

2. Коношков А.С., Летягин К.В. Диагностическая и лечебная тактика при посттравматических носовых кровотечениях // Российская оториноларингология. 2012. № 1. С. 99-102.
3. Левчук И.П., Третьяков Н.В. Медицина катастроф. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2011. 246 с.
4. Pasquali P. Cryosurgery: A practical manual. – New York: Springer, 2015. 441 p.
5. Евдулов О.В., Магомадов Р.А.-М., Мирземагомедова М.М., Мирземагомедов Р.Г., Аминов Г.И. Термоэлектрическая система для теплового воздействия на конечности человека // Медицинская техника. 2022. № 2. С. 1-4.
6. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: Progress, challenges and perspectives // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 437. Art. ID: 135268.
7. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: Design, optimization and advancement // Nano Energy. 2021. Vol. 90. Art. ID: 106572.
8. Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Исабекова Т.И., Аминов Г.И., Аминова И.Ю. Математическая модель термоэлектрического устройства для лечения панариция методом местной гипотермии // Медицинская техника. 2022. № 2. С. 51-54.
9. Абоуеллаиль А.А., Чан Ц., Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Борталевич С.И., Солдатов Д.А. Лабораторное обоснование термоэлектрического метода контроля переходного сопротивления контактов // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 70-78.
10. <http://www.kryotherm.spb.ru> (дата доступа: 18.01.2023).
11. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Набиев Н.А., Рагимова Т.А. Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения // Медицинская техника. 2019. № 2. С. 12-14.

Олег Викторович Евдулов,  
 д-р техн. наук, доцент,  
 Наби Абдулаевич Набиев,  
 аспирант,  
 кафедра теоретической и  
 общей электротехники,  
 Ганати Янгиевич Ахмедов,  
 д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой,  
 кафедра физики,  
 Мадина Абдулаевна Хазамова,  
 канд. техн. наук, зав. кафедрой,  
 Сарабике Гусеновна Гасанова,  
 аспирант,  
 кафедра теоретической и  
 общей электротехники,  
 ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный  
 технический университет»,  
 г. Махачкала, Республика Дагестан,  
 e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

**Б.Б. Горбунов, И.В. Нестеренко, С.В. Селищев**

## **Оценка влияния амплитуды второй фазы деполяризующего биполярного полусинусоидального импульса дефибрилляции на его энергетическую эффективность**

### **Аннотация**

На основе данных моделирования реакции находящегося в состоянии имитационной фибрилляции кардиомиоцита на биполярные деполяризующие полусинусоидальные импульсы дефибрилляции с разными значениями относительной амплитуды второй фазы были построены графики зависимости доли цикла фибрилляции, на которой импульс дефибрилляции вызывает долговременное удлинение рефрактерного периода кардиомиоцитов (индекса полноты дефибрилляции), от энергии импульса дефибрилляции. Построенные графики показали, что биполярный дефибрилляционный импульс обеспечивает рост индекса полноты дефибрилляции при более низких значениях энергии, чем монополярный.

### **Введение**

В исследовании, выполненном на модели кардиомиоцита желудочков сердца человека ten Tusscher-Panfilov 2006 [1] в среде моделирования BeatBox [2], было установлено, что импульсы дефибрилляции вызывают долговременное удлинение рефрактерного периода кардиомиоцитов, что препятствует распространению волны фибрилляции [3]. Этот эффект ранее был обнаружен в экспериментальных исследованиях [4]-[7]. В работе [8] было обнаружено наличие на диаграмме энергии / фазы цикла фибрилляции областей эффективности деполяризующего монополярного импульса дефибрилляции, в которых достигается долговременное удлинение рефрактерного периода кардиомиоцитов, в работе [9] аналогичный результат был получен для гиперполяризующего монополярного импульса. В работе [10] было выполнено сравнение областей эффективности полусинусоидальных монополярного и биполярного деполяризующих полусинусоидальных дефибрилляционных импульсов. В работе [11] была исследована зависимость от энергии монополярного импульса дефибрилляции доли цикла фибрилляции, на которой импульс дефибрилляции вызывает долговременное удлинение рефрактерного периода кардио-

миоцитов (индекса полноты дефибрилляции) для ряда значений длительности импульса.

**Целью данного исследования** является сравнение зависимостей индекса полноты дефибрилляции от относительной энергии биполярного полусинусоидального деполяризующего импульса дефибрилляции с оптимальными длительностями фаз, установленными на базе гипотезы гарантированной дефибрилляции [12], при различных значениях относительной амплитуды второй фазы импульса.

### **Материалы и методы**

Исследования проводились на модели миоцита желудочков сердца человека ten Tusscher-Panfilov 2006 [1], находящейся под воздействием имитационной фибрилляции, в среде моделирования BeatBox [2] под операционной системой «Fedoga». Фибрилляцию имитировали подачей деполяризующих стимулов возбуждения амплитудой 80 мкА/см<sup>2</sup> и длительностью 0,5 мс с частотой 240 мин<sup>-1</sup> (предельной частотой возбуждения, воспринимаемой моделью кардиомиоцита [3]). На диаграмме энергия/фаза цикла фибрилляции были построены области эффективности деполяризующих полусинусоидальных монополярного импульса и биполярных импульсов дефибрил-

ляции с рядом значений относительной амплитуды второй фазы  $-0,3$ ;  $-0,4$ ;  $-0,5$ ;  $-0,6$ ;  $-0,7$ ;  $-1$ . Диаграммы, построенные для монополярного импульса и биполярного импульса дефибрилляции при значении относительной амплитуды второй фазы, равной  $-0,5$ , представлены в работе [10]. Длительность импульса монополярной формы и фаз импульса биполярной формы составляла 53 мс, что соответствует энергетически оптимальной длительности импульсов дефибрилляции, полученной в работе [12].

При построении зависимостей индекса полноты дефибрилляции использовались значения энергии относительно пороговой энергии возбуждения модели кардиомиоцита монополярным полусинусоидальным импульсом длительностью 53 мс. При этом значении длительности монополярного импульса пороговый коэффициент энергии возбуждения составляет  $132,1 \text{ мкА}^2 \cdot \text{мс}/\text{см}^2$ . Для построения зависимостей индекса полноты дефибрилляции от относительной энергии импульса была применена свободно распространяемая программная система для математических вычислений «GNU Octave», использующая совместимый с MATLAB язык высокого уровня [13]. Написанный для «GNU Octave» скрипт вычислял индекс полноты дефибрилляции на относительных уровнях энергии, представленных списком в текстовом файле. Были заданы уровни от 0,1 до 100 по ряду E192. Данные нижних и верхних порогов областей эффективности дефибрилляции были подготовлены в отдельных текстовых файлах для каждого значения относительной амплитуды второй фазы. Результаты вычислений записывались в отдельный файл для каждого значения относительной амплитуды второй фазы. Результаты вычислялись методом линейной интерполяции по значениям двух ближайших точек исходных данных.

Данные моделирования и другие материалы, относящиеся к работе, размещены на онлайн-ресурсе ResearchGate [14].

## Результаты и обсуждение

Определенная на модели энергетически оптимальная длительность монополярного полусинусоидального импульса возбуждения составила 22,4 мс при пороговом коэффициенте энергии  $107,1 \text{ мкА}^2 \cdot \text{мс}/\text{см}^2$ . Разница энергетически оптимальных длительностей импульсов возбуждения и дефибрилляции согласуется с результатом, полученным в экспериментах на животных. Так, в работе [15] определена энергетически оптимальная длительность прямоугольных монополярных импульсов кардиостимуляции 1,3 мс, а в работе [16] – энергетически оп-

тимальная длительность прямоугольных монополярных импульсов дефибрилляции 4 мс.

На рис. 1 представлена зависимость индекса полноты дефибрилляции от относительной энергии полусинусоидальных деполяризующих биполярных импульсов с рядом значений коэффициентов амплитуды второй фазы и монополярного импульса (относительная амплитуда второй фазы равна 0).

Из рис. 1 видно, что в диапазоне относительных значений энергии от 1 до 10 с увеличением модуля относительной амплитуды второй фазы дефибрилляционного полусинусоидального деполяризующего биполярного импульса более высокий индекс полноты дефибрилляции достигается при более низких значениях относительной энергии по сравнению с монополярным импульсом, при этом на больших значениях индекса полноты дефибрилляции такой рост незначителен после значения относительной амплитуды второй фазы, равного  $-0,5$ .

## Заключение

Полученные результаты показали, что биполярный дефибрилляционный импульс в диапазоне относительных значений энергии от 1 до 10 обеспечивает увеличение индекса полноты дефибрилляции при более низких значениях энергии, чем монополярный. При этом значительный рост энергетической эффективности импульса в указанном диапазоне относительных энергий наблюдается при увеличении значения относительной амплитуды второй фазы до  $-0,5$ . Такое значение относительной амплитуды второй фазы, как правило, используется в выпускаемых дефибрилляторах. Оптимальное значение модуля относительной амплитуды второй фазы для квазисинусоидального биполярного импульса, равное 0,55, было установлено в экспериментах на животных [17].

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (соглашение № 075-03-2023-024 от 13.01.2023 г.).*

### Список литературы:

1. Ten Tusscher K.H., Panfilov A.V. Alternans and spiral breakup in a human ventricular tissue model // American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology. 2006. Vol. 291. № 3. PP. H1088-H1100.
2. Antonioletti M., Biktashev V.N., Jackson A., Kharche S.R., Stry T., Biktasheva I.V. BeatBox – HPC Simulation Environment for Biophysically and Anatomically Realistic

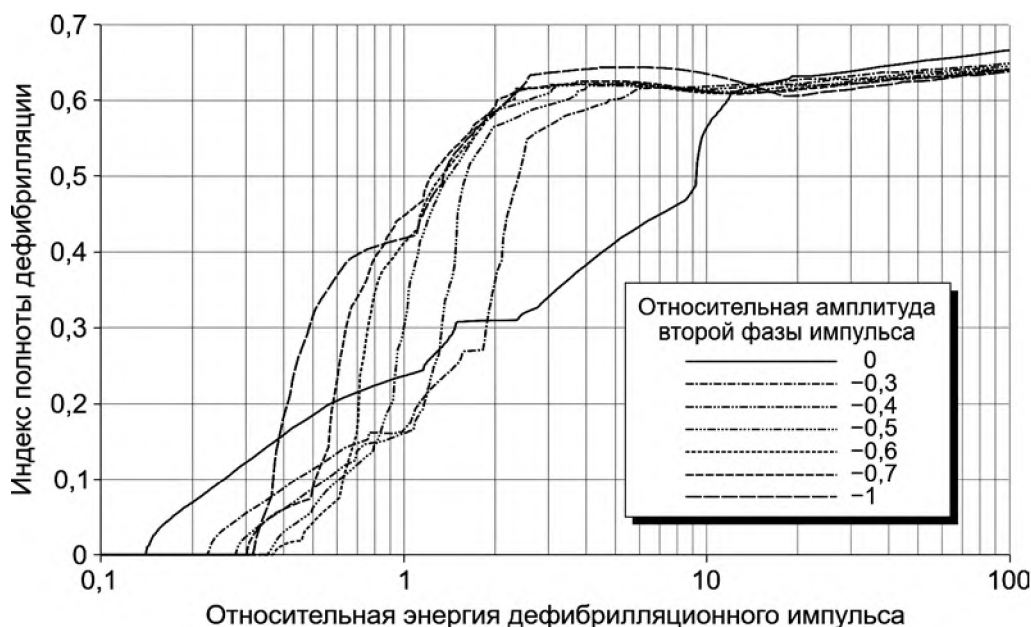


Рис. 1. Зависимость индекса полноты дефибрилляции от относительной энергии дефибрилляционных полусинусоидальных деполяризующих биполярных импульсов с рядом значений относительной амплитуды второй фазы и монополярного импульса (относительная амплитуда второй фазы равна 0)

- Cardiac Electrophysiology // PLoS One. 2017. Vol. 12. № 5. P. e0172292.
3. *Gorbunov B.B.* Study of the impact of rectangular current pulses on the ten Tusscher-Panfilov model of human ventricular myocyte // Journal of Biomedical Science and Engineering. 2017. Vol. 10. № 7. PP. 355-366.
  4. *Sweeney R.J., Gill R.M., Steinberg M.I., Reid P.R.* Ventricular refractory period extension caused by defibrillation shocks // Circulation. 1990. Vol. 82. № 3. PP. 965-972.
  5. *Sweeney R.J., Gill R.M., Reid P.R.* Characterization of refractory period extension by transcardiac shock // Circulation. 1991. Vol. 83. № 6. PP. 2057-2066.
  6. *Dillon S.M.* Optical recordings in the rabbit heart show that defibrillation strength shocks prolong the duration of depolarization and the refractory period // Circulation Research. 1991. Vol. 69. № 3. PP. 842-856.
  7. *Tovar O.H., Jones J.L.* Relationship between «extension of refractoriness» and probability of successful defibrillation // The American Journal of Physiology. 1997. Vol. 272. № 2. Pt. 2. PP. H1011-H1019.
  8. *Gorbunov B.B., Vostrikov V.A., Nesterenko I.V., Telyshev D.V.* Areas of effectiveness of defibrillating pulse in the energy/phase diagram for the fibrillation cycle on the cardiomyocyte model // International Journal of Bioelectromagnetism. 2018. Vol. 20. № 1. PP. 1-4.
  9. *Горбунов Б.Б., Селищев С.В.* Реакция модели кардиомиоцита, находящегося под воздействием фибрилляции, на гиперполяризующий импульс // Медицинская техника. 2019. № 2. С. 5-8.
  10. *Горбунов Б.Б., Нестеренко И.В., Тельшев Д.В., Селищев С.В.* Области эффективности полусинусоидальных монополярного и биполярного деполяризующих дефибрилляционных импульсов на диаграмме энергия / фаза цикла фибрилляции // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Т. 5. № 4. С. 369-379.
  11. *Gorbunov B.B., Vostrikov V.A., Galyastov A.A., Telyshev D.V.* The dependence of the fibrillation cycle fraction on which the defibrillation pulse is effective on the pulse energy / 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), St. Petersburg and Moscow, Russia. 2020. PP. 2486-2489.
  12. *Gorbunov B.B., Vostrikov V.A., Galyastov A.A., Nesterenko I.V., Telyshev D.V., Denisov M.V.* Guaranteed defibrillation on a cardiomyocyte model / 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), IEEE. 2020. PP. 0058-0061.
  13. GNU Octave: Scientific Programming Language / <https://www.gnu.org/software/octave/>. 2023.
  14. *Gorbunov B.B., Nesterenko I.V., Selishchev S.V.* Evaluation of the influence of the second phase amplitude of the depolarizing biphasic half-sinusoidal defibrillation pulse on its energy efficiency: Supplementary resources / <https://www.researchgate.net/publication/367964962>, 2023.
  15. *Angelakos E.T., Torres J.C.* The efficiency of electrical pulses for cardiac stimulation // Cardiologia (Basel). 1964. Vol. 44. № 6. PP. 355-365.
  16. *Koning G., Schneider H., Hoelen A.J., Reneman R.S.* Amplitude-duration relation for direct ventricular defibrillation with rectangular current pulses // Medical & Biological Engineering. 1975. Vol. 13. № 3. PP. 388-395.
  17. *Востриков В.А., Богушевич М.С.* Влияние амплитуды 2-й фазы биполярного синусоидального импульса на эффективность наружной дефибрилляции желудочков сердца // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2000. Т. 129. Прил. № 2. С. 40-41.

*Борис Борисович Горбунов,  
ведущий инженер,  
Игорь Валерьевич Нестеренко,  
ведущий инженер,  
Сергей Васильевич Селищев,  
д-р физ.-мат. наук, профессор, директор,  
Институт биомедицинских систем,  
Национальный исследовательский  
университет «МИЭТ»,  
г. Москва, г. Зеленоград,  
e-mail: boris.b.gorbunov@org.miet.ru*

## В.А. Карпухин, А.Е. Косоруков, А.В. Самородов, А.А. Бурцев, В.А. Загрядский

### Исследование адекватности нелинейной электрической модели кожи

#### Аннотация

Исследовалась адекватность нелинейной схемы замещения электрического адмиттанса кожи в зависимости от вида разложения и числа членов степенного ряда, аппроксимирующего нелинейную проводимость. В результате проведенных исследований установлено, что для разложений нелинейных компонентов по степеням напряжения функция отклика модели адекватна при количестве компонентов разложения 5 и более, а для разложений нелинейных компонентов по степеням зондирующего тока функция отклика модели неадекватна во всем исследуемом диапазоне числа компонентов разложения. Полученные результаты позволяют обосновать выбор модели описания электрического адмиттанса кожи человека.

#### Введение

В медицинской практике широко используется измерение электрического импеданса кожи, позволяющего определять ее влажность, выявлять на ранних стадиях злокачественные новообразования, контролировать чрескожную импрегнацию лекарственных веществ, проводить оценку психоэмоционального состояния, а также осуществлять электропунктурную диагностику [1]-[3]. Для описания электрического импеданса кожи применяется много схем ее замещения, которые, как правило, основаны на различных топологиях RC-элементов [4]-[8]. Наиболее удачной моделью кожи является схема замещения, предложенная в работе [9] и исследованная в работе

[10]. Данная модель позволяет осуществлять численную оценку нелинейных биофизических процессов, происходящих в эпидермисе. Однако адекватность этой модели не была установлена.

**Целью настоящей работы** является оценка адекватности функции отклика нелинейной модели электрического адмиттанса кожи (ЭАК) человека на токовое воздействие.

#### Материалы и методы

В качестве модели ЭАК была использована двухкомпонентная нелинейная схема замещения с сосредоточенными параметрами, состоящая из параллельно соединенных нелинейной проводимости и линейной емкости (*рис. 1*) [9].