

УДК 57.087:004.042

## МОДЕЛИ БИОИМПЕДАНСА ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ И ОБРАТИМОМ ПРОБОЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ БИОМАТЕРИАЛА

Филист С.А., Шаталова О.В., Богданов А.С.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

### РЕЗЮМЕ

Цель исследования: совершенствование скрининговых систем диагностики социально значимых заболеваний путем моделирования вольтамперных характеристик биоактивных точек (БАТ) и классификации получаемых моделей посредством компьютерных технологий.

Задачи исследования:

- разработать структурно-функциональную модель электрической проводимости биоматериала в аномальных зонах (в области точек акупунктуры);
- разработать метод формирования пространства информативных признаков, предназначенного для классификаторов функционального состояния биоматериала.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы теории линейных электрических цепей, методы математического моделирования. При моделировании проводимости биоматериала в качестве инструментария использовался Matlab 8.0.

**Материал и методы.** Для моделирования вольтамперной характеристики БАТ предложено использовать структурно-функциональные модели с диодно-резистивными ячейками симметричной структуры. Разработан метод формирования пространства информативных признаков, предназначенного для классификаторов функционального состояния биоматериала, заключающийся в регистрации вольтамперных характеристик биоматериала в каждой биоактивной точке путем воздействия на них постоянным стабилизированным по уровню напряжением в диапазоне от –15 до 15 В, изменяемым с шагом в 1 В. Путем сопоставления характерных точек вольтамперной характеристики и параметров структурно-функциональной модели формируется вектор информативных признаков, предназначенный для нейросетевого классификатора.

**Результаты.** Построена структурно-функциональная модель электропроводности биоматериала на основе диодно-резистивных ячеек. Проведен факторный анализ вольтамперных характеристик биоматериалов, на основании которого показано, что для построения структурно-функциональной модели электропроводности биоматериала достаточно семи диодно-резистивных ячеек.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют построить классифицирующие модули для доклинической диагностики социально значимых заболеваний или заболеваний, маскируемых функциональным состоянием организма или профессиональной деятельностью, например пиелонефрита у беременных. Для диагностики достаточно ввести в компьютер координаты вольтамперной характеристики БАТ (30 значений), после чего программа получит семь значений омических сопротивлений, соответствующих модели биоимпеданса, которые используются в качестве входного вектора информативных признаков в нейросетевом классификаторе.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** импеданс, биоактивная точка, модель, вольтамперная характеристика, вектор информативных признаков.

### Введение

В диагностике многих заболеваний значительный интерес представляют параметры состава тканей отдельных регионов. Особый интерес вызывают исследования

электрической проводимости в аномальных зонах – в области биоактивных точек (БАТ). Анализ отечественных и зарубежных исследований различных свойств БАТ указывает на возможность получения от этих точек диагностической информации. Так, по изменению электрических параметров отдельных БАТ можно судить о локализации патологического процесса, а также о его динамике при развитии болезни или в ходе лечения.

✉ Филист Сергей Алексеевич, тел.: 8 (4712) 58-70-98, 8-903-875-54-69; e-mail: SFilist@gmail.com

Кроме того, некоторые авторы отмечают, что изменения в этих точках могут проявляться раньше, чем явные клинические признаки заболевания, т.е. возможно выявление заболевания на самых ранних стадиях [1].

Однако информация, снимаемая с БАТ в виде электрической проводимости на постоянном или переменном токе, не обладает достаточной робастностью и не позволяет построить адекватные решающие правила, позволяющие обеспечить приемлемые показатели диагностической эффективности при принятии диагностических решений. В целях улучшения показателей качества диагностики прибегают к увеличению объема информации, снимаемой с БАТ. Это достигается путем увеличения числа анализируемых БАТ или числа частот зондирующего тока, на котором определяется полное электрическое сопротивление в области БАТ; изменением энергетических характеристик источника возбуждающего тока.

Остановимся более подробно на последнем способе. Если электрическое сопротивление линейно, т.е. определяется согласно закону Ома, то изменение энергетических характеристик источника возбуждающего тока не приведет к получению дополнительной информации. Однако эксперименты показывают, что это сопротивление носит нелинейный характер и зависит от приложенного напряжения. Поэтому одним из путей увеличения объема информации, снимаемой с БАТ, является исследование ее вольтамперной характеристики с последующим получением характерных точек, координаты которых могут быть использованы для построения пространства информативных признаков в классифицирующих моделях. Для определения этих характерных точек необходима модель вольтамперной характеристики БАТ. Модель вольтамперной характеристики может быть получена либо на основе структурно-функционального моделирования электрической проводимости в БАТ, либо посредством аппроксимации экспериментально полученной вольтамперной характеристики БАТ более простой функцией, например полиномиальной.

Цель исследования – совершенствование скрининговых систем диагностики социально значимых заболеваний путем моделирования вольтамперных характеристик биоактивных точек и классификации получаемых моделей посредством компьютерных технологий. Для выполнения поставленной цели необходимо разработать структурно-функциональную модель электрической проводимости биоматериала в аномальных зонах (в области точек акупунктуры) и метод формирования пространства информативных признаков, предназначенного для классификаторов функционального состояния биоматериала.

## Материал и методы

Модель вольтамперной характеристики построена на основе феноменологического подхода – математической или гомеостатической модели описания экспериментально полученных данных об объекте исследования. Такая модель должна отражать как экспериментальные данные о характере поведения вольтамперной характеристики биоматериала в окрестности БАТ, так и интегрировать знания о физических и физиологических свойствах самого биоматериала.

В основу модели электрической проводимости БАТ положена гипотеза об обратимом пробое диэлектрика. В соответствии с этой гипотезой сопротивление в БАТ состоит из двух составляющих: цепочки последовательно соединенных участков, имеющих свойства диэлектрика с обратимым пробоем, и омических сопротивлений, осуществляющих функции обратной связи (отрицательной) для моделирования отрицательного сопротивления.

Для моделирования этих участков использовали диодно-резистивные ячейки. На рис. 1 показана модель электрического сопротивления в БАТ, полученная в программной системе SIMULINK среды MATLAB 7.13 [2].

В этой модели для моделирования обратимого пробоя диэлектрика используются четыре диодно-резистивные ячейки в прямой цепи и две диодно-резистивные ячейки в цепи обратной связи. Как те, так и другие диодно-резистивные ячейки моделируют обратимый пробой диэлектрика. В ячейках, включенных в прямую цепь, сопротивление диэлектрика до пробоя моделируется резисторами, включенными параллельно диодным ячейкам, а в ячейках, включенных в цепь обратной связи, сопротивление диэлектрика до пробоя моделирует сопротивление запятого диода.

В качестве источника питания электрической цепи, моделирующей электропроводность биоматериала в окрестности БАТ, использовался источник пилообразного напряжения, который подключался последовательно с цепочкой из четырех диодно-резистивных ячеек. Интерфейсное окно SIMULINK для определения параметров этого источника питания показано на рис. 2, а.

В качестве параметров модели используются амплитуда и частота пилообразного напряжения. В модели также предусмотрена установка формы напряжения питания. Кроме пилообразной формы имеется возможность использовать синусоидальную форму напряжения и прямоугольные импульсы.

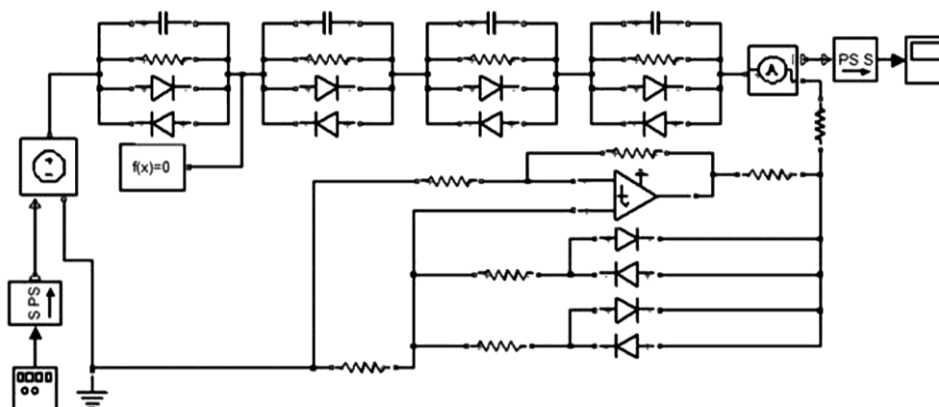
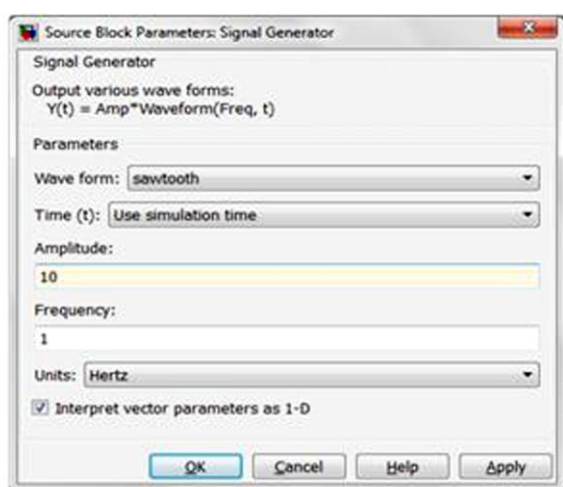
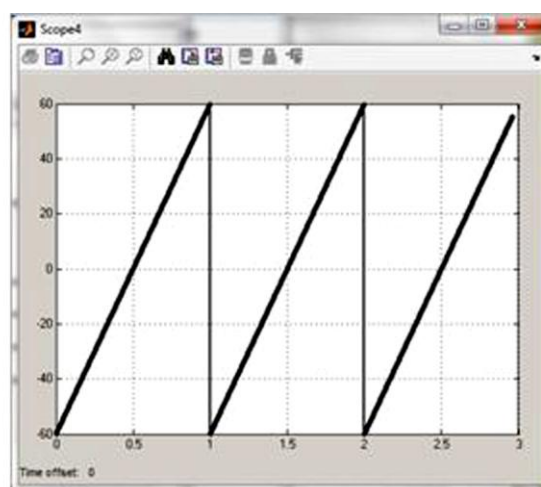


Рис. 1. Модель электрического сопротивления для моделирования вольтамперных характеристик БАТ



а



б

Рис. 2. Интерфейсные окна SIMULINK: а – настройки источника питания; б – эпюра напряжения на выходе генератора

Форма выходного напряжения на входе модели импеданса БАТ представлена на рис. 2, б. Таким образом, на модель биоимпеданса, выполненную в виде диодно-резистивных ячеек, подается последовательность волн пилообразного напряжения, число которых задается в окне программы (рис. 2, б), каждая из волн генерирует одну вольтамперную характеристику биоимпеданса БАТ.

На операционном усилителе  $t$  и включенных в цепь его положительной обратной связи диодно-резистивных ячеек, представленных на рис. 1, реализована модель отрицательного сопротивления, которое моделирует «ответную реакцию биоматериала» [1]. Если диоды в цепи его обратной связи выключены, то обратная связь отсутствует и потенциал на выходе усилителя  $t$  близок к нулю, а ток в БАТ определяют в основном четыре резистора диодно-резистивных ячеек прямой цепи. По мере роста напряжения на БАТ (рис. 2, б) открываются диоды ди-

одно-резистивных ячеек, что либо увеличивает крутизну вольтамперной характеристики, если диоды открываются в прямой цепи, либо уменьшает крутизну вольтамперной характеристики (вносится отрицательное сопротивление), если диоды открываются в цепи обратной связи.

Для формирования пространства информативных признаков необходимо выбрать характерные точки на вольтамперной характеристике, которые достаточно полно характеризовали бы состояние БАТ. С другой стороны, вольтамперная характеристика БАТ определяется параметрами диодно-резистивных ячеек модели (см. рис. 1).

Пространство информативных признаков для последующего нейросетевого анализа [3] формируется путем построения модели, которая адекватна реальной вольтамперной характеристике БАТ, получаемой посредством мобильных систем биоимпедансного анализа. Адекватности вольтамперной характеристики

добиваются путем выбора соответствующего числа диодно-резистивных ячеек в прямой и обратной цепи модели, а также их параметров, к которым относятся номинальные значения резисторов ячеек, сопротивление открытого диода и проводимость закрытого диода, напряжение отпирания диода ячейки.

Включение того или иного диода диодно-резистивной ячейки сопровождается изменением крутизны вольтамперной характеристики БАТ, т.е. скачком ее первой производной. Определив координаты этих изменений и соответствующие напряжения, можем определить число диодно-резистивных ячеек и их параметры, следовательно, построить модель электропроводности БАТ и определить вектор информативных признаков, соответствующий этой модели. На рис. 3 показана модель положительной ветви вольтамперной характеристики БАТ и ее первой производной. Отрицательная ветвь не рассматривается, так как диодно-резистивные ячейки, используемые для моделирования обратимого пробоя диэлектрика, имеют симметричную структуру относительно прилагаемой полярности напряжения.

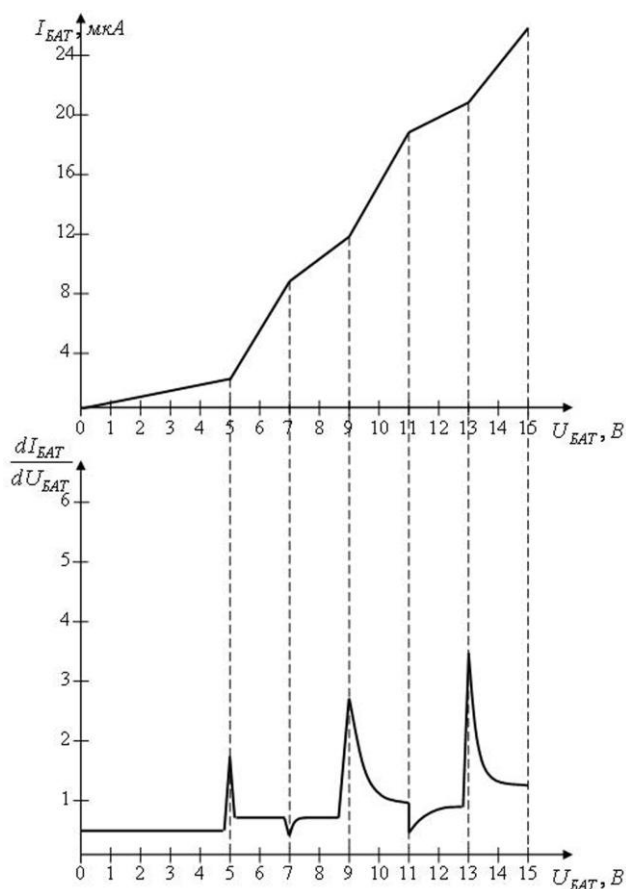


Рис. 3. Модели вольтамперной характеристики БАТ и ее первой производной, построенные на основе гипотезы об обратимом пробое диэлектрика

Если определить число скачков, наблюдаемых на графике первой производной положительной ветви вольтамперной характеристики, то можно определить число диодно-резистивных ячеек в модели вольтамперной характеристики БАТ. Распределение диодно-резистивных ячеек по прямой цепи и цепи обратной связи модели может быть определено по положительным и отрицательным скачкам первой производной.

Определив число и топологию диодно-резистивных ячеек в модели, можно приступить к формированию вектора информативных признаков для классифицирующей модели.

Вектор информативных признаков определяется с учетом того, что каждая диодно-резистивная ячейка описывается как минимум двумя параметрами: резистивным (омическим) сопротивлением и напряжением отпирания диода. При необходимости число этих параметров может быть увеличено путем добавления в диодно-резистивные ячейки в прямой цепи шунтирующих конденсаторов и внесения несимметрии в диодно-резистивную ячейку за счет установки для ее диодов различного напряжения отпирания.

## Результаты и обсуждение

Вольтамперные характеристики снимались с БАТ при напряжениях от  $-15$  до  $15$  В с шагом  $1$  В. Для экспериментальных исследований выбраны БАТ, обладающие максимальной доступностью. Для выявления необходимого объема анализируемых данных – вектора информативных признаков – использовался факторный анализ.

Факторный анализ был проведен с помощью пакета программ Statistica 6.0 for Windows. Целью анализа является изучение вопроса о числе факторов, определяющих характер поведения вольтамперных характеристик БАТ.

Таблица экспериментальных данных была получена по результатам исследования вольтамперных характеристик БАТ меридиана сердца С7 (шэнь-мэнь) у 20 волонтеров, не страдающих хроническими заболеваниями.

Фрагмент таблицы экспериментальных данных для факторного анализа вольтамперных характеристик БАТ представлен на рис. 4.

В качестве метода выделения факторов выбран метод главных компонент. Таблица собственных значений и процент исчерпывающей дисперсии, приходящийся на каждый фактор, показаны на рис. 5.

Как видно из таблицы, собственное значение для первого фактора равно  $23,43502$ , т.е. доля дисперсии, объясненная первым фактором, равна приблизительно  $78,1\%$ .

№ пачки	1	2	3	4	5	6	25	26	27	28	29	30
1	-35,2	-25,8	-21,3	-16,5	-10,5	-6,8	9,8	12	13,6	16,5	21,9	29,2
2	-22,4	-18,4	-15,6	-13,1	-10,3	-9,3	9,8	10,3	13,2	16,5	21,6	27,4
3	-42,5	-29,4	-23,2	-17,6	-15,4	-9,4	6,7	7,6	9,8	13,6	32,6	46,2
4	-32,7	-21,3	-17	-13,5	-11,2	-10,8	13,8	14,5	15,4	18,5	22,4	29,6
5	-23,9	-19,3	-16,4	-12	-10,2	-8,2	9,1	11,3	13,6	16,5	21,9	29,2
6	-23,6	-18,2	-14,9	-11,3	-8,8	-5,7	3,9	7,1	10,5	18,6	21,5	23,5
7	-14,5	-8,2	-6,7	-5,8	-5	-4,3	4,9	5,9	7,5	7,8	15,4	27,4
8	-42,5	-43,6	-42,2	-31,2	-28,7	-24,6	19,4	21,6	27,1	26,4	38,2	46
9	-41,2	-24,6	-13,2	-10,9	-9,6	-6,7	4,7	5,8	8,5	9,5	13,9	26,7
10	-12,3	-9,5	-6	-6	-4,7	-4,2	4,1	6,5	8,3	10,5	11,7	14,1
11	-7	-6	-5,6	-4,7	-3,4	-2,6	4	4,2	4,7	5,1	6	6,8
12	-16,3	-15,2	-14,8	-13,5	-12,5	-6,5	5,1	7,1	9,2	11,9	13,8	15,5
13	-37,6	-27,8	-19,8	-18,5	-14,2	-12	11,6	14,6	17,6	20,6	27,2	45,3
14	-19,7	-13,6	-10,5	-9,4	-7,7	-6,3	4,4	5,3	7,3	8,7	9,2	14,2
15	-43,6	-26,4	-17,8	-17,5	-11,6	-11,2	8,7	12,5	13,9	15,6	26,8	36,8
16	-15,7	-12,5	-9,6	-8,1	-7,2	-5,3	8,3	9,6	10,4	11,5	17,5	18,7
17	-34	-25,9	-21,8	-21	-17,2	-13,2	9,4	12,2	15,1	16,8	18,9	26,7
18	-28,9	-21,6	-16,5	-10,3	-5,2	-4,8	7,1	11,3	13,8	16,6	18,9	43,5
19	-31,2	-21,3	-17,4	-13,5	-11,5	-9	9,8	10,7	15,6	21,3	22,7	28,6
20	-24,4	-17,3	-16	-14,5	-9,7	-7,3	7,9	9,9	18,7	21	23,9	26,8

Рис. 4. Фрагмент таблицы экспериментальных данных для факторного анализа вольтамперных характеристик БАТ

Eigenvalues (Лист1 in Сердца 1) Extraction: Principal components				
Value	Eigenvalue	% Total variance	Cumulative Eigenvalue	Cumulative %
1	23,43502	78,11675	23,43502	78,1167
2	2,27600	7,58665	25,71102	85,7034
3	1,44274	4,80913	27,15376	90,5125
4	0,79987	2,66623	27,95363	93,1788
5	0,60419	2,01397	28,55782	95,1927
6	0,51611	1,72037	29,07393	96,9131
7	0,26238	0,87460	29,33631	97,7877
8	0,15425	0,51416	29,49056	98,3019
9	0,12903	0,43009	29,61959	98,7320
10	0,11840	0,39466	29,73799	99,1266
11	0,06247	0,20824	29,80046	99,3349
12	0,06155	0,20516	29,86201	99,5400
13	0,03934	0,13113	29,90135	99,6712
14	0,03257	0,10857	29,93392	99,7797
15	0,02402	0,08008	29,95794	99,8598
16	0,01674	0,05580	29,97468	99,9156
17	0,01405	0,04683	29,98873	99,9624
18	0,00697	0,02325	29,99570	99,9857
19	0,00430	0,01432	30,00000	100,0000

Рис. 5. Собственные значения и процент исчерпывающей дисперсии, приходящийся на каждый фактор (фрагмент таблицы)

График, представленный на рис. 6, был дополнен отрезками, соединяющими соседние собственные значения, чтобы сделать критерий более наглядным. Основываясь на методе Монте-Карло, Кэттель утверждает, что после точки, где непрерывное падение собственных значений замедляется, уровень остальных собственных значений отражает только случайный «шум». На графике, приведенном на рис. 6, эта точка может соответствовать факторам 2, 5 или 7 (как показано стрелками). Поэтому можно попытаться испытать все решения и посмотреть, которое из них дает

более адекватную картину. Однако, учитывая, что первые производные вольтамперных характеристик волонтеров имеют порядка семи скачков в диапазоне от 5 до 15 В, целесообразно выбрать семь диодно-резистивных ячеек в модели биоимпеданса БАТ.

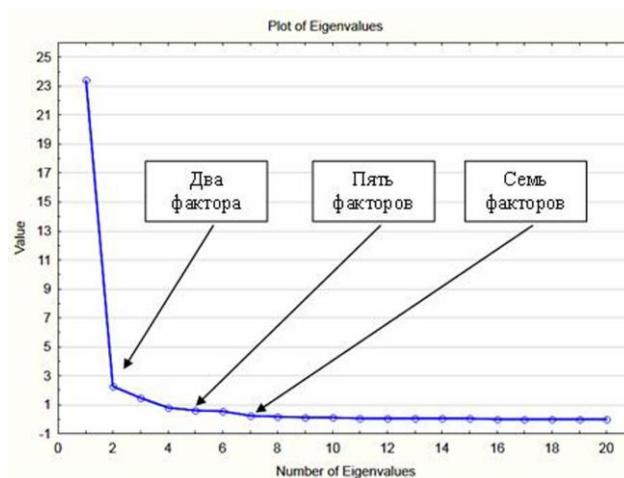


Рис. 6. График собственных значений

Полученные результаты позволяют построить классифицирующие модули для доклинической диагностики социально значимых заболеваний или заболеваний, маскируемых функциональным состоянием организма или профессиональной деятельностью, например пиелонефрита у беременных. Для диагностики достаточно ввести в компьютер координаты вольтамперной характеристики БАТ (30 значений), после чего программа получит семь значений омических сопротивлений, соответствующих модели биоимпеданса, которые исполь-

зуются в качестве входного вектора информативных признаков в нейросетевом классификаторе.

## Заключение

Сравнение модели вольтамперной характеристики, представленной на рис. 1, и экспериментально полученной вольтамперной характеристики БАТ показало, что модель отображает все качественные особенности реальной характеристики. Построена структурно-функциональная модель электропроводности биоматериала на основе диодно-резистивных ячеек. Проведен факторный анализ вольтамперных характеристик биоматериалов, на основании которого показано, что для построения структурно-функциональной модели электропроводности биоматериала достаточно семи диодно-резистивных ячеек.

*Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2870.2013.8.*

## Литература

1. *Нехаенко Н.Е.* Рациональная микроволновая терапия на основе мониторинга потенциала биологически активных точек. Воронеж: ВГТУ, 2002. 113 с. (Моделирование, оптимизация и компьютеризация в сложных системах. Кн. 23)
2. *Шаталова О.В., Авад Али Мохаммед, Адел Мохаммед Аль-Кдаси, Снопков В.Н.* Моделирование влияния электрокардиосигнала на оценку динамической составляющей биоимпеданса // Мед. техника. 2013. № 4. С. 30–32.
3. *Филист С.А., Алексенко В.А., Кассим К.Д.* Гибридные информационные технологии по экспресс-диагностике инфекционных заболеваний на основе многочастотного анализа пассивных свойств биотканей // Известия ЮФУ. Техн. науки. Тематич. выпуск «Медицинские информационные системы». 2010. № 8 (109). С. 12–17.

Поступила в редакцию 17.01.2013 г.

Утверждена к печати 07.05.2014 г.

**Филист Сергей Алексеевич** (✉) – д-р техн. наук, кафедра биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

**Шаталова Ольга Владимировна** – канд. техн. наук, кафедра биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

**Богданов Андрей Сергеевич**, кафедра биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

✉ **Филист Сергей Алексеевич**, тел.: 8 (4712) 58-70-98, 8-903-875-54-69; e-mail: SFilist@gmail.com

## BIOIMPEDANCE MODELS AT THE NONLINEAR VOLT-AMPERE CHARACTERISTIC AND REVERSIBLE BREAKDOWN OF THE DIELECTRIC COMPONENT OF THE BIOMATERIAL

**Filist S.A., Shatalova O.V., Bogdanov A.S.**

*South-West State University, Kursk, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Research objective:** improvement of screening systems of diagnostics of socially significant diseases by modeling of volt-ampere characteristics of bioactive points (BAP) and classification of received models by means of computer technologies.

Research problems:

- development of structurally functional model of electric conductivity of a biomaterial in abnormal zones (in the field of acupuncture points);
- development of a method of formation of space of the informative signs intended for qualifiers of a functional condition of a biomaterial.

**Material and methods.** For the solution of objectives methods of the theory of linear electric chains, methods of mathematical modeling were used. When modeling conductivity of a biomaterial as tools Matlab 8.0 was used.

For modeling of the volt-ampere characteristic of BAP it is offered to use structural-functional models

with diode-resistive cells of symmetric structure. The method of formation of space of the informative signs intended for qualifiers of a functional condition of a biomaterial, the volt-ampere characteristics of a biomaterial consisting in registration in each bioactive point by impact on them by the constant tension stabilized on level in the range from  $-15\text{ V}$  to  $+15\text{ V}$ , changed with a step in  $1\text{ V}$  is developed. By comparison of characteristic points of the volt-ampere characteristic and parameters of structural-functional model the vector of informative signs intended for the neuronetwork qualifier is formed.

**Results.** The structural-functional model of conductivity of a biomaterial on the basis of diode-resistive cells is constructed. The factorial analysis of volt-ampere characteristics of biomaterials on the basis of which it is shown is carried out that for creation of structural-functional model of conductivity of a biomaterial there are enough seven diode-resistive cells.

**Conclusions.** The received results allow to construct classifying modules for preclinical diagnostics of socially significant diseases or the diseases masked by a functional condition of an organism or professional activity, for example, diagnostics of pyelonephritis at pregnant women. For diagnostics it is enough to enter BAP (30 values) then the program will receive seven values of the ohmic resistance corresponding to model of a bioimpedance which are used as an entrance vector of informative signs in the neuronetwork qualifier into the computer of coordinate of the volt-ampere characteristic.

**KEY WORDS:** impedance, bioactive point, model, volt-ampere characteristic, vector of informative signs.

*Bulletin of Siberian Medicine, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 129–135*

#### References

1. Nehaenko N.E. *Rational microwave therapy on the basis of monitoring of potential of biologically active points*. Voronezh: VGTU, 2002. 113 p. (Modeling, optimization and a computerization in difficult systems. Book 23) (in Russian).
2. Shatalova O.V., Awadh Ali Mohammed, Adel Mohammed AlKdasi, Snopkov V.N. Simulation of the effect of electrocardiosignal on evaluation of the dynamic component of bioimpedance. *Medical Equipment*, 2013, no. 4, pp. 30–32 (in Russian).
3. Filist S.A., Aleksenko V.A., Kassim K.D. Hybrid information technologies on express diagnostics of infectious diseases on the basis of the multifrequency analysis of passive properties of biofabrics. *SFU News. Technical science. Thematic release "Medical information systems"*, 2010, no. 8(109), pp. 12–17 (in Russian).

Filist Sergey A. (✉), South-West State University, Kursk

Shatalova Olga V., South-West State University, Kursk

Bogdanov Andrey S., South-West State University, Kursk

✉ Filist Sergey A., Ph.: +7 (4712) 58-70-98, +7-903-875-54-69; e-mail: SFilist@gmail.com