

3. Jatsun S.M., Jatsun A.S., Rukavitsyn A.N. Designing a Mechanotherapy Device for Rehabilitation of Lower Extremities of Humans // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 50 (2). PP. 128-133.
4. Jatsun S.M., Jatsun A.S., Rukavitsyn A.N., Politov E.N. System for Monitoring Motion of Lower Limbs Used for Assessment of Patient's Physical Rehabilitation // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 50 (3). PP. 184-188.
5. Корневский Н.А., Яцун С.Ф., Яцун А.С., Дмитриева В.В. Экзоскелет с биотехнической обратной связью для вертикализации пациентов // *Медицинская техника*. 2017. № 4. С. 42-45.
6. Li Na, Lei Yan, Hua Qian, Hongfang Wu, Jian Wu, Sen Men Review on Lower Extremity Exoskeleton Robot // *Open Automation and Control Systems Journal*. 2015. Vol. 7. PP. 441-453.

Светлана Михайловна Яцун,
д-р мед. наук, профессор,
зав. кафедрой медико-биологических дисциплин,
ФГБОУ ВО «Курский
государственный университет»,
Андрей Сергеевич Яцун,
канд. техн. наук, зав. научно-исследовательской
лабораторией «Мехатроника и робототехника»,
Александр Николаевич Рукавицын,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра механики, мехатроники
и робототехники,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск,
e-mail: alruk75@mail.ru

М.К. Седанкин, А.Г. Гудков, В.Ю. Леушин, С.Г. Веснин, И.А. Сидоров,
Д.Н. Чупина, С.В. Агасиева, В.А. Скуратов, С.В. Чижиков

Микроволновая радиотермометрия органов малого таза

Аннотация

Рассмотрены вопросы создания радиотермографа для обследования органов малого таза. На основе математического моделирования разработана волноводная антенна для внутриполостной диагностики, которая протестирована на различных фантомах и биологических тканях. Результаты исследований могут быть использованы в различных областях медицины и робототехники.

Введение

Различные медицинские приборы могут быть использованы в качестве диагностических средств медицинских комплексов. Для поиска патологических изменений в организме человека могут применяться медицинские радиотермографы. Важной медицинской проблемой являются онкологические заболевания органов малого таза. В 2012 году по всему миру было выявлено 527 600 случаев рака шейки матки (далее – РШМ), из них 265 700 имели летальный исход. В России в период 2004-2015 гг. наблюдался рост заболеваемости РШМ с 110,3 до 119,7 (из расчета на 100 000 граждан) [1], [2]. Для выявления РШМ применяются различные методы диагностики. Тем не менее в медицинском сообществе существует определенная неудовлетворенность существующими методами диагностики и лечения злокачественных новообразований данной локализации. Крайне актуально измерение температуры биологических объектов (далее – БО), так как это абсолютно безболезненно и информативно. По всему миру разрабатываются термометрические приборы в двух направлениях: измеряющие температуру через кожный покров и через естественные полости организма. Необходима роботизация технологии с целью повышения ее эффективности.

В 2009 году научной группой университета Covilhã (University of Beira Interior, Португалия) разработан внутриполостной датчик [3], [4] для внутривагинального термомониторинга. Измерителем температуры является термистор MA100, который помещен в тампон для комфортного размещения в теле. Прибор позволяет исследовать фертильность женщин. Испытания прибора показали, что существует корреляция между внутривагинальной температурой и различными физиологическими процессами. В работе [5] представлен аналогичный беспроводной датчик, который включает в себя термистор, микроконтроллер, приемопередатчик (IEEE 802.15.4) и аккумулятор. Прибор визуализирует температуру с помощью при-

ложения, установленного на смартфон или планшет. С помощью подобных устройств [3]-[6] женщина может отслеживать изменения температуры в режиме реального времени и определять точное время овуляции и пр. Данные датчики измеряют лишь усредненную внутривагинальную температуру и созданы для планирования беременности, поэтому использовать их для «прицельной» диагностики малоэффективно. Так как органы малого таза женщины располагаются внутри тела, при воспалении яичников или другой патологии температура брюшной стенки и стенки влагалища не повышается. Для обследования шейки матки целесообразно использовать метод микроволновой радиотермометрии (далее – МР). Стандартные антенны, применяемые в МР молочных желез, не подойдут ввиду значительных размеров. Для обследования шейки матки необходима антенна, конструкция которой позволит ввести ее в биологическую полость.

Впервые в России применение МР для гинекологии описано в работе [7]. Обследование проводилось трансабдоминально, т. е. при установке антенны на брюшную полость на проекцию матки. Такое обследование дает лишь косвенную информацию о процессах, протекающих в малом тазу. В работе [8] использовался радиотермометр с внутриполостной одноканальной антенной. По результатам исследований авторы отмечают, что применение внутривагинального датчика позволяло диагностировать острый сальпингоофорит, обострение и подострое течение хронического сальпингоофорита, а также воспалительные процессы в области придатков матки [9]. Внутриполостная антенна для измерения температуры простаты представляет собой щелевую антенну и измеряет температуру через щель в цилиндре. Данная антенна измеряет РТ через боковую поверхность и также не может использоваться для прицельной диагностики шейки матки и внутренних тканей. Рассматриваемая работа посвящена разработке внутриполостной антенны для обследования шейки матки на базе волноводной антенны.

Методы исследований

Микроволновая антенна, находящаяся в контакте с телом человека, измеряет усредненную РТ T_{rad} в объеме биологических тканей под антенной. Радиояркостная температура, измеряемая медицинским радиотермометром, зависит от термодинамической температуры $T(r)$ и весовой радиометрической функции $W(r)$ антенны как [9], [10]

$$T_{rad} = \int_{-\infty}^{\infty} T(r) \cdot W(r) dV; \quad (1)$$

$$W(r) = \frac{\sigma(r)|E(r)|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma(r)|E(r)|^2 dV}, \quad (2)$$

где $E(r)$ – напряженность электрического поля, создаваемого антенной; $\sigma(r)$ – электропроводность биологических тканей.

Для разработки внутриполостной антенны выполнены расчеты ее электрического поля $E(r)$ в ближней зоне. Расчет выполнен в программе электродинамического моделирования, которая численно решает уравнение Максвелла в конечно-разностной форме, используя метод конечных разностей во временной области (*Finite Difference Time Domain, FDTD*). Исследуемая среда представляет собой многослойную структуру (рис. 1). Толщина слоев модели соответствует анатомии тела. Биофизические параметры модели приведены в табл. 1. Все слои модели изотропны по физическим свойствам. Программа автоматически создает сетку модели, причем шаг сетки неравномерный для различных подобластей.

Размер исследуемой области составил $100 \times 100 \times 100$ мм. Ось антенны расположена в центре исследуемой области при $X_0 = 50$ мм, $Y_0 = 50$ мм. Минимальный размер пространственной сетки выбран 0,01 мм соответственно минимальному размеру элементов модели (толщина металлизации излучателя – 0,1 мм). На границе исследуемой области тангенциальные составляющие электрического поля равны нулю. Антенна представляет собой волновод круглого сечения, заполненный СВЧ-керамикой. После консультации с врачами общий диаметр антенны выбран равным $\varnothing 15$ мм, длина антенны 170 мм. Возбуждение антенны в модели осуществляется с использованием коаксиального кабеля. Большинство антенн проектируются в активном режиме, хотя необходимо понимать, что метод МР является пассивным, а излучение в биологический объект не

производится. Наиболее критичной характеристикой антенны является ее согласование с биологическими тканями. Поэтому в качестве оценки эффективности применения волноводных антенн для обследования шейки матки использовался КСВ. Электрофизические параметры биологических тканей в диапазоне 3,8 ГГц следующие: слизистая оболочка (электропроводность 2,54 См/м; диэлектрическая проницаемость 41,09; толщина 2 мм), шейка матки (2,77 См/м; 45,95; 20 мм), матка (3,54 См/м; 55,63; 40 мм); поглотитель (3,45 См/м; 55,44; 38 мм) [11]. За исходные геометрические параметры модели антенны приняты следующие значения: угол раскрытия щели $\phi = 90^\circ$; высота диэлектрика $h = 5$ мм; диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 25$; зазор щели $s = 2$ мм; высота антенны $H = 20$ мм; диаметр антенны – 15 мм.

Результаты

Варьируя перечисленные геометрические параметры, можно добиться наилучшего КСВ. Выполнена серия расчетов при различных значениях геометрических параметров антенны. Первоначально варьируем H в пределах от 9 до 20 мм. Далее меняем h в диапазоне от 9 до 20 мм. Рабочая полоса выбирается при условии $КСВ < 2$, чтобы минимизировать рассогласование между антенной и телом. В соответствии с результатами моделирования наилучший результат был получен при $h = 9$ мм. С изменением ϕ после расчетов мы обнаружили, что при $\phi = 100^\circ$ КСВ является наилучшим. Дальнейшее моделирование проводится с варьированием s .

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, показал, что для $s = 2$ мм КСВ на центральной частоте является оптимальным. В результате моделирования были установлены оптимальные геометрические параметры антенны: $h = 9$ мм, $\phi = 100^\circ$, $s = 2$ мм, $H = 24$ мм.

Экспериментальные исследования проведены с помощью жидких фантомов с помощью анализатора цепей «Agilent Technologies E5071C» в частотном диапазоне 3...4,6 ГГц. На рис. 3 представлены зависимости КСВ антенны от частоты, полученные экспериментально и в результате математического моделирования. Очевидно, что характеристики достаточно близки, что подтверждает корректность выполненных расчетов. Область измерения радиояркостной температуры равна объему области, представляющей собой эллипсоид, расположенный под антенной, в котором сосредоточено 85 % всей мощности, принимаемой антенной. На рис. 4 показано, что расчетная глубина измерения антенны составляет 16 мм, что вполне приемлемо для обнаружения РШМ.

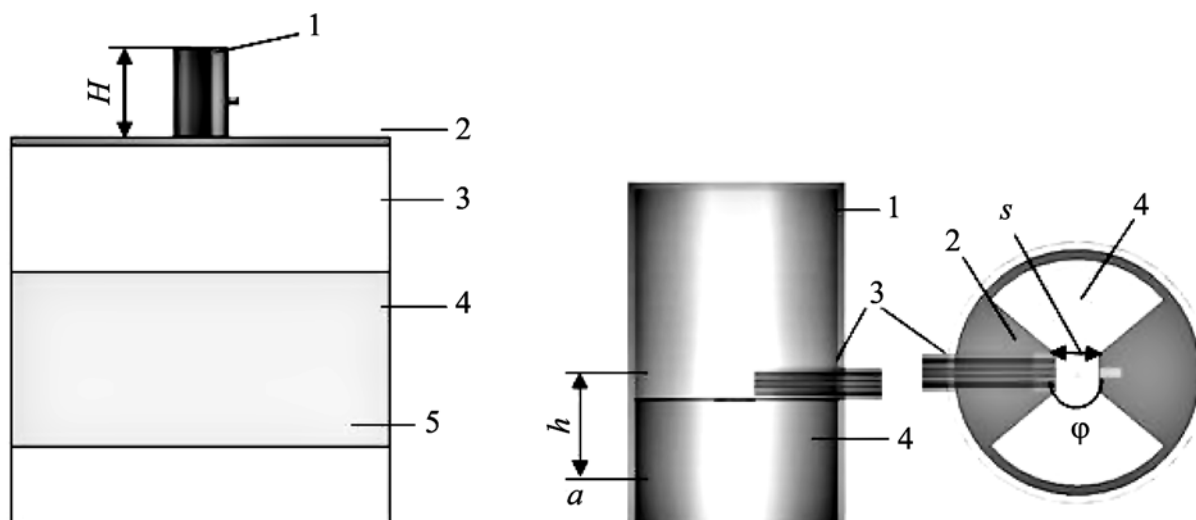
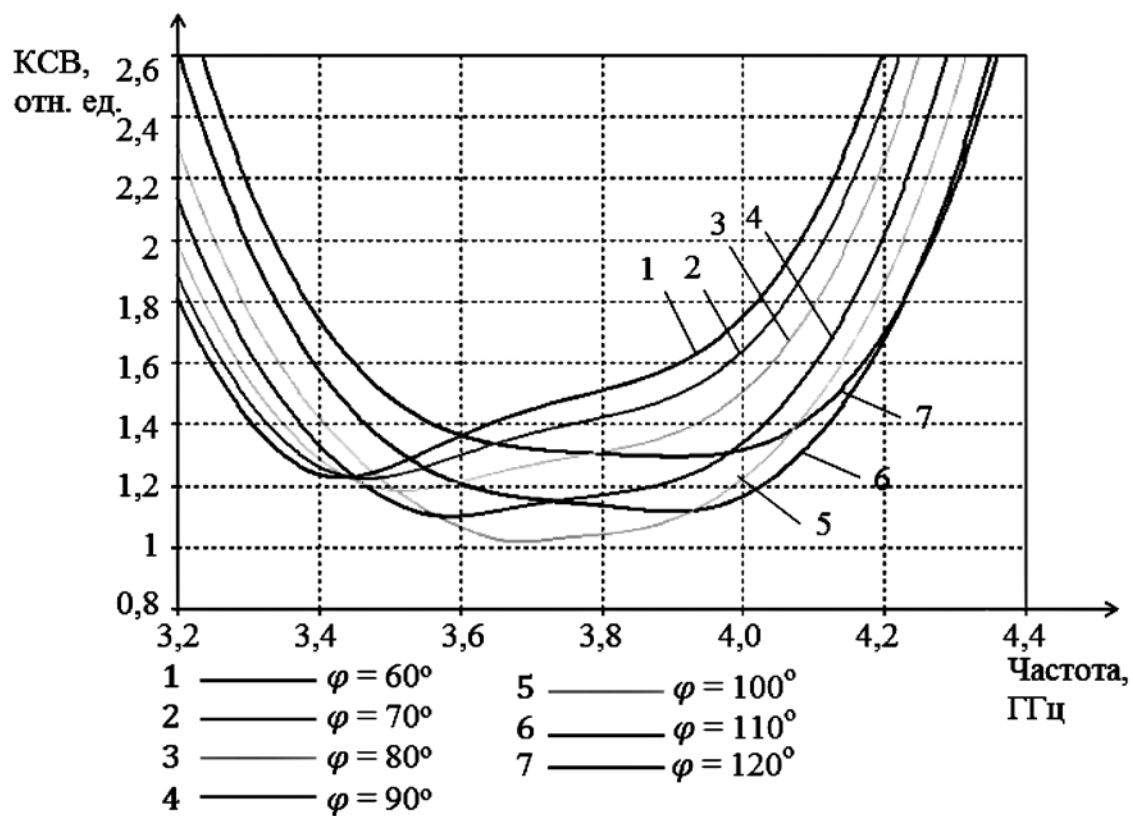
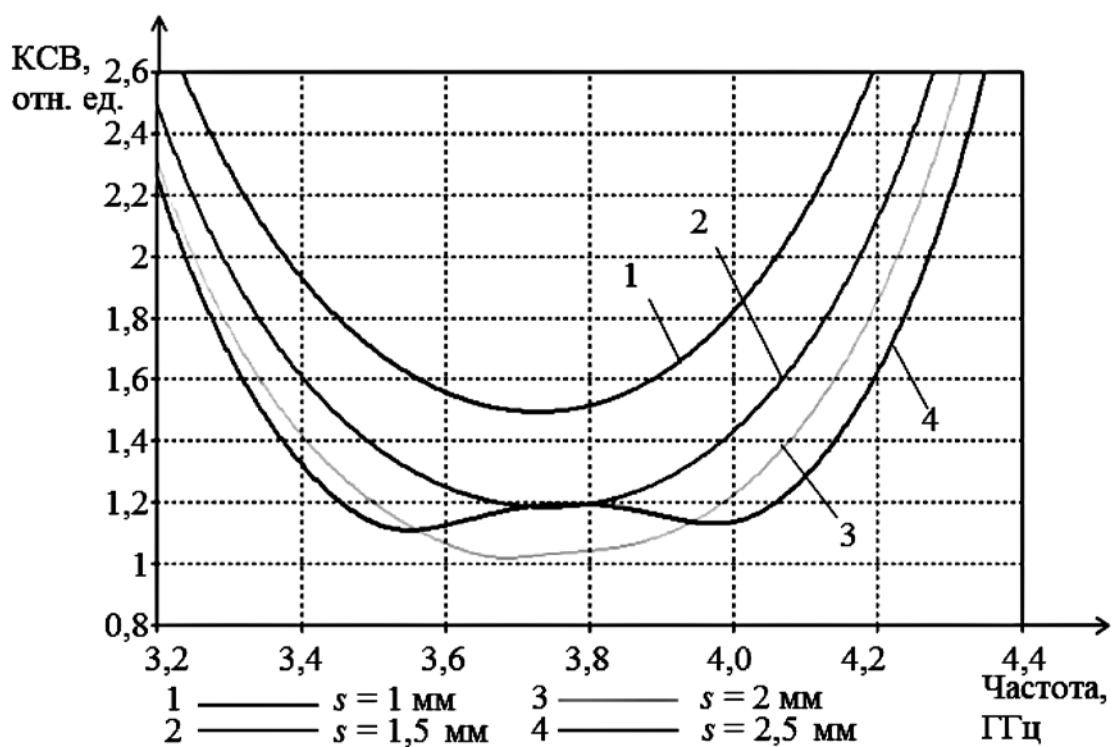


Рис. 1. Исследуемая среда биологического объекта (а): 1 – антенна; 2 – слизистая оболочка; 3 – слой шейки матки; 4 – слой матки; 5 – поглотитель; антенна (б): 1 – волновод; 2 – излучатель; 3 – коаксиальный кабель; 4 – диэлектрик



а)



б)

Рис. 2. Зависимости КСВ от частоты при варьировании φ (а) и s (б)

Закключение

В работе выполнено математическое моделирование собственного микроволнового излучения шейки матки. Создана волноводная антенна для внутриполостных исследований, на базе которой возможно создание внутриполостного радиотермографа. Расчетные характеристики антенны обеспечивают обнаружение теплового излучения небольших объемов (патологии шейки матки, расположенной на глубине 4,5...16 мм и глубже) и мониторинг небольших тепловых изменений ($< 0,4^{\circ}\text{C}$) температуры шейки матки, связанных с повышенным метаболизмом перерожденных клеток или воспалением. Экспериментальные исследования подтвердили перспективность использования антенны в медицине. Практическая реализация результатов работы будет заключаться в создании инновационной продукции и встраивании устройств МР в состав медицинских, в том числе робототехнических, комплексов различного назначения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00349).

Список литературы:

1. Cancer Facts & Figures 2015 / <https://www.cancer.org/content/dam/cancer-org/research/cancer-facts-and-statistics/annual-cancer-facts-and-figures/2015/cancer-facts-and-figures-2015.pdf> [электронный ресурс]. Дата обращения 21.12.2017.
2. Состояние онкологической помощи населению России в 2015 году / Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2016. 236 с.
3. Rodrigues J., Caldeira J., Vaidya B. A novel intra-body sensor for vaginal temperature monitoring // Sensors. 2009. Vol. 9. № 4. PP. 2797-2808.
4. Caldeira J.M.L.P. et al. Intra-body temperature monitoring using a biofeedback solution / 2010 Second International Conference on eHealth, Telemedicine, and Social Medicine // IEEE. 2010. PP. 119-124.
5. Caldeira J.M.L.P. et al. A new wireless biosensor for intra-vaginal temperature monitoring // Sensors. 2010. Vol. 10. № 11. PP. 10314-10327.
6. Pereira O.R.E., Caldeira J.M.L.P., Rodrigues J.J.P.C. A Symbian-based mobile solution for intra-body temperature monitoring / The 12th IEEE International Conference on e-Health Networking, Applications and Services // IEEE. 2010. PP. 316-321.
7. Рахлин В.Л., Алова С.Е. Радиотермометрия в диагностике патологии молочных желез, гениталий, предстательной железы и позвоночника. – Горький: НИРФИ, 1988. 46 с.
8. Хашукоева А.З., Цомаева Е.А., Водяник Н.Д. Применение трансабдоминальной и вагинальной радиотермометрии в комплексной диагностике воспалительных заболеваний придатков матки // Лечение и профилактика. 2012. № 1. С. 26-30.

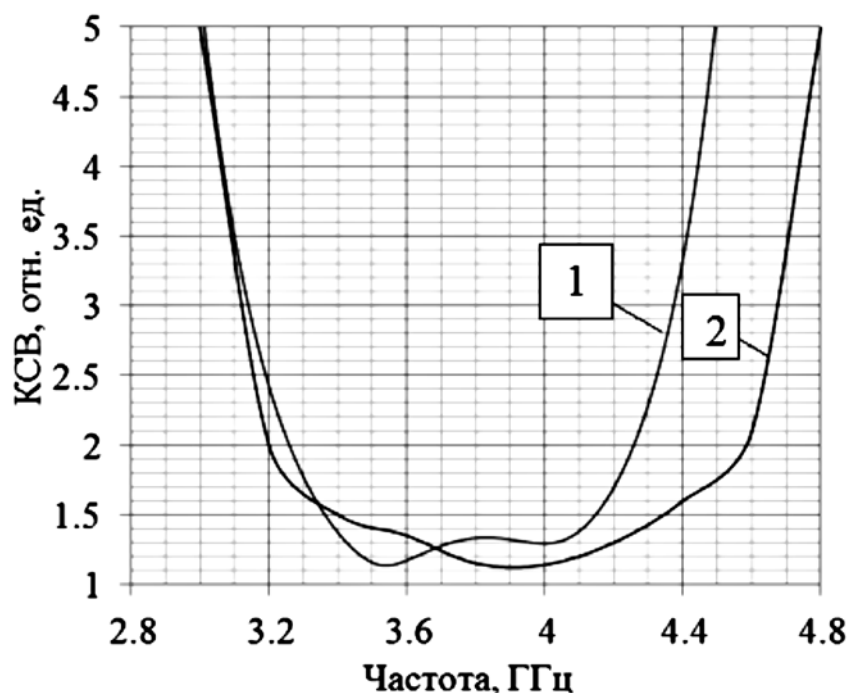


Рис. 3. КСВ антенны: 1 – эксперимент; 2 – моделирование

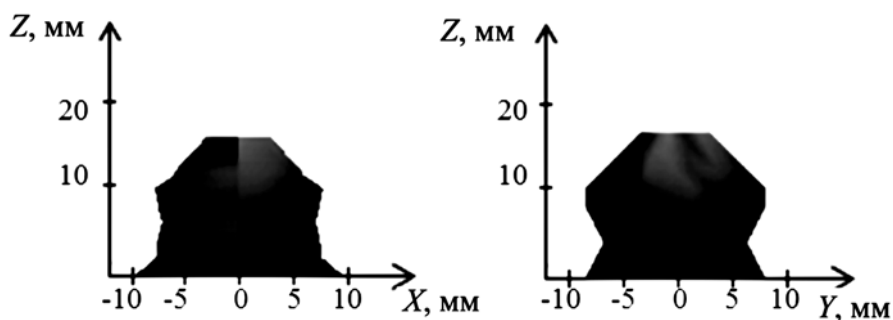


Рис. 4. Область измерения РТ: а) E-плоскость; б) H-плоскость

9. Gudkov A.G., Sedankin M.K., Leushin V.Yu., Vesnin S.G., Sidorov I.A., Agasieva S.V., Ovchinnikov L.M., Vetrova N.A. Antenna Applicators for Medical Microwave Radiometers // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52. № 4. PP. 235-238.
10. Леушин В.Ю., Гудков А.Г., С.И. Щукин, Веснин С.Г., Седанкин М.К. и др. Приборы для диагностики патологических изменений в организме человека методами микроволновой радиометрии // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2017. Т. 9. № 2. С. 27-45.
11. Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz // Physics in Medicine & Biology. 1996. Vol. 41. № 11. P. 2251.

Михаил Константинович Седанкин,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
ФГБУ ГНИИЦ РТ МО РФ/ФГБУ ГНЦ
ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
Александр Григорьевич Гудков,
д-р техн. наук, профессор,
Виталий Юрьевич Леушин,
канд. техн. наук, доцент,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,

Сергей Георгиевич Веснин,
канд. техн. наук, генеральный директор,
ООО «Фирма «РЭС»,
Игорь Александрович Сидоров,
канд. техн. наук, начальник отдела,
АО «Концерн «Вега»,
Дарья Николаевна Чутина,
студент 1-го года обучения магистратуры,
факультет «Биомедицинская техника»,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
Светлана Викторовна Агасиева,
канд. техн. наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Российский
университет дружбы народов»,
Виктор Андреевич Скуратов,
научный сотрудник,
АО «Всероссийский научно-исследовательский
институт радиотехники»,
Сергей Владимирович Чижиков,
аспирант,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
г. Москва,
e-mail: ooo.giperion@gmail.com

О.В. Аверченков, А.П. Рачин, Ю.В. Троицкий

Средства повышения эффективности чрескожной электронейростимуляции нервно-мышечного аппарата

Аннотация

Проведен анализ аппаратно-программных решений построения формирователей сигналов чрескожной электростимуляции оптимальной формы, приближающейся к форме потенциала действия нервного волокна в зоне перехвата Ранвье, и способов повышения эффективности их воздействия за счет биосинхронизации с сердечным ритмом пациента.

Введение

К устройствам чрескожной электронейростимуляции (ЧЭНС) относятся аппараты импульсной низкочастотной электротерапии в диапазоне от 10 до 500 Гц, предназначенные для функционального восстановления при травмах и заболеваниях периферической нервной системы.

Эффективность лечебного воздействия этих аппаратов прежде всего зависит от формы используемых импульсов электрической стимуляции. Считается, что оптимальной формой электростимулирующего сигнала является асимметричный биполярный сигнал воздействия с равными ампер-секундными площадями разнополярных импульсов (рис. 1а).

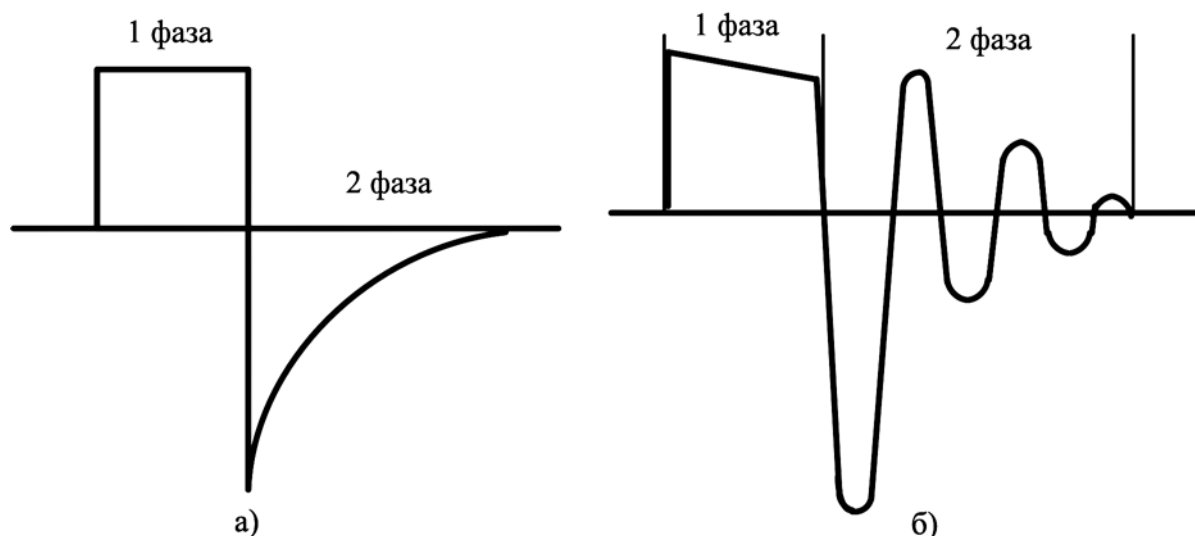


Рис. 1. Форма асимметричных импульсных сигналов, формируемых генераторами с трансформаторным выходным сигналом при активной нагрузке (а) и активно-емкостной нагрузке (б)