

17. *Popovich V., Vanurin S., Kokh S., Kuzyonny V.* Intellectual Geographic Information System for navigation safety // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2011. – Vol. 26. – P. 29-31.
18. *Беляков С.Л., Диденко Д.А., Самойлов Д.С.* Адаптивная процедура управления представлением рабочей области электронной карты // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 1 (114). – С. 125-130.
19. *Беляков С.Л., Розенберг И.Н.* Программные интеллектуальные оболочки геоинформационных систем. – М.: Научный мир, 2010.
20. *Беляков С.Л., Белякова М.Л., Розенберг И.Н.* Ограничения целостности при визуализации пространственной базы данных // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5. (142). – С. 138-143.
21. *Luger G.F.* Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. – Addison Wesley. – 2004.
22. *Беляков С.Л., Боженик А.В., Гинис Л.А., Герасименко Е.М.* Нечеткие методы управления потоками в геоинформационных системах. – Таганрог. – 2013.
23. *Варшавский П.Р., Еремеев А.П.* Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 1. – С. 45-57.
24. *Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. Вагина В.Н. и Поспелова Д.А. – М.: Физматлит. – 2008.
25. *Хорошевский В.Ф.* Семантическая интерпретация паттернов данных на основе структурного подхода // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2013. – № 2. – С. 3-13.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

Беляков Станислав Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: beliacov@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371695; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; д.т.н.; профессор.

Боженик Александр Витальевич – e-mail: avb002@yandex.ru; д.т.н.; профессор.

Розенберг Игорь Наумович – ОАО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт инженеров железнодорожного транспорта» (НИИАС); e-mail: lkudreyko@gismps.ru; 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, 27, стр. 1; тел.: 84959677701; зам. генерального директора; д.т.н.

Belyakov Stanislav Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: beliacov@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371695; the department of information analytical systems of safety; dr. of eng. sc.; professor.

Bozhenyuk Alexander Vitalievich – e-mail: avb002@yandex.ru; dr. of eng. sc.; professor.

Rozenberg Igor Naymovich – Public corporation “Research and development institute of railway engineers”; e-mail: lkudreyko@gismps.ru; 27/1, Nizhegorodskaya, Moscow, 109029, Russia; phone: +74959677701; deputy director; dr. of eng. sc.

УДК 621.396.67

Д.С. Дерачиц, Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА БАЗЕ САПР CST MICROWAVE STUDIO ФИЛЬТРА ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Для защиты устройств от помех и решения задачи электромагнитной совместимости необходимо использовать фильтры с затуханием 60 дБ и более в полосе заграждения. Устройства такого типа должны не только эффективно подавлять помеху в требуемом диапазоне частот, но и обладать хорошей экранировкой от проникновения в устройства наводимых

внешних помех. Применение фильтров высоких частот в сигнальном тракте может значительно улучшить соотношение сигнал/шум всего устройства за счет подавления низкочастотных шумов и дрейфа сигналов с частотами ниже, чем нижняя граница спектра полезного сигнала. Было выполнено моделирование фильтра с частотой среза 90 МГц, у которого затухание в рабочей полосе составляет не более 1 дБ, а подавление вне полосы пропускания - не менее 90 дБ. Фильтр представляет собой параллельно соединенные последовательные колебательные контуры. Каждый из контуров имеет емкостную связь с соседним контуром и работает как заграждающий фильтр, настроенный на одну из частот подавления. Перекрывание полос каждым из фильтров реализует всю полосу режекции фильтра, заданную от 0 до 90 МГц. Проектирование осуществлялось в два этапа: схемотехническое моделирование и полное 3D-электромагнитное моделирование с учетом металлического корпуса и возможного влияния между каскадами за счет поверхностных волн, возникающих на диэлектрической подложке фильтра. Пакет САПР СВЧ CST Microwave Studio обеспечивает анализ параметров электромагнитного поля в объеме проектируемого фильтра и осуществляет строгий расчет его технических характеристик.

Фильтр высоких частот; частота среза; полоса пропускания; CST Microwave Studio.

D.S. Derachits, N.N. Kisel, S.G. Grishchenko

SIMULATION OF HIGH-PASS FILTER USING SOFTWARE CST MICROWAVE STUDIO

To protect against interference and solve the problem of electromagnetic compatibility is necessary to use filters with attenuation of 60 dB or more in the stopband. Devices of this kind must not only effectively reduce the noise in the desired frequency range, but also have good shielding from penetrating into the device induced by external noise. The use of high-pass filter in the signal path can significantly improve the signal/noise ratio of the entire device by suppressing the low-frequency noise and drift signals with frequencies lower than the lower limit of the frequency spectrum of the desired signal. The work was performed modeling filter with a cutoff frequency of 90 MHz, the attenuation of which in the operating band is less than 1 dB, and the suppression is bandwidth - not less than 90 dB. A filter is a parallel-connected series resonant circuit. Each circuit is capacitively coupled to an adjacent circuit and operates as a band stop filter configured to suppress one of the frequencies. Overlapping bands of each filter implements the entire band rejection filter set from 0 to 90 MHz. Design was carried out in two phases: circuit simulation and full 3D - electromagnetic simulation with the metal body and the possible impact between stages due to surface waves generated on a dielectric substrate filter. Microwave CAD software CST Microwave Studio provides an analysis of the parameters of the electromagnetic field in the volume of the filter design and implement a rigorous calculation of its technical characteristics.

High-pass filter cutoff frequency; bandwidth; CST Microwave Studio.

Введение. Темпы развития инфокоммуникационного оборудования и энергетических систем ведут к ухудшению электромагнитной обстановки. Повышенный уровень помех за пределами рабочего диапазона частот приводит к сбоям действующей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Для защиты РЭА от помех и решения задачи электромагнитной совместимости необходимо использовать фильтры с затуханием 60 дБ и более в полосе заграждения. Устройства такого типа должны не только эффективно подавлять помеху в требуемом диапазоне частот, но и обладать хорошей экранировкой от проникновения в РЭА наводимых внешних помех.

К основным техническим параметрам любого фильтра обычно относят: амплитудную и фазовую частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ), частоту (частоты) среза, полосу пропускания, полосу подавления, уровень затухания в полосе пропускания, уровень подавления и другие. Частотой среза в любом фильтре принято считать такую частоту, при которой амплитуда выходного сигнала достигает уровня 0,707 (-3 дБ в логарифмическом масштабе) от своего максимального значения. При этом мощность, поступившая в нагрузку на выходе фильтра, составляет половину своего максимального значения. Полосу частот, в пределах которой

мощность выходного сигнала изменяется от своего максимального значения до половины, называют полосой пропускания (прозрачности) фильтра. Соответственно, полосу частот, в пределах которой мощность в нагрузке изменяется от половины максимального значения до своего минимума (в пределе – нуля), традиционно принято считать полосой подавления (заграждения или режекции) фильтра [1–22].

Известно, что фильтр высоких частот (ФВЧ) – это устройство, подавляющее входные сигналы в диапазоне частот ниже частоты среза этого фильтра. ФВЧ аналоговых сигналов бывают активными, т.е. требующими источников питания для своей работы, и пассивными, которые таких источников не требуют. В активном ФВЧ необходимо использовать активные элементы, выполненные по микроэлектронной технологии, например, операционные усилители, а пассивный ФВЧ можно изготовить только на пассивных электронных компонентах. Здесь важно отметить, что применение любых ФВЧ в сигнальном тракте РЭА может значительно улучшить соотношение сигнал/шум всего устройства за счет подавления низкочастотных шумов и дрейфа сигналов с частотами ниже, чем нижняя граница спектра частот полезного сигнала.

Моделирование фильтра высокой частоты. В работе было выполнено моделирование ФВЧ с частотой среза 90 МГц, у которого затухание в рабочей полосе составляет не более 1 дБ, а подавление вне полосы пропускания – не менее 90 дБ. Фильтр реализован как ФВЧ двадцатого порядка и представляет собой параллельно соединенные последовательные колебательные контуры (рис. 1).

Каждый из контуров имеет емкостную связь с соседним контуром и работает как заграждающий фильтр, настроенный на одну из частот подавления. Перекрывание полос каждым из фильтров реализует всю полосу режекции ФВЧ, заданную от 0 до 90 МГц [24].

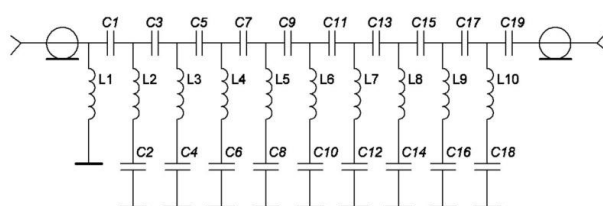


Рис. 1. Электрическая схема ФВЧ двадцатого порядка

Проектирование осуществлялось в два этапа: схемотехническое моделирование и полное 3D – электромагнитное моделирование с учетом металлического корпуса и возможного влияния между каскадами за счет поверхностных волн, возникающих на диэлектрической подложке фильтра. В результате схемотехнического моделирования рассчитаны емкости и индуктивности схемы фильтра, АЧХ которого показана на рис. 2. Параметры сосредоточенных элементов фильтра приведены в табл. 1

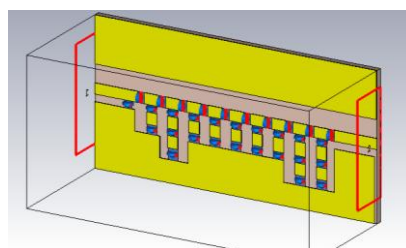


Рис. 2. Трехмерная модель ФВЧ в CST Microwave Studio

Таблица 1

Параметры сосредоточенных элементов фильтра

Обозначение	Номинал, нГн	Обозначение	Номинал, пФ	Обозначение	Номинал, пФ
L4, L5, L6, L7	82	C13	33	C17	75
L8	100	C5, C9, C11	36	C4	82
L3	110	C7	39	C16	100
L9	133	C15	43	C2	120
L2	220	C3	47	C1	150
L10	276	C8, C10	51	C18	280
L1	680	C6	56	C19	1000
		C12, C14	62		

3D-моделирование выполнялась в пакете САПР СВЧ CST Microwave Studio [23], в качестве исходных данных использовались параметры сосредоточенных пассивных элементов фильтра, полученных на первом этапе схемотехнического моделирования и приведенные в таблице выше. В качестве подложки использован стеклотекстолит FR4 толщиной 1 мм, диэлектрической проницаемостью $\epsilon=4,6$ и тангенсом диэлектрических потерь $\delta=0,015$. Модель фильтра в CST Microwave Studio и зависимости АЧХ для S-параметров показаны на рис. 2, 3 соответственно.

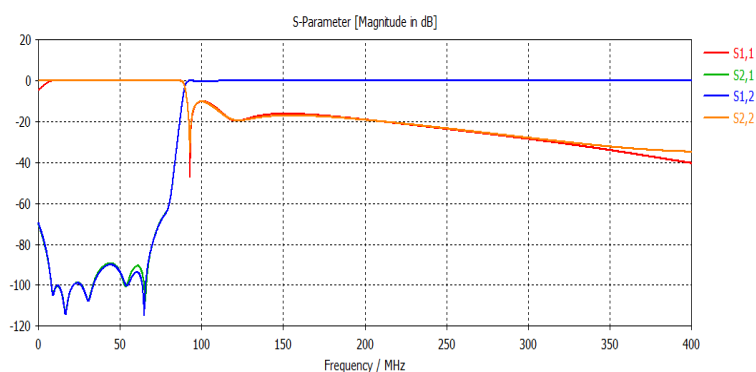


Рис. 3. АЧХ S-параметров ФВЧ

Как видно из рис. 3 в области режекции ФВЧ от 0 до 70 МГц наблюдался неравномерный характер АЧХ. При этом уровень подавления изменялся в значительных пределах от -70 дБ до -110 дБ. Кроме того минимальный уровень подавления оказался на 20 дБ меньше аналогичного параметра, полученного на этапе схемотехнического моделирования. Данный факт можно объяснить взаимным влиянием каскадов ФВЧ друг на друга из-за возникновения поверхностных волн в диэлектрической подложке, которые при схемотехническом моделировании учесть невозможно.

На рис. 4–7 представлены распределения вектора Пойнтинга и напряженности электрического поля в продольном сечении ФВЧ без экранирования между каскадами в полосе подавления на частоте 80 МГц и в полосе пропускания на частоте 400 МГц, соответственно.

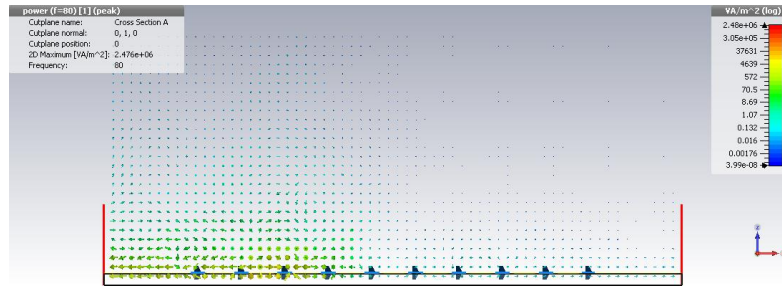


Рис. 4. Распределение вектора Пойнтинга в продольном сечении ФВЧ в полосе подавления на частоте 80 МГц

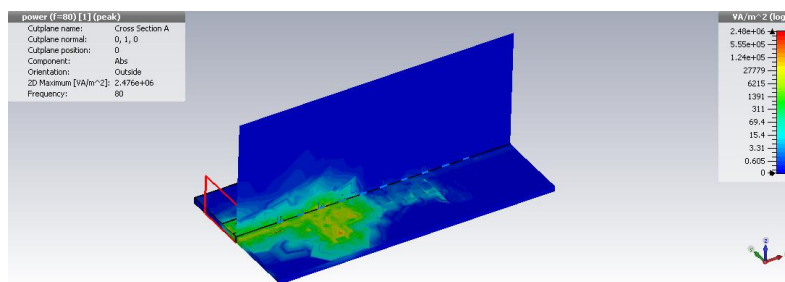


Рис. 5. Распределение напряженностей электромагнитного поля в продольном сечении ФВЧ в полосе подавления на частоте 80 МГц

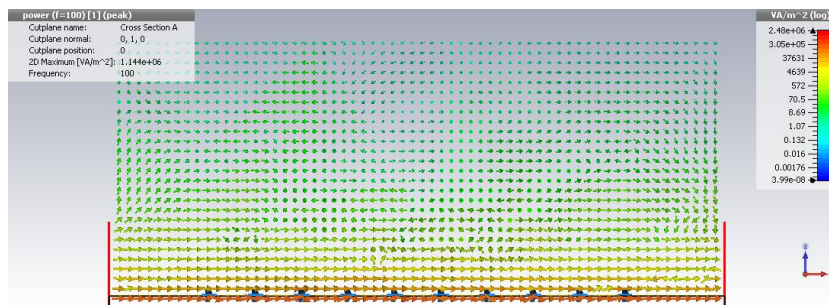


Рис. 6. Распределение вектора Пойнтинга в продольном сечении ФВЧ в полосе пропускания на частоте 400 МГц

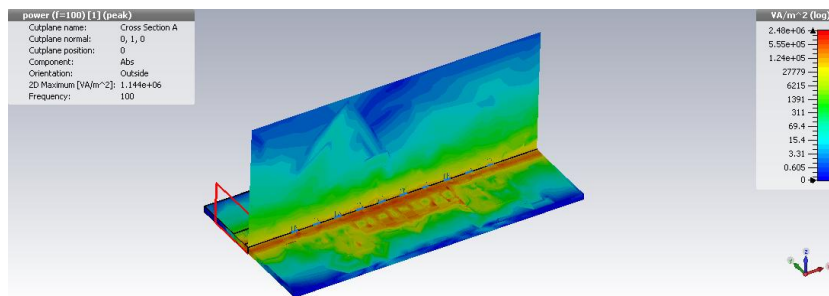


Рис. 7. Распределение напряженностей электромагнитного поля в продольном сечении ФВЧ в полосе пропускания на частоте 400 МГц

Как видно из приведенных распределений, амплитуды электромагнитного поля и вектора Пойнтинга практически полностью ослабляются ФВЧ на расстоянии менее половины продольной длины фильтра на частоте 80 МГц и практически без потерь достигают выхода фильтра на частоте 400 МГц. В полосе режекции при удалении от подложки перпендикулярно вверх амплитуды поля и вектора Пойнтинга заметно убывают. В полосе пропускания при удалении от микрополосковой линии и диэлектрической подложки в любом направлении затухание амплитуд поля и вектора Пойнтинга происходит значительно медленнее и слабее, поле локализуется в непосредственной близости к диэлектрику.

Для уменьшения электромагнитной связи между каскадами использованы стальные экраны в виде пластин, разделяющие друг от друга все каскады фильтра. Модель такого фильтра и зависимости АЧХ для его S-параметров показаны на рис. 8, 9, соответственно.

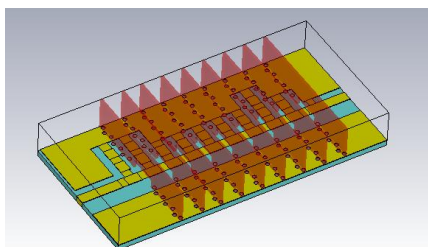


Рис. 8. Фильтр высоких частот с экранированием между каскадами

На рис. 9, 10 изображены распределения вектора Пойнтинга в продольном сечении ФВЧ с экранированием между каскадами в полосе подавления и в полосе пропускания фильтра. Аналогично результатам для фильтра без экранов (см. рис. 6, 7), амплитуды вектора Пойнтинга практически полностью ослабляются экранированным ФВЧ на расстоянии менее половины продольной длины фильтра на частоте 80 МГц и практически без потерь достигают выхода такого фильтра на частоте 400 МГц. Однако в этом случае, согласно рис. 10 и 11, энергия электромагнитного поля сконцентрирована вокруг микрополосковой линии, межкаскадных экранов и на самой диэлектрической подложке и занимает значительно меньший объем во всем фильтре.

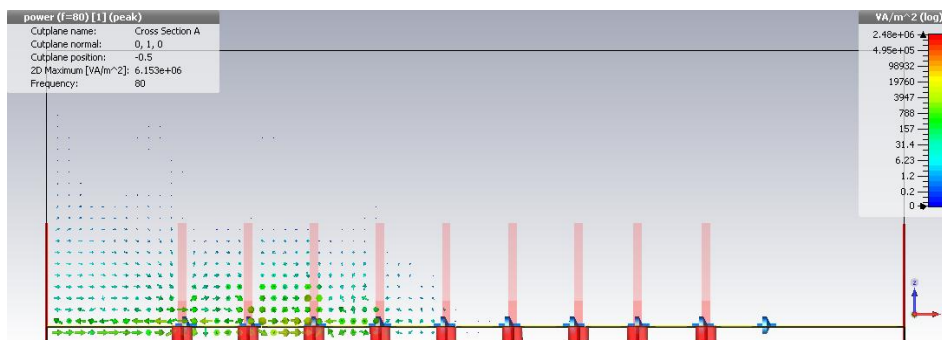


Рис. 10. Распределение вектора Пойнтинга в продольном сечении ФВЧ с экранированием всех каскадов в полосе подавления на частоте 80 МГц

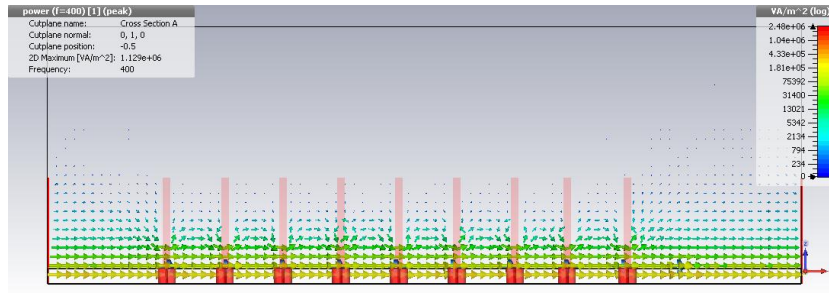


Рис. 11. Распределение вектора Пойнтинга в продольном сечении ФВЧ с экранированием всех каскадов в полосе пропускания на частоте 400 МГц

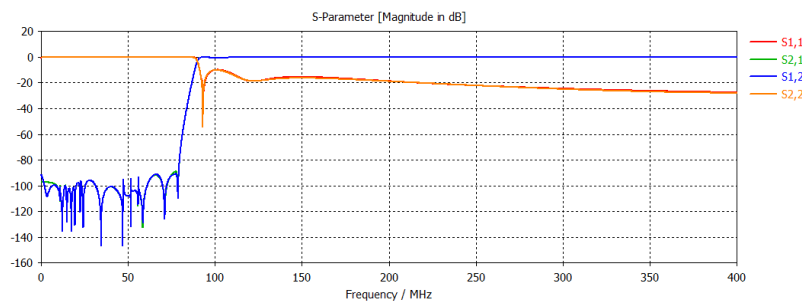


Рис. 9. Частотные характеристики S -параметров ФВЧ с экранированием всех каскадов

Заключение. Сравнение зависимостей АЧХ для ФВЧ с экранами и без них показало, что применение экранирующих пластин существенно улучшает подавление сигналов в полосе режекции фильтра. При этом наименьший уровень ослабления сигнала составил не менее -90 дБ. Использование экранов существенно влияет на поверхностную и пространственную волн, значительно уменьшая их уровень внутри объема фильтра. По сути, межкаскадные экраны образуют гребенчатую замедляющую структуру, которая совместно с диэлектрической подложкой способствует возникновению поверхностных волн. Характерным признаком поверхностной волны является экспоненциальное затухание амплитуды поля и вектора Пойнтинга в поперечном направлении от продольной поверхности самой замедляющей структуры, вдоль которой и происходит перенос энергии поля, что полностью подтверждается приведенными выше результатами моделирования.

Таким образом, задача проектирования фильтра включает в себя разработку его принципиальной схемы с обязательным учетом наличия внешних источников помех и возможного влияния корпуса и каскадов фильтра друг на друга, действие которых значительным образом влияет на технические характеристики фильтра. При проектировании фильтров с большим уровнем подавления схемотехническое моделирование не может адекватно описать, происходящие процессы формирования электромагнитного поля, поэтому необходимо выполнять трехмерный электромагнитный анализ всего устройства с помощью специализированных средств электронного моделирования. Пакет САПР СВЧ CST Microwave Studio обеспечивает анализ параметров электромагнитного поля в объеме проектируемого фильтра и осуществляет достаточно строгий расчет его технических характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Херреро Д., Уиллонер Г.* Синтез фильтров: Пер. а англ. / Под ред. И.С. Гоноровского. – М.: Сов. радио, 1971. – 232 с.
2. *Ханзед Г.Е.* Справочник по расчету фильтров. Пер. с англ. / Под ред. А.Е. Знаменского. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
3. *Антенны и устройства СВЧ. Проектирование Фазированных антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского.* – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
4. *Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алёхин Ю.Н. и др.* Под ред. Веселова Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ. – М.: Высш. шк., 1988. – 280 с.
5. *Сычёв А.Н.* Управляемые СВЧ устройства на многомодовых полосковых структурах. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 318 с.
6. *Бова Н.Т., Стукало П.А., Храмов В.А.* Управляющие устройства СВЧ. – Киев: Техника, 1973. – 163 с.
7. *Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана.* – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
8. *Statz H., Newman P., Smith I., Pucel R., Haus H.* GaAs FET device and circuit simulation in SPICE // IEEE Trans. Electron Devices. – 1987. – Vol. ED-34, №2. – P. 160-169.
9. *Разезиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А.* Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
10. *Конструирование и расчёт полосковых устройств / Под ред. И.С. Ковалёва.* – М.: Сов. радио, 1974. – 295 с.
11. *Бова Н.Т. и др.* Микроволновые устройства СВЧ. – Киев: Техника, 1984. – 182 с.
12. *Воронин М.Я.* Нерегулярные линии передачи на СВЧ: теория и применение. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 1994. – 291 с.
13. *Знаменский А.Е., Попов Е.С.* Перестраиваемые электрические фильтры. – М.: Связь, 1979. – 128 с.
14. *Saavedra C., Zheng Y.* Ring-Hybrid Microwave Voltage-Variable Attenuator Using HFET Transistors // IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques. – 2005. – Vol. 53, № 7. – P. 2430-2433.
15. *Постников В.Ф.* Элементы теории полосковых линий. – Новосибирск, 1994. – 89 с.
16. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. – М.: Связь, 1971. – Т. 1. – 495 с.
17. *Разинкин В.П., Белотелов В.В.* Новые принципы построения полосковых фильтров СВЧ // Труды 4-й Международной конференции АПЭП-98, Новосибирск, 1998. – С. 133-136.
18. *Расчёт фильтров с учётом потерь. Справочник, перевод с немецкого / Под ред. Сильвинской К.А.* – М.: Связь, 1972. – 200 с.
19. *Осипенков В.М., Бачинина Е.Л., Фельдштейн А.Л.* Вопросы расчёта фильтров СВЧ с потерями // Радиотехника. – 1973. – Т. 28, № 4. – С. 25-30.
20. *Lucyszyn S., Robertson D.* Analog reflection topology building blocks for adaptive microwave signal processing applications // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1995. – Vol. 43, № 3. – P. 601-611.
21. *Матвеев С.Ю., Разинкин В.П.* Узкополосный СВЧ фильтр // Патент 2185693 РФ: 7 Н 01 Р 1/20, 7/00. 2002. Бюл. № 20.
22. *Разинкин В.П., Белотелов В.В.* Высокоизбирательные фильтры СВЧ // Proceeding IEEE-Russia conference Microwave electronics (MEMIAT997). – Novosibirsk: NSTU, 1997. – P. 120-121.
23. *Матвеев С.Ю., Разинкин В.П.* Микрополосковый фильтр СВЧ // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – Т. 44. – № 7-8. – С. 38-41.
24. *Грищенко С.Г., Дерачиц Д.С., Кисель Н.Н.* 3D-моделирование микрополоскового фильтра высоких частот в пакете HFSS // Современная электроника. – 2015. – № 4. – С. 72-76.
25. *Курушин А.А.* Школа проектирования СВЧ устройств в CST Studio Suite. – М.: One-book, 2014. – 433 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Деращиц Дмитрий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Кисель Наталья Николаевна – кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

Грищенко Сергей Григорьевич – директор Института радиотехнических систем и управления; к.т.н.; доцент.

Derachits Dmitriy Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitter, graduate student.

Kisel Natalia Nikolayevna – the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.

Grishchenko Sergey Grigorievich – director of Institute radio engineering system and control; cand. of eng. sc.; associate professor.