

УДК 004:[616-008.9+612.014.42]

В.О. Яруга, Т.Г. Білова, І.О. Побіженко

Харківська державна академія культури, Харків

## СТАТИСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ДВОКРИТЕРІЙНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЖИВИХ ТКАНИН РЕЗИСТИВНО-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 урахуванням дії завад та використанням електродів, імпеданс яких може бути представленим електричною ланкою паралельно поєднаних опору та ємності. Також проаналізовано точність оцінювання електричних параметрів живих тканин за цим методом та визначено умови її змінювання.

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

### Вступ та постановка завдання дослідження

Відома велика кількість методів медичної діагностики та методів оцінки психофізіологічного стану людини-оператора [1 – 10], що базуються на визначенні складових імпедансу живих тканин. Серед них новим є метод вимірювання електричних параметрів живих тканин [10, 11], в основу якого покладено двокритерійну апроксимацію експериментальних даних. Цей метод дозволяє знаходити опір та ємність шкіри, а також опір внутрішніх тканин з урахуванням імпедансу, створеного вимірювальними електродами. В умовах проведення числового експерименту без урахування дії завад при використанні резистивних або ємнісних електродів [12] метод дає точну оцінку складових імпедансу живих тканин. При використанні електродів, імпеданс яких може бути представленим електричною ланкою паралельно поєднаних активного опору та ємності (резистивно-ємнісні електроди), знайдено умови [11], при яких метод дозволяє знаходити складові імпедансу живих тканин з похибкою, що не перевищує заданого значення. Також числовим експериментом показано [13], що в умовах дії випадкового шуму у вимірювальній ланці при використанні ємнісних електродів метод є незміщеним та спроможним. Але залишається невідомою поведінка методу в умовах дії завад при використанні резистивно-ємнісних вимірювальних електродів.

Таким чином, метою роботи є оцінювання методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних при його використанні для вимірювання електричних параметрів живих тканин резистивно-ємнісними електродами в умовах дії завад за допомогою таких статистичних характеристик, як спроможність, незміщеність та точність.

### Постановка числового експерименту

Процедура вимірювання електричних параметрів живих тканин резистивно-ємнісними електродами (рис. 1) із використанням методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних така.

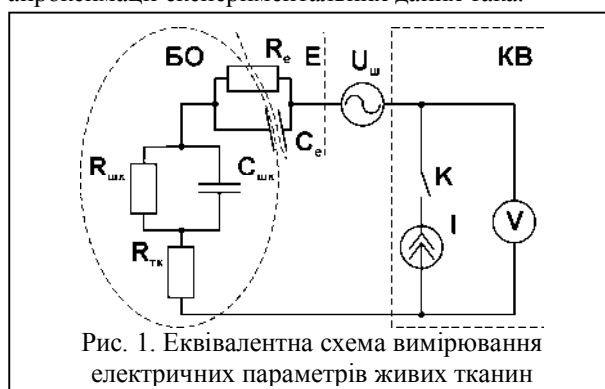


Рис. 1. Еквівалентна схема вимірювання електричних параметрів живих тканин

За допомогою ключа (К) через резистивно-ємнісні електроди (Е) до біологічного об'єкту (БО) подається стабілізований струм (І). 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 [11] отримують оцінки опору та ємності шкіри ( $R_{шк}$ ,  $C_{шк}$ ), опору внутрішніх тканин ( $R_{тк}$ ), а також опору та ємності електродів ( $R_e$ ,  $C_e$ ).

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 (KB) 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 резистивно-ємнісних електродів в умовах дії завад виконувалося за допомогою програми «Двокритерійна апроксимація» [12]. При цьому амплітуда вимірювального струму становила 40 мкА, опір та ємність електродів [14], а також опір внутрішніх тканин [15] варіювалися в діапазонах:  $R_e \in [1; 5]$  кОм,  $C_e \in [0,005; 0,5]$  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:

$$R_{шк} \in [1; 1000] \text{ кОм}, C_{шк} \in [0,001; 1] \text{ мкФ}.$$

Як зазначено вище, дані перехідного процесу з напруги можуть бути спотвореними щонайменше вісьмома чинниками. Тоді, при умові, що дія кожного з них не є визначальною, за граничною теоремою теорії ймовірностей, джерело напруги  $U_{ш}$ , що характеризує їх сумарний вплив, може бути змодельованим генератором випадкового сигналу з нормальним розподілом. Тому, при генеруванні перехідного процесу, до даних  $U[nT]$  додавався нормальний випадковий сигнал з математичним очікуванням 0 В та середньоквадратичним відхиленням (СКВ) 0,001 В.

Оскільки попередні дослідження [11] показали залежність точності визначення електричних параметрів еквівалентної схеми вимірювання від співвідношення тривалостей перехідних процесів у шкірі та на електродах, то для знаходження статистичних характеристик методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних було проведено два числові експерименти. Перший був присвячений оцінці точності та незміщеності методу, другий – оцінці його спроможності.

Відповідно до першого експерименту при генеруванні даних  $U[nT]$  значення параметрів еквівалентної схеми вимірювання випадково змінювалися 300 разів в межах обумовлених вище діапазонів. При цьому для кожного випадково заданого набору значень параметрів генерувалося 300 перехідних процесів, які відрізнялися один від одного доданими значеннями джерела випадкового сигналу  $U_{ш}$ . За кожним перехідним процесом оцінювалися параметри еквівалентної схеми вимірювання. Для сукупності цих оцінок обчислювалися математичне очікування, СКВ та двосторонній критерій  $\chi^2$  Пірсона й t-критерій Стюдента.

У другому експерименті генерування даних  $U[nT]$  виконувалося для кожного з двох наборів значень параметрів еквівалентної схеми вимірювання,

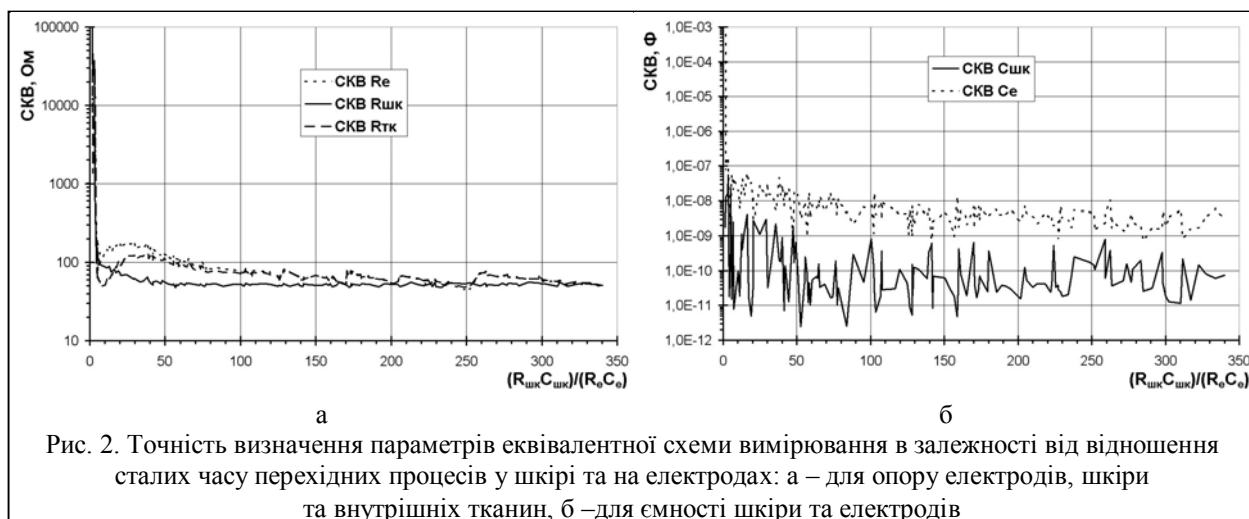
вибраних із випадково заданих у першому експерименті. При цьому загальна кількість дискретних відліків  $N$  змінювалась від 10 до 4510 з кроком 500 відліків. При кожному значенні загальної кількості дискретних відліків генерувалося 300 перехідних процесів, які відрізнялися одне від одного доданими значеннями джерела випадкового сигналу  $U_{ш}$ . За кожним перехідним процесом оцінювалися параметри еквівалентної схеми вимірювання. Для сукупності цих оцінок обчислювалися математичне очікування, СКВ та двосторонній критерій  $\chi^2$  Пірсона й t-критерій Стюдента.

Критерій  $\chi^2$  Пірсона використовувався для перевірки гіпотези про відповідність отриманої сукупності оцінок параметрів еквівалентної схеми вимірювання закону нормального розподілу; t-критерій Стюдента – для перевірки гіпотези про наявність систематичної похибки у результатах визначення параметрів еквівалентної схеми вимірювання, а, отже, для оцінювання незміщеності методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних; а знайдені значення СКВ оцінок параметрів еквівалентної схеми – для характеристики точності та визначення спроможності цього методу.

Оскільки у першому експерименті значення параметрів еквівалентної схеми вимірювання змінювалися 300 разів та для кожного набору значень параметрів генерувалося 300 перехідних процесів, а у другому експерименті значення параметрів еквівалентної схеми було задано два рази та для кожного заданого набору значень параметрів 10 разів змінювалась загальна кількість дискретних відліків, для кожної з яких генерувалося 300 перехідних процесів, то загальна кількість циклів «генерування даних – оцінювання параметрів еквівалентної схеми вимірювання» у першому експерименті становила 90 000, а у другому – 6 000.

### Обговорювання результатів числового експерименту

Результати першого експерименту (рис. 2) свідчать, що точність визначення параметрів еквівалентної схеми вимірювання з використанням методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних збільшується зі збільшенням відношення сталих часу перехідних процесів у шкірі та на електродах та, для СКВ шуму 0,001 В, стабілізується при умові  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) > 7$ . Враховуючи, що без дії завад [11] при  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) > 4$  метод дозволяє отримувати оцінки параметрів еквівалентної схеми з помилкою, що не перевищує наперед заданого значення, можна стверджувати, що зі збільшенням СКВ шуму точність визначення параметрів еквівалентної схеми вимірювання за методом двокритерійної апроксимації експериментальних даних зменшується.



Оцінювання незміщеності методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних (табл. 1 – табл. 3) при сталому значенні СКВ випадкового шуму свідчить, що ймовірність виникнення систематичної похибки у результатах вимірювання зменшується зі збільшенням відношення сталих часу перехідних процесів у шкірі та на електродах, отже покращуються умови для знаходження значень параметрів еквівалентної схеми. Так, наприклад, при  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) > 7$  для рівня значимості 5 % з імовірною систематичною похибкою отримано не більше 15 % оцінок параметрів, для рівня значимості 1 % з імовірною систематичною похибкою отримано не більше 11 % оцінок параметрів, для рівня значимості 0,1 % з імовірною систематичною похибкою отримано не більше 7 % оцінок параметрів еквівалентної схеми вимірювання, тоді як при  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) > 20$  для рівня значимості 5 % з імовірною систематичною похибкою отримано менше 10 % оцінок параметрів, для рівня значимості 1 % з імовірною систематичною похибкою отримано менше 6 % оцінок параметрів, для рівня значимості 0,1 % з імовірною систематичною похибкою отримано менше 1 % оцінок параметрів еквівалентної схеми.

Таблиця 1

Відносна кількість перевищень довірчої ймовірності, %, обчислена на всій сукупності оцінок параметрів еквівалентної схеми вимірювання

критерій	довірча ймовірність	оцінюваний параметр				
		$R_e$	$C_e$	$R_{шк}$	$C_{шк}$	$R_{тк}$
Пірсона	0,95	20	4,0	11	15	13
	0,99	11	0,70	2,0	7,3	4,6
	0,999	7,3	0,70	0,0	2,6	1,3
Стьюдента	0,95	19	13	11	15	19
	0,99	14	8,6	10	9,9	14
	0,999	8,6	6,0	8,6	8,6	11

Таким чином, існують умови при яких метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних є незміщеним при імітації його застосування

для вимірювання електричних параметрів живих тканин резистивно-ємнісними електродами в умовах дії випадкового шуму.

Таблиця 2

Відносна кількість перевищень довірчої ймовірності, %, обчислена на сукупності оцінок параметрів еквівалентної схеми вимірювання при  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) > 7$

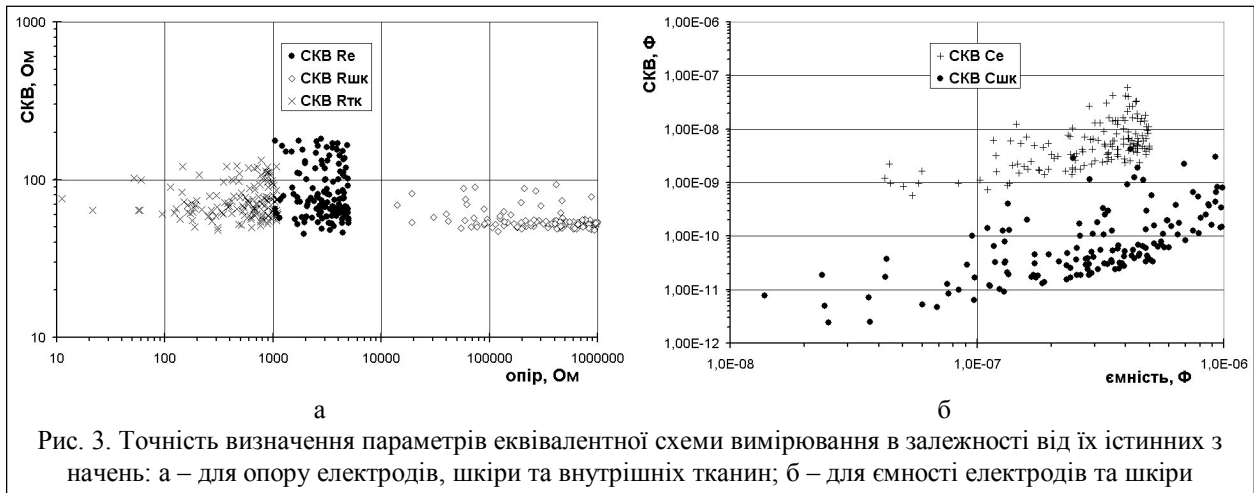
критерій	довірча ймовірність	оцінюваний параметр				
		$R_e$	$C_e$	$R_{шк}$	$C_{шк}$	$R_{тк}$
Пірсона	0,95	20	3,5	11	14	13
	0,99	11	0,0	1,4	7,0	4,2
	0,999	7,0	0,0	0,0	2,8	0,7
Стьюдента	0,95	15	7,7	6,3	11	15
	0,99	11	3,5	4,9	4,9	11
	0,999	4,9	1,4	3,5	3,5	7,0

Таблиця 3

Відносна кількість перевищень довірчої ймовірності, %, обчислена на сукупності оцінок параметрів еквівалентної схеми вимірювання при  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) > 20$

критерій	довірча ймовірність	оцінюваний параметр				
		$R_e$	$C_e$	$R_{шк}$	$C_{шк}$	$R_{тк}$
Пірсона	0,95	16	3,8	6,9	9,9	12
	0,99	7,6	0,0	0,76	3,8	4,6
	0,999	3,8	0,0	0,0	0,76	0,76
Стьюдента	0,95	9,9	5,3	3,1	6,9	9,9
	0,99	5,3	1,5	1,5	1,5	4,6
	0,999	0,0	0,0	0,0	0,0	0,76

Дослідження точності визначення оцінок параметрів еквівалентної схеми (рис. 3) методом двокритерійної апроксимації експериментальних даних при  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) > 7$  та СКВ шуму 0,001 В свідчить, що вона не залежить від істинного значення параметру для опору електродів, шкіри та внутрішніх тканин та зменшується при збільшенні істинного значення параметру для ємності електродів та шкіри.



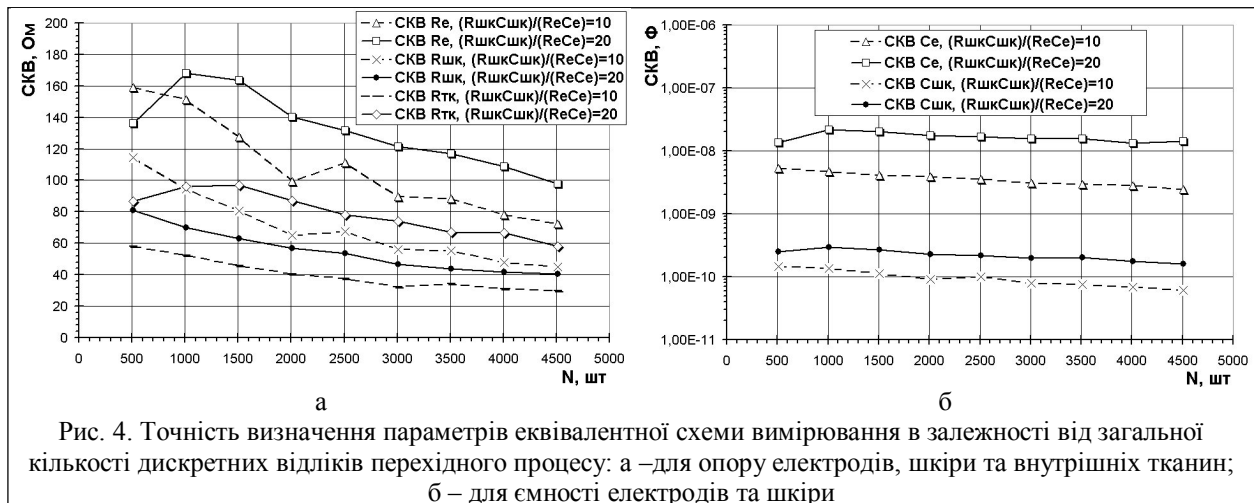
Так у проведеному експерименті, СКВ оцінок опору електродів не перевищила 182 Ом, опору шкіри – 94 Ом, опору внутрішніх тканин – 134 Ом, тоді як СКВ оцінок ємності для електродів ємністю 0,044 мкФ становила 2,2 нФ, а для електродів ємністю 0,41 мкФ становила 60 нФ, для шкіри ємністю 0,014 мкФ становила 7,8 пФ, а для шкіри ємністю 0,92 мкФ становила 3000 пФ.

Для оцінювання спроможності методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних у другому експерименті з усієї сукупності значень параметрів еквівалентної схеми вимірювання, заданих при виконанні першого експерименту, було вибрано два набори так, що для першого набору значень параметрів еквівалентної схеми виконувалася умова  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) \approx 10$  ( $R_e \approx 1,8\text{кОм}$ ,  $C_e \approx 0,044\text{мкФ}$ ,  $R_{шк} \approx 39\text{кОм}$ ,  $C_{шк} \approx 0,021\text{мкФ}$ ,  $R_{тк} \approx 400\text{Ом}$ ), а для другого – умова  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) \approx 20$  ( $R_e \approx 3,4\text{кОм}$ ,  $C_e \approx 0,38\text{мкФ}$ ,  $R_{шк} \approx 120\text{кОм}$ ,  $C_{шк} \approx 0,21\text{мкФ}$ ,  $R_{тк} \approx 290\text{Ом}$ ). Результати другого експерименту (рис. 4) свідчать, що при збільшенні загальної кількості дискретних відліків перехідного процесу СКВ оцінок параметрів зменшуються. Так, для  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) \approx 10$  при

$N = 510$  СКВ оцінок  $R_e$  становило 160 Ом,  $R_{шк} - 110$  Ом,  $R_{тк} - 58$  Ом,  $C_e - 5,4$  нФ,  $C_{шк} - 0,15$  нФ, а при  $N = 4510$  СКВ оцінок  $R_e$  становило 73 Ом,  $R_{шк} - 45$  Ом,  $R_{тк} - 30$  Ом,  $C_e - 2,5$  нФ,  $C_{шк} - 0,062$  нФ. Тоді як для  $(R_{шк}C_{шк})/(R_eC_e) \approx 20$  при  $N = 1010$  СКВ оцінок  $R_e$  становило 168 Ом,  $R_{шк} - 70$  Ом,  $R_{тк} - 96$  Ом,  $C_e - 22$  нФ,  $C_{шк} - 0,29$  нФ, а при  $N = 4510$  СКВ оцінок  $R_e$  становило 98 Ом,  $R_{шк} - 41$  Ом,  $R_{тк} - 58$  Ом,  $C_e - 14$  нФ,  $C_{шк} - 0,16$  нФ. Таким чином, збільшення обсягу спостережень за перехідним процесом  $N$  призводить до наближення оцінок параметрів еквівалентної схеми до істинних значень. Отже, у проведеному дослідженні метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних виявився спроможним.

### Висновки

Проведені дослідження свідчать, що в умовах числового експерименту метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних при його застосуванні для вимірювання електричних параметрів живих тканин резистивно-ємнісними електродами є незміщеним та спроможним.



При цьому точність визначення параметрів еквівалентної схеми вимірювання збільшується зі збільшенням відношення сталих часу перехідних процесів у шкірі та на електродах й зменшується зі збільшенням середньоквадратичного відхилення випадкового шуму, точність визначення опору електродів, шкіри та внутрішніх тканин не залежить від їх істинних значень, а точність визначення ємності електродів та шкіри зменшується зі збільшенням їх істинних значень. Отже, метод двокритерійної апроксимації експериментальних даних є придатним для подальшого практичного використання.

В майбутньому планується дослідити можливість застосування методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних для вимірювання електричних параметрів живих тканин, представлених більш складною еквівалентною схемою.

## Список літератури

1. Кривуля Г.Ф. Автоматизированная система контроля и реабилитации работников ж.-д. 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 Фоль) / В.Г. Иванов, Е.Я. Панков, В.А. Вязовский, С.В. Иванов. – М.: 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. Вилк, 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. Виногодовой. – М.: Медицина, 1986. – 416 с.
6. Ji Zhenyu. Novel electrode-skin interface for breast electrical impedance scanning / Zhenyu Ji, Xiuzhen Dong, Xuetao 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.П. 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. Способ вимірювання електричних параметрів живих тканин / В.О. Ярута (Україна). – № 2003054717; Заявлено 26.05.2003; Опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3.
11. Ярута В.О. Вимірювання електричних параметрів живих тканин з урахуванням резистивно-ємнісного імпедансу, створеного електродами / В.О. Ярута // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 4 (94). – С. 231-234.
12. 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.: ХУПС, 2010. – Вип. 1 (82). – С. 209-212.
13. Ярута В.О. Статистичне оцінювання методу двокритерійної апроксимації експериментальних даних при застосуванні його для вимірювання електричних параметрів живих тканин ємнісними електродами / В.О. Ярута, В.Д. Липанов, В.О. Брусенцев // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 2 (92). – С. 248-253.
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.

Надійшла до редколегії 15.10.2014

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

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ДВУХКРИТЕРИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В.А. Ярута, Т.Г. Белова, И.А. Побиженко

Приведены результаты численного эксперимента, который позволил определить условия несмещенности и состоятельности метода двухкритериальной аппроксимации экспериментальных данных при использовании его для измерения электрических параметров живых тканей с учётом влияния помех и применением электродов, импеданс которых может быть представлен электрической цепью параллельно соединённых сопротивления и ёмкости. Также проанализирована точность оценивания электрических параметров живых тканей этим методом и определены условия её изменения.

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

## A STATISTICAL ESTIMATION OF THE TWO-CRITERION APPROXIMATION OF EXPERIMENTAL DATA IN THE MEASUREMENT OF ELECTRICAL PARAMETERS OF LIVING TISSUES WITH RESISTIVE-CAPACITIVE ELECTRODES

V.O. Yaruta, T.G. Bilova, I.O. Pobizhenko

Results of numerical experiment are brought, which allowed to determine conditions for unbiasedness and validity of the two-criterion approximation method of experimental data when using it for measuring of living tissues electrical parameters with taking into account noises and using electrodes with impedance which can be represented by connected in parallel resistance and capacitance. The accuracy of estimation of living tissues electrical parameters by this method is analyzed too and the conditions are evaluated.

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