

## СИММЕТРИЧНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ БИОИМПЕДАНСА

В. В. Антипенко<sup>1</sup>, Е. А. Печерская<sup>2</sup>, Д. В. Якушов<sup>3</sup>, О. В. Карпанин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup>v.antipenko7@yandex.ru, <sup>2</sup>pea1@list.tu, <sup>3</sup>hammer.fate@yandex.ru, <sup>4</sup>karpanino@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования является симметричный источник тока для измерений биоимпеданса. Предметом исследования является определение путей возникновения погрешностей измерения биоимпеданса. Целью является разработка метода уменьшения паразитных утечек высокочастотного тока в процессе измерения биоимпеданса. *Материалы и методы.* Для определения источников возникновения погрешности измерений используется представление о путях прохождения паразитных токов утечки в землю. *Результаты.* Предложен метод устранения паразитного влияния тока утечки из объекта измерения в землю. В результате схема измерения биоимпеданса нечувствительна к любым видам токов утечки от объекта измерения в землю. *Выводы.* Предложенный симметричный источник тока для измерений биоимпеданса позволяет полностью устранить влияние паразитного тока утечки из объекта измерения в землю, что положительным образом влияет на точность и достоверность определения параметров тела человека.

**Ключевые слова:** биоимпеданс, ток, утечка, человек, измерение, погрешность, электроды

**Для цитирования:** Антипенко В. В., Печерская Е. А., Якушов Д. В., Карпанин О. В. Симметричный источник тока для измерений биоимпеданса // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 33–38. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-4

## SYMMETRICAL CURRENT SOURCE FOR BIOIMPEDANCE MEASUREMENTS

V.V. Antipenko<sup>1</sup>, E.A. Pecherskaya<sup>2</sup>, D.V. Yakushov<sup>3</sup>, O.V. Karpanin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>v.antipenko7@yandex.ru, <sup>2</sup>pea1@list.tu, <sup>3</sup>hammer.fate@yandex.ru, <sup>4</sup>karpanino@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The object of the study is a symmetrical current source for bioimpedance measurements. The subject of the study is to determine the ways of occurrence of errors in the measurement of bioimpedance. The aim is to develop a method for reducing parasitic leakage of high-frequency current in the process of bioimpedance measurement. *Materials and methods.* To determine the sources of measurement error, the idea of the paths of parasitic leakage currents into the ground is used. *Results.* A method is proposed to eliminate the parasitic effect of leakage current from the measuring object into the ground. As a result, the bioimpedance measurement circuit is insensitive to any types of leakage currents from the measuring object into the ground. *Conclusions.* The proposed symmetrical current source for bioimpedance measurements makes it possible to completely eliminate the influence of parasitic leakage current from the measuring object into the ground, which positively affects the accuracy and reliability of determining the parameters of the human body.

**Keywords:** bioimpedance, current, leakage, person, measurement, error, electrodes

**For citation:** Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Yakushov D.V., Karpanin O.V. Symmetrical current source for bioimpedance measurements. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3): 33–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-4

### Введение

Биоимпедансный анализ – метод диагностики состава тела человека посредством измерения комплексного электрического сопротивления участков тела в разных частях организма. Данный метод диагностики позволяет неинвазивно на ранних стадиях определить патологические

процессы в организме и предпринять своевременное лечение [1]. В данный момент биоимпедансный анализ достаточно хорошо изучен, однако используется преимущественно как дополнение к основным видам медицинской диагностики [2]. Низкая достоверность результата обусловлена невозможностью обеспечить стабильность результата измерения, значительное влияние оказывает положение пациента, ориентация в пространстве и т.д. [3]. Целью является повышение стабильности измерения биоимпеданса за счет устранения влияния паразитных утечек тока.

### Принцип измерения

В процессе измерения на объект подается высокочастотный стабильный ток через токовые электроды. Через потенциальные электроды измеряется падение напряжения на определенном участке тела человека. Фактически реализован четырехзондовый метод измерения сопротивления (рис. 1) [4, 5].

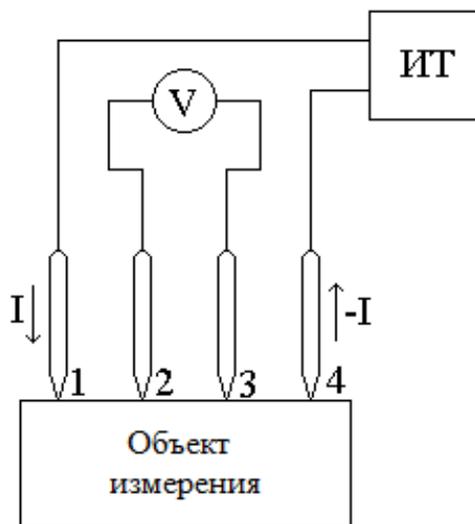


Рис. 1. Четырехзондовый метод измерения сопротивления:

ИТ – источник тока;  $V$  – вольтметр (дифференциальный усилитель);

$I$  и  $4$  – токовые электроды;  $2$  и  $3$  – потенциальные электроды;  $I$  – прямой ток;  $-I$  – возвратный ток

Частота тока меняется согласно установленной сетке частот и может составлять единицы мегагерц. В результате цикла измерения возможно получение зависимости напряжения от частоты, а также фазы измеренного сигнала от частоты. По двум характеристикам можно определить параметры эквивалентной модели человека (сопротивления, емкости), а уже исходя из них пересчитать биологические параметры [6, 7].

### Пути утечки тока и их влияние на измерения

В реальности все окружающие нас объекты имеют паразитную емкость и сопротивление относительно земли [8]. В биоимпедансной измерительной системе участвуют объект измерения (человек), измерительный блок, в состав которого входит источник тока и дифференциальный усилитель, а также персональный компьютер, где отражается процесс и результат измерения. Все эти объекты имеют паразитные емкости и сопротивления утечки в землю. Кроме того, в большинстве бытовых приборов специально устанавливаются конденсаторы на землю для повышения безопасности эксплуатации приборов. При биоимпедансных измерениях на объект измерения подаются частоты вплоть до нескольких мегагерц и на этих частотах паразитные емкости становятся сравнимыми с емкостями эквивалентной модели человека, что приводит к увеличению погрешности измерений. Учесть данные паразитные емкости – задача нетривиальная, поэтому необходимо создать устройство, нечувствительное к такого рода утечкам [9]. С учетом паразитных емкостей утечки схема измерения примет вид, отображенный на рис. 2.

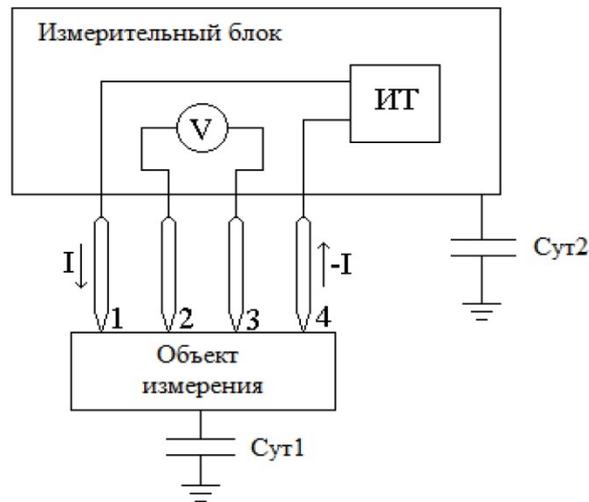


Рис. 2. Схема измерения с учетом емкостей утечки ( $C_{ут1}$  и  $C_{ут2}$ )

В подавляющем большинстве в биоимпедансных измерителях используется «классический» источник тока на операционном усилителе, представленный на рис. 3, либо источник тока с заземленной нагрузкой.

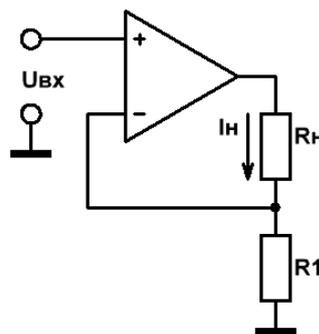


Рис. 3. «Классический» источник тока

В обоих вариантах источников тока подразумевается, что возвратный ток будет втекать в общую шину схемы. Поскольку, как правило, общая шина устройства имеет наибольшую паразитную емкость относительно земли (а зачастую эта емкость вводится искусственно для безопасности), то часть измерительного тока течет мимо объекта измерения в землю и возвращается обратно в измерительный блок (рис. 4).

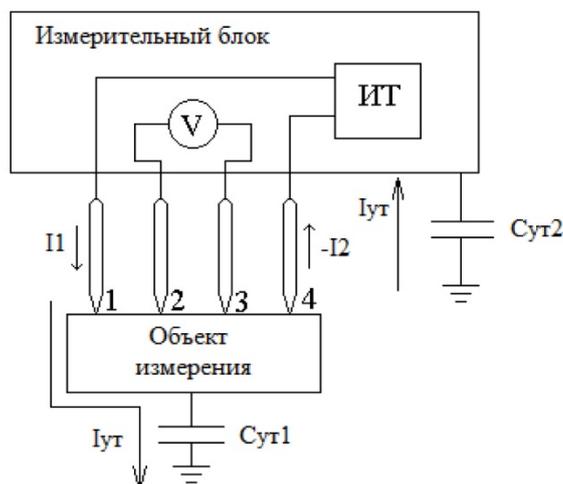


Рис. 4. Путь тока утечки

В таком случае втекающий в объект измерения ток ( $I_1$ ) не равен вытекающему току ( $-I_2$ ), что оказывает сильное влияние на точность измерения падения напряжения. Паразитные емкости имеют нестабильный характер и могут зависеть от положения человека в пространстве, а также иметь частотную зависимость [10].

#### *Устранение влияния тока утечки на результат измерения*

Для устранения паразитного влияния тока утечки необходимо применить симметричный источник тока. В таком источнике тока напряжение на положительном токовом электроде равно напряжению на отрицательном токовом электроде со знаком минус. Происходит инверсия напряжения на отрицательном токовом электроде. Это легко достигается введением дополнительного операционного усилителя в схему, который будет инвертировать напряжение на положительном токовом электроде, а на его выход подключается отрицательный токовый электрод. В результате при симметричном подключении человека к схеме измерения (рука–рука, нога–нога) и горизонтальном его расположении удастся почти устранить влияние паразитного тока утечки на результат измерения. При таком подключении объект измерения можно представить в виде Т-образной схемы (рис. 5).

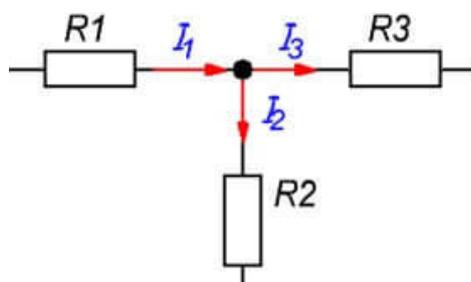


Рис. 5. Упрощенная модель измерений

На рис. 5 резисторы  $R_1$  и  $R_3$  – комплексные сопротивления левой и правой части объекта измерения, а резистор  $R_2$  – комплексное сопротивление утечки. При равенстве  $R_1$  и  $R_3$  и применении симметричного источника тока значение сопротивления  $R_2$  не оказывает влияния на падение напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_3$  согласно закону Кирхгофа, а значит, повышается стабильность и точность измерений.

В случае наиболее распространенного подключения рука–нога удастся также добиться значительного снижения погрешности измерения за счет применения симметричного источника тока. Это обусловлено тем, что минимальное сопротивление и максимальные утечки у человека в области туловища и объект измерения можно также представить в виде Т-образной схемы, хотя и менее идеальной. Путь протекания измерительного тока в случае подключения рука–нога отражен на рис. 6.



Рис. 6. Путь протекания тока рука–нога

Из рис. 6 видно, что чем шире область протекания тока, то тем ниже сопротивление участка тела, также наблюдается некоторая симметрия объекта измерения по отношению к электродам. При варьировании точек подключения электродов можно достичь наилучших результатов.

### Заключение

Симметричный источник тока для измерений биоимпеданса в совокупности с горизонтальным расположением человека позволяет значительно уменьшить влияние тока утечки на результат измерения. Это обеспечивает высокую повторяемость результатов измерения и позволяет считать биоимпедансный анализ достоверным методом диагностики.

### Список литературы

1. Anamika P., Mukesh R. Bioimpedance analysis of vascular tissue and fluid flow in human and plant body: A review // *Biosystems engineering*. 2020. Vol. 197. P. 170–178.
2. Tronstad C., Strand-Amundsen R., Possibilities in the application of machine learning on bioimpedance time-series // *Journal of Electrical Bioimpedance*. 2019. Vol. 10. P. 24–33.
3. Finch P. Intra-abdominal fat: Comparison of computed tomography fat segmentation and bioimpedance spectroscopy // *Malawi Medical Journal*. 2017. Vol. 29. P. 155–159.
4. Антипенко В. В., Печерская Е. А., Левин А. И. [и др.]. Исследование взаимодействия электродов с тканью при биоимпедансной диагностике // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2022. № 2. С. 114–119.
5. Печерская Е. А., Антипенко В. В., Карпанин О. В. [и др.]. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2020. № 3. С. 78–84.
6. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O. et al. Development of an automated bioimpedance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 1515 (5). P. 052075. doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052075
7. Antipenko V. V., Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O. et al. Analysis of methodological errors in measuring a digital automated bio-impedance meter // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 1695 (1). P. 012051. doi: 10.1088/1742-6596/1695/1/012051
8. Антипенко В. В., Кульков В. Н., Печерская Е. А., Антипенко С. А. Разработка алгоритма функционирования системы для определения достижения эффекта трансмуральности // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2020. № 4. С. 92–100.
9. Антипенко В. В., Печерская Е. А., Антипенко С. А. Схема для одновременного измерения биоимпеданса кожи, восприимчивости и потенциала // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы*. Пенза, 2021. С. 270–272.
10. Levin A. I., Pecherskaya E. A., Varenik Yu. A. et al. Application of an automated complex resistance and phase difference measuring method for rheographic studies of human cardiovascular system // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. № 2086 (1). P. 012113. doi: 10.1088/1742-6596/2086/1/012113

### References

1. Anamika P., Mukesh R. Bioimpedance analysis of vascular tissue and fluid flow in human and plant body: A review. *Biosystems engineering*. 2020;197:170–178.
2. Tronstad C., Strand-Amundsen R., Possibilities in the application of machine learning on bioimpedance time-series. *Journal of Electrical Bioimpedance*. 2019;10:24–33.
3. Finch P. Intra-abdominal fat: Comparison of computed tomography fat segmentation and bioimpedance spectroscopy. *Malawi Medical Journal*. 2017;29:155–159.
4. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Levin A.I. et al. Metrological aspects of the automated method of measuring bioimpedance. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(2):114–119. (In Russ.)
5. Pecherskaya E.A., Antipenko V.V., Karpanin O.V. et al. Metrological aspects of the automated method of measuring bioimpedance. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(3):78–84. (In Russ.)
6. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O. et al. Development of an automated bioimpedance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;(1515):052075. doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052075
7. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O. et al. Analysis of methodological errors in measuring a digital automated bio-impedance meter. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;(1695):012051. doi: 10.1088/1742-6596/1695/1/012051

8. Antipenko V.V., Kul'kov V.N., Pecherskaya E.A., Antipenko S.A. Development of a system functioning algorithm to determine the achievement of the transmural effect. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(4):92–100. (In Russ.)
9. Antipenko V.V., Pecherskaya E.A., Antipenko S.A. Scheme for simultaneous measurement of skin bioimpedance, susceptibility and potential. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy = Information technologies in science and education. Problems and prospects.* Penza, 2021: 270–272. (In Russ.)
10. Levin A.I., Pecherskaya E.A., Varenik Yu.A. et al. Application of an automated complex resistance and phase difference measuring method for rheographic studies of human cardiovascular system. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;(2086):012113. doi: 10.1088/1742-6596/2086/1/012113

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Владимир Викторович Антипенко**

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

**Vladimir V. Antipenko**

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Екатерина Анатольевна Печерская**

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

**Ekaterina A. Pecherskaya**

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

**Дмитрий Викторович Якушов**

соискатель,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: hammer.fate@yandex.ru

**Dmitriy V. Yakushov**

Applicant,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Олег Валентинович Карпанин**

заведующий службой калибровки и ремонта,  
кафедра информационно-измерительной  
техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: karpanino@mail.ru

**Oleg V. Karpanin**

Head of calibration and repair service,  
sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 05.06.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 03.07.2023**

**Принята к публикации / Accepted 07.08.2023**