

УДК 621.37

Малошумящий перестраиваемый узкополосный полосно-пропускающий фильтр, построенный на основе совместного использования дискретных конденсаторов переменной емкости и дискретных катушек переменной индуктивности

¹ Посный О. А., ¹ Долгушев С. В., ² Посная Е. А.

¹АО «КБ радиосвязи»

Фиолентовское шоссе, 1/2, корпус «А» литер «М»
помещение I-3, Севастополь, 299053, Российская Федерация
posnyi@rambler.ru

²Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
sntulena@mail.ru

Получено: 6 октября 2019 г.

Отрецензировано: 20 декабря 2019 г.

Принято к публикации: 25 декабря 2019 г.

Аннотация: Представлены результаты разработки малошумящего перестраиваемого узкополосного полосно-пропускающего фильтра, используемого в качестве входного селектора коротковолнового приемника. Предложена схема построения полосно-пропускающего фильтра на основе совместного использования дискретных конденсаторов переменной емкости и дискретных катушек переменной индуктивности. Определены границы частотного диапазона и максимально достижимый коэффициент перекрытия при практической реализации схемы, исходя из возможностей современной элементной базы. Получены данные частотной избирательности и уровня собственных шумов в ходе практических исследований для различных конфигураций селектора. Отмечено, что полученные характеристики превосходят параметры современных аналогов. Селектор внедрен в серийное производство и поставляется как самостоятельное изделие, а также в составе коротковолнового приемника.

Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, коротковолновый приемник, малошумящий селектор, дискретный конденсатор переменной емкости, дискретная катушка переменной индуктивности.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Посный О. А., Долгушев С. В., Посная Е. А. Малошумящий перестраиваемый узкополосный полосно-пропускающий фильтр, построенный на основе совместного использования дискретных конденсаторов переменной емкости и дискретных катушек переменной индуктивности // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 4. С. 539—546.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Посный, О. А. Малошумящий перестраиваемый узкополосный полосно-пропускающий фильтр, построенный на основе совместного использования дискретных конденсаторов переменной емкости и дискретных катушек переменной индуктивности / О. А. Посный, С. В. Долгушев, Е. А. Посная // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 4. — С. 539—546.

Low-noise tunable narrow bandpass filter designed based on combined use of discrete variable capacitor and discrete variable inductor

O. A. Posnyi¹, S. V. Dolgushev¹, and E. A. Posnaya²

¹*OJSC «Radio Design»*

*1/2 Fiolentovskoe Rd, Sevastopol, 299053, Russian Federation
posnyi@rambler.ru*

²*Sevastopol State University*

*33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
sntulena@mail.ru*

Received: October 6, 2019

Peer-reviewed: December 20, 2019

Accepted: December 25, 2019

Abstract: *The development results of low-noise tunable narrow bandpass filter used as input selector for short-wave receiver are presented. A filter construction scheme is proposed based on joint use of discrete variable capacitor and discrete variable inductor. The frequency range boundaries and maximum achievable overlap coefficient are determined for the circuit practical implementation, based on the capabilities of the modern element base. The frequency selectivity data and level of intrinsic noise were obtained in the course of practical research for various selector configurations. It is noted that the obtained characteristics exceed parameters of modern analogues. The selector is introduced into serial production and is supplied as independent product, as well as part of a short-wave receiver.*

Keywords: *bandpass filter, shortwave receiver, low-noise selector, discrete variable capacitor, discrete variable inductor.*

For citation (IEEE): O. A. Posniy et al. "Low-noise tunable narrow bandpass filter designed based on combined use of discrete variable capacitor and discrete variable inductor," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 539–546, 2019. (In Russ.).

1. Введение

В последние десятилетия коротковолновый диапазон частот стал менее загруженным, в первую очередь, по причине перехода многих вещательных станций из эфира в сеть Интернет. Также одной из причин является освоение более высокочастотных диапазонов на фоне угасания интереса к коротковолновой радиосвязи и вещанию, обусловленного большей энергозатратностью и меньшей пропускной способностью канала. Однако, несмотря на это, потребность в приемной аппаратуре высокого класса коротковолнового диапазона не снижается. Не во всех странах наблюдается тенденция отказа от коротковолнового вещания. Так, например, в Китае, наоборот, активно осваивают данный диапазон. Кроме того, аэродромная коротковолновая радиосвязь все еще востребована на сегодняшний день, и, очевидно, будет использоваться еще многие десятилетия, не говоря уже об аппаратуре военного назначения. Наличие передатчиков с выходной мощностью в десятки и сотни киловатт вынуждает повышать требования к избирательности по соседнему каналу и блокированию, стремиться к построению узкополосных малошумящих устройств. Таким образом, задача построения высокоизбирательных перестраиваемых малошумящих полосно-пропускающих фильтров является весьма актуальной.

В данной работе представлены результаты разработки узкополосного селектора, предназначенного для использования в составе коротковолнового приемника. Особенностью селектора является совместное использование дискретных конденсаторов переменной емкости (ДКПЕ) и дискретных катушек переменной индуктивности (ДКПИ) с равномерным перекрытием диапазона частот от 1,5 до 30 МГц без разбиения на более узкие поддиапазоны. Применение современной элементной базы и ряда схемотехнических решений позволило получить передовые характеристики для устройств данного класса.

2. Методология и теоретическое моделирование

Мировыми лидерами в области разработки перестраиваемых частотно-избирательных устройств являются корпорация «Pole/Zero» (За-

падный Честер, штат Огайо, США) и компания «Rohde & Schwarz» (Мюнхен, Германия). Каждая из этих компаний предлагает широкую линейку устройств, перекрывающих диапазон частот от КВ до СВЧ. Однако, что касается перестраиваемых частотно-избирательных цепей коротковолнового диапазона, схемотехнические подходы у них различаются [1—4]. Авторы отдали предпочтение принципу построения полосно-пропускающего фильтра, принятому специалистами из «Rohde & Schwarz» в [2].

Схемы включения колебательного контура с целью получения частотно-избирательной цепи весьма разнообразны. Наиболее предпочтительными являются трансформаторная, автотрансформаторная схемы, а для повышения избирательности применяются связанные контуры. Однако кроме индуктивного включения можно использовать частичное емкостное включение контура, т. е. подключение источника и нагрузки к контуру через емкостные делители (рис. 1). Такой подход позволяет реализовать совместное использование ДКПЕ и ДКПИ для перестройки полосового фильтра в широкой полосе частот (коэффициент перекрытия до 40), при таком способе включения добротность контура практически не снижается.

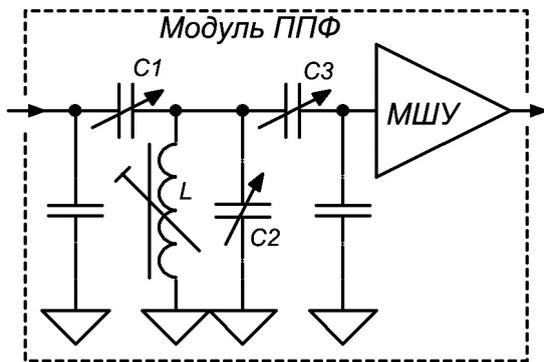


Рис. 1. Модуль полосно-пропускающего фильтра.

Fig. 1. Bandpass filter module

Из рис.1 видно, что схема содержит перестраиваемые ДКПЕ и ДКПИ, а также устанавливаемый на выходе компенсирующий малошумящий усилитель (МШУ), формируя тем самым законченный модуль полосно-пропускающего фильтра (ППФ), обладающий определенными характеристиками. Теоретические исследования показали, что при существующей элементной базе один такой модуль может обеспечить избирательность порядка 20 дБ при отстройке $\pm 10\%$ от центральной частоты

фильтра с коэффициентом шума $NF \approx 5$ дБ при модуле коэффициента передачи близком к единице (более точное значение: +0,25 дБ).

Включая однотипные модули последовательно (рис. 2), можно повышать избирательность. Так, например, для двух последовательно включенных модулей избирательность при отстройке $\pm 10\%$ от центральной частоты фильтра составит более 40 дБ, для трех — более 60 дБ, для четырех — более 80 дБ. В то же время при таком построении необходимо обращать внимание и на повышение коэффициента шума с добавлением каждого последующего модуля.

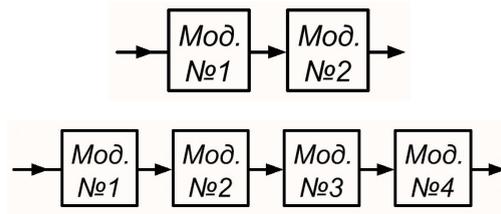


Рис. 2. Примеры включения нескольких модулей ППФ.
 Fig. 2. Examples of including multiple bandpass filter modules

Типовые параметры, полученные в результате теоретического моделирования, в зависимости от количества модулей сведены в табл.1. Имея шумовые характеристики приемного тракта, можно подобрать компромиссный вариант структуры селектора по соотношению избирательности и коэффициента шума для обеспечения требований ГОСТ Р 52016-2003¹ для соответствующего класса радиоприемного устройства.

Таблица 1. Параметры селекторов при различных количествах модулей.
 Table 1. Selector parameters for different numbers of modules (theoretical data)

Кол-во модулей	1	2	3	4
Избирательность при отстройке $\pm 10\%$ от центральной частоты, дБ	≥ 20	> 40	> 60	> 80
Модуль коэффициента передачи, дБ	+0,25	+0,5	+0,75	+1,0
Коэффициент шума NF, дБ	5	7,2	8,6	9,6

3. Результаты разработки и экспериментальные данные

¹ ГОСТ Р 52016-2003 Приемники магистральной радиосвязи гектометрового-декаметрового диапазона волн. Параметры, общие технические требования и методы измерений. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200031497> (дата обращения: 21.08.2019).

По описанному выше принципу были разработаны селекторы с избирательностью 40 дБ (2 модуля ППФ в составе). Экспериментальные характеристики показали соответствие теоретическим оценкам (см. табл. 1). При перестройке от 1,5 МГц до 30 МГц полоса пропускания по уровню минус 3 дБ составила $1,2 \pm 0,1$ %, ОИР3 $\geq +35$ дБм. На рис. 3 представлены результаты измерения коэффициента шума для селектора, состоящего из двух модулей полосно-пропускающих фильтров. На частоте настройки 29 МГц коэффициент шума NF составил 6,82 дБ.

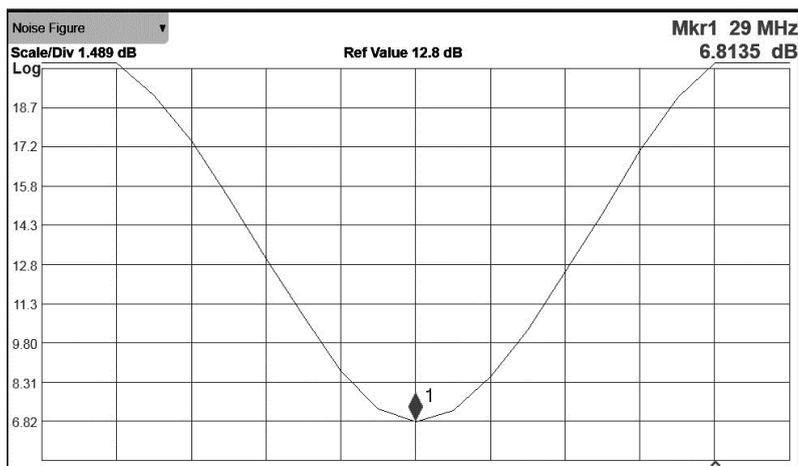


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента шума NF (дБ) для селектора, состоящего из двух модулей ППФ, настроенного на частоту 29 МГц (Keysight N8976B).

Fig. 3. Frequency dependence of Noise Figure (dB) for a selector consisting of two bandpass filters modules tuned to 29 MHz (Keysight N8976B)

Кроме этого, были проведены испытания селектора, состоящего из 4-х модулей. Для этой конфигурации на рис.4 приведена одна из частотных зависимостей модуля коэффициента передачи, выраженного в дБ. Из графика видно, что ослабление по уровню минус 80 дБ достигается при отстройках менее ± 10 % от центральной частоты.

Полученные характеристики близки к теоретическим значениям, приведенным в табл. 1. Следует отметить, что перестраиваемая схема, показанная на рис. 1, реализуема в основном в коротковолновом диапазоне и низкочастотной области УКВ, поскольку в качестве коммутирующих устройств используются высокочастотные реле, обеспечивающие низкое резистивное сопротивление контакта (менее 50 мОм) при подключении

элементов в соответствующих «магазинах» (ДКПЕ, ДКПИ) для сохранения высокой добротности контура. Другими словами, возможности элементной базы несколько ограничивают частотный диапазон применения схемы.

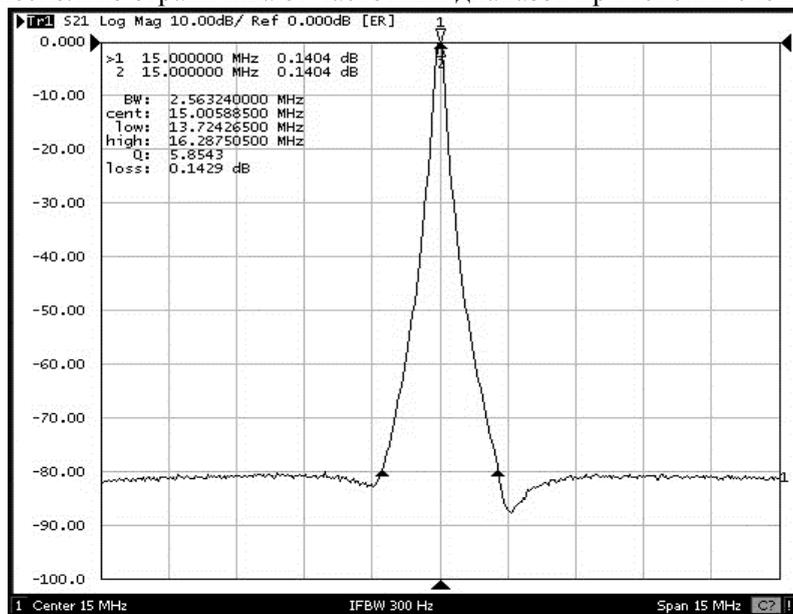


Рис. 4. Частотная зависимость модуля коэффициента передачи (дБ) для селектора, состоящего из четырех модулей полосно-пропускающих фильтров, настроенного на частоту 15 МГц (Agilent E5062A).

Fig. 4. Frequency dependence of the transmission coefficient module (dB) for a selector consisting of four bandpass filters modules tuned to 15 MHz (Agilent E5062A)

4. Заключение

Способ построения малошумящих частотно-избирательных устройств, рассмотренный в работе, позволяет выполнить узкополосную фильтрацию при дискретной перестройке с коэффициентом перекрытия всего рабочего диапазона частот до 40. Селекторы в составе серийно выпускаемого коротковолнового приемника ПТ-100 (группа промышленных компаний «Корпорация ТИРА», Санкт-Петербург) успешно прошли испытания в реальных условиях работы на радиостанции аэродрома «Пулково» (Санкт-Петербург).

Список литературы

1. Internally switched 3-band tunable filter «HF-ERF». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dovermpg.com/polezero/english/globalnavigation/products/tunable-filters/bandpass-filters/hf-erf-series> (дата обращения: 21.08.2019).
2. R&S FK4120/FK4140 Digitally Tuned HF Selectors. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/fk4120-fk4140-productstartpage_63493-9943.html (дата обращения: 21.08.2019).
3. R&S FK2020/FK2040 Digital Pre-/Post-Selectors. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/fk2020-fk2040-productstartpage_63493-9195.html (дата обращения: 21.08.2019).
4. FK2020/FK2040 Digital Pre-/Post-Selectors Datasheet. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FK2020_FK2040_en.pdf (дата обращения: 21.08.2019).

Информация об авторах

Посный Олег Александрович, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор АО «КБ радиосвязи», г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-8771-613X.

Долгушев Сергей Васильевич, генеральный директор АО «КБ радиосвязи», г. Севастополь, Российская Федерация.

Посная Елена Анатольевна, кандидат экономических наук, доцент ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-7716-9117.

Information about the authors

Oleg A. Posniy, Cand. Sc. (Eng.), lead design engineer of OJSC “Radio Design”, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-8771-613X.

Sergey V. Dolgushev, general manager of lead design engineer of OJSC “Radio Design”, Sevastopol, Russian Federation.

Elena A. Posnaya, Cand. Sc. (Econ.), docent of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-7716-9117.