношень, параметрам обраної еквівалентної схеми вимірювання. Якісно відповідність оцінюється [12] за допомогою таких статистичних характеристик, як спроможність, незміщеність та точність.

Таким чином, **метою роботи** є оцінювання спроможності, незміщеності та точності методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних при вимірюванні електричних параметрів живих тканин в умовах дії завад.

### Постановка числового експерименту

Метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних може бути застосованим для вимірювання складових імпедансу живих тканин [10] із використанням металевих, резистивних або ємнісних електродів. Вочевидь найскладніший випадок застосування цього методу передбачає використання ємнісних електродів (рис. 1). Тоді процедура вимірювання є такою.

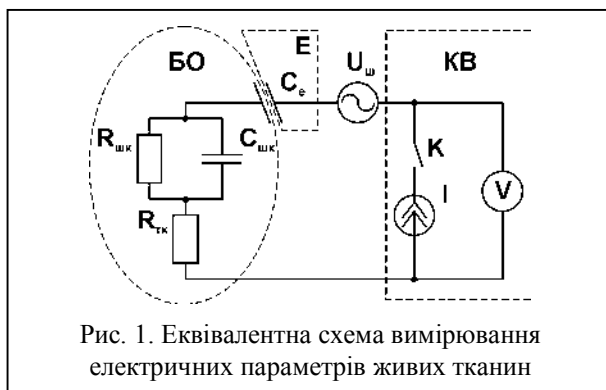


Рис. 1. Еквівалентна схема вимірювання електричних параметрів живих тканин

За допомогою ключа (К) через ємнісні електроди (Е) до біологічного об'єкту (БО) подається стабілізований струм (I). Перехідний процес з напруги  $U[nT]$  ( $n = \overline{0, N}$ ,  $N$  – номер останнього відліку,  $T$  – період дискретизації), що виникає у ланці «біологічний об'єкт – електрод», в дискретні моменти часу  $nT$  реєструється вольтметром (V). Після оброблення даних  $U[nT]$  ітераційним алгоритмом [10] отримують оцінки опору та ємності шкіри ( $R_{шк}$ ,  $C_{шк}$ ),

опору внутрішніх тканин ( $R_{тк}$ ), а також ємності електродів ( $C_e$ ). На схемі дію власних шумів електродів та викликаних їх зсувом, похибок квантування перехідного процесу за рівнем та часом, наведень мережі живлення та поруч працюючих приладів, флуктуацій стабілізованого струму, спотворень, внесених елементами каналу вимірювання (КВ) враховано за допомогою джерела напруги  $U_{ш}$ .

Дослідження статистичних характеристик методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних при його застосуванні для вимірювання електричних параметрів живих тканин з використанням ємнісних електродів в умовах дії завад виконувалося за допомогою програми «Двокритерійна апроксимація» [11]. При цьому амплітуда вимірювального струму [13] становила 40 мкА, а ємність електродів [14] й опір внутрішніх тканин [15] варіювалися в діапазонах:  $C_e \in [0,002; 0,5]$  мкФ та  $R_{тк} \in [10; 1100]$  Ом. Оскільки вимірювання електричних параметрів живих тканин за методом двокритерійної апроксимації експериментальних даних головним чином розраховано на оцінювання опору та ємності шкіри, то для них були обрані завищені діапазони варіювання [13]:  $R_{шк} \in [1; 1000]$  кОм,  $C_{шк} \in [0,001; 1]$  мкФ.

Як зазначено вище, дані перехідного процесу з напруги можуть бути спотвореними щонайменше вісьмома чинниками. Тоді, за умови, що дія кожного з них не є визначальною, за граничною теоремою теорії ймовірностей [16], джерело напруги  $U_{ш}$ , що характеризує їх сумарний вплив, може бути змодельоване генератором випадкового сигналу з нормальним розподілом. Отже, при генеруванні перехідного процесу до даних  $U[nT]$  додавався нормальний випадковий сигнал, математичне сподівання якого становило 0 В, а середньоквадратичне відхилення (СКВ) варіювалося від 0 до 0,07 В.

Таким чином, для генерування даних  $U[nT]$  параметрам еквівалентної схеми та сигналу шуму надавалися випадково вибрані значення з обумовлених вище діапазонів. При цьому для кожного вибраного набору параметрів обчислювалося 50 перехідних процесів, загальна кількість дискретних відліків ( $N$ ), яких змінювалася від 10 до 9810 з кроком 200 відліків. А оскільки метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних є новим і його статистичні характеристики досі не досліджувалися, то для кожного значення загальної кількості дискретних відліків генерувалося 300 перехідних процесів, за кожним з яких оцінювалися параметри еквівалентної схеми. За сукупністю цих оцінок знаходилися їх математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення та двосторонні t-критерій Стьюдента й критерій  $\chi^2$  Пірсона. За t-критерієм Стьюдента переви-

рялася гіпотеза про наявність систематичної похибки у результатах оцінювання параметрів еквівалентної схеми, а, отже, виконувалася оцінка незміщеності методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних. Оскільки коректне застосування t-критерія Стьюдента можливе для нормально розподілених випадкових величин, то перед його обчисленням перевірялася гіпотеза про нормальний розподіл отриманої сукупності оцінок параметрів еквівалентної схеми за критерієм  $\chi^2$  Пірсона.

Параметри еквівалентної схеми та сигналу шуму випадково вибиралися 300 разів. Після кожного їх оновлювання генерувалися дані  $U[nT]$ , за якими обчислювалися оцінки параметрів та їх статистичні характеристики. Таким чином, загальна кількість циклів «генерування даних – оцінювання параметрів еквівалентної схеми» становила 4500000. При цьому точність та спроможність методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних досліджувалися за СКВ оцінок параметрів еквівалентної схеми.

### Обговорювання результатів числового експерименту

Проведені дослідження свідчать (табл. 1), що при внесенні у дані перехідного процесу  $U[nT]$  випадкового шуму виникнення систематичної похибки у результатах оцінювання електричних параметрів живих тканин є статистично недостовірним. Так, наприклад, для рівня значимості 5% з імовірною систематичною похибкою знайдено менше 6% параметрів, для рівня значимості 1% з імовірною систематичною похибкою знайдено менше 3% параметрів та для рівня значимості 0,1% з імовірною систематичною похибкою знайдено менше 2% параметрів еквівалентної схеми. Отже, ітераційний алгоритм оцінювання електричних параметрів живих тканин є адекватним обраній електричній моделі живих тканин, а метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних є незміщеним при імітації його застосування для вимірювання електричних параметрів живих тканин в умовах дії випадкового шуму.

Таблиця 1

Відносна кількість перевищень довірчої ймовірності, %

критерій	довірча ймовірність	оцінюваний параметр			
		$C_e$	$R_{шк}$	$C_{шк}$	$R_{тк}$
Пірсона	0,95	8,1	8,5	5,7	6,3
	0,99	2,8	3,1	1,4	1,6
	0,999	1,3	1,3	0,30	0,47
Стьюдента	0,95	4,5	5,2	3,5	3,7
	0,99	1,8	2,5	1,2	1,4
	0,999	0,73	1,5	0,65	0,69

При збільшенні загальної кількості дискретних відліків перехідного процесу СКВ оцінюваних параметрів зменшується (рис. 2).

Так, при  $N = 210$  СКВ оцінок  $R_{шк}$  набувало значень від 640 до 26000 Ом,  $R_{тк}$  – від 250 до 3200 Ом,  $C_{шк}$  – від  $11 \cdot 10^{-12}$  до  $300 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $C_e$  – від  $19 \cdot 10^{-15}$  до  $5,4 \cdot 10^{-6}$  Ф.

А при  $N = 9810$  СКВ оцінок  $R_{шк}$  набувало значень від 100 до 1400 Ом,  $R_{тк}$  – від 40 до 490 Ом,  $C_{шк}$  – від  $1,7 \cdot 10^{-12}$  до  $50 \cdot 10^{-9}$  Ф та  $C_e$  – від  $2,9 \cdot 10^{-15}$  до  $54 \cdot 10^{-9}$  Ф.

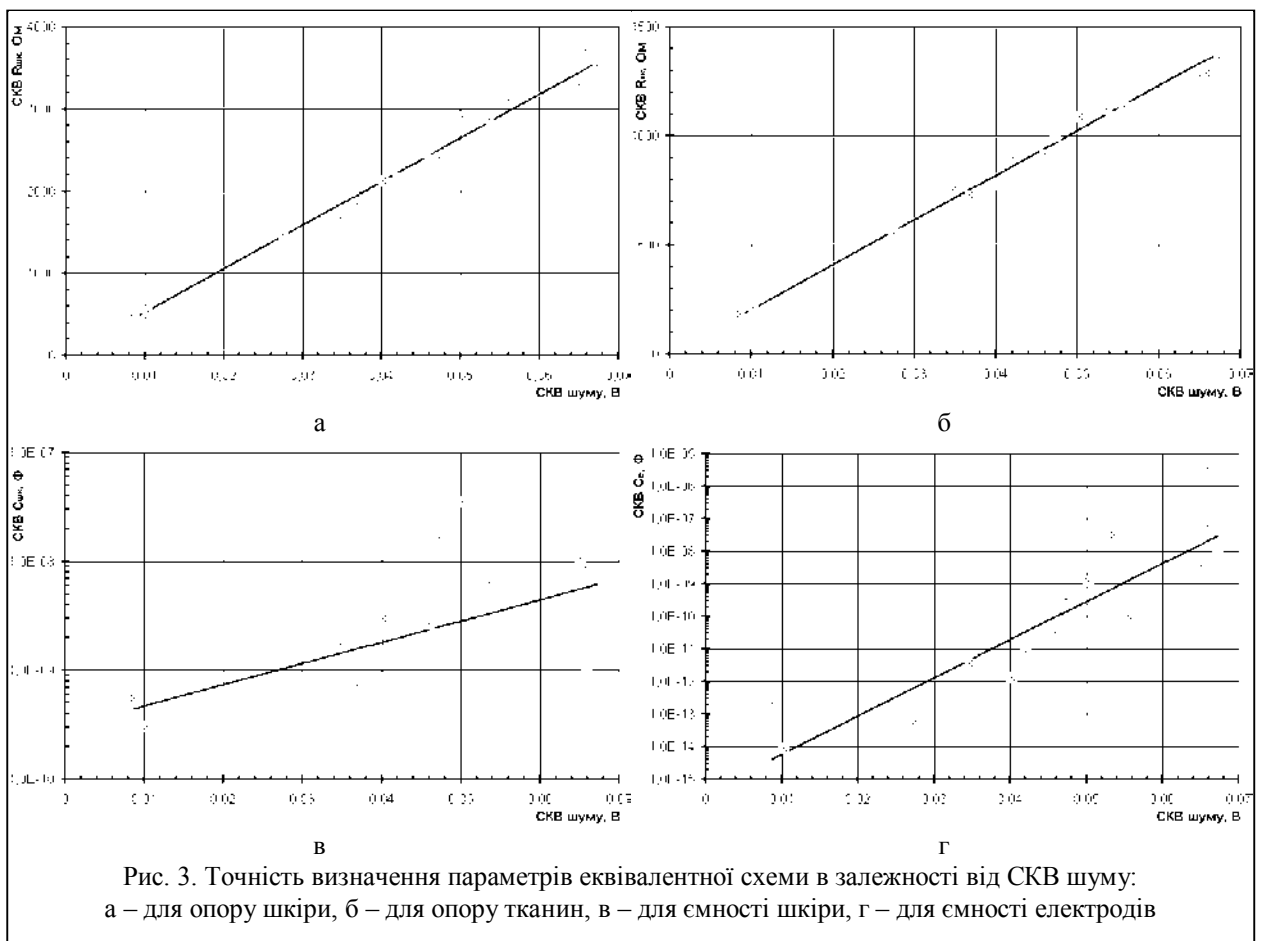
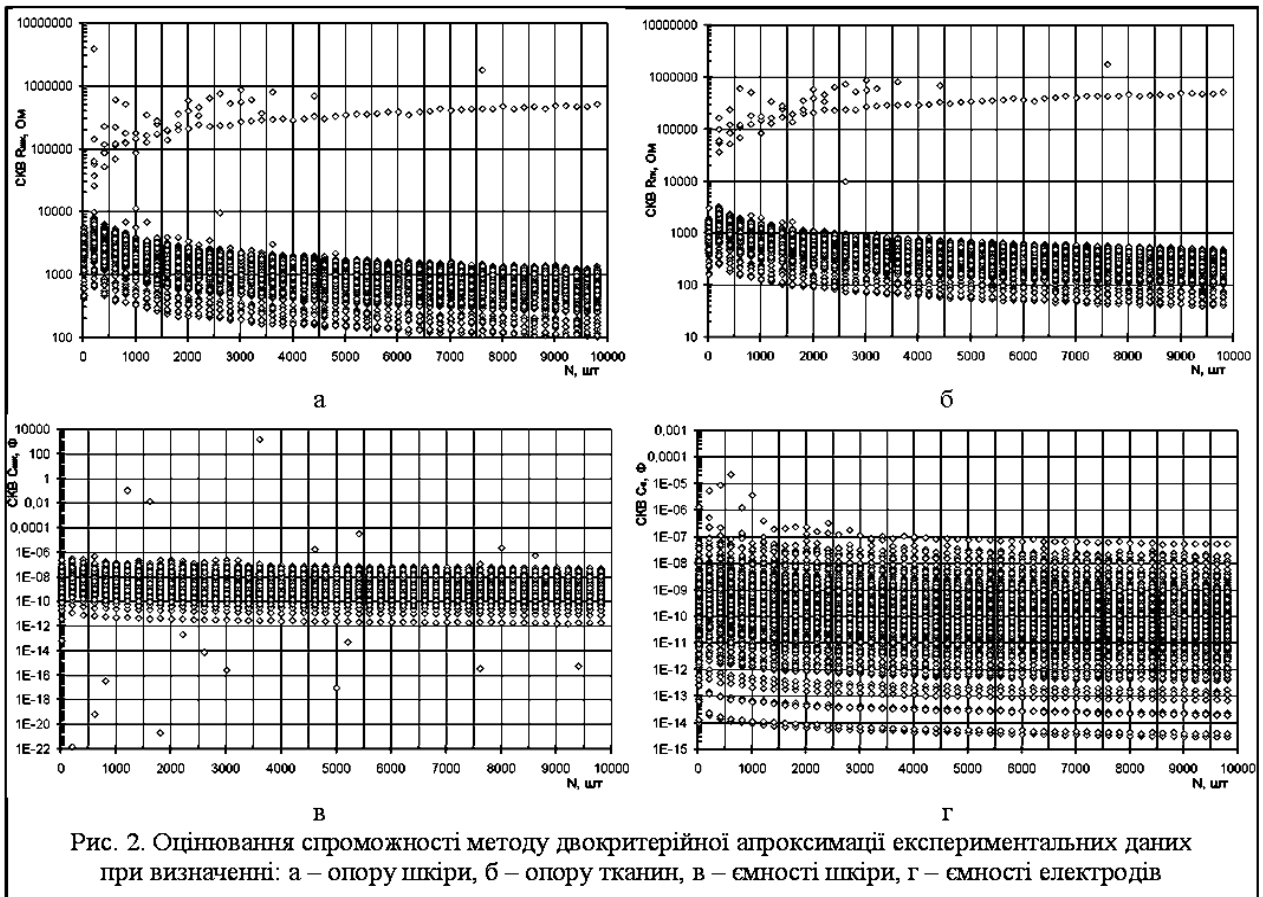
Таким чином, збільшення обсягу спостережень за перехідним процесом  $N$  призводить до наближення оцінок параметрів еквівалентної схеми до істинних значень. Отже, метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних у проведеному дослідженні виявив себе спроможним. При цьому дані, не підпорядковані загальній тенденції, відповідають неоптимальному співвідношенню «сигнал – шум»,  $U_{ш}/U_{бo}$  (тут  $U_{ш}$  – СКВ сигналу шуму,  $B$ ;  $U_{бo}$  – падіння напруги на шкірі та внутрішніх тканинах). Так, при  $U_{ш}/U_{бo} > 0,52$  спостерігається стійке поступове збільшення СКВ оцінок опору шкіри й внутрішніх тканин та нерегулярне визначення ємності шкіри. Отже, за цих умов результати вимірювань розбігаються.

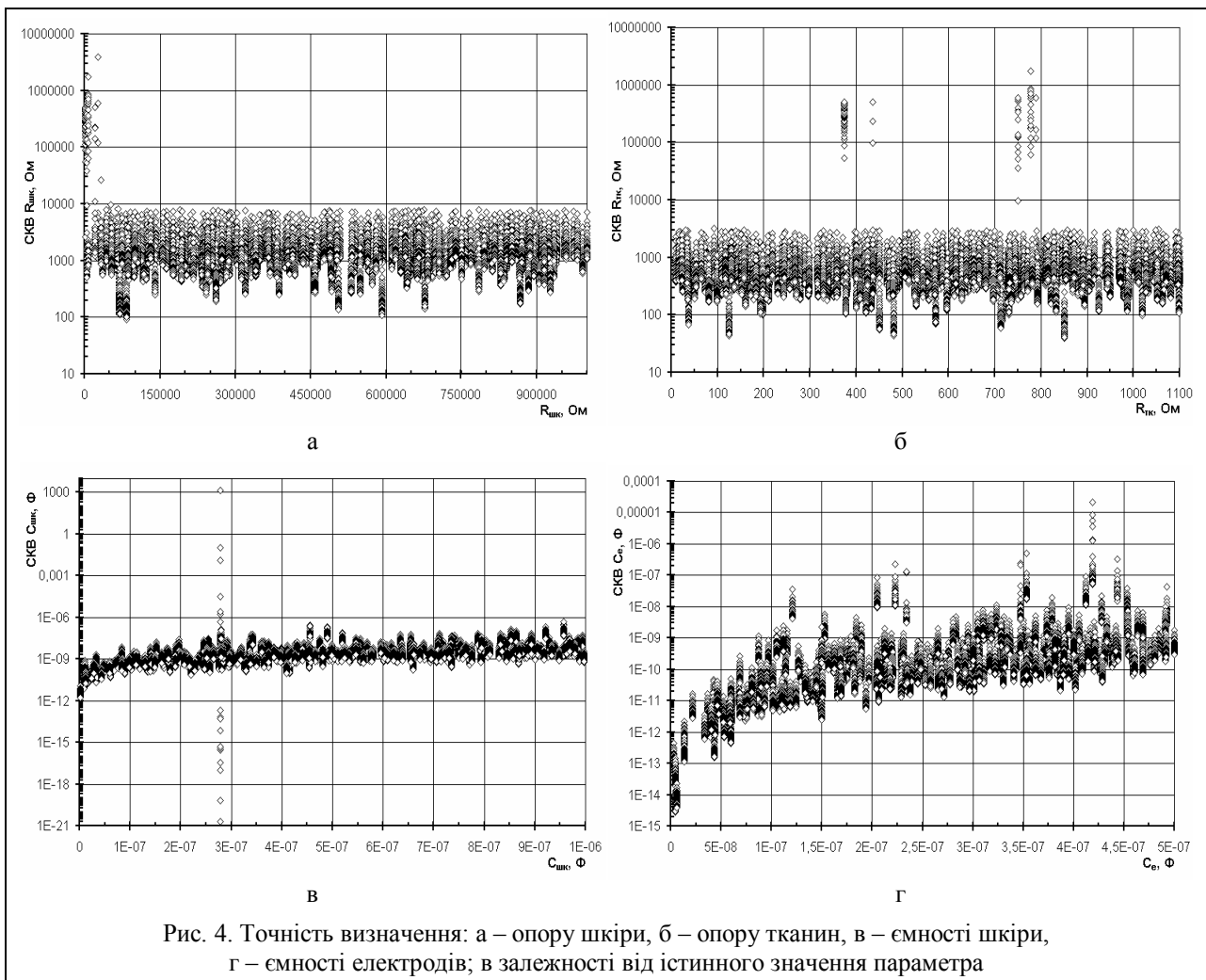
Проведені дослідження свідчать, що точність визначення параметрів за методом двокритерійної апроксимації експериментальних даних зменшується при збільшенні СКВ шуму.

Так, при  $N = 1010$  (рис. 3), для СКВ шуму 8,6 мВ СКВ оцінок  $R_{шк}$  становило 460 Ом,  $R_{тк}$  – 180 Ом,  $C_{шк}$  –  $0,55 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $C_e$  –  $0,22 \cdot 10^{-12}$  Ф, тоді як для СКВ шуму 66 мВ СКВ оцінок  $R_{шк}$  становило 3700 Ом,  $R_{тк}$  – 1400 Ом,  $C_{шк}$  –  $8,8 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $C_e$  –  $3,5 \cdot 10^{-6}$  Ф.

При  $U_{ш}/U_{бo} < 0,06$  (рис. 4) точність визначення оцінок параметрів еквівалентної схеми методом двокритерійної апроксимації експериментальних даних не залежить від істинного значення параметру для опору тканин і шкіри та зменшується при збільшенні істинного значення параметру для ємності шкіри й електрода.

Так, за цих умов СКВ оцінок  $R_{шк}$  не перевищувало 9700 Ом,  $R_{тк}$  – 3200 Ом. Для істинного значення  $C_{шк} = 1,3 \cdot 10^{-9}$  Ф СКВ його оцінок набувало значень від  $1,7 \cdot 10^{-12}$  Ф до  $11 \cdot 10^{-12}$  Ф, для істинного значення  $C_{шк} = 1 \cdot 10^{-6}$  Ф СКВ його оцінок набувало значень від  $8,4 \cdot 10^{-9}$  Ф до  $51 \cdot 10^{-9}$  Ф,





а для істинного значення  $C_e = 5,6 \cdot 10^{-9}$  Ф СКВ його оцінок набувало значень від  $3,8 \cdot 10^{-15}$  Ф до  $23 \cdot 10^{-15}$  Ф, для істинного значення  $C_e = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Ф СКВ його оцінок набувало значень від  $0,29 \cdot 10^{-9}$  Ф до  $1,8 \cdot 10^{-9}$  Ф. Тоді як при  $U_{ш}/U_{б0} > 0,06$  точність визначення параметрів є непередбачуваною.

### Висновки

Проведені дослідження показали, що при співвідношенні «сигнал – шум»

$$U_{ш}/U_{б0} < 0,52$$

в умовах проведення числового експерименту метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних при його застосуванні для вимірювання електричних параметрів живих тканин за допомогою ємнісних електродів є незміщеним та спроможним. При цьому при  $U_{ш}/U_{б0} < 0,06$  точність визначення опору шкіри та тканин не залежить від їх істинних значень, а точність визначення ємності шкіри та електрода зменшується зі збільшенням їх істинних

значень. Отже, метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних є придатним для подальшого практичного використання.

В майбутньому планується застосувати метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних для вимірювання електричних параметрів живих тканин із використанням резистивно-ємнісних електродів та дослідити статистичні характеристики методу у цьому випадку.

### Список літератури

1. Кривуля Г.Ф. Автоматизированная система контроля и реабилитации работников железнодорожного транспорта на основе методов рефлексодиагностики и рефлексотерапии / Г.Ф. Кривуля, В.Д. Липанов, А.В. Липанов // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1996. – № 5. – С. 49-51.
2. Иванов В.Г. Приборная реализация методов рефлексодиагностики и терапии (Накатани и Фолль) / В.Г. Иванов, Е.Я. Панков, В.А. Вязовский, С.В. Иванов. – Х.: Novasoft, 1994. – 160 с.
3. Ki Hwan Hong. Effectiveness of thigh-to-thigh current path for the measurement of abdominal fat in bioelectrical impedance analysis / Ki Hwan Hong, Yong Gyu Lim, Kwang Suk Park // Med Biol Eng Comput. – 2009. – V 47. – P. 1265-1271.

4. А.с. 824994 СССР, МКИ А 61 В5/05. Способ исследования регенератора костной ткани / Ю.К. Вилкс, Х.А. Янсон (СССР); Риж. науч.-исследоват. ин-т травматологии и ортопедии (СССР). – № 2794127/28-13; Заявл. 15.06.1979; Опубл. 30.04.1981, Бюл. № 16.

5. Инструментальные методы исследования сердечно-сосудистой системы: справочник; под ред. Т.С. Виноградовой. – М.: Медицина, 1986. – 416 с.

6. Ji Zhenyu. Novel electrode-skin interface for breast electrical impedance scanning / Zhenyu Ji, Xiuzhen Dong, Xietao Shi, Fusheng You, Feng Fu, Ruigang Liu // *Med Biol Eng Comput.* – 2009. – V 47. – P. 1045-1052.

7. Ulgen Y. Physiological quality assessment of stored whole blood by means of electrical measurements / Y. Ulgen, M. Sezdi // *Med Biol Eng Comput.* – 2007. – V 45. – P. 653-660.

8. Биофизика / Под ред. Б.Н. Тарусова, О.Р. Кольс. – М.: Высш. шк., 1968. – 468 с.

9. Чеглоков А.В. Рефлексодиагностика психофизиологического состояния (ПФС) человека: науч.-метод. пособие / А.В. Чеглоков, В.Г. Иванов. – Х.: Основа, 2000. – 62 с.

10. № UA 65068 C2 Україна, МПК (2006) А 61 В5/05. Спосіб вимірювання електричних параметрів живих тканин / В.О. Ярута (Україна). – № 2003054717; Заявлено 26.05.2003; Опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3.

11. Ярута В.О. Імітація вимірювання електричних параметрів живих тканин / В.О. Ярута, В.Д. Липанов, Т.Г. Білова // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2010. – Вип. 1 (82). – С. 209-212.

12. Лакин Г.Ф. Биометрия: учеб. пособие для биол. спец. вузов / Г.Ф. Лакин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.

13. Ярута В.А. Измерение электрических параметров живых тканей на основе их моделирования в виде эквивалентной схемы / В.А. Ярута // *Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ».* – X., 2002. – № 18. – С. 133-142.

14. Орлов Ю.Н. Контактные биоэлектроды для биомедицинских измерений: учеб. пособие по курсу «Биомедицинские измерения» / Ю.Н. Орлов. – М.: МВТУ, 1989. – 48 с.

15. Реограф РГ4-01: паспорт, дв. 2.893.010 ПС / М-во мед. пром., Львовский з-д радиоэлектрон. мед. аппаратуры. – Львов: Львовский облполиграфиздат, 1977. – 43 с.

16. Игуменцева Н.В. Статистический анализ результатов экспериментов и наблюдений: учеб. пособие / Н.В. Игуменцева, В.И. Пахомов. – Х.: ООО «Компания СМИТ», 2005. – 236 с.

Надійшла до редколегії 23.02.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Г. Асеев, Харківська державна академія культури, Харків.

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ МЕТОДА ДВУХКРИТЕРИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ ЕМКОСТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

В.А. Ярута, В.Д. Липанов, В.А. Брусенцев

Приведены результаты численного эксперимента, который позволил определить условия несмещённости и состоятельности метода двухкритериальной аппроксимации экспериментальных данных при использовании его для измерения электрических параметров живых тканей с применением емкостных электродов при учёте влияния помех. Также определены условия, при которых изменяется точность оценивания электрических параметров живых тканей этим методом.

**Ключевые слова:** живые ткани, измерение, двухкритериальная аппроксимация, состоятельность, несмещённость, точность.

**A STATISTICAL ESTIMATION OF THE TWO-CRITERION APPROXIMATION METHOD OF EXPERIMENTAL DATA WHEN USING IT FOR MEASURING OF LIVING TISSUES ELECTRICAL PARAMETERS WITH CAPACITIVE ELECTRODES**

V.O. Iaruta, V.D. Lipanov, V.O. Brusentsev

Results of numerical experiment are brought, which allowed defining conditions of unbiasedness and validity of the two-criterion approximation method of experimental data when using it for measuring of living tissues electrical parameters with using capacitive electrodes taking into account noises. The conditions are evaluated too at which the estimation accuracy of electrical parameters of living tissues by this method is changes.

**Keywords:** living tissue, measuring, two-criterion approximation, capacity, validity, unbiasedness, accuracy.