

УДК 621.3.029.6

Л.Г. Стаценко, О.А. Пуговкина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОТЕРМОМЕТРИИ

Исследуется возможность применения дополнительного разорванного кольцевого резонатора (один из вариантов конструкции метаматериала) в конструкции СВЧ-компонентов для радиотермометров. Рассматривается микрополосковая плата, в горизонтальной плоскости которой вытравлен дополнительный разорванный кольцевой резонатор, для которого представлена эквивалентная схема и проводится расчет параметров его элементов. Представлены основные соотношения для расчета S-параметров (коэффициентов отражения и передачи). Проводится расчет и сравнение коэффициентов отражения и коэффициентов передачи при последовательной и параллельной схеме включения питания. Результаты расчетов представлены в виде графиков. Определено, что полосовые характеристики дополнительного разорванного кольцевого резонатора зависят от его геометрических размеров (размера зазора и длины заглушки питания), схема включения с параллельно-связанной линией питания имеет лучшие полосовые характеристики по сравнению с последовательно-связанной линией питания. Сделаны выводы о возможности дальнейшего использования дополнительного разорванного кольцевого резонатора в качестве структурного элемента СВЧ-компонентов в устройствах микроволновой радиотермометрии. Проведен сравнительный анализ возможных потерь в микрополосковых линиях, выполненных из диэлектрика и из метаматериала. Рассмотрена целесообразность применения подложки из метаматериала в микрополосковых линиях.

Метаматериал; микрополосковая линия; микроволновая радиотермометрия.

L.G. Statsenko, O.A. Pugovkina

MICROWAVE DEVICES DESIGN FOR MICROWAVE RADIOMETRY APPLICATIONS

The possibility of use the complementary split ring resonator – CSRR (one part of the first realized left-handed metamaterial) in a microwave components design for radiothermometers is investigated. Microstrip line with etched CSRR on ground plane is considered. The equivalent circuit model for CSRR is shown and extracted lumped element values for CSRR are calculated. The basic relationships for calculating the S-parameters (the return and transmission responses) are given. The calculation and comparison of the return and transmission responses for CSRR structure is carried out with series coupling feed lines and with parallel coupling feed lines. The calculation results are presented in graphs. It is defined that the bandpass complementary split ring resonator response of its dimensions (gap distance, feed stub length) and parallel coupling feed line has better bandpass response than series coupling feed line. The conclusions about the possibility of using CSRR as a structural element of microwave components in devices of microwave radiometry thermometry are drawn. The comparative analysis of possible losses in the microstrip lines, made of dielectric and metamaterial is carried out. The expediency of applicability substrate from a metamaterial in microstrip lines is considered.

Metamaterial; microstrip lines; microwave radiometry thermometry.

Микроволновая радиотермометрия (РТМ метод) позволяет измерять в диапазоне сверхвысоких частот интенсивность собственного электромагнитного излучения внутренних тканей пациента, которое пропорционально температуре тканей, и визуализировать ее на экране монитора. Радиотермометрия представляет интерес для ранней диагностики заболеваний, например рака, так как изменение температуры тканей обычно предшествует структурным изменениям, которые обнаруживаются при общепринятых методах исследования молочной железы – УЗИ, маммографии, пальпации. Данный метод может быть использован в различных областях медицины (маммология, урология, гинекология, невропатология и т.д.). [1, 2].

Радиотермометр должен обеспечивать высокое качество получаемой информации, миниатюрность и надежность диагностического комплекса. Этого невозможно добиться без использования современных технологий СВЧ микроэлектроники. Одним из вариантов такой технологии является применение СВЧ компонентов, выполненных на основе материала нового типа – метаматериала, искусственно созданного вещества, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой [3–5].

Одна из возможных реализаций метаматериала – дополнительный разорванный кольцевой резонатор (CSRR – complementary split ring resonator) (рис. 1). CSRR состоит из двух concentрических колец с зазорами на противоположных сторонах. Регулируя геометрию CSRR, можно контролировать значения емкости, индуктивности и, следовательно, значение резонансной частоты. При возбуждении Е-полем вдоль оси CSRR индуцируется ток через кольца, а CSRR демонстрирует отрицательную диэлектрическую проницаемость в определенном диапазоне частот.

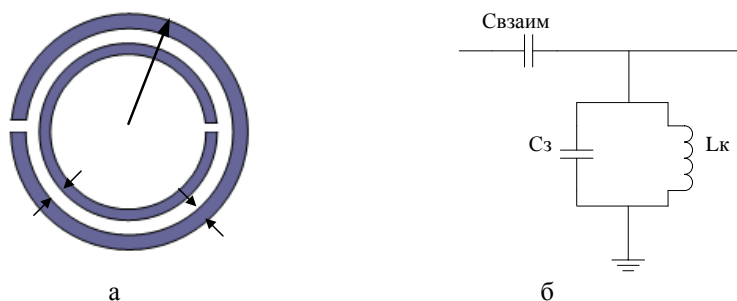


Рис. 1. Дополнительный разорванный кольцевой резонатор: а – структурная модель; б – эквивалентная схема

Эти необычные свойства вызывают большой интерес к CSRR, как к компоненту в конструкции СВЧ устройств для уменьшения их габаритных размеров при одновременном сохранении (или даже улучшении) их функциональных возможностей. Эти новые СВЧ устройства могут применяться в различных областях современной электроники [6] и, в частности, в радиотермометре.

Для анализа частотных параметров и функциональных возможностей CSRR представлена микрополосковая плата, в горизонтальной плоскости которой вытравлен CSRR (рис. 2). Рассмотрено две схемы включения: последовательная и параллельная.

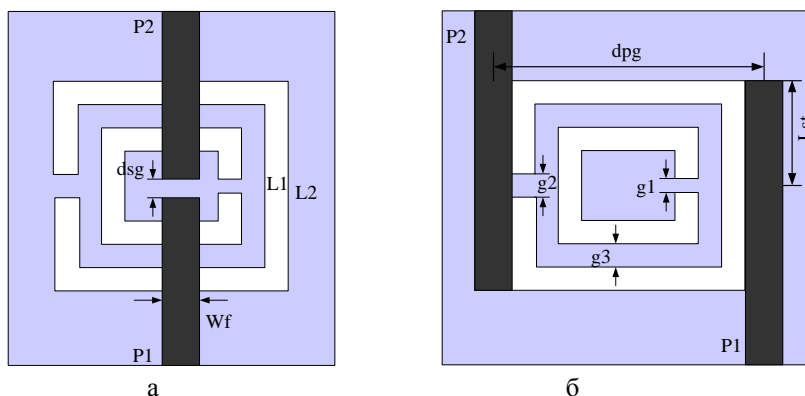


Рис. 2. CSRR с последовательно-связанной линией питания (а) и с параллельно-связанной линией питания (б)

Рис. 2 показывает структурную модель микрополосковой платы с CSRR-элементом с последовательно-связанной линией питания (а) и с параллельно-связанной линией питания (б). Эквивалентная схема для обоих случаев показана на рис. 3.

На эквивалентной схеме CSRR представляет собой колебательный LC-контур с индуктивностью L_r и емкостью C_r (рис. 3). C_c – взаимная емкость между линией передачи и CSRR. C_g – емкость зазора между двумя отдельными микрополосковыми линиями передачи, L_t – индуктивность линии передачи.

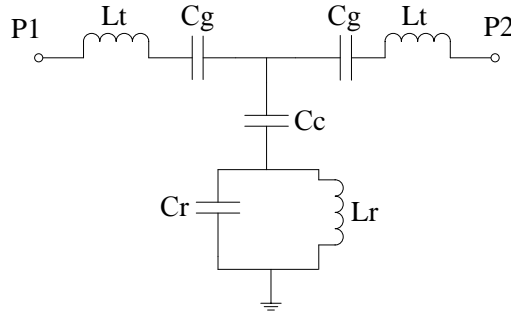


Рис. 3. Эквивалентная схема CSRR

Для определения качества полосовых характеристик при каждом способе включения проведем расчет S-параметров – коэффициента отражения (S_{11}) и коэффициента передачи (S_{21}).

$$S_{11} = \frac{2Z_p Z_s + Z_s^2 - Z_0^2}{(Z_s + Z_0 + 2Z_p)(Z_s + Z_0)}, \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{2Z_p Z_0}{(Z_s + Z_0 + 2Z_p)(Z_s + Z_0)}, \quad (2)$$

где $Z_s = \frac{1 - \omega^2 L_t C_g}{j\omega C_g}$ и $Z_p = \frac{1 - \omega^2 L_r (C_r + C_c)}{j\omega C_c (1 - \omega^2 L_t C_r)}$ – сопротивления последовательной и параллельной линии эквивалентной схемы (рис. 3), соответственно. Часть значений элементов для последовательной и параллельной схем включения (рис. 2,а,б) найдены с помощью моделирования полной ЕМ-волны с помощью программного пакета IE3D [7].

Произведен расчет емкости и индуктивности эквивалентной схемы (рис. 3) при следующих параметрах: $L_1=4.68$ мм, $L_2=7.2$ мм, $g_1=0.18$ мм, $g_2=0.36$ мм, $g_3=0.36$ мм, $W_f=1.6$ мм.

Результаты расчетов для последовательной схемы подключения (рис. 2,а) были получены при условии, что размера зазора $d_{sg}=0.5$ мм, тогда $C_g=0.4$ пФ, $L_r=2$ нГн, $C_r=0.4$ пФ, $L_t=1.6$ нГн, $C_c=21$ пФ; и что $d_{sg}=4.5$ мм, тогда $C_g=0.15$ пФ, $L_r=2$ нГн, $C_r=0.38$ пФ, $L_t=1.1$ нГн, $C_c=12$ пФ.

Для параллельной схемы подключения (рис. 2,б) было рассчитано, что если длина заглушки питания $L_{st}=0$ мм и параллельно-связанный зазор $d_{pg}=5.2$ мм, тогда $C_g=0.22$ пФ, $L_r=2.2$ нГн, $C_r=0.39$ пФ, $L_t=1.2$ нГн, $C_c=12$ пФ; и что если $L_{st}=3.5$ мм и $d_{pg}=8.2$ мм, тогда $C_g=0.07$ пФ, $L_r=2.1$ нГн, $C_r=0.38$ пФ, $L_t=1.6$ нГн, $C_c=21$ пФ.

Используя полученные значения, производим расчет S_{11} и S_{21} , результаты которого представлены в виде графиков на рис. 4, 5.

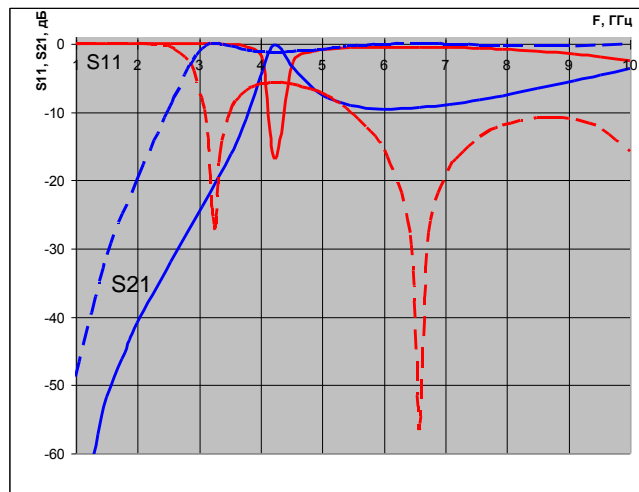


Рис. 4. График зависимости $S_{11}(F)$ и $S_{21}(F)$ при $d_{sg}=0.5$ мм (- - - -) и $d_{sg}=4.5$ мм (—)

Из рисунка 4 очевидно, что размер зазора d_{sg} существенно влияет на полосовой отклик, причем с увеличением зазора вносимые потери уменьшаются. Так на частоте 3.054 ГГц при $d_{sg}=0.5$ мм $S_{21}=-0.64$ дБ, а при $d_{sg}=4.5$ мм $S_{21}=-23.84$ дБ.

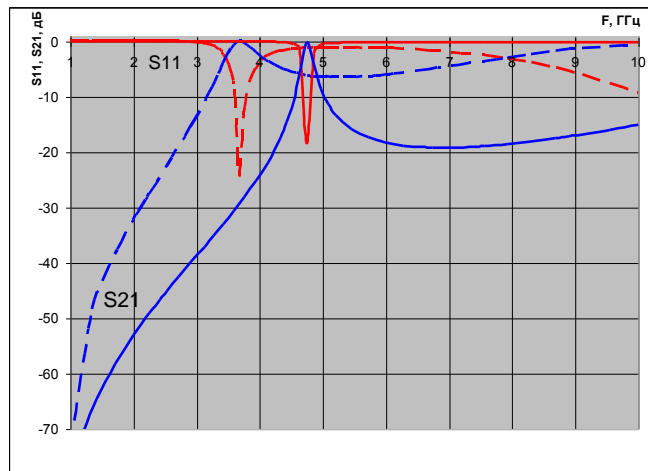


Рис. 5. График зависимости $S_{11}(F)$ и $S_{21}(F)$ при $L_{st}=0$ мм, $d_{pg}=5.2$ мм (- - - -) и $L_{st}=3.5$ мм, $d_{pg}=8.2$ мм (—)

Рис. 5 показывает, что при параллельной схеме включения влияние оказывает не только изменения длины зазора d_{pg} , но и изменения длины заглушки питания L_{st} . С увеличением L_{st} связанная область между линией питания и CSRR увеличивается, что приводит к лучшему полосно-пропускающему отклику. Так если $L_{st}=0$ мм, $d_{pg}=5.2$ мм, то $S_{21}=-24$ дБ, а если $L_{st}=3.5$ мм и $d_{pg}=8.2$ мм, то $S_{21}=-38$ дБ на частоте 3.054 ГГц.

Проведя анализ различных схем включения (параллельной и последовательной), можно сделать следующий вывод: параллельная схема включения является наиболее эффективной с точки зрения полосно-пропускающей реакции. Видно,

что на частоте 5.094 ГГц при последовательном включении с $d_{sg}=4.5$ мм значение S_{21} составляет -8 дБ (рис. 4), а при параллельном с $L_{st}=3.5$ мм и $d_{pg}=8.2$ мм – -11.4 дБ (рис. 5).

Далее оценим возможность применения метаматериалов в устройствах СВЧ с точки зрения возможных потерь. Рассмотрим микрополосковые линии (МПЛ), выполненные из диэлектрика и из метаматериала.

Для МПЛ потери в проводниках $\alpha_{ПП}$ (дБ) записываются в виде [8]

$$\alpha_{ПП} = 1.38A \frac{R_s}{dZ_c} \frac{32 - \left(\frac{W_3}{d}\right)^2}{32 + \left(\frac{W_3}{d}\right)^2}, \quad (3)$$

$$\frac{W_3}{d} = \frac{W}{d} + \frac{1.25t}{\pi d} \left(1 + \ln \frac{4\pi W}{t}\right), \quad (4)$$

где $A = 1 + \frac{d}{W_3} \left(1 + \frac{1}{\pi} \ln \frac{4\pi W}{t}\right)$ – ослабление, дБ; $R_s = \sqrt{\pi f \mu_0 \rho}$ – поверхностное сопротивление металлизированного слоя; ρ – удельное сопротивление проводника. Для меди $\rho = 0.0172 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$; Z_c – характеристическое сопротивление, Ом.

$$Z_c = \frac{120}{\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}} \cdot \left[\ln \left(\frac{4d}{W} + \sqrt{\frac{16d^2}{W^2} + 2} \right) - \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0.2258 + \frac{0.1208}{\varepsilon_r} \right) \right], \quad (5)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Потери в подложке α_n (дБ) определяются по формуле [8]

$$\alpha_n = 27,3 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - 1} \frac{\varepsilon_{эф} - 1}{\sqrt{\varepsilon_{эф}}} \frac{tg \delta}{\lambda_0}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{эф}$ – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость материала; $tg \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь ($\delta = 10^{-4}$).

$$\varepsilon_{эф} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot \left[\left(1 + \frac{12d}{W}\right)^{-1/2} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{d}\right) \right]}{2}. \quad (7)$$

Рассмотрим МПЛ (рис. 6) со следующими параметрами: $W=0.9$ мм, $d=6$ мм, $t=1$ мм.

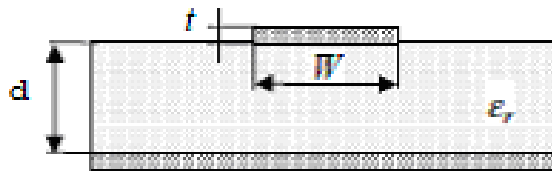


Рис. 6. Микрополосковая линия

Результаты расчетов потерь в проводнике $\alpha_{ПП}(f)$ и в подложке $\alpha_n(f)$ в зависимости от частоты, представлены в виде графиков на рис. 7, 8, соответственно.

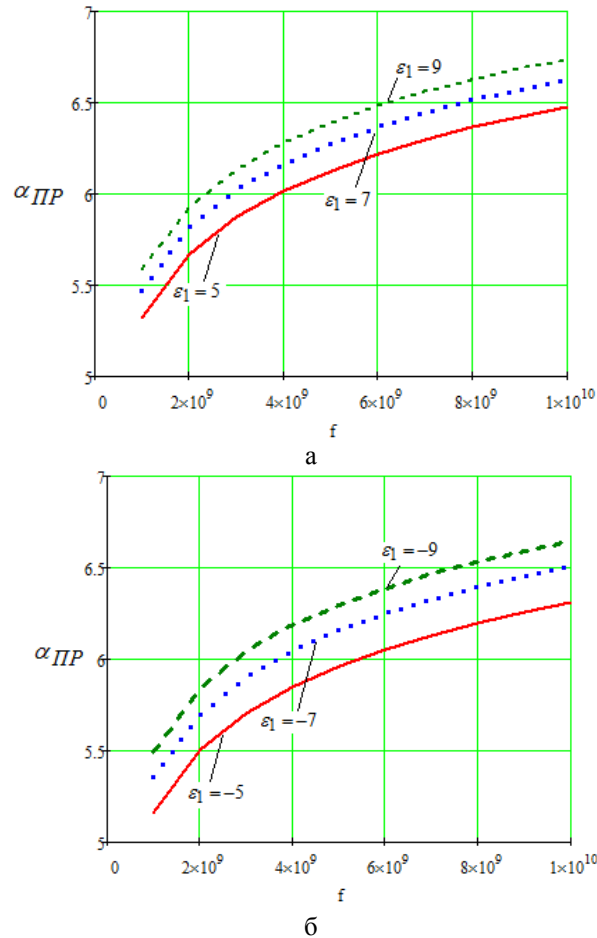


Рис. 7. График зависимости потерь в проводнике от частоты для МПЛ из диэлектрика (а) и для МПЛ из метаматериала (б)

Если рассматривать зависимость $\alpha_{PP}(f)$ и $\alpha_n(f)$ для подложки из диэлектрика и из метаматериала, то очевидна одинаковая закономерность: с ростом частоты увеличиваются потери и большему значению диэлектрической проницаемости ϵ соответствуют большие потери (рис. 7, 8). Но в ПМЛ, выполненной на основе подложки из метаматериала, потери имеют реактивную составляющую, что тем самым вносит дополнительные потери.

МПЛ с подложкой из метаматериала обладает сильными дисперсионными свойствами и высокими потерями. Отсюда возникает вопрос о целесообразности применения метаматериалов в МПЛ. Чтобы на него ответить, необходимо определить поведение электромагнитного поля в МПЛ.

В МПЛ из метаматериала с потерями могут распространяться прямые и обратные волны. При введении потерь наблюдается объединение типов волн, причем объединенные моды распространяются с постоянной фазовой скоростью, не зависящей от частоты. Эти волны являются прямыми, но в отличие от других прямых волн не вырождаются в антиповерхностные волны, а существуют во всем диапазоне частот, начиная с некоторой частоты. Их поля практически не просачиваются в волновод, сосредотачиваясь вблизи его границы [9].

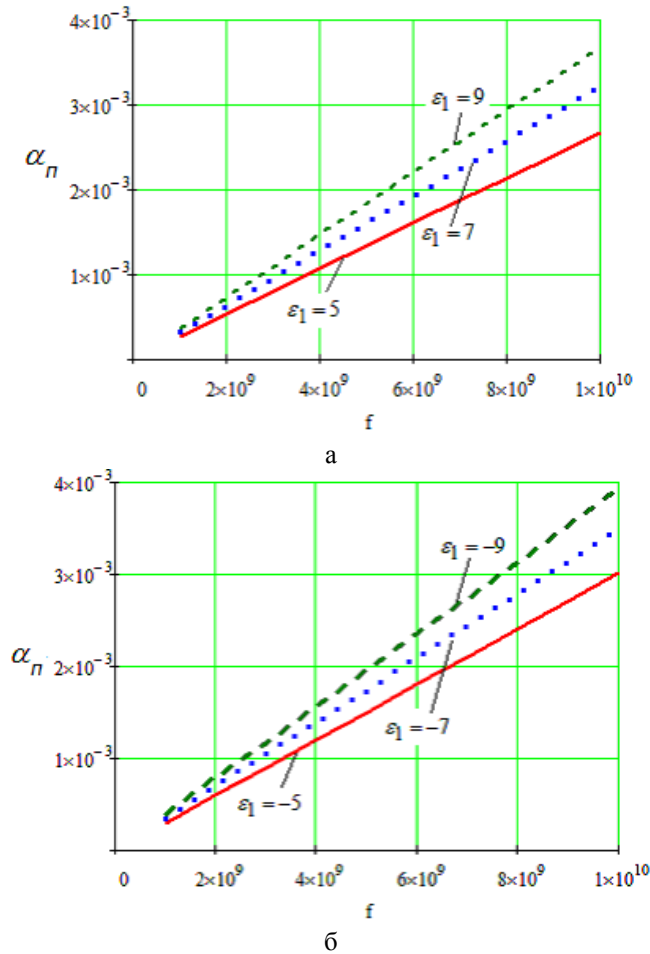


Рис. 8. График зависимости потерь в подложке от частоты для МПЛ из диэлектрика (а) и для МПЛ из метаматериала (б)

Таким образом, существует возможность распространения волн без затухания на определенных частотах, несмотря на наличие потерь в метаматериале. А МПЛ, выполненные с подложкой из метаматериала, будут способны передать до 100 % входящего сигнала. А изменение конструкции СВЧ-компонентов, связанное с использованием дополнительного разорванного кольцевого резонатора, для радиотермометра позволяет повысить качество рабочих характеристик (АЧХ, коэффициент усиления, чувствительность, помехоустойчивость). Это приведет к улучшению качества сигнала, а также снижению сложности отдельных функциональных блоков. Предлагаемые изменения повысят стабильность и надежность работы радиотермометра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурдина Л.М., Пинхосевич Е.Г., Хайленко В.А., Бурдина И.И., Веснин С.Г., Тихомирова Н.Н. Радиотермометрия в алгоритме комплексного обследования молочных желез // Современная онкология. – 2006. – Т. 6, № 1. – С. 8-10.
2. Вайсблат А.В. Радиотермография как метод диагностики в медицине. – М.: НЦЗД РАМН, 2003. – 80 с.

3. *Veselago V.G.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 92, № 7. – С. 517-526.
4. *Smith D.R. et al.* Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 84, № 18. – P. 4184-4187.
5. *Стаценко Л.Г., Понедельникова О.А.* Сравнение свойств диэлектрика метаматериала при отражении и преломлении волн на границе раздела сред // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы III Всероссийской научно-технической конференции (Владивосток, 22-25 сент. 2009 г.). – Владивосток, 2009. – С. 341-346.
6. *Mandal M. K., Mondal P., Sanyal S., and Chakrabarty A.* Low insertion-loss, sharp-rejection and compact microstrip low-pass filters // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2006. – Vol. 16, № 11. – P. 600-602.
7. *Falcone F., Lopetegi T., Baena J. D.* Effective negative- ϵ stop-band microstrip lines based on complementary split ring resonators // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2004. – Vol. 14, № 6. – P. 280-282.
8. *Нефедов Е.И., Панченко Б.А.* Микроразомкнутые антенны. – М.: Радио и связь, 1986. – 144 с.
9. *Баширин А.А., Меньших Н.Л.* Особенности распространения электромагнитных волн в планарном волноводе из метаматериала с потерями // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2010. – № 11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – URL: <http://jre.cplire.ru/mac/nov10/2/text.html> (дата обращения 12.09.2013).

REFERENCES

1. *Burdina L.M., Pinkhosevich E.G., Khaylenko V.A., Burdina I.I., Vesnin S.G., Tikhomirova N.N.* Radiotermometriya v algoritme kompleksnogo obsledovaniya molochnykh zhelez [Microwave radiometry in the algorithm of a comprehensive breast examination], *Sovremennaya onkologiya* [Modern Oncology], 2006, Vol. 6, No. 1, pp. 8-10.
2. *Vaysblat A.V.* Radiotermografiya kak metod diagnostiki v meditsine [Radiotomography as a method of diagnosis in medicine]. Moscow: NTsZD RAMN, 2003, 80 p.
3. *Veselago V.G.* Elektrodinamika veshchestv s odnovremenno otritsatel'nymi znacheniyami ϵ i μ [The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in physical Sciences], 1967, Vol. 92, No. 7, pp. 517-526.
4. *Smith D.R. et al.* Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, *Physical Review Letters*, 2000, Vol. 84, No. 18, pp. 4184-4187.
5. *Statsenko L.G., Ponedel'nikova O.A.* Sravnenie svoystv dialektrika metamateriala pri otrazhenii i prelomlenii voln na granitse razdela sred [Comparison of properties of dielectrica metamaterial with reflection and refraction of waves at the interface], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana: materialy III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konfe-rentsii (Vladivostok, 22-25 sent. 2009 g.)* [Technical problems of development of the world ocean: proceedings of the III all-Russian scientific-technical conference (Vladivostok, 22-25 Sept. 2009)]. Vladivostok, 2009. pp. 341-346.
6. *Mandal M. K., Mondal P., Sanyal S., and Chakrabarty A.* Low insertion-loss, sharp-rejection and compact microstrip low-pass filters, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, Vol. 16, No. 11, pp. 600-602.
7. *Falcone F., Lopetegi T., Baena J. D.* Effective negative- ϵ stop-band microstrip lines based on complementary split ring resonators, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, Vol. 14, No. 6, pp. 280-282.
8. *Nefedov E.I., Panchenko B.A.* Mikropoloskovye anteny [Microstrip antenna]. Moscow: Radio i svyaz', 1986, 144 p.
9. *Basharin A.A., Men'shikh N.L.* Osobennosti rasprostraneniya elektromagnitnykh voln v planarnom volnovode iz metamateriala s poteryami [Propagation characteristics of electromagnetic waves in planar waveguide of the metamaterial losses], *Zhurnal radioelektroniki: elektronnyy zhurnal* [Journal of radio electronics: electronic journal], 2010, No. 11. [Elektronnyy resurs]. Available at: <http://jre.cplire.ru/mac/nov10/2/text.html> (Accessed 12 September 2013).

Статью рекомендовал к опубликованию к.ф.-м.н. Н.В. Злобина.

Стаценко Любовь Григорьевна – Дальневосточный федеральный университет в г. Владивостоке; e-mail: lu-sta@mail.ru; 690922, г. Владивосток, Русский остров, пос. Аякс, 10, корпус С, каб. С808; тел.: +79025246057; кафедра электроники и средств связи; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Пуговкина Ольга Александровна – e-mail: olgaponedelnik@mail.ru; 690922, г. Владивосток, Русский остров, пос. Аякс, 10, корпус С, каб. С819, тел.: +79502851101; кафедра электроники и средств связи; аспирант.

Statsenko Lyubov Grigor'evna – Far Eastern Federal University, Vladivostok; e-mail: lu-sta@mail.ru; 10 Village Ajax, building C, office C808, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russia; phone: +79025246057; the department of electronics and communications; head of department; dr. of phis.-math. sc.; professor.

Pugovkina Olga Aleksandrovna – e-mail: olgaponedelnik@mail.ru; 10 Village Ajax, building C, office C819, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russia; phone: +79502851101; the department of electronics and communications; postgraduate student.

УДК 616. 831 – 009.11 – 089 – 053.2

М.В. Тупиков, В.А. Тупиков, Н.М. Чурилов

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО БИОУПРАВЛЕНИЯ
ПРИ ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ
У ДЕТЕЙ С ДЦП**

Проведен анализ результатов применения метода функционального биоуправления на основе биологической обратной связи по электромиограмме: ФБУ (БОС по ЭМГ) при восстановительном лечении детей с ДЦП с двигательными нарушениями в виде трицепс синдрома. Лечение включало оперативную коррекцию эквинусной деформации стопы 12 детей (17 стоп) с трицепс-синдромом при диплегической и гемиплегической формах ДЦП по оригинальной авторской методике (патент РФ на изобретение № 2486873) с последующим восстановлением мышечного баланса и выработкой адекватного двигательного навыка методом функционального биоуправления (ФБУ БОС по ЭМГ). Средний возраст пациентов 10,4±2,3 лет. Продолжительность послеоперационной иммобилизации в гипсовой повязке составляла 6 недель. Каждому пациенту проведено от 8 до 15 сеансов ФБУ. В среднем, число сеансов составило 11 ± 2. Результаты, оцененные по данным электромиограммы (определяли коэффициент реципрокности передней большеберцовой и икроножной мышц до и после применения метода ФБУ БОС по ЭМГ), гониометрии и тестов многоаспектной оценки функциональных возможностей, свидетельствуют о высокой эффективности метода ФБУ (БОС по ЭМГ) при коррекции двигательных нарушений и восстановлении опороспособности нижних конечностей у детей с ДЦП.

Детский церебральный паралич; хирургическое лечение; биологическая обратная связь.

M.V. Tupikov, V.A. Tupikov, N.M. Churilov

**APPLICATION OF FUNCTIONAL BIOCFEEDBACK IN SURGICAL
TREATMENT MOTOR DISORDERS IN CHILDREN WITH CEREBRAL
PALSY**

Results of applying the biofeedback method on the ground of electromyogram in rehabilitative treatment of children with cerebral palsy with movement disorders as triceps syndrome are analyzed. The treatment included surgical correction of equinus deformity for 12 children (17 feet) with the triceps syndrome at diplegia and hemiplegic cerebral palsy forms by the original author's technique (RF patent for invention number 2486873), followed by reduction of muscular balance