

УДК 621.372.543.2

ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР СО СВЕРХШИРОКОЙ ПОЛОСОЙ ЗАГРАЖДЕНИЯ И УРОВНЕМ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ БОЛЕЕ 100 ДБ*

Я. Ф. Бальва¹, А. М. Сержантов², С. А. Ходенков¹, В. В. Иванин¹, В. А. Шокиров¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М. Ф. Решетнева
660014, Россия, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: ya.f.balva@mail.ru

²Сибирский федеральный университет
660074, Россия, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: cubicus@mail.ru

Предложены миниатюрные конструкции полоскового резонатора на двухслойной подвешенной подложке и полосно-пропускающих фильтров на его основе. Фильтры обладают широкой полосой заграждения с высоким уровнем затухания в ней. Экспериментальный фильтр четвертого порядка с относительной шириной полосы пропускания 5 % имеет полосу заграждения по уровню –100 дБ до частоты более чем в 10 раз превышающей центральную частоту. Показана эффективность применения предложенной конструкции резонатора для создания миниатюрных фильтров по технологии LTCC.

Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, резонатор на подвешенной подложке, двухслойная подложка, широкая полоса заграждения.

THE BAND-PASS FILTER WITH THE ULTRA WIDE STOPBAND AND INTERFERENCE REJECTION LEVEL MORE THAN 100 DB

Ya. F. Balva¹, A. M. Serzhantov², S. A. Khodenkov¹, V. V. Ivanin¹, V. A. Shokirov¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: ya.f.balva@mail.ru

²Siberian Federal University
26 Kirenskiy str., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: cubicus@mail.ru

The authors propose miniature constructions of the stripline resonator performed on a double-layer suspended substrate and bandpass filters on its base. The filters have a wide stopband with high attenuation. The experimental bandpass filter of the fourth order with percentage bandwidth 5 % has the stopband on the level of –100 dB up to the frequency that 10 times exceeds the passband center frequency. It is shown that the miniature filters based on the proposed resonator could be effectively produced by LTCC technology.

Keywords: bandpass filter, miniature filter, suspended stripline resonator, double-layer substrate, wide stopband

Как известно, полосно-пропускающие фильтры (ППФ) являются важнейшими элементами современных радиотехнических систем связи, радиолокации и радионавигации. Одними из основных требований, предъявляемых к таким устройствам, являются миниатюрность и высокие селективные свойства, которые в том числе определяются наличием у ППФ широкой полосы заграждения (ПЗ) с большим уровнем затухания.

Распространенным способом расширения полосы заграждения является использование резонаторов со скачком волнового сопротивления, в которых частота основной моды колебаний может быть многократно ниже частоты следующей моды. Ширина ПЗ в таких фильтрах растет с увеличением скачка волнового сопротивления [1; 2]. Однако этот рост сопровождается существенным падением собственной добротности

резонаторов, обусловленным увеличением омических потерь на узком участке полоскового проводника. Для подавления ближайших паразитных полос пропускания ППФ на планарных резонаторах могут использоваться резонаторы со скачком волнового сопротивления с несовпадающими частотами высших мод колебаний [3]. Часто для подавления одной из паразитных полос предлагается использовать нули прохождения мощности, возникающие при кондуктивной связи концевых резонаторов с портами фильтра [4–6].

Расширить полосу заграждения также позволяет исключение взаимодействия смежных пар резонаторов на частотах высших мод колебаний [5; 6]. Это происходит в результате взаимной компенсации индуктивного и емкостного взаимодействий, например при определенной длине области связи резонаторов [7–9].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.A18.21.1857.

Несмотря на определенный прогресс в создании фильтров с широкой полосой заграждения высокочастотный край ПЗ по уровню -60 дБ во всех рассмотренных работах располагается не выше $8f_0$, где f_0 – центральная частота фильтра. Одним из путей расширения ПЗ является создание новых конструкций резонаторов, частота второй моды колебаний в которых многократно превышает частоту первой. Например, в случае коаксиального фильтра четвертого порядка [10] использование конструкции резонатора нового типа позволило повысить верхнюю границу ПЗ по уровню -90 дБ до $47 f_0$ [11]. Однако с точки зрения технологичности, надежности и стоимости такие устройства существенно уступают конструкциям на полосковых и микрополосковых структурах.

В настоящей работе предлагается миниатюрная конструкция полоскового резонатора, позволяющая создавать полосковые ППФ с рекордно глубокой и широкой полосой заграждения.

Резонатор (рис. 1) представляет собой двухслойную подвешенную подложку, на которой три полосковых проводника расположены один под другим. Два наружных проводника замкнуты одним концом на одну из боковых стенок корпуса. Внутренний проводник замкнут одним концом на противоположную боковую стенку. Другие концы полосковых проводников свободны и не достают до боковых стенок.

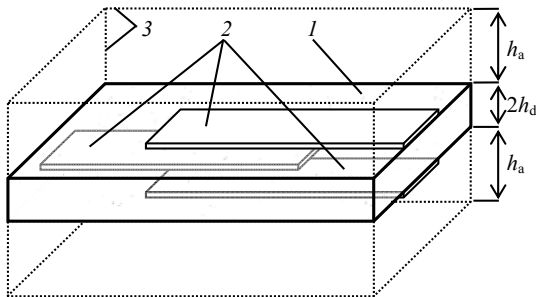


Рис. 1. Конструкция полоскового резонатора

Для первой (рабочей) моды колебаний, имеющей самую низкую частоту f_1 , токи на всех трех проводниках текут в одну сторону (рис. 2, а). Для второй моды, имеющей более высокую частоту f_2 , токи на верхнем и нижнем проводнике текут в противоположные стороны, а ток на внутреннем проводнике отсутствует (рис. 2, б). Для третьей моды, частота которой $f_3 > f_2$, токи на верхнем и нижнем проводнике текут в одном

направлении, а ток на внутреннем проводнике течет в противоположном направлении (рис. 2, в). Важно, что в конструкциях фильтров на основе рассматриваемого резонатора, возбуждения второй моды колебаний можно избежать, если порты фильтра кондуктивно подключить к внутреннему проводнику резонатора. Вследствие этого протяженность ПЗ фильтра будет определяться соотношением частот f_1 и f_3 .

Проведенные исследования показали, что параметром, в наибольшей степени влияющим на частоту основной моды f_1 и отношение f_3/f_1 , является толщина диэлектрических слоев h_d .

Эти зависимости были получены электромагнитным 3D-моделированием с использованием программы *Ansoft HFSS*. При расчете использовались следующие параметры: длина резонатора $l_r = 20$ мм, длина полосковых проводников $l_s = 0.98l_r$, ширина проводников $w = 3$ мм, высота воздушных зазоров $h_a = 3.5$ мм, диэлектрическая проницаемость слоев $\epsilon_r = 2.2$.

Из рис. 3, а видно, что частота f_1 понижается с уменьшением толщины h_d , а отношение f_3/f_1 , характеризующее ширину полосы заграждения фильтра, растет. Отметим, что при этом будет одновременно уменьшаться длина резонатора, и увеличиваться его собственная добротность за счет снижения омических потерь. На рис. 3, б построены зависимости собственной добротности резонатора Q_1 для первой моды от толщины h_d . Расчет выполнен для двух значений тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Проводимость проводников была $\sigma = 5.6 \times 10^7$ См/м (соответствует меди). Частота резонатора поддерживалась постоянной ($f_1 = 1$ ГГц) за счет соответствующего укорочения его длины l_r . Значения остальных параметров были теми же, что и при расчете графиков на рис. 3, а.

Как показали исследования, для увеличения ширины полосы заграждения также следует увеличивать ширину полосковых проводников w и увеличивать толщину воздушного зазора между диэлектрической подложкой и стенками металлического корпуса h_a . Однако это приводит к увеличению размеров фильтра. Увеличение диэлектрической проницаемости подложки несущественно увеличивает ширину полосы заграждения.

Перспективность применения предложенного резонатора в технике СВЧ подтверждается приводимыми ниже результатами электромагнитного 3D моделирования четырехрезонаторного фильтра (рис. 4), а также результатами измерений опытного образца.

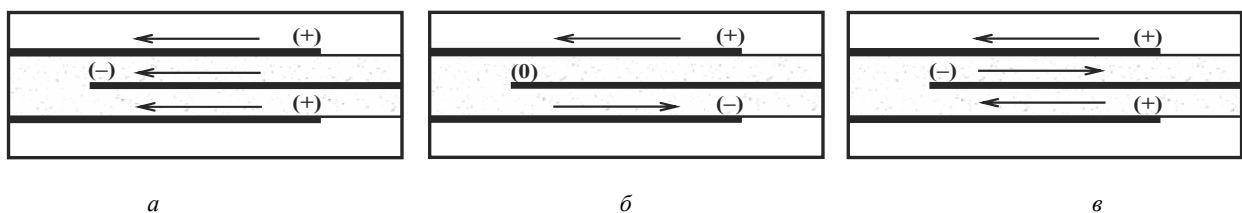


Рис. 2. Распределение токов в полосковых проводниках резонатора для первых трех мод колебаний

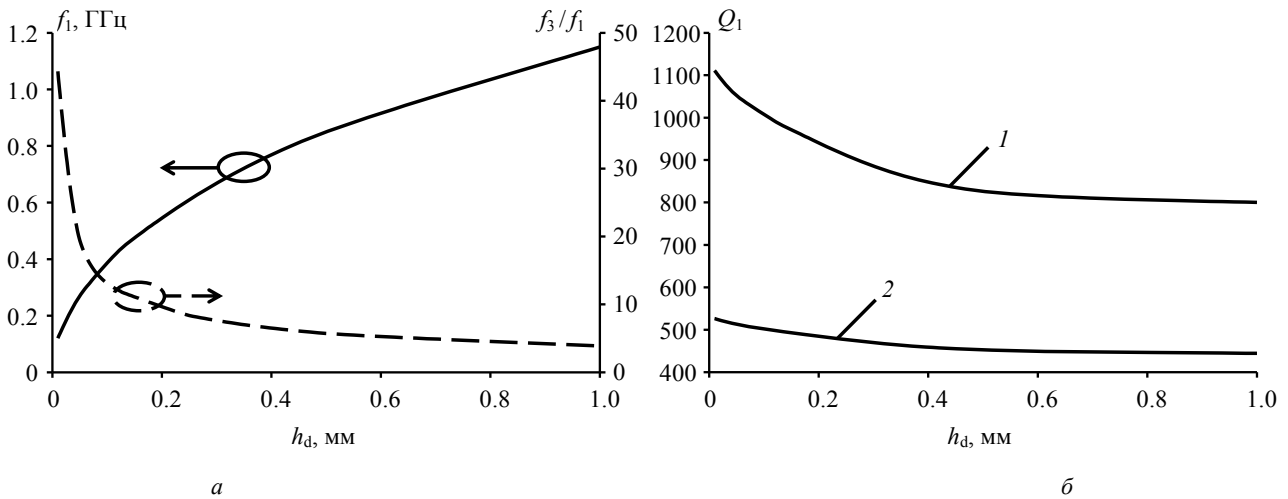


Рис. 3. Зависимости частоты первой моды резонатора f_1 и отношения f_3/f_1 от h_d (а); зависимости собственной добротности резонатора на частоте f_1 от h_d : 1 – при $\text{tg}\delta=0$; 2 – при $\text{tg}\delta=0.001$ (б)

В конструкции, приведенной на рис. 4, порты фильтра кондуктивно подключены к внутренним полосковым проводникам наружных резонаторов. Расчет показал, что изменяя только толщину диэлектрических слоев при прочих равных условиях (в данном случае при $\epsilon_r = 2.2$, $h_a = 3.5$ мм, $w = 3$ мм, $l_s = 0.98l_r$, зазоре между внутренними резонаторами $S_1 = 6.5$ мм и зазоре между внутренними и наружными резонаторами $S_2 = 5.75$ мм), можно существенно расширить полосу заграждения фильтра.

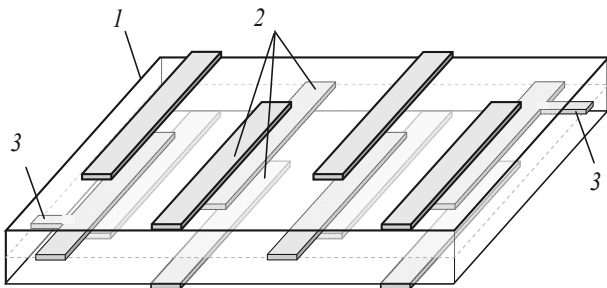


Рис. 4. Конструкция четырехрезонаторного фильтра (без корпуса-экрана):

1 – двухслойная подвешенная диэлектрическая подложка; 2 – полосковые проводники; 3 – порты фильтра

На рис. 5 приведены АЧХ фильтров, рассчитанные для трех значений h_d : 0.5 мм (кривая 1), 0.25 мм (кривая 2) и 0.125 мм (кривая 3). Относительная ширина полосы пропускания всех трех фильтров 5 %, центральная частота $f_0 = 1$ ГГц для каждой толщины подстраивалась длиной резонаторов l_r . Из рисунка видно, что с уменьшением толщины диэлектрических слоев ширина полосы заграждения существенно увеличивается.

Для эксперимента двухслойная подложка макета фильтра была выполнена из материала RT/Duroid толщиной $h_d = 0.2$ мм, имеющего диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 3.4$ и диэлектрические потери

$\text{tg}\delta \approx 0.002$. Подложка имеет размеры 12×38 мм². Все полосковые проводники резонаторов имеют ширину $w = 3$ мм. Длина проводников внутренних резонаторов равна $l_s = 9$ мм, а длина проводников наружных резонаторов – $l_s = 9.25$ мм. Толщина воздушных зазоров между диэлектрической подложкой и стенками металлического корпуса равна $h_a = 3.5$ мм. Зазор между соседними внутренними резонаторами составлял $S_1 = 6.5$ мм, а между внутренним и наружным резонатором – $S_2 = 5.75$ мм.

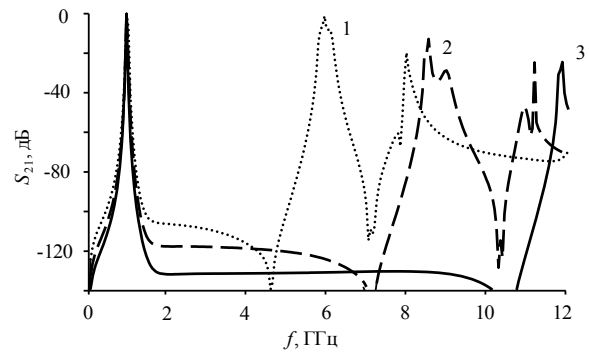


Рис. 5. АЧХ фильтров при разных значениях толщины диэлектрических слоев:

1 – $h_d = 0.5$ мм, 2 – $h_d = 0.25$ мм, 3 – $h_d = 0.125$ мм

Измеренная амплитудно-частотная характеристика изготовленного макета представлена на рис. 6, здесь же приведена фотография устройства.

Фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 1$ ГГц при относительной ширине полосы пропускания $\Delta f/f_0 \approx 5$ %. Минимальные потери СВЧ мощности в полосе пропускания составляют около 3 дБ. Верхняя граница полосы заграждения по уровню -100 дБ простирается до $10.5f_0$.

Наиболее эффективно предложенная конструкция полосо-пропускающего фильтра может быть реали-

зована с помощью технологии многослойных интегральных схем на основе керамики с низкой температурой отжига (*Low Temperature Cofired Ceramics – LTCC*). На рис. 7 приведена расчетная АЧХ четырехрезонаторного монолитного фильтра, выполненного на основе материалов, применяемых в *LTCC* технологии. Конструктивные параметры фильтра были следующими.

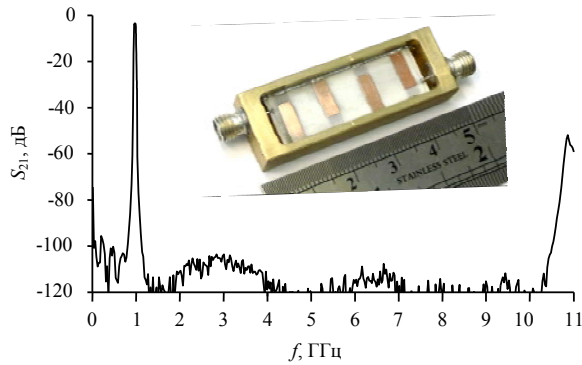


Рис. 6. Измеренная АЧХ макета четырехрезонаторного фильтра

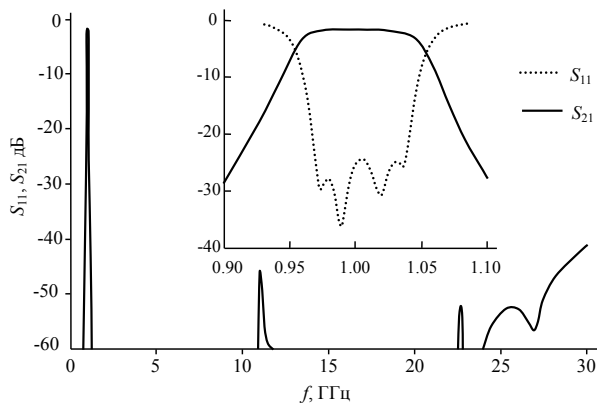


Рис. 7. Расчетная АЧХ четырехрезонаторного *LTCC* фильтра

Материал диэлектрических слоев (керамических листов), заполняющих весь объем фильтра – *Heratope CT2000* ($\epsilon = 9.1$, $\text{tg}\delta = 0.002$) толщиной 20 мкм (между полосковыми проводниками) и 600 мкм (3 листа по 200 мкм между проводниками и экранами) [1]. Ширина полосковых проводников 1 мм, их длина 3.5 мм, полная длина резонаторов 4.5 мм. Материал проводников – воженная проводящая паста *HF612* на основе *Ag* толщиной 10 мкм с удельным поверхностным сопротивлением 2 мОм/Г [1]. Расстояние между парой внутренних резонаторов 1 мм, между парами наружных 0.875 мм. Для оптимальной настройки фильтра в полосе пропускания центральные проводники внутренних резонаторов были укорочены на 0.1 мм.

Разработанный фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 1$ ГГц при относительной ширине полосы пропускания 10 %. Минимальное затухание в полосе пропускания фильтра составило

1.7 дБ. Полоса заграждения по уровню -70 дБ составила $\sim 11f_0$, а по уровню -40 дБ составила $\sim 30f_0$. Габариты фильтра $1.24 \times 4.25 \times 5$ мм³.

Таким образом, в работе предложена и исследована миниатюрная конструкция оригинального полоскового резонатора на двухслойной подвешенной подложке, позволяющая создавать планарные микроволновые полосно-пропускающие фильтры с рекордно широкой и глубокой полосой заграждения. Показана возможность реализации устройств на таких резонаторах в монолитном исполнении с использованием *LTCC* технологии.

Библиографические ссылки

1. Chen Y.-M., Chang S.-F., Chang C.-C., Hung T.-J. Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. Vol. 55. № 10. 2007. P. 2191–2199.
2. Селективные свойства микрополосковых фильтров на четвертьволновых сонаправленных шпильковых резонаторах / Б. А. Беляев, С. В. Бутаков, Н. В. Лалетин и др. // *Радиотехника и электроника*. 2006. Т. 51, № 1. С. 24–36.
3. Lin S.-C., Deng P.-H., Lin Y.-S., Wang C.-H., Chen C. H. Wide-stopband microstrip bandpass filters using dissimilar quarter-wavelength stepped-impedance resonators // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 2006. Vol. 54. № 3. P. 1011–1017.
4. Kuo J.-T., Shih E. Microstrip stepped impedance resonator bandpass filter with an extended optimal rejection bandwidth // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 2003. V. 51. № 5. P. 1554–1559.
5. Kuo T.-N., Li W.-C., Wang C.-H., Chen C. H. Wide-stopband microstrip bandpass filters using quarter-wavelength stepped-impedance resonators and bandstop embedded resonators // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2008. Vol. 18. № 6. P. 389–391.
6. Chen Y.-M., Chang S.-F., Chang C.-C., Hung T.-J. Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2007. Vol. 55. № 10. P. 2191–2199.
7. Kuo J.-T., Chen S.-P., Jiang M. Parallel-coupled microstrip filters with over-coupled end stages for suppression of spurious responses // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. V. 13. № 10. 2003. P. 440–442.
8. Sanchez-Soriano M. Á., Torregrosa-Penalva G., Bronchalo E. Multispurious suppression in parallel-coupled line filters by means of coupling control // *IET Microw. Antennas Propag.* 2012. Vol. 6. № 11. P. 1269–1276.
9. Особенности коэффициентов связи регулярных микрополосковых резонаторов / Б. А. Беляев, Н. В. Лалетин, А. А. Лексиков, А. М. Сержантов // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48, № 1. С. 39–46.
10. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V., Leksikov A. A. Miniature bandpass filter with a wide stopband up to $40f_0$ // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2012. Vol. 54, № 5. P. 1117–1118.

11. Миниатюрный коаксиальный резонатор и полосо-пропускающий фильтр на его основе со сверхширокой полосой заграждения / Б. А. Беляев, А. М. Сержантов, В. В. Тюрнев, А. А. Лексиков, Ан. А. Лексиков // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 1. С. 95–102.

References

1. Chen Y.-M., Chang S.-F., Chang C.-C., and Hung T.-J. *Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 55, 2007, p. 2191–2199.

2. Belyaev B. A., Butakov S. V., Laletin N. L., Leksikov A. A., Tyurnev V. V. and Chesnokov O. N. *Selective properties of microstrip filters designed on quarter-wave codirectional hairpin resonators*. Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 51, 2006, N. 1, pp. 20–30.

3. Lin S.-C., Deng P.-H., Lin Y.-S., Wang C.-H., Chen C.H. *Wide-stopband microstrip bandpass filters using dissimilar quarter-wavelength stepped-impedance resonators*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, 2006, p. 1011–1017.

4. Kuo J.-T., Shih E. *Microstrip stepped impedance resonator bandpass filter with an extended optimal rejection bandwidth*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 51, 2003, p. 1554–1559.

5. Kuo T.-N., Li W.-C., Wang C.-H., Chen C.H. *Wide-stopband microstrip bandpass filters using quarter-wavelength stepped-impedance resonators and bandstop*

embedded resonators. IEEE Microwave Wireless Components Letters, Vol. 18, 2008, No. 6, p. 389–391.

6. Chen Y.-M., Chang S.-F., Chang C.-C., Hung T.-J. *Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 55, 2007, p. 2191–2199.

7. Kuo J.-T., Chen S.-P., Jiang M. *Parallel-coupled microstrip filters with over-coupled end stages for suppression of spurious responses*. IEEE Microwave Wireless Components Letters, Vol. 13, 2003, No. 10, p. 440–442.

8. Sánchez-Soriano M.Á., Torregrosa-Penalva G., Bronchalo E. *Multispurious suppression in parallel-coupled line filters by means of coupling control*, IET Microwaves Antennas & Propagation, Vol. 6, 2012, p. 1269–1276.

9. Belyaev B. A., Laletin N. V., Leksikov A. A., and Serzhantov A. M. *Peculiarities of coupling coefficients of a regular microstrip resonator*. Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 48, 2003, No. 1, p. 31–38.

10. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V., Leksikov A. A. *Miniature bandpass filter with a wide stopband up to $40f_0$* . Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 54, 2012, p. 1117–1118.

11. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V., Leksikov A. A., and Leksikov An. A. *Miniature coaxial resonator and related bandpass filter with ultra-wide stopband*, Technical Physics Letters, Vol. 38, 2012, No. 1, p. 47–50.

© Бальва Я. Ф., Сержантов А. М., Ходенков С. А., Иванин В. В., Шокиров В. А., 2013

УДК 62-503.57

А. Ю. Власов¹, Н. В. Филенкова², Д. Е. Кравчук²

РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННЫХ АНТЕННЫХ РЕФЛЕКТОРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ*

¹ООО «СИБИНВЕНТ-КОСМОС» (МИП СибГАУ)

Россия, 660059, Красноярск, ул. Семафорная, 433, корп. 1, ЛЗ-37

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: vlasov.anton@gmail.com

Рассматривается способ адаптивного управления технологическим процессом создания прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов заключающийся в том, что последовательно на каждом технологическом этапе измеряются контролируемые и технологические параметры, уточняются экспериментальные зависимости определяющие связь контролируемых параметров с показателями качества готового изделия. На основе полученных данных оптимизируются технологические параметры последующих этапов, обеспечивающие достижения заданных показателей качества готового изделия.

Ключевые слова: адаптивная система управления, технологический процесс, рефлектор, композиционный материал.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.513.11.0014 от 11 марта 2013 г.