

**ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

УДК 621.37, 615.47.144

DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-9

*Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин,
С. А. Антипенко, В. С. Александров, О. А. Мельников*

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЯ БИОИМПЕДАНСА**

*E. A. Pecherskaya, V. V. Antipenko, O. V. Karpanin,
S. A. Antipenko, V. S. Alexandrov, O. A. Mel'nikov*

**METROLOGICAL ASPECTS OF THE AUTOMATED METHOD
FOR MEASURING BIOIMPEDANCE**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* На современном этапе развития персонализированной медицины актуальной является задача создания автоматизированной системы измерения биомпеданса, обладающей гарантированной точностью, высоким быстродействием и возможностью обработки результатов измерений с помощью ЭВМ. Целью представленного исследования является повышение метрологических характеристик разработанной автоматизированной системы. *Материалы и методы.* Представлено схемотехническое решение автоматизированного метода измерения биоимпеданса, позволяющего определить соотношение разных типов тканей в составе тела человека. *Результаты.* Установлено, что погрешности измерения биоимпеданса возникают при регистрации тока, протекающего через систему параллельно-последовательных сопротивлений и емкостей, представляющих собой эквивалент электрической схемы человека. В результате метрологического анализа автоматизированной системы измерения биомпеданса достигнуто снижение основной относительной погрешности измерения до 0,1 %. *Выводы.* Разработана модель в виде эквивалентной электрической схемы, согласно которой тело человека представляет собой паразитный конденсатор на высоких частотах, в котором одежда выступает диэлектриком, одной из обкладок является тело человека, а второй – земля. Проанализированы фазо-частотные характеристики указанной схемы, что позволило улучшить схемотехническую часть источника тока с целью минимизации влияния паразитной емкости объекта.

A b s t r a c t. *Background.* At the present stage of the development of personalized medicine, it is urgent to create an automated system for measuring bioimpedance with guaranteed accuracy, high speed and the ability to process measurement results using a computer. The aim of the presented study is to improve the metrological characteristics of the developed automated system. *Materials and methods.* A schematic solution of an automated method for measuring bioimpedance is presented, which makes it possible to determine the ratio of different types

of tissues in the composition of the human body. **Results.** It has been established that errors in measuring bioimpedance arise when recording the current flowing through a system of parallel-series resistances and capacitors, which are the equivalent of a human electrical circuit. As a result of the metrological analysis of the automated bioimpedance measurement system, the basic relative measurement error has been reduced to 0.1 %. **Conclusions.** A model has been developed in the form of an equivalent electrical circuit, according to which the human body is a parasitic capacitor at high frequencies, in which clothing acts as a dielectric, one of the plates is the human body, and the other is the earth. The phase – frequency characteristics of this circuit are analyzed, which made it possible to improve the circuitry part of the current source in order to minimize the effect of the parasitic capacitance of the object.

К л ю ч е в ы е с л о в а: биоимпеданс, погрешность измерения, автоматизированная измерительная система, фазо-частотная характеристика.

К e y w o r d s: bioimpedance, measurement error, automated measuring system, phase – frequency response.

Введение

Биоимпедансные анализаторы обладают свойствами портативности, мобильности и повышенного комфорта для длительного мониторинга [1]. Спектр измерения частоты от 100 до 2500 кГц, анализаторы позволяют различать внесение погрешностей внеклеточной и внутриклеточной жидкостью. Для повышения точности измерения решены следующие задачи: проведен обзор электрических моделей биообъектов, разработано схемотехническое решение измерительных узлов и проанализированы погрешности измерений биоимпеданса.

Анализ погрешностей измерения биоимпеданса

Погрешности измерения биоимпеданса могут возникать при регистрации тока, протекающего через систему параллельно-последовательных сопротивлений и емкостей – эквивалент электрической схемы человека [2, 3], вследствие паразитных утечек тока на общий провод, потому как измерительные электроды подключаются к крайним точкам [4]. Разработанная схема источника тока, минимизирующая данные погрешности, представлена на рис. 1.

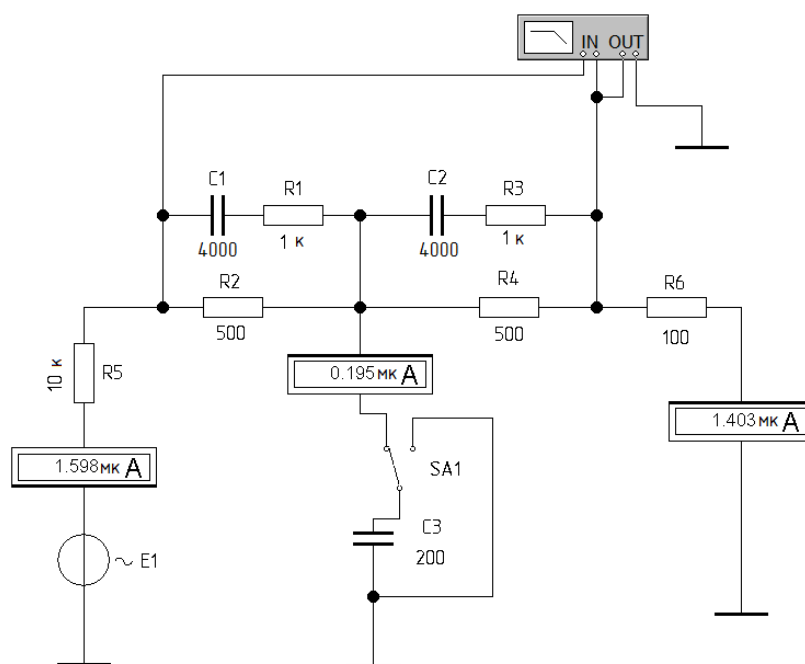
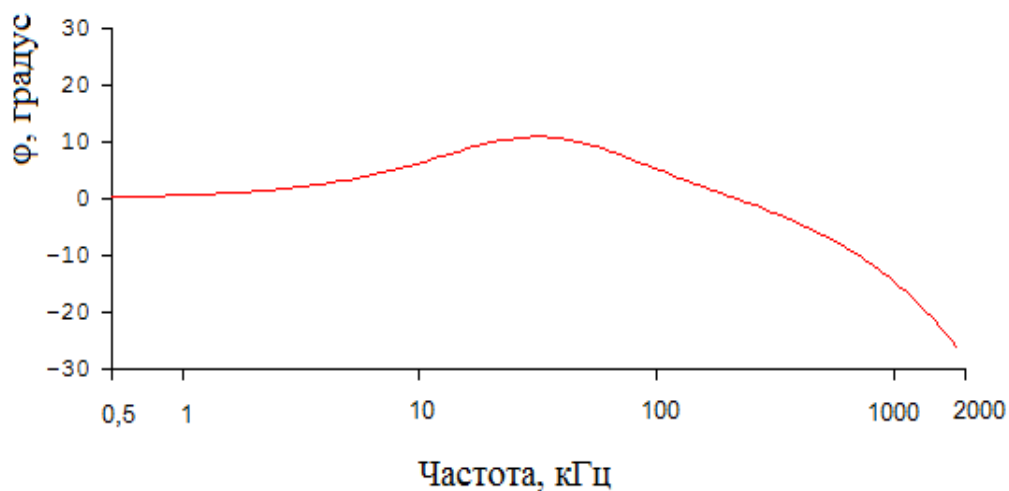


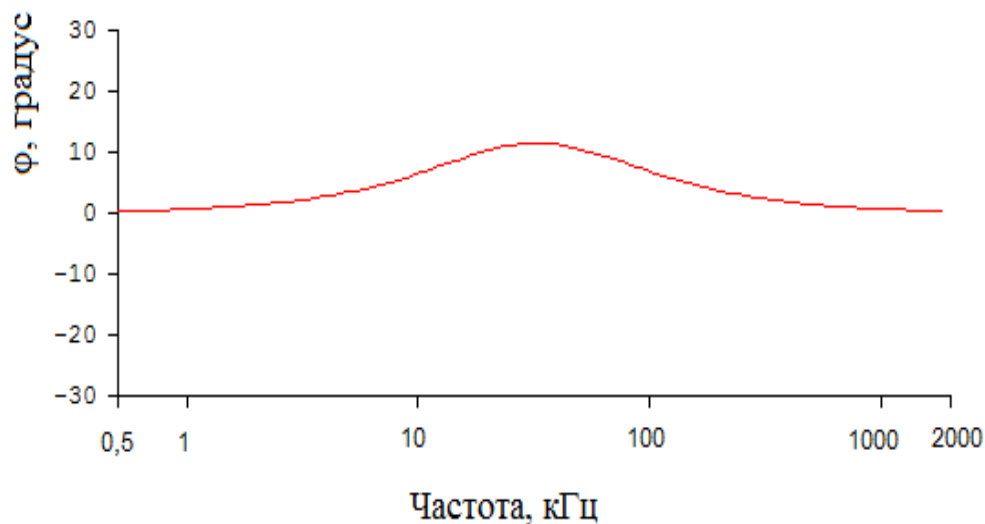
Рис. 1. Схема, моделирующая утечку тока на землю

Цепь состоит из $R1$ – сопротивление межклеточной жидкости, $C1$ – емкость, образованная диэлектрической мембраной клеток, и $R3$ – сопротивление внутриклеточной жидкости. Тело человека представляет собой паразитный конденсатор на высоких частотах, в котором одежда выступает диэлектриком, одной из обкладок является тело человека, а второй – земля. В качестве такого паразитного конденсатора выступает $C3 = 200$ пФ (см. рис. 1), его реактивное сопротивление равно 398 Ом, при напряжении 10 В и частоте 2 МГц. Согласно первому правилу Кирхгофа определено, что паразитный ток составляет $12,2\%$.

На рис. 2 представлены фазо-частотные характеристики (ФЧХ) рассмотренной схемы. Анализ ФЧХ показал, что при увеличении частоты свыше 150 кГц проявляется эффект утечки тока на землю через конденсатор $C3$, что оказывает влияние на погрешность измерения биоимпеданса.



а)



б)

Рис. 2. Фазо-частотные характеристики:

а – при отключенном конденсаторе $C3$; б – при включенном конденсаторе $C3$

На рис. 3 изображена схема, которая состоит из сумматора, необходимого для суммирования токов, и делителя напряжения, с помощью которого производится регулировка пропорции токов. В зависимости от положения движка коэффициент передачи различный, так в верхнем положении $K = 1$, а в нижнем – $K = 0$. При моделировании схемы наиболее подходящая пропорция составила 60% – входящий ток и 40% – выходящий.

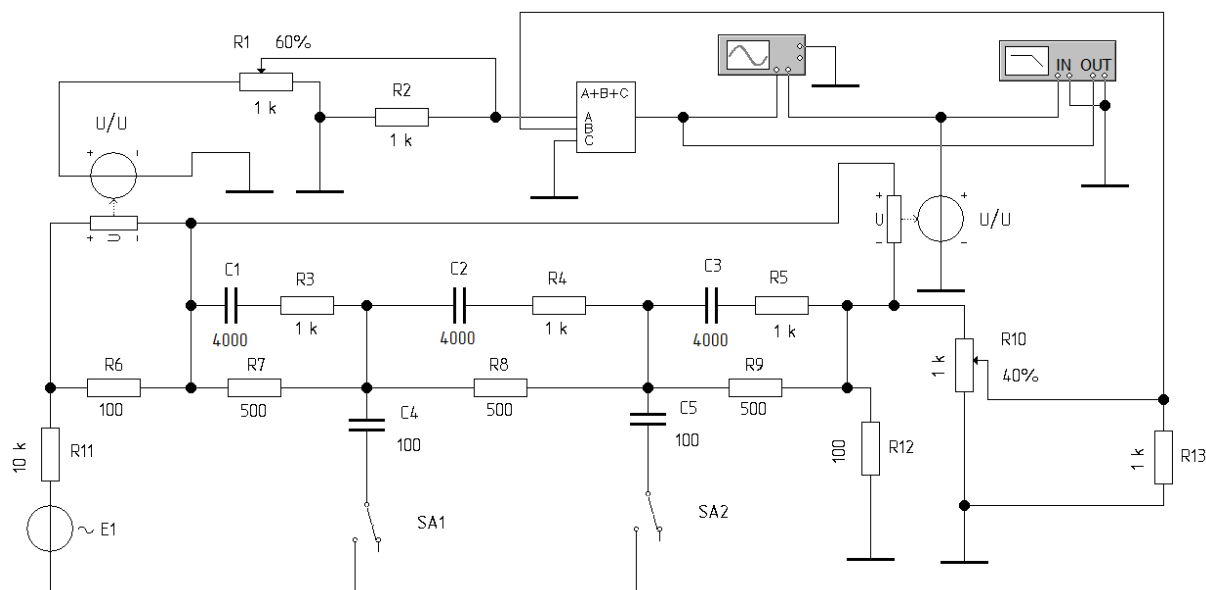
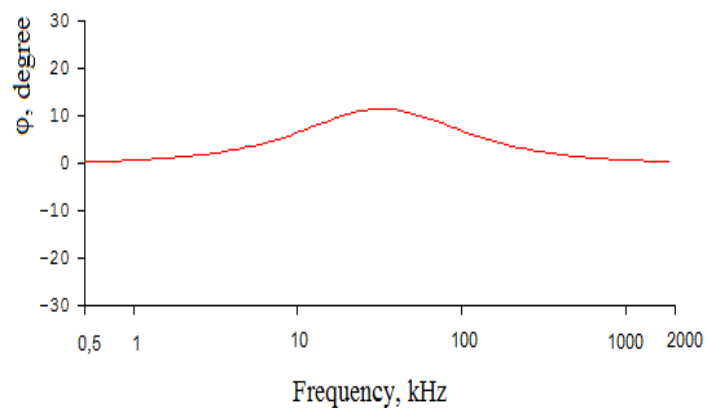
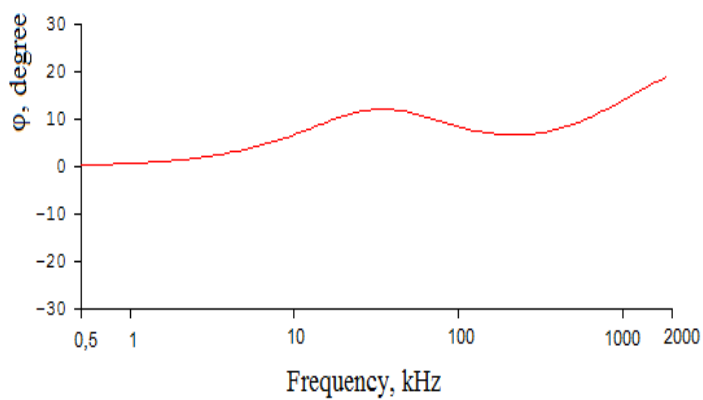


Рис. 3. Схема измерения суммы втекающего (60 %) и вытекающего (40 %) тока с усложненной эквивалентной схемой тела человека

Добавим в схему, представленную на рис. 3, кодоуправляемые источники напряжения. Они необходимы для косвенного измерения токов через падение напряжения на резисторах [5]. На рис. 4 представлены фазо-частотные характеристики рассмотренной схемы.



a)



б)

Рис. 4. Фазо-частотные характеристики при кодоуправляемых источниках напряжения: а – при отключенном конденсаторе C_3 ; б – при включенном конденсаторе C_3

Из полученных фазо-частотных характеристик следует, что влияние конденсатора $C3$ начинается также с частоты около 150 кГц. На рис. 5 представлена усложненная эквивалентная схема тела человека, в которой с помощью сумматора складываются сигналы входного и выходного токов. На рис. 6 представлены фазо-частотные характеристики рассмотренной схемы. Данный способ устранения помехи не универсален, но в данном случае его применение целесообразно.

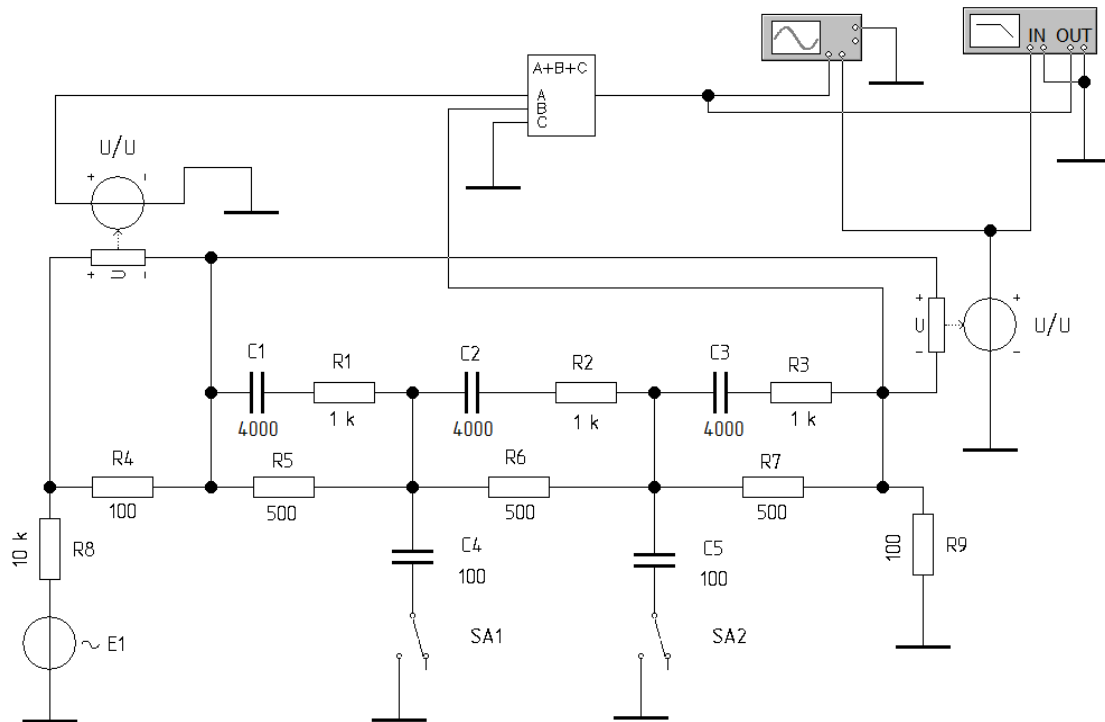


Рис. 5. Схема измерения суммы втекающего и вытекающего тока с усложненной эквивалентной схемой тела человека

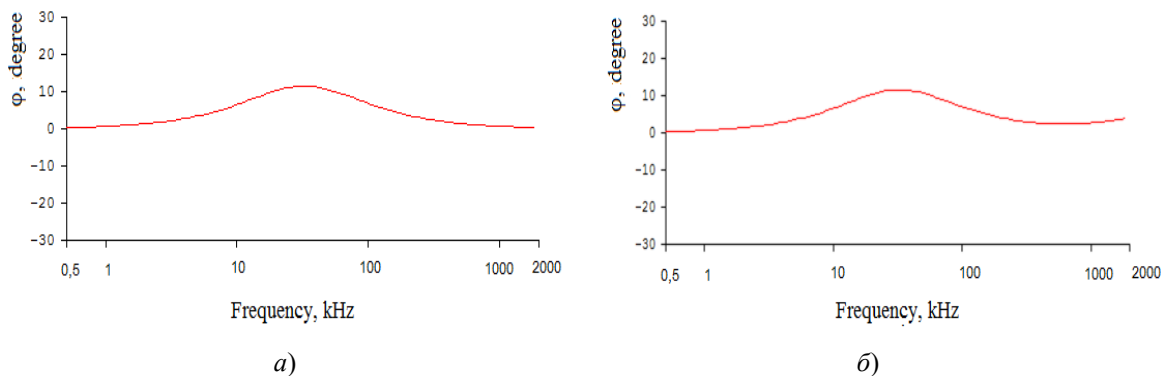


Рис. 6. Фазо-частотные характеристики:
а – при отключенном конденсаторе $C3$; б – при включенном конденсаторе $C3$

Заключение

В данной работе промоделирована схема, учитывающая ток утечки на землю. Представлен объект измерения в виде электрической модели и проведено моделирование процесса, что позволило улучшить схемотехническую часть источника тока с целью увеличения точности измерения и максимально устранить влияние паразитной емкости объекта. Следовательно, меняя пропорции токов электрической модели схемы на RC -элементах, можно снизить влияние паразитной помехи.

Библиографический список

1. *Леонов, С. Д.* Измеритель биоимпеданса с определением активной и реактивной составляющих / С. Д. Леонов, С. А. Образцов, Ю. В. Троицкий // *Медицинская техника*. – 2011. – № 4 (268). – С. 15–18.
2. *Антипенко, В. В.* Основы биоимпедансного анализа для мониторинга клинического состояния заболеваний / В. В. Антипенко, Е. А. Печерская // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы* : сб. ст. по материалам VII Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. – Пенза, 2020. – С. 221–224.
3. *Грачев, А. Ю.* Аппаратно-программный комплекс для автоматизированных измерений биоимпеданса / А. Ю. Грачев, О. В. Карпанин, Е. А. Печерская // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2017. – № 1 (21). – С. 96–108.
4. *Воробьева, Е. Ю.* Факторы, влияющие на точность биоимпедансного анализа / Е. Ю. Воробьева, К. Ю. Крайнова, Е. А. Печерская, А. М. Бибарсова // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы* : сб. науч. ст. VI Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. – Пенза, 2019. – С. 178–179.
5. Automated system for bioimpedance measuring / P. E. Golubkov, E. A. Pecherskaya, O. V. Karpanin, K. Y. Kraynova, D. V. Artamonov, Y. V. Shepeleva // *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2018, Novosibirsk)* : proceedings. – Novosibirsk, 2018. – P. 641–644.
6. Development of an automated bioimpedance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases / V. V. Antipenko, E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, D. V. Artamonov, K. Yu. Spitsina, A. V. Pecherskiy // *JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. – Krasnoyarsk, 2020. – С. 52075.

References

1. Leonov S. D., Obraztsov S. A., Troitskiy Yu. V. *Meditinskaya tekhnika* [Medical equipment]. 2011, no. 4 (268), pp. 15–18. [In Russian]
2. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. st. po materialam VII Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of articles based on the materials of the VII all-Russian interuniversity scientific and practical conference]. Penza, 2020, pp. 221–224. [In Russian]
3. Grachev A. Yu., Karpanin O. V., Pecherskaya E. A. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, and networks in Economics, technology, nature, and society]. 2017, no. 1 (21), pp. 96–108. [In Russian]
4. Vorob'eva E. Yu., Kraynova K. Yu., Pecherskaya E. A., Bibarsova A. M. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. VI Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of scientific articles of the VI all-Russian interuniversity scientific and practical conference.]. Penza, 2019, pp. 178–179. [In Russian]
5. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Kraynova K. Y., Artamonov D. V., Shepeleva Y. V. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2018, Novosibirsk): proceedings*. Novosibirsk, 2018, pp. 641–644.
6. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Artamonov D. V., Spitsina K. Yu., Pecherskiy A. V. *JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. Krasnoyarsk, 2020, p. 52075.

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

doctor of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Антипенко Владимир Викторович
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: v.antipenko7@yandex.ru

Карпанин Олег Валентинович
старший преподаватель,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: karpanino@mail.ru

Антипенко Светлана Анатольевна
инженер,
ПО «Электроприбор»
(Россия, г. Пенза, проспект Победы, 69)
E-mail: zarsveta5@gmail.com

Александров Владимир Сергеевич
студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vsalexrus@gmail.com

Мельников Олег Андреевич
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oleg-068@mail.ru

Antipenko Vladimir Viktorovich
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Karpanin Oleg Valentinovich
senior lecturer,
sub-department of nano-and microelectronics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Antipenko Svetlana Anatolevna
engineer,
PIC «Electropribor»
(69 Pobedy Avenue, Penza, Russia)

Alexandrov Vladimir Sergeevich
student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Melnikov Oleg Andreevich
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин С. А. Антипенко, В. С. Александров, О. А. Мельников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 78–84. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-9.