

# СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУР ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ИХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Аринин Олег Вячеславович

МТУСИ, ассистент кафедры «Электроника», Москва, Россия

Аристархов Григорий Маркович

МТУСИ, д.т.н., проф., зав. кафедры «Электроника», Москва, Россия

[g.aristarkhov2010@yandex.ru](mailto:g.aristarkhov2010@yandex.ru)

## Аннотация

Исследуются частотные свойства многоступенчатых гребенчатых и встречно-гребенчатых микрополосковых структур при различных способах их возбуждения. Показано, что при комбинированном способе их возбуждения они обладают существенно более высокой частотной избирательностью. Приводятся результаты сравнительного анализа двух-, трех- и четырех-резонаторных структур, в которых формируется значительное число полюсов рабочего затухания на конечных частотах, что и определяет повышенную частотную избирательность микрополосковых фильтров на основе этих структур с существенно ограниченным числом резонаторов.

## Ключевые слова

Гребенчатые и встречно-гребенчатые структуры, микрополосковые фильтры, полюсы и нули рабочего затухания, кондуктивное включение, магнитный и комбинированный способы возбуждения

## Введение

Гребенчатые многопроводные структуры являются схемотехническим базисом для создания на их основе наиболее компактных микрополосковых фильтров (МПФ) [1-2, 9-12]. Отличительной особенностью этих структур является высокое значение их характеристического сопротивления, которое на порядок и более превышает значение волновых сопротивлений фидерных трактов. Поэтому для согласования этих структур применяются различные способы их возбуждения как то: кондуктивное (частичное) включение резонаторов, магнитное возбуждение с помощью короткозамкнутого короткого отрезка линии передачи и электрическое с помощью дополнительного разомкнутого отрезка линии передачи. Каждый из этих способов определяет специфические особенности формирования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) этих структур.

Повышение частотной избирательности этого типа МПФ достигается традиционным путем – введением дополнительных параллельных электромагнитных связей между несмежными резонаторами [3-5]. Однако организация этих связей, во-первых, приводит во многих практических случаях к существенному усложнению структур МПФ, а во-вторых, обуславливает формирование ограниченного числа полюсов рабочего затухания. В работах [6-8] показано, что применение многоступенчатых встречно-гребенчатых структур при их кондуктивном включении позволяет сформировать большее число полюсов рабочего затухания на конечных частотах без введения дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами. Это, с одной стороны, обеспечивает более высокую частотную избирательность МПФ, а с другой – упрощает их конструкцию.

В данной работе этот подход к повышению частотной избирательности МПФ развивается применительно к структурам с другими способами их возбуждения.

## Двухрезонаторные гребенчатые секции

Двухрезонаторные гребенчатые секции являются базовыми звеньями гребенчатых и встречно-гребенчатых МПФ. Исследуем потенциальные селективные возможности многоступенчатых гребенчатых секций в зависимости от способов их возбуждения. Для обеспечения корректности сравнения электрических и конструктивно-технологических параметров рассматриваемых в данной работе структур будем задаваться одинаковыми и теми же относительной шириной полосы пропускания и крутизной рабочего затухания в его переходной области. Все рассматриваемые структуры будут реализовываться на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=10$  и толщиной  $H=1$  мм.

На рисунке 1 представлены две структуры двухрезонаторных гребенчатых секций с преобладающей магнитной связью между резонаторами, в которой формируются полюсы рабочего затухания в области верхних частот. В многоступенчатой секции с кондуктивным ее возбуждением (рис. 1,а) возможно формирование при сильной магнитной связи двух полюсов рабочего затухания (пунктирная кривая на рис 1,в). При ослаблении этой связи полюсы затухания будут совмещаться или перемежаться и, как следствие, вырождаться. Расщепление полюсов рабочего затухания на частотной оси обеспечивается выбором определенного соотношения коэф-

коэффициентов связей между микрополосковыми линиями (МПЛ) на разных ступенях секции [8]. При магнитном возбуждении секции (рис. 1,б) посредством дополнительных короткозамкнутых входного и выходного отрезков МПЛ она не теряет способности к формированию двух полюсов рабочего затухания вблизи полосы пропускания. Наряду с этим в этой структуре возможно формирование дополнительных полюсов рабочего затухания в области верхних частот (сплошная кривая на рис. 1,в), которые существенно повышают ее частотную избирательность. Рассмотрим механизм формирования основных и дополнительных полюсов рабочего затухания. На рисунках 2 и 3 представлены частотные зависимости входных импедансов секций при ее четном ( $Z_{\text{even}}=Z_c$ ) и нечетном ( $Z_{\text{odd}}=Z_o$ ) возбуждении. В области частот, где  $Z_c$  и  $Z_o$  противоположны по знаку характеристическое сопротивление секций становится вещественным  $Z_o = \sqrt{Z_c Z_o}$  и в этой области формируется полоса пропускания (рис. 1,в). Ширина полосы пропускания определяется степенью неуравновешенности электромагнитных связей между четвертьволновыми резонаторами. На частотах  $f_\infty$ , на которых выполняется условие баланса эквивалентных импедансов  $Z_c(f_\infty)=Z_o(f_\infty)$ , формируются основные полюсы рабочего затухания (рис 1,в и 2,б).

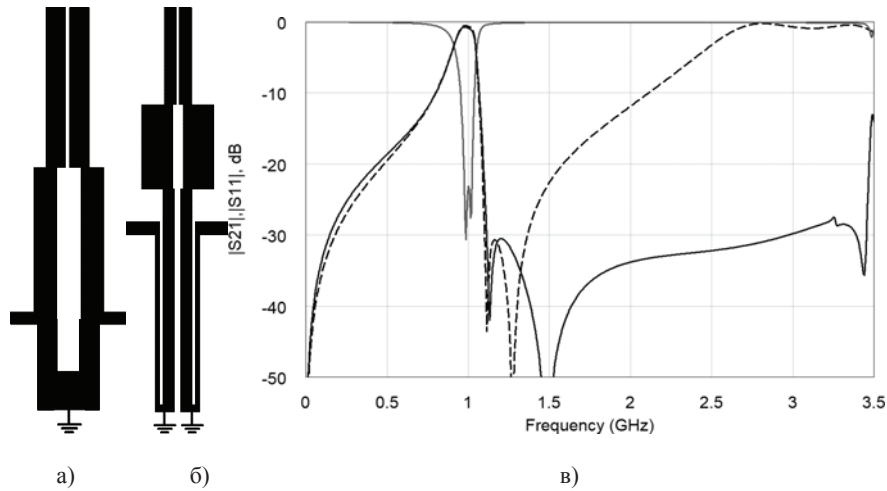


Рис. 1. Двухрезонаторные гребенчатые секции с кондуктивным и магнитным возбуждением

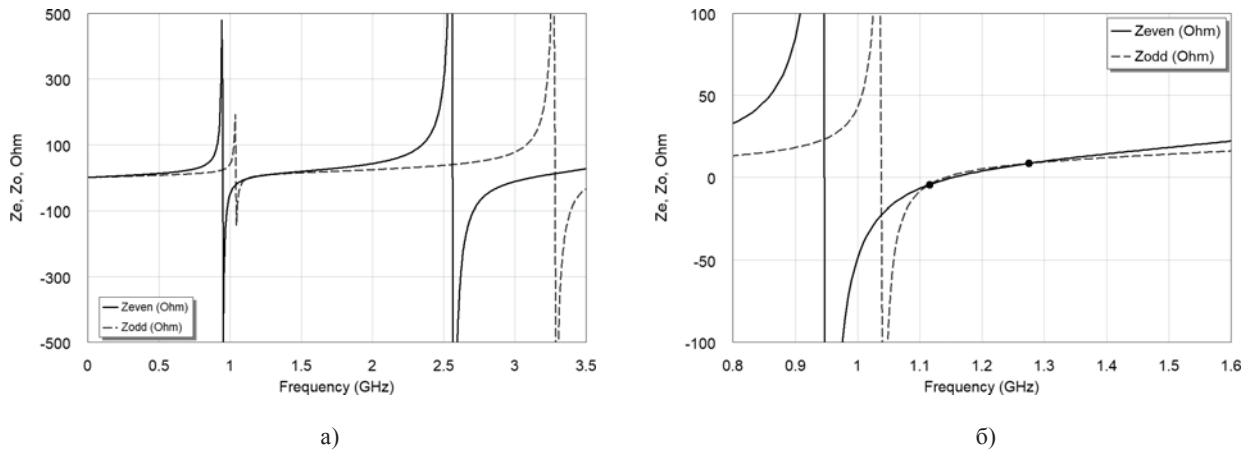


Рис. 2. Частотные зависимости импедансов  $Z_c$  и  $Z_o$  секции при ее кондуктивном включении

Отличительная особенность частотной зависимости эквивалентных импедансов  $Z_c$  и  $Z_o$  для структуры с магнитным возбуждением (рис. 3) заключается в том, что с повышением частоты электрическая длина возбуждающего короткозамкнутого отрезка увеличивается и в области второй гармоники становится равной четверти длины волны. Вследствие этого входное сопротивление структуры монотонно возрастает и принимает значения на несколько порядков больше волновых сопротивлений резонаторов. Таким образом, в этой области частот связь между входом и выходом эквивалентного четырехполюсника существенно ослабляется, что и определяет повышенный уровень затухания в полосе заграждения (рис. 1,в, сплошная кривая).

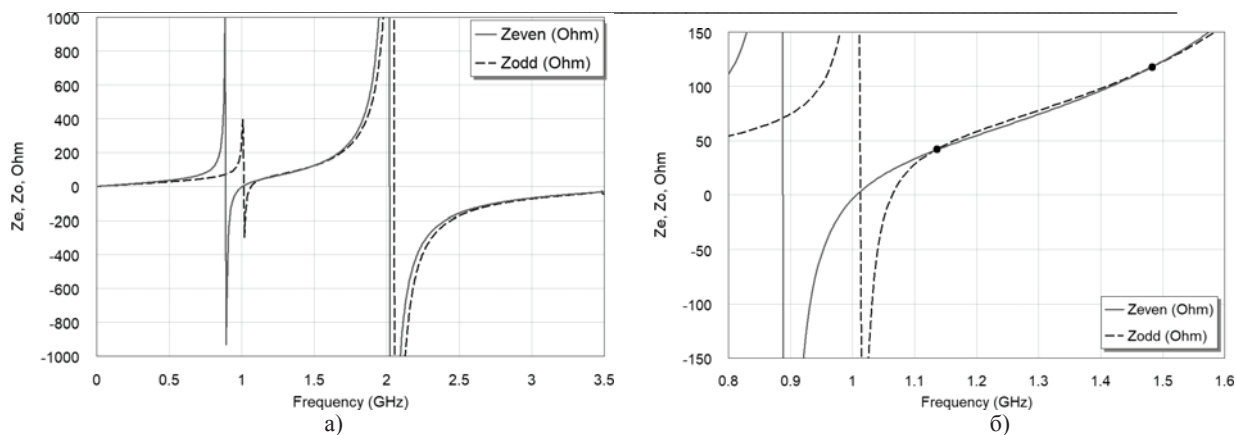


Рис. 3. Частотные зависимости импедансов  $Z_e$  и  $Z_o$  секции при ее магнитном возбуждении

На рисунке 4 представлены аналогичные двухрезонаторные секции, в которых преобладающей связью между резонаторами является электрическая. В этом случае так же формируется два основных полюса рабочего затухания, один из которых расположен в области нижних – а второй в области верхних частот. И в этом случае секция с магнитным возбуждением обладает более высокой частотной избирательностью в области верхних частот (сплошная кривая на рис.4,в).

Следует отметить, что расстояние между МПЛ в рассматриваемых структурах  $S_{min}/H \geq 0.15$ , что определяет их физическую реализуемость как в рамках толстопленочной, так и тонкопленочной технологий.

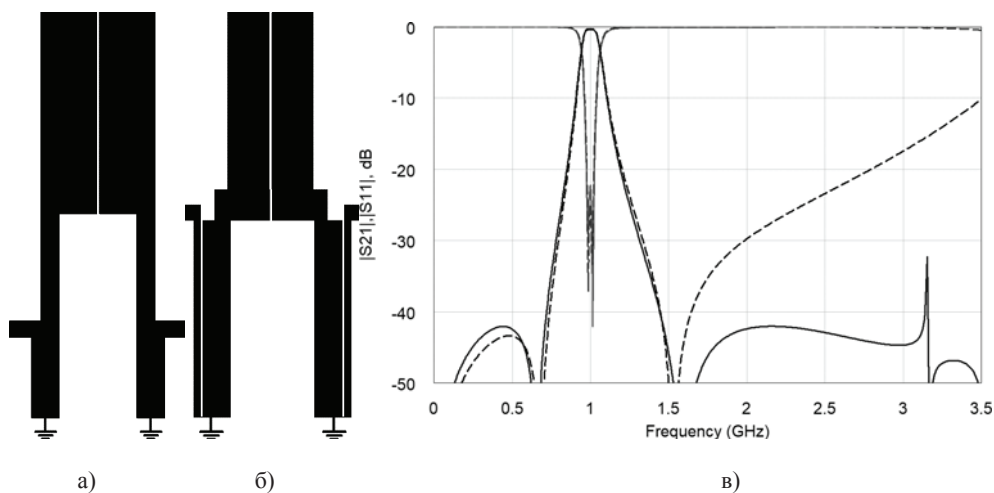


Рис. 4. Двухрезонаторные гребенчатые секции с преобладающей электрической связью

### Трехрезонаторные МПФ

В [7] предложена структура трехрезонаторного гребенчатого МПФ с кондуктивным возбуждением, в котором формируются три полюса рабочего затухания, один из которых расположен в области нижних, а два других в области верхних частот. Такой режим работы данной структуры достигается тем, что между первым и вторым многоступенчатыми резонаторами преобладающей является электрическая связь, а между вторым и третьим – магнитная (рис. 5,а). Соответствующая частотная зависимость рабочего затухания этого МПФ приведена на рис. 5,с (пунктирная кривая). При магнитном возбуждении структуры (рис. 5,б) обеспечивается, как и в случае двухрезонаторной секции, более высокий уровень затухания в полосе заграждения в области верхних частот (сплошная кривая). При этом усиление магнитной связи между возбуждающим отрезком линии передачи и резонатором обеспечивается включением перемычки между ними в области их короткого замыкания.

В случае расположения всех полюсов рабочего затухания в области верхних частот (рис. 6) этот способ возбуждения позволяет получить более высокую частотную избирательность вблизи полосы пропускания.

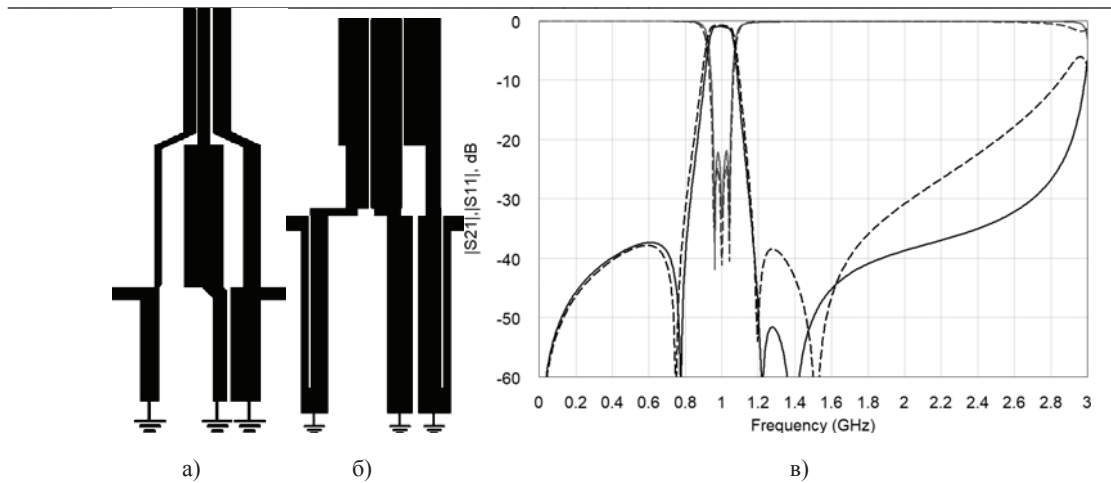


Рис. 5. Трехрезонаторные гребенчатые секции с квазисимметричной АЧХ

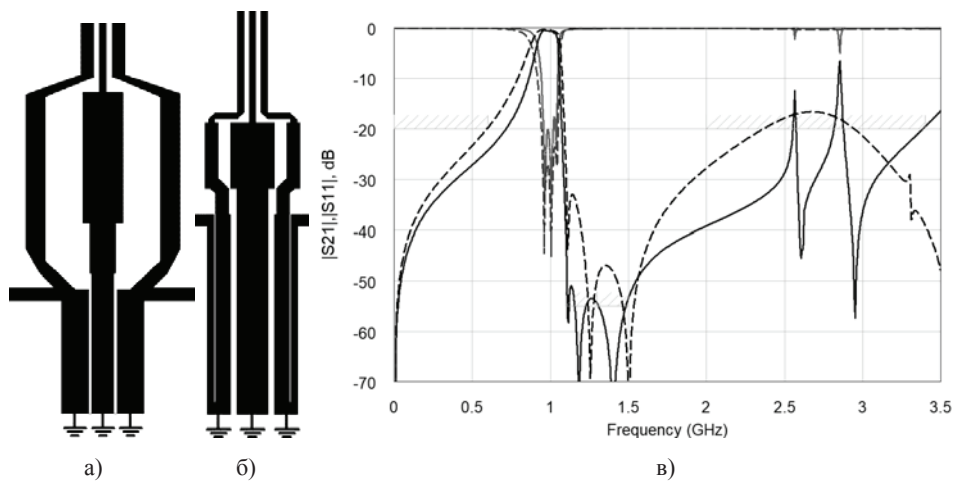
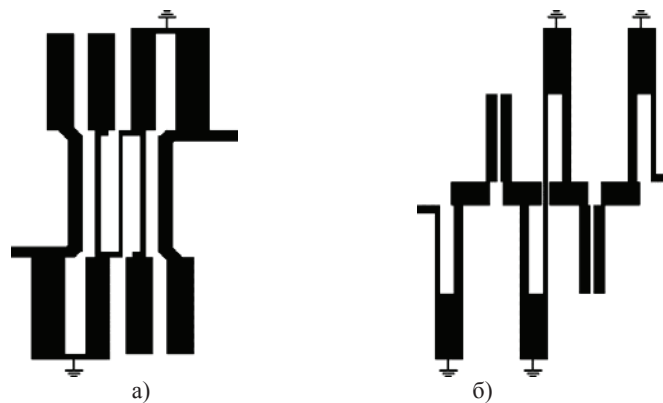


Рис. 6. Трехрезонаторные гребенчатые секции с повышенной избирательностью в области верхних частот

### Четырехрезонаторные МФ

В работе [6] предложены встречно-гребенчатые структуры с дополнительной гальванической связью между смежными резонаторами при кондуктивном их возбуждении. В этих структурах сочетаются каскадное соединение и электромагнитное взаимодействие двухрезонаторных гребенчатых секций (рис. 7,а,с- пунктирная кривая). Как видим, в четырехрезонаторных структурах этого типа формируется четыре полюса рабочего затухания, при значительном расстоянии между резонаторами. Это обеспечивает более высокую устойчивость их частотных характеристик к технологическому разбросу параметров элементов. Здесь так же представлена встречно-гребенчатая структура с комбинированным способом ее возбуждения, при котором сочетаются кондуктивный и магнитный способы.



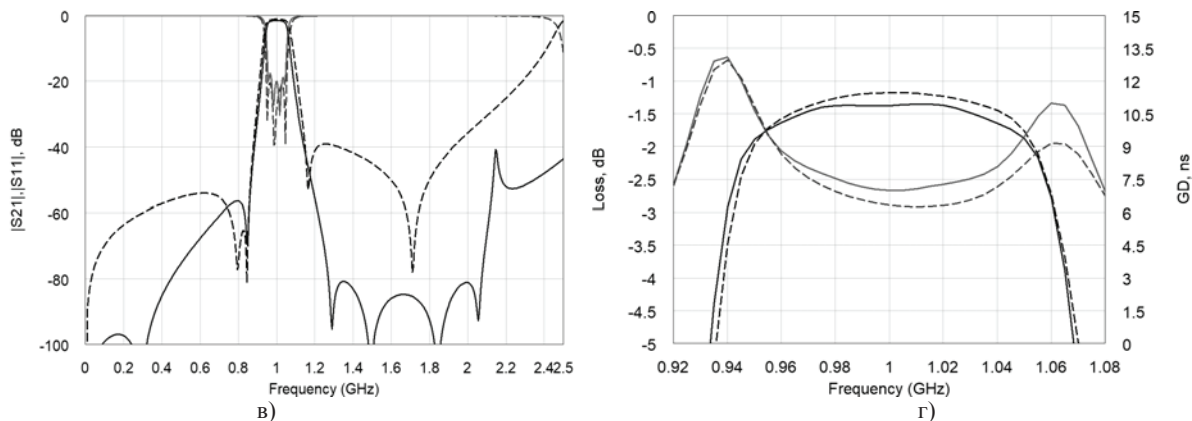


Рис. 7. Четырехрезонаторные встречно-гребенчатые МПФ

Как следует из рис. 7,с (сплошная кривая), в этой структуре возможно формирование шести полюсов рабочего затухания, которые обеспечивают более высокий уровень затухания в полосах заграждения при той же крутизне затухания в ее переходных областях как и при кондуктивном возбуждении. При столь существенном выигрыше по частотной избирательности структура с комбинированным способом возбуждения незначительно уступает структуре с кондуктивным возбуждением по потерям в полосе пропускания, что составляет примерно 10% (рис. 7,г).

Для сравнения на рис. 8,б приведена частотная зависимость двухступенчатого гребенчатого четырехрезонаторного МПФ с дополнительной электрической связью между несмежными резонаторами (пунктирная кривая). Как видим, он также существенно уступает по частотной избирательности встречно-гребенчатой структуре с комбинированным способом возбуждения (рис. 7,б, 8,б, сплошная кривая).

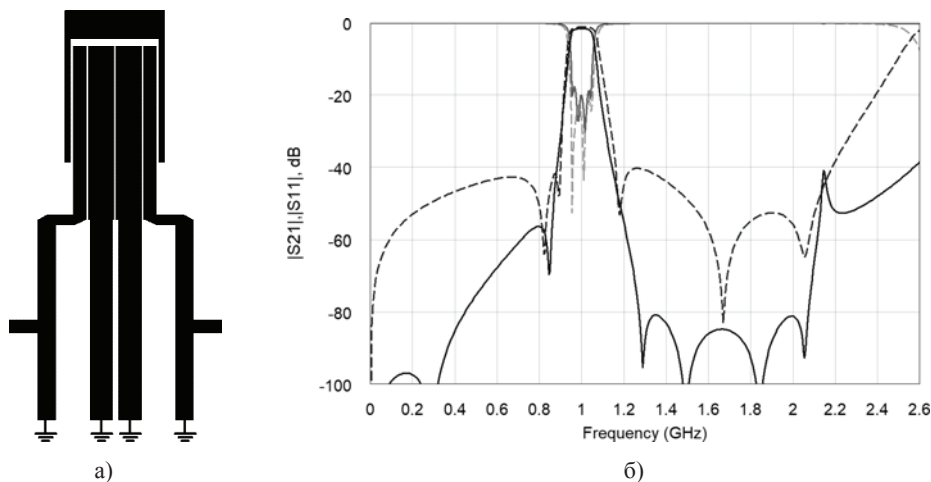


Рис. 8. Топология гребенчатой структуры и сравнение ее АЧХ с встречно-гребенчатым МПФ

### Заключение

Комбинированный способ возбуждения многоступенчатых гребенчатых и встречно-гребенчатых структур потенциально обеспечивает более высокую частотную избирательность МПФ в широкой полосе заграждения. Это достигается за счет рационального сочетания двух факторов, которые свойственны этому типу структур: возможности формирования значительного числа полюсов рабочего затухания на конечных частотах и высокого значения входного сопротивления в области второй гармоники. Эти структуры физически осуществимы по любой из существующих планарных технологий и могут служить основой для создания компактных высокоизбирательных МПФ при существенно ограниченном числе резонаторов.

### Литература

1. Matthaei G.L., Young L., and Jones E.M.T. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. McGraw-Hill, New York, 1964. Moscow: Svyaz', 1971.
2. Makimoto M. and Yamashita S. Compact bandpass filters using stepped impedance resonators // Proc. IEEE, vol. 67, 1979, pp.16-19.
3. Rhodes J.D. The stepped digital elliptic filter // IEEE Trans. MTT, 1969, mol. MTT-17, no.4, pp. 178-184.
4. Rhodes J.D. Theory of electrical filters, New York, Wiley, 1976.
5. Zakharov A.V., Il'chenko M.E., Trubarov I.V. Planar three-resonator bandpass filters with cross coupling // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. Vol. 62. No. 2, pp. 185-193.
6. Aristarkhov G.M., Arinin O.V. and Kirillov I.N. Compact highly-selective microstrip filters based on counter-comb structures // 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/SOSG.2018.8350569 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8350569>
7. Aristarkhov G.M., Arinin O.V. and Kirillov I.N. Microstrip filters based on counter-comb structures with additional galvanic connection," 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456933 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8456933>.
8. *Аристархов Г.М., Аринин О.В., Кириллов И.Н.* Высокоизбирательные фильтры на основе гребенчатых и встречно-гребенчатых структур с ограниченным числом резонаторов // Радиотехника. 2020. Том. 84. No. 1 (2). С. 35-44.
9. *Аристархов Г.М., Звездинов Н.В.* Высокоизбирательные микроволновые фильтры на основе структур с предельно минимальным числом резонаторов // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2016. Т. 6. № 1. С. 6-8.
10. *Аристархов Г.М., Кириллов И.Н., Марковский А.В., Пустовалова В.А.* Компактные высокоизбирательные микрополосковые фильтры на свернутых шпилечных резонаторах // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2020. Т. 10. № 2. С. 28-33.
11. *Аринин О.В., Аристархов Г.М., Ивичев М.П.* Высокоизбирательные микрополосковые фильтры на основе многоступенчатых гребенчатых структур с дополнительной кросс-связью // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2020. Т. 10. № 1. С. 30-33.
12. *Кириллов И.Н., Аристархов Г.М., Медведева В.С., Шигонцев А.Г.* Микрополосковые фильтры на сонправленных шпилечных резонаторах с расщепленными полюсами рабочего затухания // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2020. Т. 10. № 3. С. 14-18.