Основной интерес в диапазоне частот свыше 40 ГГц представляют следующие полосы:

– 40,5–43,5 ГГц (Q-band) – первая широкая полоса, доступная для гражданской связи. Выделена для беспроводных коммуникаций в ЕС;

– 59–64 ГГц, в которой аномально велико атмосферное поглощение сигнала. Не лицензируется в США и Канаде, странах ЕС, Японии, Южной Корее, Австралии;

– 71–76/81–86 ГГц (E-band) – канал шириной 10 ГГц даёт возможность использования широкополосного сигнала, существенно увеличивая ёмкость тракта передачи данных. В России решением ГКРЧ от 15 июля 2010 года радиочастотный диапазон 71–76 ГГц / 81–86 ГГц (E-band) выделен «для применения на территории Российской Федерации РРС прямой видимости юридическими и физическими лицами без оформления отдельных решений ГКРЧ для каждого конкретного юридического или физического лица». При условии выполнения технических требований, эксплуатация РРС прямой видимости может осуществляться «без оформления разрешений на использование радиочастот или радиочастотных каналов»;

– 92–96 ГГц (W-band) – «окно прозрачности» в атмосфере.

Ведутся разработки также в области частот 122 ГГц, 160 ГГц и 245 ГГц.

Системы беспроводной сверхскоростной (1–10 Гбит/с) передачи данных КВЧ-диапазона могут использоваться в следующих направлениях:

– опорные магистральные беспроводные каналы связи;
– беспроводная опорная сеть для базовых станций операторов мобильной телефонии, для соединения базовых станций WiFi, WiMAX и LTE;
– беспроводная альтернатива оптическим кабельным каналам Интернет;
– комплексное подключение (Интернет, LAN, телефония) бизнес-центров и жилых зданий;
– синхронизация данных между устройствами на коротких расстояниях (для диапазона 60 ГГц);
– подключение «последней мили».

Создание таких систем связи неразрывно связано с разработкой базовых узлов, среди которых особое место занимают частотные фильтры. Применение пассивных LC-фильтров в SiGe БиКМОП технологиях становится в некоторых случаях затруднительно из-за невысоких добротностей катушек индуктивности, а также довольно большой занимаемой площади на кристалле, что приводит к удорожанию производства. В этом случае технологическая сложность реализации полупроводниковых высокодобротных интегральных индуктивностей предопределяет целесообразность

развития теории активных фильтров [3], являющихся, как правило, параметрически высокочувствительными устройствами. В области относительно низких частот для оптимизации этой чувствительности используются многопетлевые структуры [73], базирующиеся на дополнительных межзвенных связях [74]. Однако это требует применения широкополосных активных элементов, у которых частота единичного усиления (f_1) значительно превышает произведение частоты полюса (f_p) и его добротности (Q). Именно эта причина препятствует применению оптимальных структур в СВЧ- и КВЧ-фильтрах и приводит к необходимости использовать каскадное включение звеньев второго порядка. В этом случае основной задачей построения таких избирательных усилителей является уменьшение потребляемой мощности и минимизация чувствительности параметров f_p и Q.

5.1. Перспективные структуры полосно-пропускающих звеньев на основе усилителей тока

В работе [3] показано, что в звеньях второго порядка рисунка 5.1, на которых реализуются избирательные усилители СВЧ- и КВЧ-диапазонов, уменьшение потребляемой мощности и увеличение частоты единичного усиления f_1 достигается в случае использования в качестве активных элементов неинвертирующих усилителей тока (УТ1) [17, 58, 59], в контуре обратной связи которых включаются как разделённые, так и неразделительные частотозадающие RC-цепи [75].

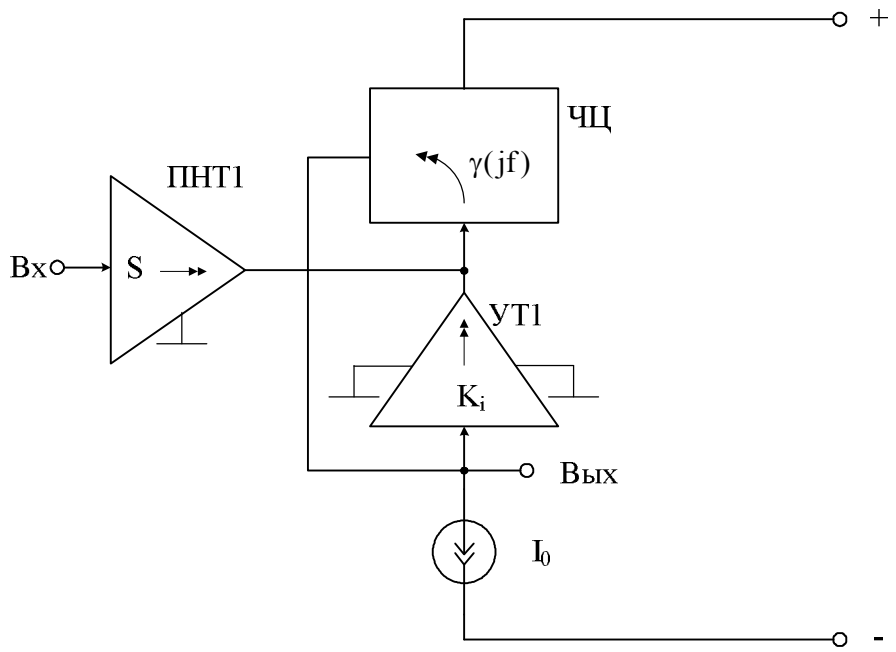

Рис. 5.1. Обобщённая структура звена полосно-пропускающего типа на базе усилителя тока УТ1 [75]

В этом случае (рис. 5.1) для повышения стабильности частоты полюса (f_p) необходимым условием является использование в контуре обратной связи частотозависимой цепи (ЧЦ) полосно-пропускающего типа

$$\gamma(jf) = \frac{jff_p(D_p - D_0)}{f_p^2 - f^2 + jff_pD_p}, \tag{5.1}$$

где D_0 и D_p – затухание нуля и полюса частотно-задающей RC-цепи.

При этом частота полюса звена совпадает с частотой полюса этой цепи.

В этом случае влияние усилителя тока УТ1 направлено только на увеличение добротности Q:

$$Q = [K_iD_0 + D_p(1 - K_i)]^{-1}, \tag{5.2}$$

где K_i – коэффициент передачи усилителя тока.

Однако влияние частоты единичного усиления (f_1) этого активного элемента приводит к изменению как f_p, так и Q, причём их относительные изменения δf_p и δQ определяются из следующего соотношения:

$$\delta f_p = -\delta Q = -\frac{1}{2}\frac{f_p}{f_1}D_pK_i, \tag{5.3}$$

а их параметрические чувствительности находятся по формуле:

$$S_{f_1}^{f_p} = -S_{f_1}^{Q} = \frac{1}{2}\frac{f_p}{f_1}D_pK_i. \tag{5.4}$$

Приведённые соотношения позволяют определить требуемые параметры K_i и f_1 для реализации необходимых значений f_p и Q, их стабильности, а также сформулировать задачу практического построения усилителей тока.

В области относительно низких частот повышение точности реализации частоты и добротности полюса звеньев второго порядка возможно применением в усилителях тока дополнительных цепей собственной компенсации [18, 20, 21, 76], направленных на увеличение f_1, или созданием специальных структур с дополнительными компенсирующими усилителями, когда относительные изменения (5.3) компенсируются действием этих дополнительных активных элементов [77]. Однако в СВЧ- и КВЧ-диапазонах эти подходы приводят к существенному увеличению «электрической длины» и оказываются неэффективными. Именно поэтому в соответствии с (5.3), (5.4), общая задача построения таких звеньев связана с минимизацией произведения D_pK_i – собственного затухания полюса частотозадающей цепи и коэффициента передачи усилителя тока K_i. Это утверждение согласуется и условием уменьшения чувствительности добротности к нестабильности параметра K_i:

$$S_{K_i}^{Q} = Q(D_p - D_0)K_i. \tag{5.5}$$

При решении задачи необходимо учитывать основные параметры полупроводниковых компонентов используемых технологических процессов.

5.2. Активные RC-фильтры

Приведённые соотношения показывают, что расширение диапазона рабочих частот активных фильтров с архитектурами, рассмотренными в главе 1, связано с уменьшением затухания полюса D_p и нуля D_0 пассивных частотозадающих цепей [75]. В некоторых случаях для этого можно использовать «разделение» цепи второго порядка [14], содержащее дополнительные повторители тока. Однако в области достаточно высоких частот это приводит к увеличению «электрической длины» и уменьшению f_1 усилителей тока. При этом уменьшение D_p в сравнении с «мостовыми» цепями второго порядка оказывается незначительным [61].

В общем случае для мостовых RC-цепей:

$$D_p = \sqrt{m}(\sqrt{k} + 1/\sqrt{k}) + \frac{1}{\sqrt{mk}},\ D_0 = \sqrt{m}(\sqrt{k} + 1/\sqrt{k}), \tag{5.6}$$

где m, k – отношение номиналов однотипных пассивных элементов (R, C).

Таким образом, как это следует из (5.2):

$$Q = \left[D_0 + \frac{1 - K_i}{\sqrt{mk}} \right]^{-1}. \tag{5.7}$$

Следовательно, для повторителей тока (K_i=1) добротность:

$$Q = \left[\sqrt{m}(\sqrt{k} + 1/\sqrt{k}) \right]^{-1} \tag{5.8}$$

определяется только соотношением номиналов пассивных элементов, а её параметрическая чувствительность минимизируется при k=1

$$S_k^Q = 0,\ S_m^Q = -\frac{1}{2},\ S_{K_i}^Q = 2Q^2. \tag{5.9}$$

В этом случае, как это следует из (5.4), чувствительности f_p и Q принимают значения:

$$S_{f_1}^{f_p} = -S_{f_1}^Q = \frac{f_p}{f_1} Q. \tag{5.10}$$

Для уменьшения чувствительностей (5.10) необходимо увеличивать коэффициент передачи K_i усилителя тока. В этом варианте D_{pmin}=3 для равнономинальных RC-цепей. Однако увеличение K_i связано с пропорциональным уменьшением f_1. Тогда при реализации произвольной добротности этот параметр должен удовлетворять условию K_i<3 и, следовательно, в этом случае

$$S_{f_\alpha}^{f_p} = -S_{f_\alpha}^Q \approx 14\frac{f_p}{f_\alpha},\ S_K^Q = 3Q, \tag{5.11}$$

где f_α – граничная частота коэффициента передачи по току транзисторов в усилителе тока.

Таким образом, при реализации среднего значения добротности использование повторителей тока оказывается предпочтительным не только по диапазону рабочих частот [75]. Действительно, возможность оптимизации параметрической чувствительности добротности (5.9) является дополнительным аргументом в пользу повторителя тока. Кроме этого, такой вариант схемы позволяет уменьшить величину потребляемого тока звеном фильтра.

На рисунке 5.2 показан пример реализации этого варианта звена второго порядка (избирательного усилителя) на базе двух биполярных транзисторов в каскодном включении [78].

В этой схеме

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 (R_2 + h_{11.1})}}, \tag{5.12}$$

$$k = C_1/C_2,\ m = (R_2 + h_{11.1})/R_1,\ K_i = \alpha_1, \tag{5.13}$$

где $h_{21.i}=\alpha_i \le 1$ и $h_{11.i}$ – малосигнальные параметры i-го транзистора в схеме с общей базой.

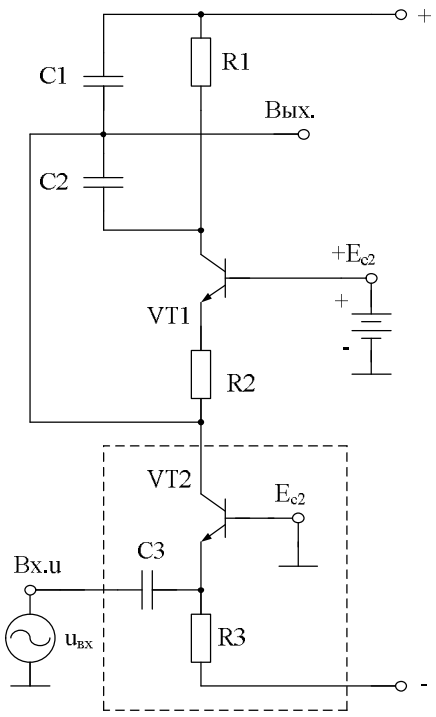

Рис. 5.2. Звено полосового RC-фильтра СВЧ-диапазона [78]

Учитывая, что в данной схеме $K_i<1$, реализуемая добротность отличается от рассчитанной по соотношению (5.8). Из (5.7) при k=1 следует, что

$$Q = \left[2\sqrt{m} + \frac{1-\alpha_1}{\sqrt{m}} \right]^{-1}. \tag{5.14}$$

Поэтому при

$$m = \frac{R_2 + h_{11.1}}{R_1} = \frac{1-\alpha_1}{2} \tag{5.15}$$

реализуется максимальная добротность полюса

$$Q_{max} = \frac{\sqrt{(1+\beta_1)}}{2\sqrt{2}}, \tag{5.16}$$

где $\beta_1 = \alpha_1/(1-\alpha_1)$ – коэффициент усиления тока базы транзистора VT1.

Однако в любом случае коэффициент усиления схемы на частоте полюса f_p определяется следующим соотношением:

$$K_0 = Q\frac{\alpha_2}{h_{11.2}}\sqrt{R_1(R_2 + h_{11.1})}\sqrt{k}. \tag{5.17}$$

Для упрощения процедуры каскадирования такого звена во входной цепи схемы использован дополнительный конденсатор C3. Исключение его влияния на приведённые выше параметры требует выполнения неравенства:

$$C_3 >> \frac{1/R_3 + 1/h_{11.2}}{2\pi f_p}. \tag{5.18}$$

На рисунке 5.3 приведена принципиальная схема СВЧ RC-фильтра, а на рисунке 5.4 – результаты её моделирования в САПР Agilent ADS на базе SiGe 0,25 мкм технологии (техпроцесс SG25H1).

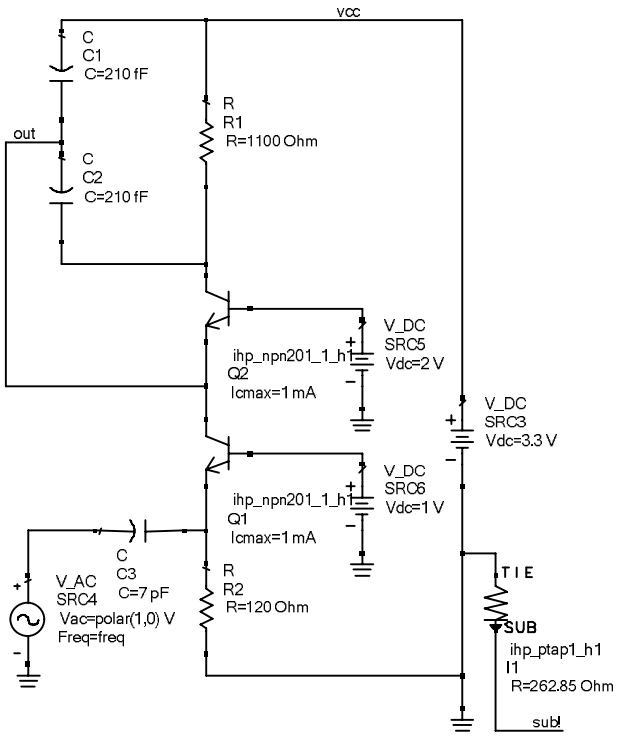

Рис. 5.3. Принципиальная схема звена RC-фильтра

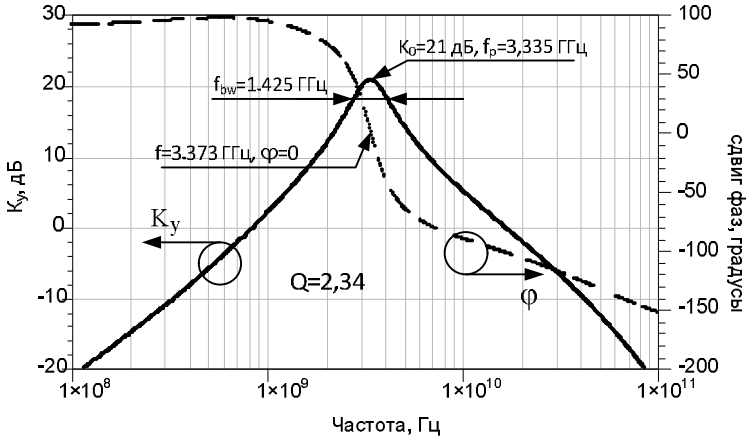

Рис. 5.4. Амплитудная и фазочастотная характеристики звена активного СВЧ-фильтра

5.3. Активные RLC-фильтры

Согласно соотношениям (5.3), (5.4), (5.5) существенное уменьшение влияния $f_т$ транзисторов на реализуемые схемой ИУ параметры и повышение их стабильности достигается уменьшением затуханий нуля и полюса частотозависимых цепей второго порядка. С этой целью в их структуре ИУ можно использовать интегральные низкодобротные индуктивности при сохранении основных свойств частотозадающей цепи (5.1).

На рисунке 5.5 приведён вариант реализации такой цепи в структуре избирательного усилителя на основе повторителя тока, реализуемого на транзисторе VT1 [75].

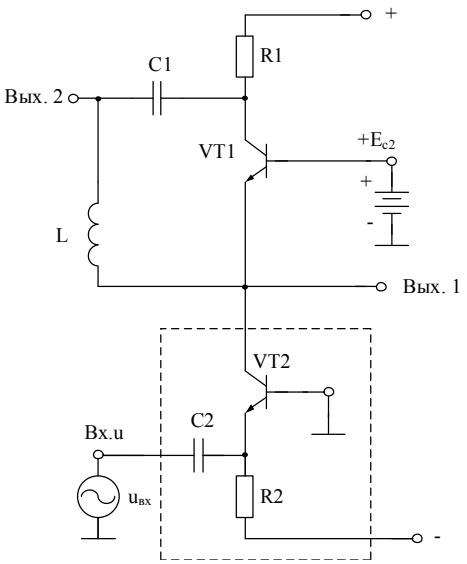

Рис. 5.5. Избирательный RLC-усилитель КВЧ-диапазона

Здесь

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \tag{5.19}$$

$$D_0 = h_{11.1}\sqrt{\frac{C}{L}},\ D_p = D_0 + R\sqrt{\frac{C}{L}}. \tag{5.20}$$

Поэтому, согласно (5.2)

$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \Big/ [h_{11.1} + R(1-\alpha_1)]. \tag{5.21}$$

Как видно из (5.20), соотношение C и L определяет D_p и, согласно (5.3) и (5.4), влияние $f_т$ транзистора VT1. Реализуемый схемой «выигрыш» зависит от добротности полюса схемы. Например, при L=10 нГн, R=100 Ом, C=10 фФ и потребляемом токе в 1 мА получаем, что

$$f_p = 16 \text{ ГГц};\ Q = 37;\ D_0 = 0{,}25;\ D_p = 0{,}35. \tag{5.22}$$

Поэтому влияние $f_т$ как на f_p, так и на Q, согласно соотношениям (5.10) и (5.4), уменьшается почти на два порядка в сравнении с классическим RC-звеном.

Кроме того, в RLC-варианте возможна режимная настройка реализуемой добротности полюса практически без изменения f_p. Действительно, как это следует из (5.21), изменение входного сопротивления VT1 $h_{11.1} = \varphi_т / I_0$ под действием статического тока эмиттера (I_0) влияет только на D_0 пассивной цепи.

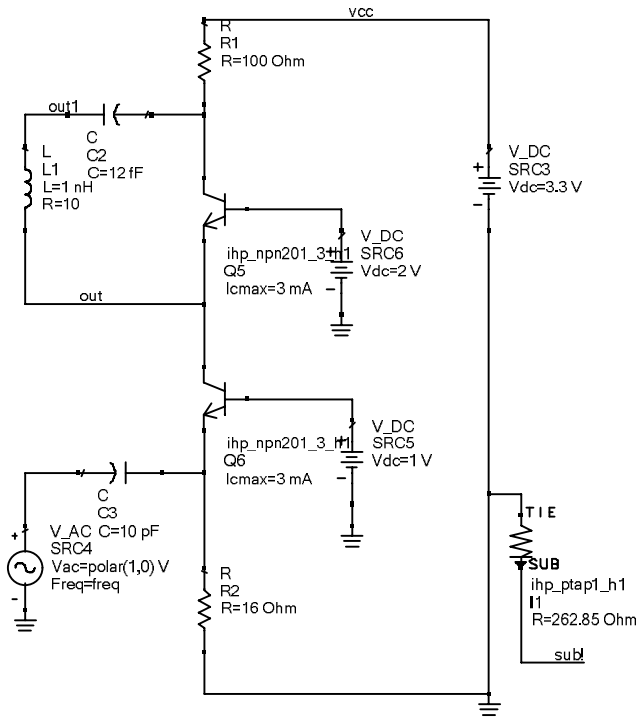

Рис. 5.6. Принципиальная схема RLC-усилителя КВЧ-диапазона

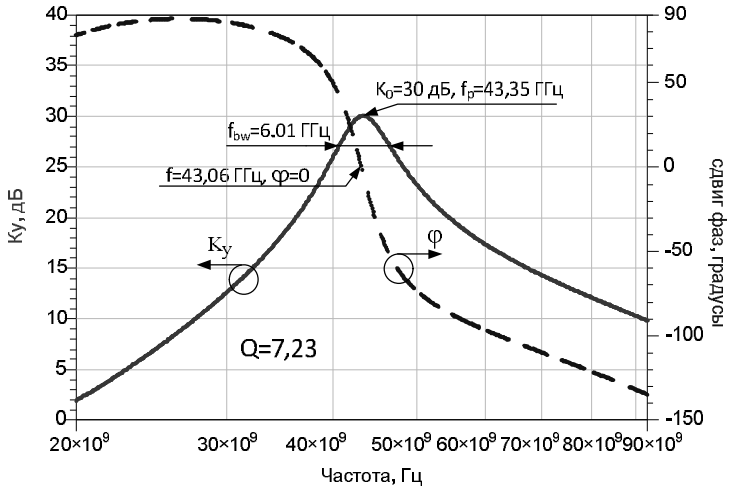

Рис. 5.7. Результаты моделирования схемы RLC-усилителя рисунка 5.1

На рисунке 5.6 приведена принципиальная схема КВЧ RLC-звена второго порядка, а на рисунке 5.7 – результаты её моделирования в САПР Agilent ADS на базе SiGe 0,25 мкм технологии (техпроцесс SG25H1 [79]).

В отличии от СВЧ-диапазона в КВЧ-диапазоне требуется специальная параметрическая оптимизация схемы с учётом влияния прочих, не рассмотренных в работе источников погрешности.

5.4. Выводы

Полученные результаты показывают, что совокупность структурных, схемотехнических и параметрических условий позволяют в рамках существующих технологических ограничений реализовать достаточно высококачественные полосовые фильтры СВЧ- и КВЧ-диапазонов для физических измерений.

Во-первых, использование в контуре регенеративной обратной связи частотозависимых цепей как RC-, так и RLC-классов обеспечивает предельно низкую активную чувствительность параметров полюса передаточной функции. При этом возможность минимизации затухания полюса пассивной цепи обеспечивает основные качественные показатели звена второго порядка и целесообразность замены RC-базиса на RLC-цепь второго порядка.

Во-вторых, особенность реализации усилителей тока как активных элементов позволяет за счёт увеличения их частоты единичного усиления предельно расширить возможный диапазон рабочих частот звеньев при относительно больших значениях реализуемой добротности и создать условия для настройки частоты полюса.

Наконец, и это самое главное, параметры проектирования m и k позволяют создать область параметрического компромисса для численных значений ёмкостных и резистивных элементов и удовлетворить дополнительным технологическим ограничениям при построении электронной компонентной базы СВЧ- и КВЧ-диапазонов техники физических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korotkov A.S., Morozov D.V., Unbehauen R., Low-voltage continuous-time filter based on a CMOS transconductor with enhanced linearity, Int. J. Electronics and Communications (AEÜ), Dec. 2002. – V. 56, no. 6. – P. 416–420.

2. Korotkov A.S., Morozov D.V., Hauer H., Unbehauen R., A 2.5-V, 0.35 um CMOS transconductance-capacitor filter with enhanced linearity, Proc. Midwest Symposium on Circuits and Systems, Tulsa, USA, Aug. 2002. – V. 3. – P. 141–144.

3. Krutchinsky S.G., Prokopenko N.N. High-frequency section of active filters of mixed-signal SoC based on current amplifiers [Электронный ресурс] // Электрон. журн. ISRN Electronics, 2012. – URL: http://www.isrn.com /journals /electronics/2012/319896/

4. Maheshwari S., Khan I.A. High performance versatile translinaear – c universal filter // Journal of Active and Passive Electronic Devices. – 2005. – V. 1. – P. 41–51.

5. Krutchinsky S.G. Active R-filters with additional RC-circuits // Proceeding ICCSC'08, Bucharest, Romania. – 2008. – P. 100–105.

6. IHP – Innovations for High Performance Microelectronics: SiGe:C BiCMOS technologies [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ihp-ffo.de/en/services/mpw-prototyping/sigec-bicmos-technologies.html (дата обращения: 12.10.2012).

7. VBIC Home Page [Электронный ресурс]. – URL: http://www. designers-guide.org/VBIC/ (дата обращения: 12.10.2012).

8. Крутчинский С.Г., Иванов Ю.И., Крикун И.Я. Расширение динамического диапазона в многоконтурных полиномиальных ARC-фильтрах // Радиотехника. – 1989. – № 8. (in Russia).

9. Roberts G.W., Sedra A.S. All current-mode frequency selective circuits // Electronics Letters. – 1989. – V. 25, no. 12. – P. 759–761.

10. Keskin A.V., Hancioglu E. Current-mode multifunction filter using two CDBAs // Int. Journal of Electronics and communications. 2005. – V. 59, no. 8. – P. 485–498.

11. Yuce E., Minaci S. Universal current-mode filters and parasitic impedance effects on the filter performance // Int. Journal of circuit theory and Applications. – 2008. – V. 36, no. 2. – P. 161–171.

12. Sagbas M., Ayten U.E., Sedef H. Current and voltage transfer function filters using a single active device // IET Circuits Devices and Systems. – 2010. – V. 4. – P. 78–86.

13. Krutchinsky S.G. Fundamental limitations in precision analog circuits. Proceeding ICCSC`02, St. Peterburg, Russia, 2002. – P. 16–19.

14. Крутчинский С.Г., Иванов Ю.И., Григорьев В.С. Прецизионные ARC-звенья второго порядка // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – Т. 42. – № 8.

15. Прокопенко Н.Н., Крюков С.В., Хорунжий А.В. Особенности проектирования аналоговых микросхем на транзисторах с малым напряжением Эрли // Всерос. науч.-техн. конф. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС): сб. тр. – 2008. – № 1. – С. 324–329.

16. Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Крюков С.В. Способ усиления сигналов в структуре дифференциальных каскадов с цепями взаимной компенсации импедансов низкоомных резисторов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. – Т. 102. – № 1. – С. 90–94.

17. Прокопенко Н.Н., Конев Д.Н., Серебряков А.И. Широкополосный аналоговый перемножитель напряжений на базе токовых зеркал // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2009. – Т. 94. – № 5. – С. 86–92.

18. Прокопенко Н.Н., Хорунжий А.В., Конев Д.Н. Способ расширения диапазона рабочих частот каскодного дифференциального усилителя // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – Т. 80. – № 3. – С. 192–194.

19. Крутчинский С.Г. Особенность структурного синтеза принципиальных схем микроэлектронных устройств частотной селекции // Известия РАН «Микроэлектроника». – 1996. – № 4.

20. Крутчинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Старченко Е.И. Компенсация паразитных ёмкостей активных элементов в электронных устройствах // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем: сб. науч. тр. / под общ. ред. Академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2006. – С. 194–199.

21. Крутчинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Ковбасюк Н.В., Будяков А.С., Савченко Е.М. Методы компенсации основных составляющих выходной ёмкости транзисторов в аналоговых микросхемах // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем: сб. науч. тр. / под общ. ред. Академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2006. – С. 223–228.

22. Krutchinsky S.G., Prokopenko N.N., Budykov A.S. Compensation methods of basic transistors output capacitance components in analog integrated circuits. Proceeding ICCSC`06, Bucharest, Romania, 2006. – P. 44–49.

23. Структурный синтез в аналоговой микросхемотехнике: монография. – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. – 260 с.

24. Волгин В.И., Зарукин А.И. Синтез и схемотехника аналоговых электронных средств в элементном базисе усилителей и повторителей тока / под общ. ред. Л.А. Волгина. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 200 с.

25. Toumazou C., Lidgey F.J., Haigh D.G. Analogue IC design: the current-mode approach // IEE Circuits and Systems Series 2. – Peter Peregrinus Ltd, 1990. – 646 с.

26. Прокопенко Н.Н., Ковбасюк Н.В. Схемотехника широкополосных усилителей: монография. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2005. – 218 с.

27. Широкополосный усилитель тока: заявка на патент Рос. Федерация: МПК8 H03F 3/45 / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Бутырлагин Н.В. – № 2011134144/08; заявл. 12.08.2011 (375).

28. Широкополосный усилитель тока: заявка на патент Рос. Федерация: МПК8 H03F 3/45 / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Ковбасюк Н.В., Пахомов И.В. – № 2011142544/08; заявл. 20.10.2011 (419).

29. Усилитель переменного тока с противофазными токовыми выходами: заявка на патент Рос. Федерация: МПК8 G05F 3/26, 3/16, H03F 3/45, H03F 3/04 / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Пахомов И.В. – № 2011143337/08; заявл. 26.10.2011 (380).

30. Многокаскадный усилитель переменного тока: заявка на патент Рос. Федерация: МПК8 H03F 3/45 / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Пахомов И.В. – № 2011142718/08; заявл. 13.10.2011 (389).

31. Входной каскад быстродействующего операционного усилителя: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/34, H03F 3/45 / Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В., Юдин А.Г. – № 2012134440/08; заявл. 10.08.2012 (477)

32. Прокопенко Н.Н. Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей: монография / Н.Н. Прокопенко, А.С. Будяков. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 231 с.

33. Дифференциальный операционный усилитель с парафазным выходом: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/34б 3/45 / Прокопенко Н.Н., Белич С.С., Пахомов И.В. – № 2012108697/08; заявл. 06.03.2012 (324).

34. СВЧ СФ-блоки систем связи на базе полностью дифференциальных операционных усилителей / Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Schmalz K., Scheytt C. // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010: сб. тр. / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 583–586.

35. Широкополосный дифференциальный усилитель: заявка на патент Российской Федерации; МПК8 H03F 3/34, 3/45 / Прокопенко Н.Н., Белич С.С., Пахомов И.В. – № 2012103439/08; заявл. 01.02.2012 (443).

36. Дифференциальный операционный усилитель с парафазным выходом: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/34, 3/45 / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Белич С.С. – № 2011101715/09; заявл. 18.01.2011 (346).

37. Широкополосный дифференциальный усилитель с парафазным выходом: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/34, 3/45 / Прокопенко Н.Н., Белич С.С., Бутырлагин Н.В. – № 2012106541/08; заявл. 22.02.2012 (445).

38. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Бутырлагин Н.В. – № 2012113599/08; заявл. 06.04.2012 (459).

39. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Пахомов И.В. – № 2011145406/08; заявл. 08.11.2011 (394).

40. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. – № 2012103434/08; заявл. 01.02.2012 (437).

41. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Крутчинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С. – № 2012101722/08; заявл. 18.01.2012 (435).

42. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00/ Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Пахомов И.В. – № 2012106542/08; заявл. 22.02.2012 (444).

43. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Серебряков А.И. – № 2012103440/08; заявл. 01.02.2012 (436).

44. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. – № 2011144981/08; заявл. 07.11.2011 (411).

45. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Крутчинский С.Г. – № 2011144592/08; заявл. 02.11.2011 (412).

46. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Федосеев С.В., Крутчинский С.Г., Юдин А.Г. – № 2012132336/08; заявл. 27.07.2012 (464).

47. Метод собственной компенсации импедансов пассивной коллекторной нагрузки в широкополосных усилителях / Н.Н. Прокопенко, Н.В. Ковбасюк, А.И. Серебряков // Успехи современной радиоэлектроники. – № 9. – 2011. – С. 71–76.

48. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Крутчинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С. – № 2012112783/08; заявл. 02.04.2012 (449).

49. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. – № 2012100454/08; заявл. 10.01.2012 (426).

50. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Пахомов И.В. – № 2012100207/08; заявл. 10.01.2012 (390-3).

51. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. – № 2011145838/08; заявл. 10.11.2011 (410).

52. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. – № 2012100520/08; заявл. 10.01.2012 (421).

53. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. – № 2012100202/08; заявл. 10.01.2012 (434).

54. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Серебряков А.И., Золотарев А.В. – № 2011141385/08; заявл. 12.10.2011 (381).

55. Прокопенко Н.Н., Ковбасюк Н.В. Архитектура и схемотехника аналоговых микросхем с собственной и взаимной компенсацией импедансов: монография. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. – 326 с.

56. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. – № 2011142126/08; заявл. 18.10.2011 (383).

57. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Крутчинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И. – № 2011138608/08; заявл. 20.09.2011 (378).

58. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Савченко Е.М. Операционные усилители с обобщённой токовой обратной связью // Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)»: сб. тр. – 2008. – № 1. – С. 330–333.

59. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Савченко Е.М. [и др.] Предельные динамические параметры операционных усилителей с обратной связью по напряжению и усилителей с «токовой обратной связью» в линейном и нелинейном режимах // Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)»: сб. тр. – 2006. – № 1. – С. 229–234.

60. Крутчинский С.Г. Смешанные системы на кристалле для систем автоматического управления и технической диагностики // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2006: сб. науч. тр. / под общ. ред. Академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2006. – С. 217–222.

61. Крутчинский С.Г. Повышение стабильности ARC-устройств на базе унифицированных микрокомпонентов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2002. – Т. 45. – № 2. – С. 55–61.

62. Крутчинский, С.Г., Прокопенко Н.Н., Сухинин Б.М. [и др.] Высокочастотные SiGe-избирательные усилители с узкой полосой пропускания в рецензируемом журнале // Электрон. журн. «Инженерный вестник Дона». – № 3. – 2012. – URL: http://www.ivdon.ru/magazine/archive /n3y2012 /1031

63. Управляемый избирательный усилитель для техпроцесса SG25VD: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Сухинин Б.М., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. – № 2012132332/08; заявл. 27.07.2012 (462).

64. Будяков П.С., Белич С.С., Семенищев Е.А. [и др.] Управляемые избирательные усилители СВЧ-диапазона // Электрон. журн. «Инженерный вестник Дона». – № 4. – 2012. – URL: http://www.ivdon.ru/magazine /archive/n4t1y2012/1059

65. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Серебряков А.И. – № 2011138798/08; заявл. 21.09.2011 (379).

66. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Серебряков А.И. – № 2011139548/08; заявл. 28.09.2011 (379-1).

67. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Серебряков А.И., Радченко В.А. – № 2011139769/08; заявл. 29.09.2011 (379-2).

68. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Серебряков А.И., Радченко В.А. – № 2011140102/08; заявл. 03.10.2011 (379-3).

69. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Крутчинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И. – № 2012102650/08; заявл. 25.01.2012 (427).

70. Избирательный усилитель с малым током потребления для SiGe техпроцессов: заявка на патент РФ; МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Миляева С.И., Будяков П.С. – № 2012132721/08; заявл. 31.07.2012 (468).

71. Избирательный усилитель: заявка на патент РФ, МПК8 H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00 / Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Пахомов И.В., Савенко А.В. – № 2012132283/08; заявл. 27.07.2012 (472).

72. Жоую Пи, Фарук Хан. Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона // Электроника: Наука, технология, бизнес. – Т. 3. – № 113. – С. 86–94.

73. Капустян В.И. Проектирование активных RC-фильтров высокого порядка. – М.: Радио и связь, 1982. – С. 160.

74. Крутчинский С.Г., Иванов Ю.И., Крикун И.Я. Расширение динамического диапазона в многоконтурных полиноминальных ARC-фильтрах // Радиотехника. – 1989. – № 8. – С. 15–20.

75. Прокопенко Н.Н., Крутчинский С.Г., Будяков П.С. [и др.]. Полосовые фильтры СВЧ- и КВЧ-диапазонов // Известия вузов. Северокавказский регион. Технические науки. – 2012. – №5. – С. 35–39.

76. Prokopenko N.N., Budyakov A.S., Kovbasjuk N.V., Krutchinsky S.G., Savchenko J.M. Compensation methods of basic transistors output capacitance components in analog integrated circuits // 4th European Conference on Circuits and Systems for Communications, ECCSC '08 sponsors: Romanian Ministry of Education. – Bucharest, 2008. – С. 77–82.

77. Крутчинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Старченко Е.И. [и др.]. Опыт разработки и моделирования аналоговых микросхем с предельными параметрами на базе Российских биполярных технологий // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2006: сб. науч. тр. / под общ. ред. Академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2006. – С. 206–211.

78. Избирательный усилитель СВЧ-диапазона: заявка на патент Российской Федерации; МПК H03F 3/45, H03H 11/00, H03K 5/00. / Прокопенко Н.Н., Крутчинского С.Г., Махмудов М.Н., Будяков П.С. – № 2012132585/08; заявл. 27.07.12 (466).

79. Раздел параметров SiGe:C БиКМОП техпроцессов [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ihp-microelectronics.com/en/services/mpw-prototyping/sigec-bicmos-technologies.html (дата обращения: 01.08.2012).

Научное издание

Прокопенко Николай Николаевич
Крутчинский Сегрей Георгиевич
Жебрун Евгений Александрович
Будяков Пётр Сергеевич

ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ФИЛЬТРЫ ВЧ- И СВЧ-ДИАПАЗОНОВ

ELECTION AMPLIFIERS AND FILTERS RF AND MICROWAVES

Монография

Ответственный за выпуск Н.В. Ковбасюк

ИД № 06457 от 19.12.01 г. Издательство ЮРГУЭС.
Подписано в печать 10.12.2012 г.
Формат бумаги 60x90/16. Усл. печ. л. 18,75 Тираж 30 экз. Заказ № 493.

ПД № 10-65175 от 05.11.99 г.
Типография Издательства ЮРГУЭС.
346500, г. Шахты, Ростовская обл., ул. Шевченко, 147