



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.13>

УДК: 621.372.63

УЗКОПОЛОСНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА STW С УМЕНЬШЕННЫМИ ПОТЕРЯМИ

С.А. Доберштейн^{1,2}, И.В. Веремеев^{1,2}, В.К. Разгоняев²

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения,
644071, Омск, ул. Масленникова, 231

²Омский научный центр СО РАН
(Институт радиофизики и физической электроники),
644024, Омск, пр. Маркса, 15

Статья поступила в редакцию 22 октября 2024 г.

Аннотация. Представлены результаты исследований, полученные при разработке узкополосных STW-фильтров с относительной полосой пропускания $\Delta f / f_0 = 0,07-0,12\%$. Использование асинхронной топологии, конструктивной, топологической и технологической оптимизации с помощью компьютерного моделирования по модели эквивалентных схем на основе Р-матриц смешанных параметров с учетом согласования с внешними нагрузками позволило уменьшить вносимые потери фильтров до 2,0-2,2 дБ в расширенном частотном диапазоне 500-1344 МГц.

Ключевые слова: поверхностные поперечные волны, фильтр, вносимые потери.

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6)

Автор для переписки: Доберштейн Сергей Александрович,
sergei.doberstein@mail.ru

Введение

Поверхностные поперечные волны (Surface Transverse Waves – STW) на кварце имеют высокую скорость распространения акустической волны $V_0 = 5000$ м/с, что обеспечивает ширину электрода и зазора 0,93-2,5 мкм встречно-штыревого преобразователя (ВШП) в диапазоне частот 500-1344 МГц. Кроме того, STW имеет низкий температурный коэффициент частоты (ТКЧ) порядка $-0,05 \cdot 10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}^2$. Эти преимущества позволяют успешно использовать STW в высокочастотных (ВЧ) асинхронных резонаторах с высокой добротностью 7200-10000 [1-4] и в узкополосных ВЧ фильтрах с вносимыми потерями 3-7 дБ [5-9]. Объединение указанных двух технологий – применение асинхронных резонаторов с увеличенной добротностью в фильтровых структурах позволяет уменьшить вносимые потери (ВП) фильтров на STW.

В работе исследовались резонаторные STW-фильтры двух типов: лестничные и двухпреобразовательные. ВП таких фильтров определяются согласованием с нагрузками при максимальной добротности входящих в них резонаторов. Вначале обеспечивается максимум добротности STW-резонаторов за счет оптимизации топологии. Затем осуществляется согласование с внешними нагрузками с помощью LC-согласования по входу и выходу фильтров. Такой подход, как показали проведенные исследования, обеспечивает минимум ВП, минимум пульсаций в полосе пропускания фильтров при сохранении высокой добротности резонаторов, входящих в фильтры.

Цель работы: исследовать возможность уменьшения вносимых потерь в узкополосных фильтрах на STW за счет согласования с внешними нагрузками.

1. Расчетные и экспериментальные результаты для лестничных фильтров на STW

В лестничных фильтрах использовались одноходовые асинхронные резонаторы, когда ВШП располагался между двумя отражательными решетками (ОР) (рис.1).

Конструктивно-топологическая оптимизация фильтров проводилась с помощью компьютерного моделирования с использованием модели эквивалентных схем на основе Р-матриц смешанных параметров с учетом согласования с внешними нагрузками [10, 11]. Топология STW-резонатора и его эквивалентная схема показана на рис.1 [3,4].

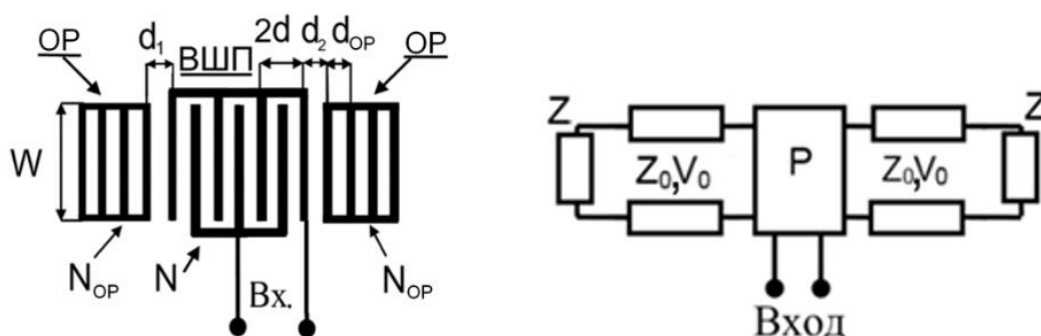


Рис. 1. Топология STW-резонатора и его эквивалентная.

Здесь Р – матрица смешанных параметров ВШП;

Z_0 – характеристический импеданс среды между ВШП и ОП,

V_0 – скорость STW;

$Z = Z_0(1 + \Gamma) / (1 - \Gamma)$ – эквивалентный импеданс ОП;

Γ – коэффициент отражения ОП.

Оптимизация параметров топологии асинхронного резонатора (рис.1) позволяет получить высокую добротность Q STW-резонаторов в диапазоне частот 500-1000 МГц [3, 4,10]. Представленные расчетные и измеренные частотные характеристики действительной и мнимой части проводимости соответственно STW-резонатора на кварце среза $YX / 36^\circ + 90^\circ$ на частоту 765 МГц демонстрируют хорошее совпадение (рис.2). STW-резонатор показал $Q = 9000$ [3,4]. На основе представленных характеристик STW-резонаторов исследовались лестничные фильтры.

Элементарным звеном лестничного фильтра является Г-образное звено, образованное соединением последовательного S и параллельного Р резонаторов. На рис. 3 схематично представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – график $|S_{21}|$ Г-образного звена из частотных характеристик последовательного резонатора S с частотами резонанса f_{rs} и антирезонанса f_{as}

и параллельного резонатора Р с частотами резонанса f_{rp} и антирезонанса f_{ap} соответственно.

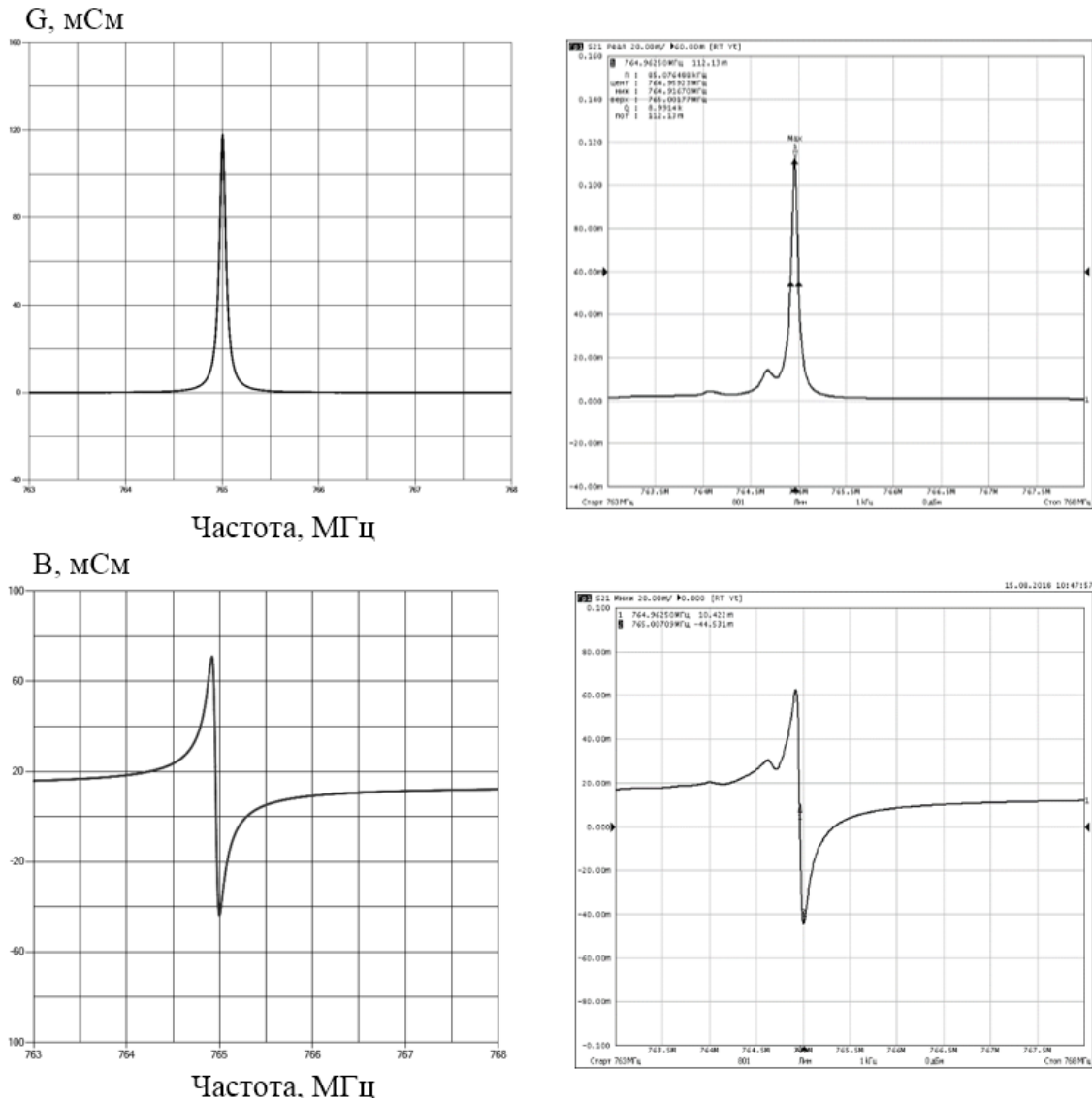


Рис. 2. Расчетные и измеренные частотные характеристики действительной и мнимой частей проводимости STW-резонатора на частоту 765 МГц

Фильтр на центральную частоту $f_0 = 766,3$ МГц обеспечил малые ВП, относительную полосу пропускания $\Delta f / f_0 = 0,08\%$. Влияние согласования на ВП в Г-звене лестничного фильтра на первый взгляд незначительно, однако в многозвенных лестничных фильтрах это влияние ощутимо, т.к. рассогласование увеличивается от звена к звену. Покажем это на примере лестничного фильтра с 3Г-звеньями (рис.4). На рис.5 (а) приведены расчетные частотные характеристики входного и выходного импеданса 3Г-звена лестничного фильтра без согласования ($L_1 = L_2 = 0$ нГн) [11]. Как видно

из рис.5 (а) на центральной частоте $f_0 = 766,3$ МГц входной и выходной импедансы имеют ярко выраженный емкостной характер: активные части импедансов составляют 42-47,5 Ом, реактивные части имеют значения от -35 до -39 Ом.

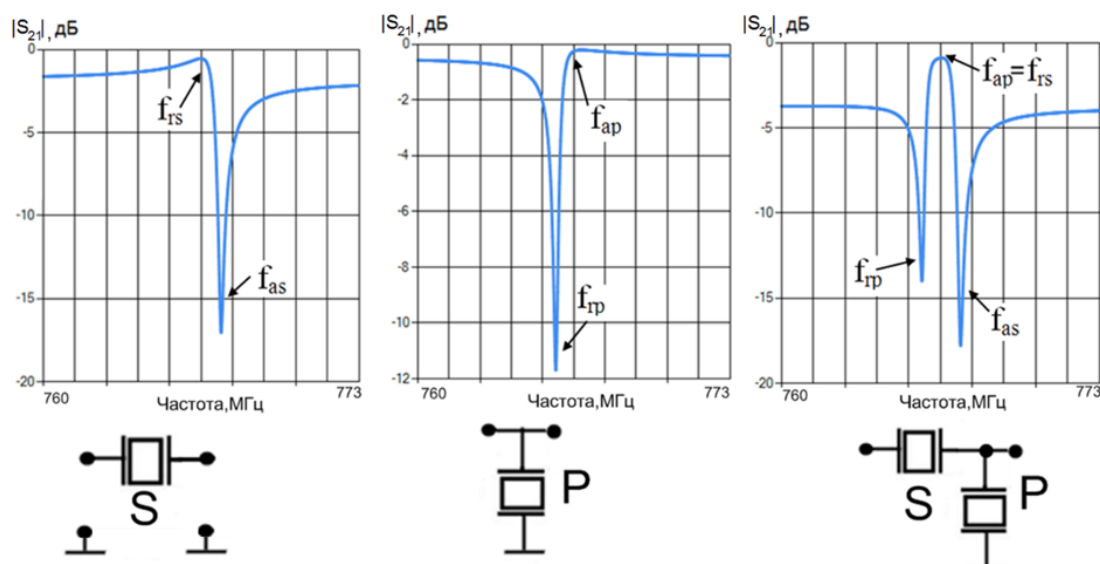


Рис. 3. Формирование АЧХ Г-звена лестничного фильтра.

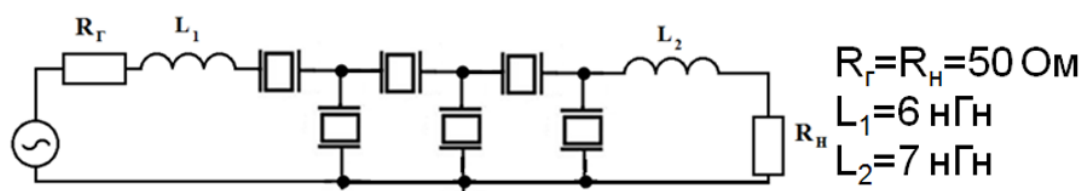


Рис. 4. Схема лестничного фильтра из 3Г-звеньев с согласованием.

При согласовании за счет подключения последовательных индуктивностей $L_1 = 6$ нГн, $L_2 = 7$ нГн по входу и выходу фильтра (рис.4) происходит компенсация емкостных составляющих входного и выходного импедансов. На центральной частоте $f_0 = 766,3$ МГц входной и выходной импедансы 3Г-звена лестничного фильтра становятся практически активными и близкими к 50 Ом (рис.5 (б)) [11].

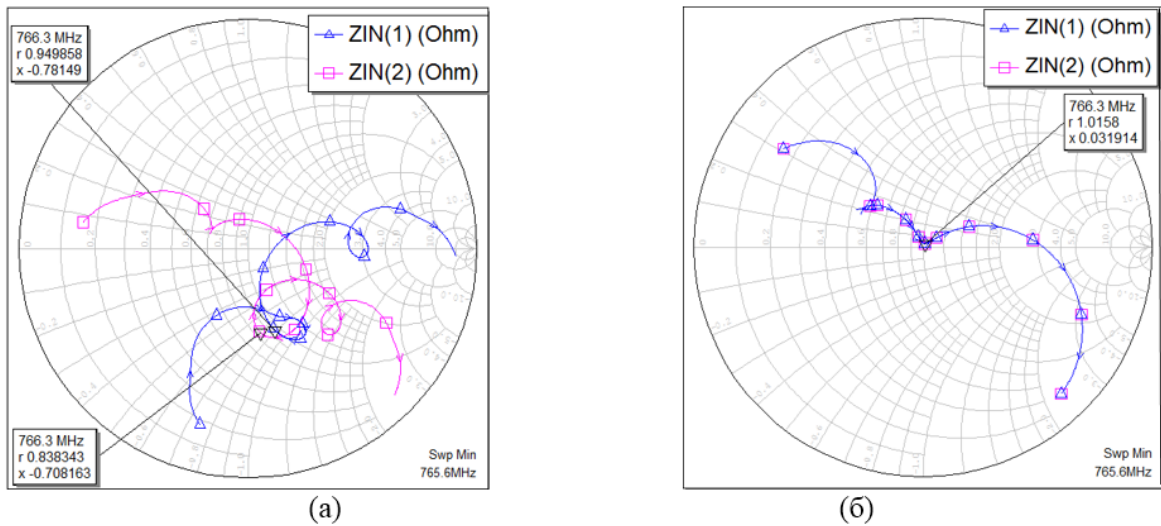


Рис. 5. Расчетные частотные характеристики входного и выходного импеданса 3Г-звена лестничного фильтра без согласования (а) и с согласованием (б).

На рис. 6а представлены расчетные АЧХ (график S_{21}) 3Г-звена лестничного фильтра без согласования. Фильтр в тракте 50 Ом обеспечил ВП = 3 дБ, пульсации АЧХ в полосе пропускания 2 дБ. При согласовании ВП уменьшились до 2,4 дБ, пульсации минимизировались в полосе пропускания (рис.6б).

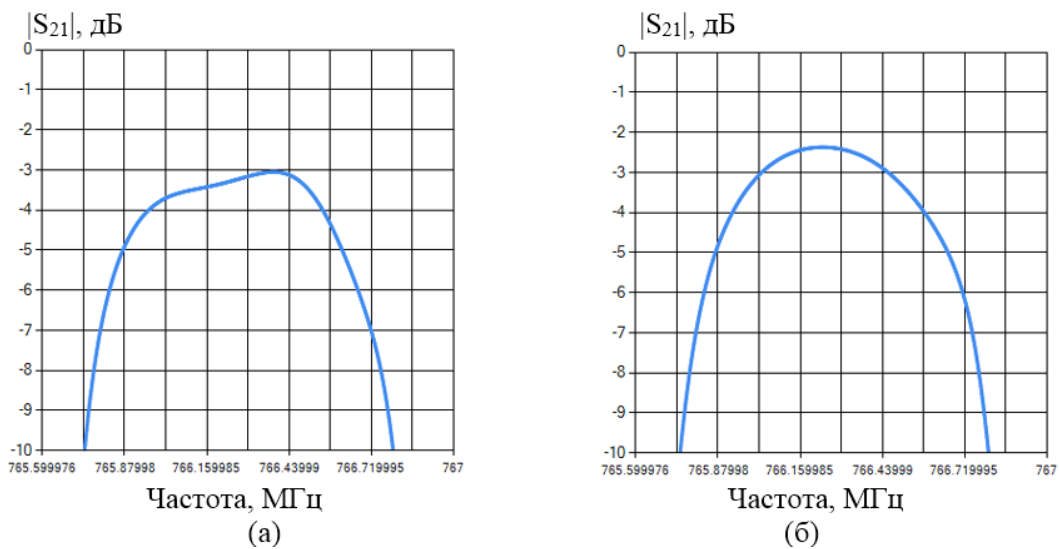


Рис. 6. Расчетные АЧХ 3Г-звена лестничного фильтра без согласования (а) и с согласованием (б).

Измеренная АЧХ 3Г-звена лестничного фильтра без согласования показана на рис.7. Фильтр показал ВП = 3-4 дБ, пульсации АЧХ 2 дБ в тракте 50 Ом.

Измеренные частотные характеристики входного и выходного импедансов в относительной полосе пропускания $\Delta f / f_0 = 0,07\%$ 3Г-звена лестничного

фильтра с согласованием показаны на рис. 8. Как видно из рис. 8 на центральной частоте $f_0 = 766,4$ МГц входной и выходной импедансы 3Г-звена лестничного фильтра стали практически активными и близкими к 50 Ом.

Измеренные АЧХ 3Г-звена лестничного фильтра с согласованием в широком и узком частотном диапазоне представлены на рис. 9. Фильтр имеет в тракте 50 Ом ВП = 2,2 дБ, пульсации АЧХ < 1 дБ в относительной полосе пропускания $\Delta f / f_0 = 0,07\%$, затухание в полосе задерживания 8 дБ. Сравнение расчётных (рис. 6б) и измеренных характеристик (рис. 9) даёт хорошее совпадение.

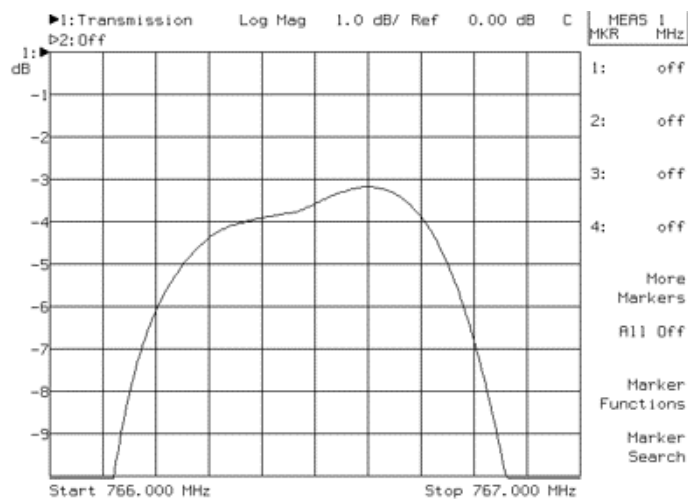


Рис. 7. Измеренная АЧХ 3Г-звена лестничного фильтра без согласования.

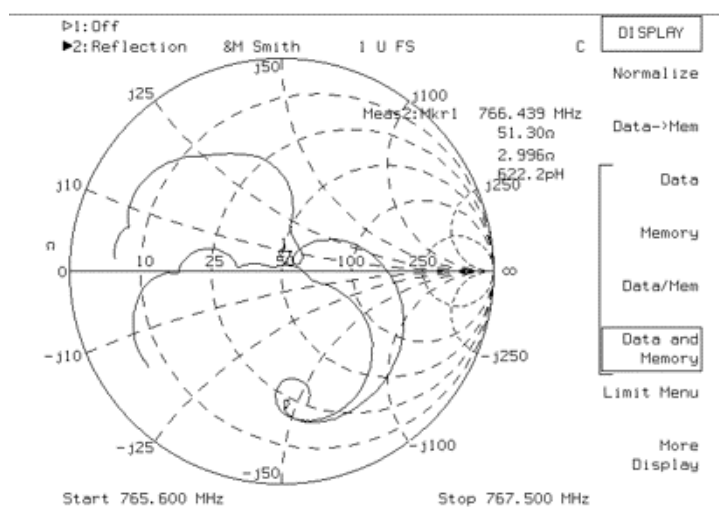


Рис.8. Измеренные частотные характеристики входного, выходного импеданса 3Г-звена лестничного фильтра с согласованием.

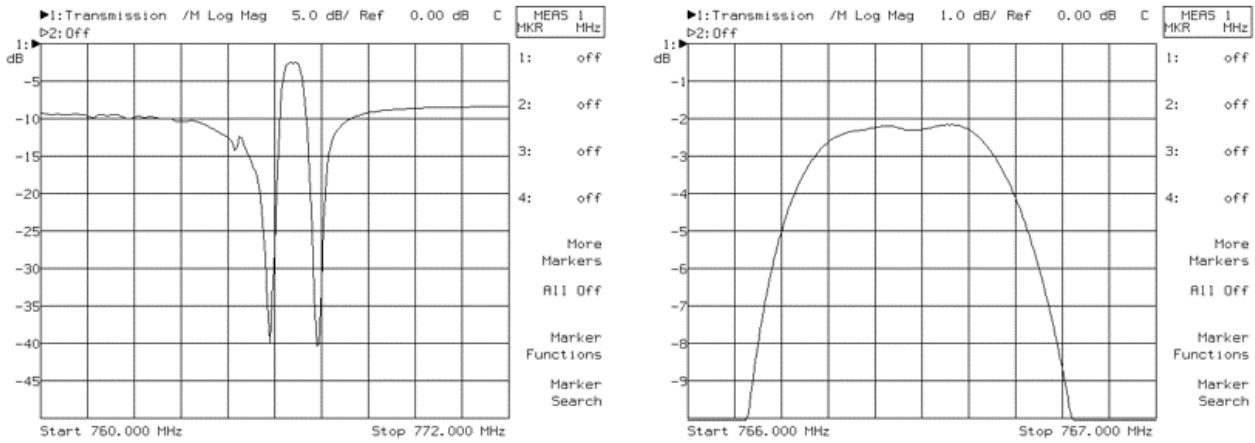


Рис. 9. Измеренные АЧХ 3Г-звена лестничного фильтра в широком и узком частотном диапазоне с согласованием.

2. Расчетные и экспериментальные результаты для двухпреобразовательных фильтров на STW

Второй тип фильтра выполнялся на двухпреобразовательной структуре (рис.10), когда между двумя ОР размещены входной и выходной ВШП. Фильтр представляет собой структуру с продольно-связанными резонаторами. Причем использовалась топология с максимально сближенными ВШП. STW имеет сдвиговую природу и в общем случае потери на распространение у нее больше, чем у обычной Рэлеевской поверхностной акустической волны (ПАВ). Поэтому расстояние между ВШП в двухпреобразовательной структуре должно быть минимальным.

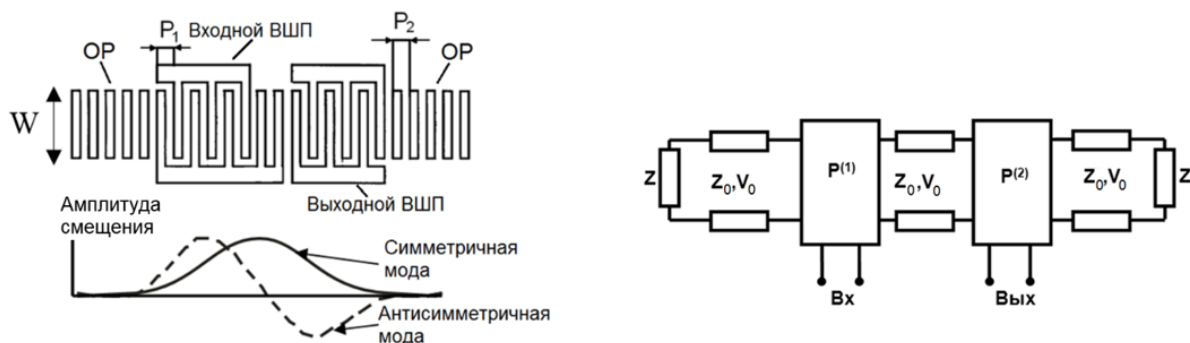


Рис. 10. Двухпреобразовательный STW-фильтр и его эквивалентная схема.

Конструктивно-топологическая и технологическая оптимизация фильтров проводилась с помощью компьютерного моделирования с использованием

модели эквивалентных схем (рис. 10). Здесь $P^{(1)}$ и $P^{(2)}$ – матрицы смешанных параметров входного и выходного ВШП; Z_0 – характеристический импеданс среды между ВШП и ОР, V_0 – скорость STW; $Z = Z_0(1 + \Gamma) / (1 - \Gamma)$ – эквивалентный импеданс ОР; Γ – коэффициент отражения ОР. Оптимальные параметры топологии двухпреобразовательных STW-фильтров приведены в таблице.

Таблица. Параметры топологии двухпреобразовательных STW-фильтров.

Параметры	501,45 МГц	1001,57 МГц	1343,6 МГц
Число электродов в ОР, N_{OP}	120	220	250
Число пар электродов в ВШП, N	80	80	160
Соотношение между периодами электродов в ВШП и ОР, P_1/P_2	0,995	0,995	0,995
Расстояние между ВШП и ОР,	$P_2/2$	$P_2/2$	$P_2/2$
Апертура, W	80λ	80λ	60λ
Относительная толщина электродов, h/λ	2,0%	2,0%	2,0%
Коэффициент металлизации	0,5	0,45	0,35

Здесь λ – длина STW на центральной частоте f_0 .

Асинхронность структуры достигается определенным соотношением между периодами электродов в ВШП и ОР.

Представленные расчетные (рис.11) и измеренные (рис.12) АЧХ двухпреобразовательного STW-фильтра на кварце среза $YX/36^\circ + 90^\circ$ на частоту 501,45 МГц демонстрируют хорошее совпадение. Как видно на рис. 11 ирис. 12 АЧХ двухпреобразовательного фильтра имеет форму, характерную для двухмодового фильтра на ПАВ (Double Mode SAW – DMS) на кварце с взаимодействием двух продольных резонансных мод: симметричной и антисимметричной с частотами f_c и f_a соответственно (рис.10).

На рис. 13 показаны измеренные частотные характеристики входного и выходного импеданса двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 501,45$ МГц. Как видно на рис. 13 входной и выходной импедансы

имеют ярко выраженный емкостной характер: активные части импедансов составляют 45,5-62,6 Ом, реактивные части имеют значения от -52,4 Ом до -64,7 Ом, что приводит к ВП = 6,3 дБ и пульсациям АЧХ 1,5 дБ в полосе пропускания в тракте 50 Ом. Поскольку двухпреобразовательный фильтр на STW подобен DMS-фильтру на кварце согласование с нагрузками осуществлялось известными методами для LC-согласования DMS-фильтров (рис. 14).

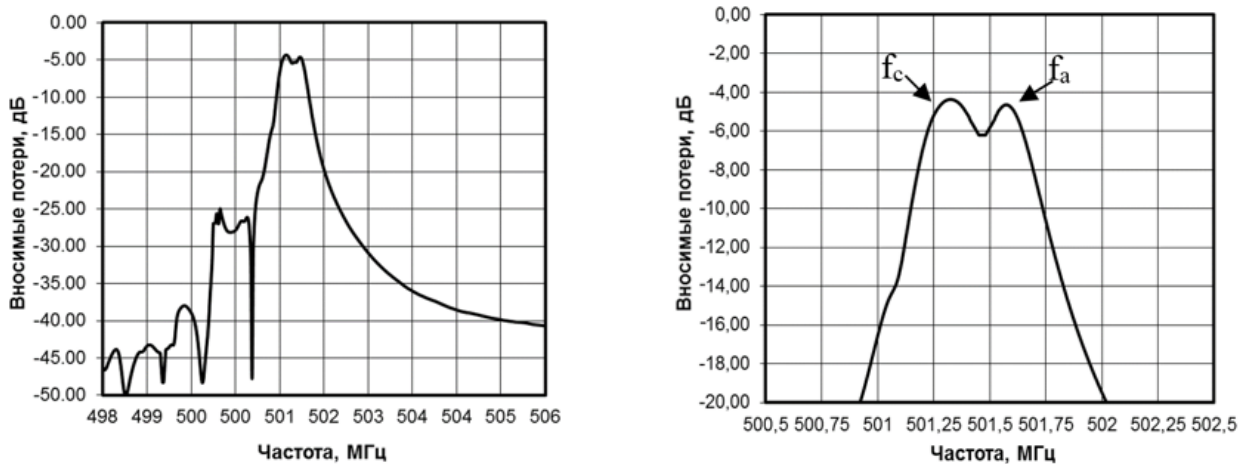


Рис. 11. Расчетные АЧХ двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 501,45$ МГц в широком и узком частотном диапазоне.

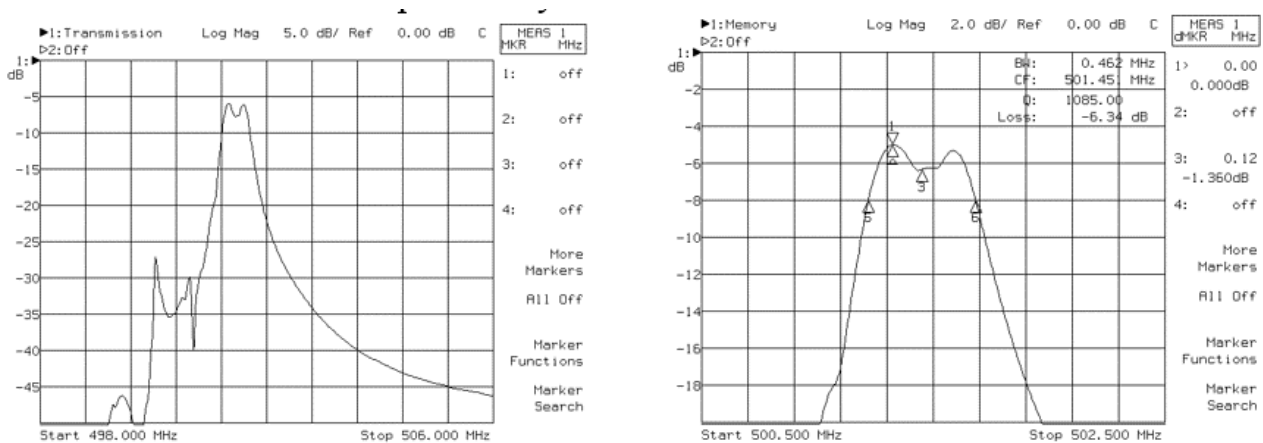


Рис. 12. Измеренные АЧХ двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 501,45$ МГц в широком и узком частотном диапазоне.

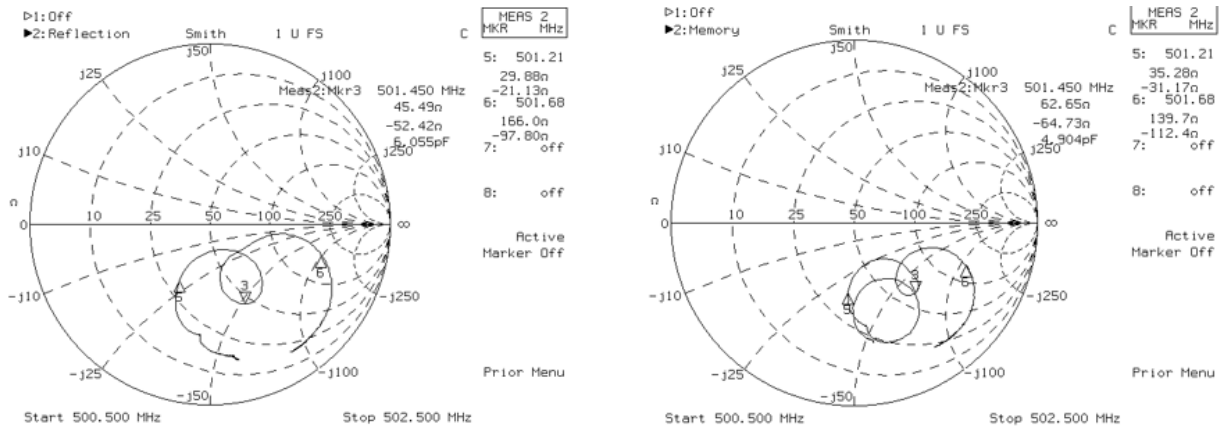


Рис. 13. Измеренные частотные характеристики входного и выходного импедансов двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 501,45$ МГц.

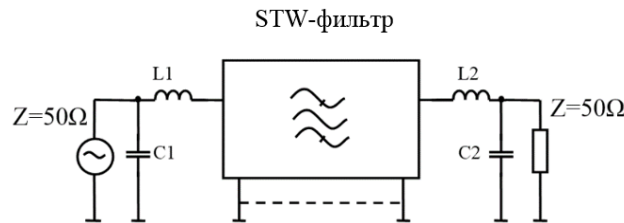


Рис. 14. Схема согласования двухпреобразовательного STW-фильтра.

Измеренные частотные характеристики входного и выходного импедансов согласованного ($L1 = L2 = 22$ нГн, $C1 = C2 = 1,8$ пФ) двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 501,45$ МГц приведены на рис. 15. Входной и выходной импедансы на f_0 близки к активному значению 50 Ом. Измеренные АЧХ согласованного двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 501,45$ МГц приведены на рис. 16.

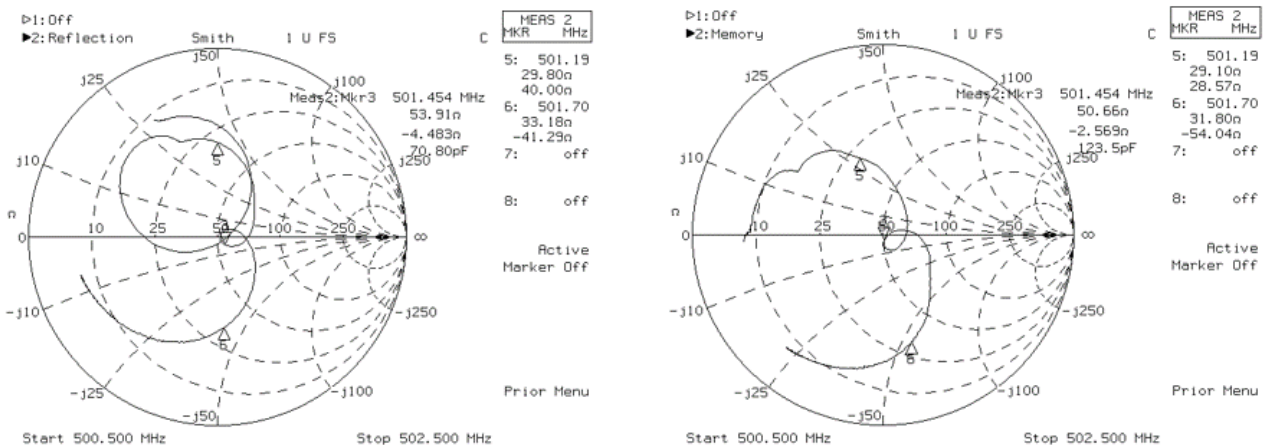


Рис. 15. Измеренные частотные характеристики входного и выходного импедансов согласованного двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 501,45$ МГц.

Фильтр обеспечил ВП = 2,2 дБ, ширину полосы пропускания 0,53 МГц по уровню -3 дБ ($\Delta f / f_0 = 0,1 \%$) с пульсациями 0,5 дБ, затухание в полосе задерживания 25-35 дБ при отстройках $\pm 2,4$ МГц от f_0 в тракте 50 Ом. На рис. 17 показаны измеренные АЧХ согласованного двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 1001,57$ МГц. Фильтр имеет ВП = 2,2 дБ, ширину полосы пропускания 1,07 МГц по уровню -3 дБ ($\Delta f / f_0 = 0,1 \%$) без пульсаций, затухание в полосе задерживания 25-35 дБ при отстройках $\pm 4,7$ МГц от f_0 в тракте 50 Ом.

Измеренные АЧХ согласованного двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 1343,6$ МГц представлены на рис. 18. Фильтр показал ВП = 2,0 дБ, ширину полосы пропускания 1,7 МГц по уровню -3 дБ ($\Delta f / f_0 = 0,12 \%$) без пульсаций, затухание в полосе задерживания 25-30 дБ при отстройках $\pm 6,3$ МГц от f_0 в тракте 50 Ом. STW-фильтры помещались в SMD-корпуса размерами 5x5x1,8 мм.

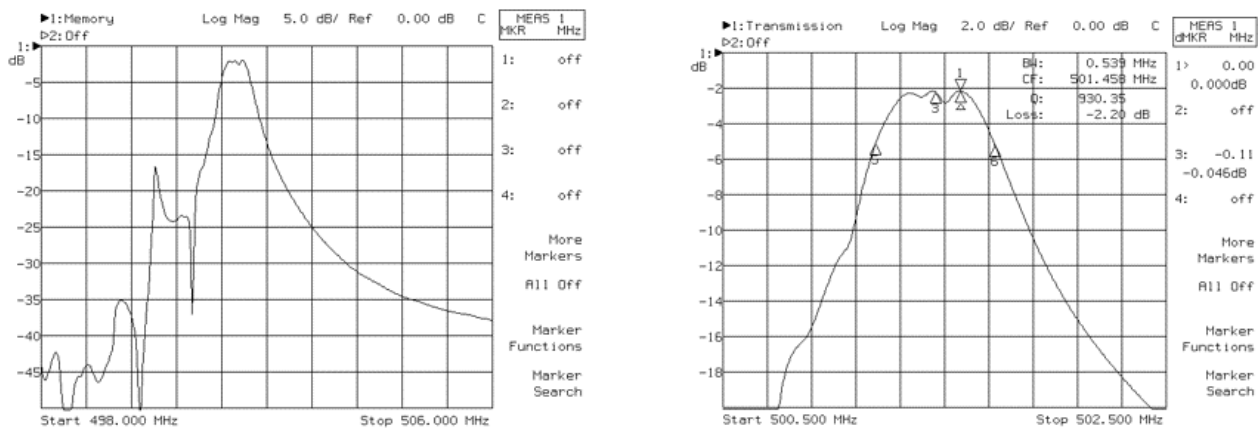


Рис. 16. Измеренные АЧХ согласованного двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 501,45$ МГц в широком и узком частотном диапазоне.

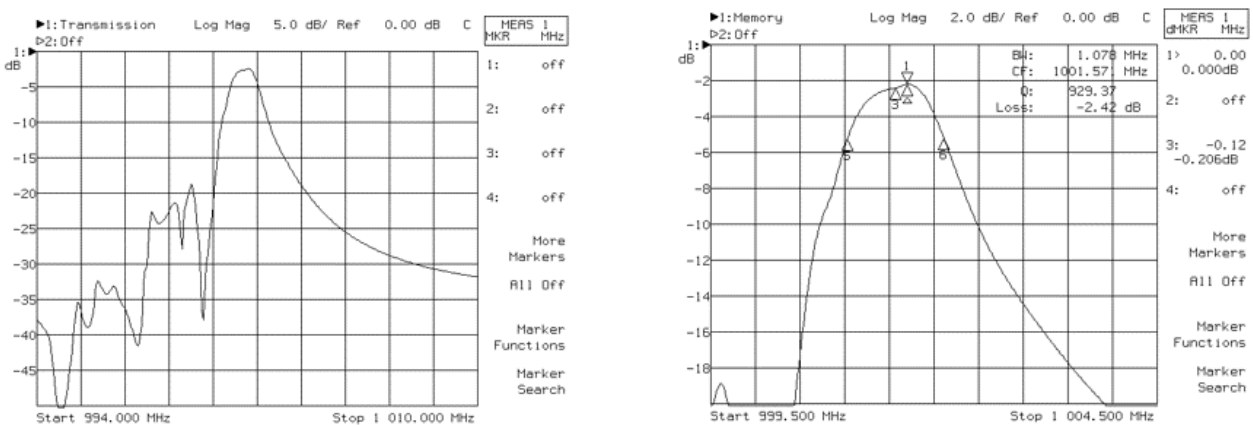


Рис. 17. Измеренные АЧХ согласованного двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 1001,57$ МГц в широком и узком частотном диапазоне.

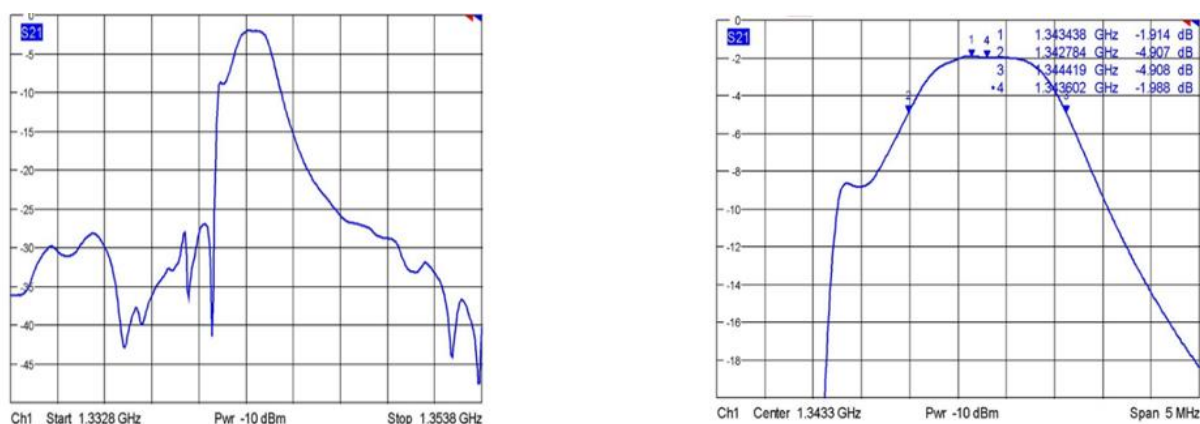


Рис. 18. Измеренные АЧХ согласованного двухпреобразовательного STW-фильтра на $f_0 = 1343,6$ МГц в широком и узком частотном диапазоне.

Внешний вид STW-фильтров показан рис. 19. Измеренная температурно-частотная характеристика STW-фильтра на $f_0 = 766$ МГц приведена на рис.20 и представляет собой нелинейную характеристику, близкую к квадратичной. Температура перехода составляет около 30°C . Максимальный относительный сдвиг центральной частоты составляет $\Delta f / f_0 = -350 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне температур T от -60°C до $+85^\circ\text{C}$, что соответствует $\text{ТКЧ} = -0,043 \cdot 10^{-6} 1 / ^\circ\text{C}^2$. Аналогичные температурно-частотные характеристики получены для STW-фильтров на частоты 500 МГц, 1000 МГц и 1344 МГц. Представленные данные свидетельствуют о том, что исследованные STW-фильтры обладают улучшенной температурной стабильностью, соизмеримой с температурной стабильностью рэлеевских ПАВ-фильтров на кварце.

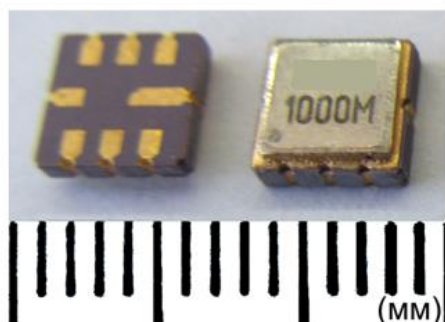
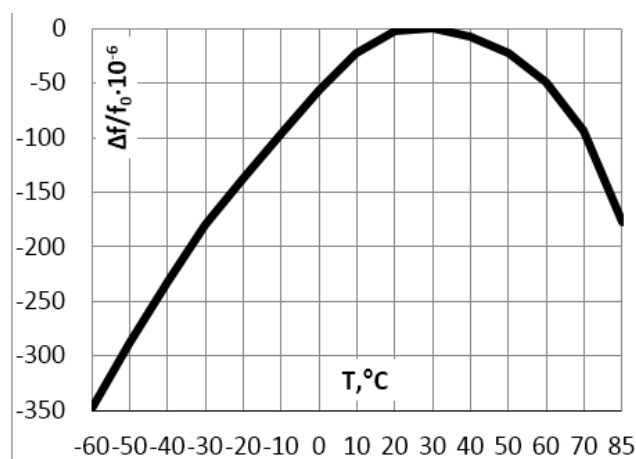


Рис.19. Фотография STW-фильтра в SMD-корпусе.

Рис.20. ТКЧ STW-фильтра на $f_0 = 766$ МГц.

Заключение

Исследованные узкополосные лестничные и двухпреобразовательные фильтры на STW с высокодобротными асинхронными резонаторами в диапазоне частот 500 МГц-1344 МГц обеспечили затухание в полосе задерживания до 35 дБ, вносимые потери 3-6 дБ, пульсации 2 дБ в относительной полосе пропускания $\Delta f / f_0 = 0,07-0,12$ %. Снизить вносимые потери узкополосных фильтров на STW-резонаторах без ухудшения их добротности возможно за счет согласования с нагрузками по входу и выходу фильтров. Показано, что при использовании LC-согласования (компенсации емкостных составляющих входного и выходного импедансов) вносимые потери фильтров уменьшились до 2,0-2,2 дБ, амплитудные пульсации в полосе пропускания минимизировались. Уменьшенные потери представленных узкополосных STW-фильтров позволят расширить их использование в качестве входных фильтров для аппаратуры связи и элементов частотной стабилизации для малощумящих генераторов.

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6)

Литература

1. Kim C.U., Plessky V.P., Wang W., Grigorievski V.I. High Q-factor STW-Resonators on AT-cut of Quartz // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 2582-2585.
2. Dufile P., Adler J.V., Sawyer A. Performances of Monolithic Micro-Oven Heated SAW and STW Resonators // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2011. P. 87–91.
3. Доберштейн С.А., Веремеев И.В. Асинхронный резонатор на поперечных поверхностных акустических волнах. Патент РФ на полезную модель № 212600, Н03Н 9/25, Н03Н 9/19, заявл. 09.03.2022, опубл. 01.08.2022, Б.И. № 22.
4. Доберштейн С.А., Веремеев И.В., Разгоняев В.К. Асинхронные резонаторы на STW с высокой добротностью и уменьшенными размерами // Радиотехника. 2023. Т. 87. №7. С. 137-144.
5. Almar R., Horine B., Andersen J. High Frequency STW Resonator Filters // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1992. P. 51–56.
6. Thorvalsson T., Plessky V.P., Muskenhirn S., Joray M., GHz Range STW Resonators and Narrow Band Filters // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1994. P. 99-102.
7. Avramov I.D. High-Performance Surface Transverse Wave Resonators in Lower GHz Frequency Range // International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol.10, No. 3. 2000. P. 735-792.
8. Fredit J.-M., Alzuaga S., Raiter N., Vercelloni N., Boudot R., Guichardaz B., Daniau W., Laude V., Ballandras S. Design of Asynchronous STW Resonators for Filters and High Stability Source Applications // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2005. P. 1315–1318.
9. Синицина Т.В., Багдасарян А.С., Дорофеева С.С. Высокочастотный фильтр на поверхностных акустических волнах на основе STW-кварца // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». М. 2017. С. 256-258.

10. Разгоняев В.К., Доберштейн С.А., Веремеев И.В. Программа расчета частотных характеристик одноходовых резонаторов на ПАВ “LadSimple_1_LC_S”. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023687149 (12.12.2023).
11. Разгоняев В.К., Доберштейн С.А., Веремеев И.В. Программа расчета частотных характеристик Г-образных звеньев лестничного фильтра из двух одноходовых ПАВ-резонаторов “LadSimple_2_LC_S”. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024680652 (02.09.2024).

Для цитирования:

Доберштейн С.А., Веремеев И.В., Разгоняев И.К. Узкополосные фильтры на STW с уменьшенными потерями. // Журнал радиоэлектроники. –2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.13>