ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЧАСТОТЫ ПАВ-ФИЛЬТРОВ НА ПРОДОЛЬНО-СВЯЗАННЫХ РЕЗОНАТОРАХ НА ТАНТАЛАТЕ ЛИТИЯ СРЕЗА YXL/42

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-3-24-31

Туркин Илья Алексеевич,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия,
tourezkiy@gmail.com

Ключевые слова: фильтры на поверхностных акустических волнах, фильтры на продольно-связанных резонаторах, температурный коэффициент частоты, танталат лития

Температурный коэффициент частоты (ТКЧ, англ. TCF – temperature coefficient of frequency) в фильтрах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) – важный параметр фильтра, обуславливающий его применимость в радиоэлектронной аппаратуре ответственного применения, например авиационного или космического, где требования к функционированию достаточно жёсткие и диапазон рабочих температур может достигать более 140°C. Фильтры на ПАВ удовлетворяют таким требованиям именно благодаря низким абсолютным значениям температурного коэффициента задержки (ТКЗ, англ. TCD – temperature coefficient of delay) среза монокристалла, на котором они изготавливаются, а также от толщины и коэффициента металлизации встречно-штыревых преобразователей (ВШП) и отражательных решёток (ОР) и варьируется от долей до десятков ppm/°C. Представлено исследование поведения частотных характеристик ПАВ-фильтров на продольно-связанных резонаторах (LCRF – Longitudinally-Coupled Resonator Filter) в широком диапазоне температур (-60°C +85°C), особое внимание уделено описанию методики измерений, приведён большой объём экспериментальных данных (исследовалось поведение 18 образцов фильтров на частоты 465, 607, 836, 1200, 1590 и 2067 МГц), приведены их толщины металлизации и рассчитано количественное отличие реального ТКЧ фильтров от справочных значений на свободной поверхности танталата лития среза (LiTaO₃) среза yxl/42°. Также приведена статистика ТКЧ граничных частот левого и правого ската АЧХ каждого образца, построена усреднённая (методом логарифмической аппроксимации) зависимость этого параметра от частоты с приведением данных толщин металлизации. Приводятся возможные основные причины такого различия.

Информация об авторе:

Туркин Илья Алексеевич, Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), Зав.лаб. НИЛ-03, к.т.н., Москва, Россия

Для цитирования:

Туркин И.А. Особенности температурного коэффициента частоты пав-фильтров на продольно-связанных резонаторах на танталате лития среза YXL/42 // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №3. С. 24-31.

For citation:

Tourkine I.A. (2020) Features of temperature coefficient of frequency saw longitudinally-coupled resonator filters based on lithium tantalate YXL/42. T-Comm, vol. 14, no.3, pp. 24-31. (in Russian)

Обзор

Наиболее распространёнными материалами в фильтрах на ПАВ являются ниобат или танталат лития, реже кварц (по причине низкого, коэффициента электромеханической связи и как следствие, возможности реализации только узкополосных фильтров).

Подавляющее большинство современных фильтров, используемых в радиоэлектронике [6], на частоты от 400 до 3 ГГц относятся к ПАВ-фильтрам на продольно-связанных резонаторах (LCRF – Longitudinally-Coupled Resonator Filter) [2, 3], так как они сочетают в себе малые вносимые потери (< 3 дБ), высокую избирательность (> 40 дБ) и приемлемую для большинства применений относительную полосу пропускания ($\sim 4-7\%$). Они изготавливаются преимущественно на танталате лития (LiTaO_3) среза $uxl/42^\circ$ (ориентация 0° , 132° , 0°), редко $uxl/36^\circ$ (ориентация 0° , 126° , 0°). Теоретический ТКЧ этих срезов LiTaO_3 составляет порядка -28 ppm/ $^\circ\text{C}$ и -32 ppm/ $^\circ\text{C}$ на свободной поверхности (с бесконечно тонкой плёнкой) [1, 3, 4] соответственно.

Реальный ТКЧ изготовленных на их базе фильтров в силу ряда причин заметно отличается от этих значений в большую сторону. Среди основных причин отличия реальных ТКЧ LCRF-фильтров от табличных справочных значений можно выделить следующие: различие скоростей ПАВ на свободной и металлизированной поверхности, влияние коэффициента металлизации и толщины электродов на резонансные явления, входное сопротивление преобразователей (ВШП) и некоторые другие.

Несмотря на то, что LCRF фильтры на ПАВ с малыми (< 3 дБ) потерями широко применяются последние полтора десятилетия вместе с развитием технологий передачи данных и навигационными системами (те стандарты, рабочие диапазоны частот которых лежат в пределах от 400 МГц до 3 ГГц: GLONASS/GPS, GSM, DECT, LTE, WIMAX, Bluetooth, и многие другие диапазоны), в открытой печати свежих прикладных статистических данных по поведению LCRF фильтров на ПАВ на базе среза танталата лития $uxl/42^\circ$ в интервале температур найдено не много; обычно приводятся отдельные значения ТКЧ единичных образцов [3] или некие обобщённые данные без указания толщин металлизации, типов и частот, берущие за основу данные ещё более ранних источников (зачастую до 2000 гг., когда LCRF фильтры ещё не получили широкого распространения).

Тем не менее, этот вопрос имеет большую практическую значимость при проектировании аппаратуры, использующей в своём составе фильтры этого типа. Более точное и системное знание поведения аппаратуры в различных экстремальных режимах эксплуатации позволяет её сделать более надёжной, соответствующей требованиям заказчиков, которые в настоящее время очень высоки.

Описание эксперимента и результаты

С использованием данных, полученных в ходе многочисленных периодических и предварительных испытаний в лаборатории акустоэлектронных устройств (НИЛ-03) в МТУ-СИ были проведены исследования реального ТКЧ группы LCRF-фильтров на оттекающих ПАВ с целью уточнения

необходимых температурных запасов полос пропускания, а также отслеживания влияние частоты на этот параметр.

В качестве оборудования для охлаждения/нагрева образцов использовалась камера тепла и холода ТАВАИ МС-81 (термокамера), а для измерения частотных характеристик и регистрации электрических параметров применялся измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения ОБЗОР-304/1 (рис. 1).

Рис. 1. Фото лабораторного стенда для испытания фильтров в широком интервале рабочих температур

При этом каждый образец устанавливался в контактное устройство, которое, в свою очередь помещалось в термокамеру (рис. 2) и подключалось посредством фазостабильных 50 Ом кабелей к измерителю комплексных коэффициентов передачи и отражения (анализатору цепей), где фиксировались характеристики (рис. 1).

Рис. 2. Фото контактного устройства с фильтром в термокамере

Предварительно вся система калибровалась методом полной двухпортовой калибровки с использованием эталонных калибровочных мер (короткозамкнутой, открытой, проходной и нагрузочной).

В качестве объектов исследования было выбрано 6 типов LCRF-фильтров: ФП-5013 (465 МГц), ФП-543 (607 МГц), ФП-548 (836 МГц), ФП-5034 (1200 МГц), ФП-568 (1590 МГц) и ФП-667 (2067 МГц) [6].

Все эти фильтры изготовлены на базе $42^\circ\text{YX-LiTaO}_3$, имеют 50/50 включение без цепей согласования, близкую относительную толщину металлизации (~8-9% от 1; значения, измеренные на профилометре приведены в табл. 2) и планарные металлокерамические LTCC (Low Temperature Confined Ceramic – низкотемпературная, совместно обжигаемая керамика) SMD-корпуса размера 3,0х3,0х1,4 мм (за исключением ФП-5013 на 465 МГц, он имеет корпус 5,0х5,0 мм, что связано с низкой частотой и большим размером кристалла) и производителя, что важно для повышения чистоты эксперимента и исключения многих факторов, обусловленных различиями типов, корпусов, материалов подложек и т. п. (рис. 3).

Рис. 3. фото современных LCRF фильтров в SMD-корпусах LTCC 3,0х3,0х1,4 мм (внешняя и обратная сторона, внутреннее устройство)

Типичные частотные характеристики LCRF-фильтра на примере ФП-5034 (1200 МГц) при нормальных условиях ($T = 23^\circ\text{C}$) приведены ниже; особенностью характеристик фильтров этого типа является своеобразное «плечо» внизу правого ската на уровне -35-40 дБ от максимума (см. рис. 4). Отсутствие согласующих элементов облегчает исследование поведения частотных характеристик фильтров в интервале температур, так как температурная стабильность согласующих элементов значительно хуже, чем у фильтров на ПАВ.

Каждый образец (всего 18, по три образца каждого типа) испытывался методом «одной камеры»; при нормальной и предельных эксплуатационных температурах: -60°C , $+23^\circ\text{C}$ (нормальные условия) и $+85^\circ\text{C}$ после достижения каждой целевой температуры.

С помощью программы автоматической регистрации [5], при достижении целевой температуры и выдержки не менее 30 минут, без изъятия из термокамеры записывались основные электрические параметры, частотные характеристики и S-параметры каждого измеряемого образца. Типовые АЧХ в полосе пропускания, построенные по записанным S-параметрам в увеличенном масштабе (0,5 дБ/клетку) всех 6 типов фильтров в интервале температур приведены на рис. 5а – 5е.

Рис. 4. Частотные характеристики ФП-5034 (1200 МГц) при нормальных условиях ($T = 23^\circ\text{C}$):

а) АЧХ в полосе пропускания; б) АЧХ в средней полосе; в) групповое время запаздывания; г) АЧХ в широком диапазоне частот

Рис. 5. измеренные АЧХ в полосе пропускания при температурах: -60°C (синим), +23°C (чёрным) и +85°C (красным) маркерами отмечены граничные частоты по уровню -3 дБ.
а) ФП-5013 (465 МГц); б) ФП-543 (607 МГц); в) ФП-548 (836 МГц); г) ФП-5034 (1200 МГц); д) ФП-568 (1590 МГц); е) ФП-667 (2067 МГц)

Для последующего расчёта ТКЧ во всех случаях фиксировались значения граничных частот по уровню -3 дБ от максимума АЧХ (в технических требованиях обычно используется уровень -1 дБ), как наиболее стабильные и вместе с этим достаточно точно измеряемые (точность измерения АЧХ анализатором цепей падает с увеличением затухания). Также это позволило снизить влияние искажений и завалов АЧХ в полосе пропускания в интервале температур на конечные результаты*.

***Примечание:** Обычно такие искажения не превышают 0,5 дБ в полосе и могут возникать при воздействии предельных эксплуатационных температур (см. рис. 5), тем не менее, они могут исказить общую картину, когда требуется точность в единицы ppm/°C. Частично причиной таких искажений является температурное расширение/сжатие материалов тракта, контактов и разъемов контактно-измерительного приспособления, а также многие другие неучтенные факторы, не поддающиеся точному прогнозированию.

При построении температурной зависимости частоты по трём точкам ($T_{min} = -60^\circ$, $T_0 = +23^\circ$, $T_0 = +85^\circ$ T_{max}), она показала характер, близкий к линейному в пределах суммарной погрешности измерений стенда, поэтому для финального расчёта ТКЧ было решено использовать только предельные температурные значения. В итоге сам расчёт ТКЧ/°C производился по формуле:

$$TCF = \frac{f_{T_{max}} - f_{T_{min}}}{dT \cdot f_{T_0}}; \quad (1)$$

где: T_{min} – минимальная эксплуатационная температура (-60°C); T_{max} – максимальная эксплуатационная температура ($+85^\circ\text{C}$); T_0 – температура нормальных условий ($+23^\circ\text{C}$); f_T – частота ската АЧХ по уровню -3 дБ при соответствующей температуре среды; dT – суммарное изменение температуры среды ($dT = T_{max} - T_{min} = 145^\circ\text{C}$).

Таблица 1

Граничные частоты левого и правого ската фильтров

Фильтр, номер образца	Граничная частота ската по уровню -3 дБ, МГц					
	НУ (+23°C)		Холод (-60°C)		Тепло (+85°C)	
	левый	правый	левый	правый	левый	правый
ФП-5013 №1	452,76	477,35	454,06	479,03	451,84	476,10
ФП-5013 №2	452,82	477,29	454,11	479,01	451,89	476,06
ФП-5013 №3	452,75	477,22	453,97	478,88	451,81	476,01
ФП-543 №1	594,12	621,28	596,05	623,69	592,70	619,69
ФП-543 №2	593,44	620,57	595,42	622,88	591,93	618,76
ФП-543 №3	593,94	621,14	595,87	623,38	592,86	619,83
ФП-548 №1	814,55	854,87	817,06	858,01	813,06	852,79
ФП-548 №2	814,40	854,70	816,85	857,89	812,77	852,53
ФП-548 №3	814,89	855,40	817,42	858,56	813,64	853,72
ФП-5034 №1	1172,18	1228,72	1175,32	1232,88	1169,94	1225,65
ФП-5034 №2	1172,31	1228,87	1175,40	1232,94	1169,98	1225,66
ФП-5034 №3	1172,82	1229,43	1175,73	1233,26	1170,55	1226,24
ФП-568 №1	1555,47	1625,40	1559,86	1631,16	1552,44	1621,42
ФП-568 №2	1555,31	1625,35	1559,79	1631,12	1552,44	1621,59
ФП-568 №3	1555,74	1625,85	1560,20	1631,41	1552,62	1621,57
ФП-667 №1	2023,34	2108,58	2028,94	2116,17	2019,31	2104,04
ФП-667 №2	2024,90	2110,34	2030,36	2117,88	2020,72	2105,80
ФП-667 №3	2022,74	2108,25	2028,11	2115,89	2019,21	2103,30

Таблица 2

Температурные уходы левого и правого ската фильтров

Фильтр, номер образца	Уход частоты, МГц*		ТКЧ ppm/°C			Соотношение ТКЧ	Толщина Металлизации
	левый	правый	левый	правый	средний	прав./лев.	
ФП-5013 №1	2,22	-2,93	-33,75	-42,37	-38,06	1,25538	0,785
ФП-5013 №2	2,21	-2,95	-33,69	-42,63	-38,16	1,26526	
ФП-5013 №3	2,16	-2,87	-32,93	-41,42	-37,18	1,25766	
ФП-543 №1	3,35	-4,00	-38,91	-44,40	-41,66	1,14117	0,630
ФП-543 №2	3,49	-4,12	-40,54	-45,76	-43,15	1,12899	
ФП-543 №3	3,02	-3,55	-34,93	-39,27	-37,24	1,1261	
ФП-548 №1	4,00	-5,22	-33,87	-42,11	-37,99	1,24345	0,425
ФП-548 №2	4,08	-5,36	-34,55	-43,25	-38,90	1,25178	
ФП-548 №3	3,78	-4,84	-31,99	-39,02	-35,51	1,21979	
ФП-5034 №1	5,38	-7,24	-31,65	-40,62	-36,14	1,28329	0,280
ФП-5034 №2	5,42	-7,27	-31,88	-40,82	-36,35	1,28042	
ФП-5034 №3	5,18	-7,01	-30,46	-39,34	-34,90	1,29121	
ФП-568 №1	7,42	-9,74	-32,90	-41,33	-37,11	1,25633	0,220
ФП-568 №2	7,35	-9,52	-32,60	-40,41	-36,50	1,23947	
ФП-568 №3	7,58	-9,85	-33,61	-41,76	-37,68	1,24264	
ФП-667 №1	-9,63	-12,13	-32,82	-39,67	-36,25	1,20869	0,165
ФП-667 №2	-9,64	-12,08	-32,83	-39,48	-36,15	1,20238	
ФП-667 №3	-8,90	-12,59	-30,34	-41,18	-35,76	1,35723	

*абсолютное изменение граничной частоты при изменении температуры среды от -60 до + 85 °C

Рис. 6. Измеренные значения ТКЧ граничных частот левого (синим) и правого (красным) скатов АЧХ фильтров ФП-5013 (465 МГц), ФП-543 (607 МГц), ФП-548 (836 МГц), ФП-5034 (1200 МГц), ФП-568 (1590 МГц), ФП-667 (2067 МГц), их логарифмическая аппроксимация и теоретический ТКЧ (зелёным)

В силу природы резонансных явлений (АЧХ левого и правого ската формируются различными модами) в LCRF-фильтрах ТКЧ граничных частот скатов АЧХ в полосе также различны, что можно наблюдать из графиков (рис. 3), поэтому они рассчитывались отдельно, а затем также считалось их среднее арифметическое. Результаты расчётов и толщины металлизации для каждого типа фильтра приведены в табл. 2.

Для лучшей визуализации результатов, по полученным данным ТКЧ (TCF) для обоих скатов всех 6-ти типов были построены ориентировочные частотные зависимости ТКЧ методом логарифмической аппроксимации и численно рассчитаны их полиномы:

Для нижних граничных частот:

$$TCF_H = 1,67 \cdot \ln(f_H) - 52,94$$

Для верхних граничных частот:

$$TCF_B = 2,41 \cdot \ln(f_B) - 50,14$$

Также для сравнения приведено теоретическое значение ТКЧ танталата лития среза ухл/42° (рис. 6).

Анализ результатов

Анализ полученной статистики измерений показывает значительно более высокий средний ТКЧ ПАВ-фильтров на продольно-связанных резонаторах на танталате лития (LiTaO₃) среза ухл/42° на 7-12 ppm/°C, чем справочные значения на свободной поверхности (-28 ppm/°C); отдельные значения ТКЧ достигали -43 ppm/°C, что превышает справочные значения ТКЧ данного среза на целых 15 ppm/°C.

Данные выбросы ТКЧ могут быть связаны с ошибкой измерений, вызванной попаданием конденсата в контактно-измерительное приспособление, а также искажением АЧХ при экстремальных температурах вследствие рассогласования с нагрузкой в контактном устройстве (некоторые типы LCRF фильтров более чувствительны к рассогласованию с нагрузкой, чем другие, что отражается на их частотных характеристиках).

Если исключить такие выбросы из статистики, то средний ТКЧ варьируется в пределах от -35 до -38 ppm/°C (см. табл. 2), что превышает не только справочное значение для среза 42°YX-LiTaO₃ (-28 ppm/°C), но и значения, зачастую заносимые как справочные в "datasheet" и технические условия фильтров на ПАВ (на 3-7 ppm/°C).

И, хотя производитель обычно закладывает большие запасы в значения гарантированных полос пропускания по сравнению с реальными АЧХ, это очень важный момент, который должен учитываться ещё на стадии проектирования аппаратуры ответственного применения. Ситуация тут осложняется ещё и тем, что производители аппаратуры зачастую игнорируют требования технических условий на фильтры, а формируют свои собственные, на пределе подходящие к возможностям фильтров.

По полученным данным, при изучении температурных уходов граничных частот АЧХ в полосе всех фильтров было также зафиксировано заметное систематическое отличие относительных уходов граничных частот левого и правого ската АЧХ.

ТКЧ граничной частоты (по уровню -3 дБ от максимума) правого ската, который формируется преимущественно 3-й модой [3] в среднем в 1,23 раза превысил аналогичный показатель левого ската, который формируется 1-й. Ранее уже проводились попытки объяснить отличия в ТКЧ граничных частот в лестничных (LDRF – ladder resonator filters) и LCRF фильтрах на ПАВ [3,4]. Стоит отметить, что частично на результатах расчёта ТКЧ сказывается некоторая «деформация» АЧХ в интервале температур – при повышенных температурах правый скат имеет тенденцию «заваливаться».

Связан ли такой завал с рассогласованием фильтра со входным/выходным трактом подключения или только с внутренними явлениями в структуре самого фильтра, установить сложно, так как здесь мы уже приближаемся к погрешностям измерений всего измерительного стенда. Тем не менее текущие результаты полностью подтверждают наличие данного явления на многих образцах фильтров такого типа, хотя средние значения незначительно отличаются от приведённых ранее [3], что может объясняться большей выборкой, отличием монтажа кристалла внутри корпусов CSSP и LTCC и другими факторами (к сожалению, публикации по ТКЧ фильтров с аналогичными частотами, полосами пропускания, корпусами и толщинами металлизации в открытых источниках не найдены).

Из графика рисунка 6 и таблицы 2 видно, что ТКЧ падал с уменьшением толщины металлизации и ростом частоты, пока не стабилизировался в фильтрах ФП-5034 (1200 МГц), ФП-568 (1590 МГц), ФП-667 (2067 МГц) вокруг значений – 31-33 ppm/°C (для нижних граничных частот) и -39-41 ppm/°C (для верхних граничных частот) несмотря на продолжающееся уменьшение толщины металлизации. При этом относительная (по сравнению с длиной волны λ) толщина металлизации сохранялась в диапазоне 8-9%.

Заключение

Проведённые исследования демонстрируют значительно более высокий средний ТКЧ ПАВ-фильтров на продольно-связанных резонаторах на танталате лития (LiTaO₃) среза $uxl/42^\circ$ на 7-12 ppm/°C, чем справочные значения на свободной поверхности и более высокие, чем обычно приводятся как справочные в "datasheet" на фильтры (на 3-7 ppm/°C). Подтверждено на группе фильтров в широком диапазоне частот наличие такого явления, как отличие ТКЧ нижней и верхней граничных частот. Установлены коэффициенты этого отличия для LCRF фильтров на танталате лития (LiTaO₃) среза $uxl/42^\circ$ на основании данных экспериментальных исследований ТКЧ граничных частот для группы из 6 типов фильтров на частоты от 465 до 2067 МГц (исследования проводились на 18 образцах). Полученные данные могут быть применены на практике при проектировании различной радиоэлектронной аппаратуры для более точной оценки температурного дрейфа частотных характеристик фильтров данного типа в её составе с целью улучшения технических характеристик и потребительских свойств аппаратуры.

Автор выражает благодарность Серебряковой Людмиле Николаевне за помощь при проведении температурных испытаний.

Литература

1. G. Kovacs, M. Anhorn, H.E. Engan, G. Visintini, and C.C.W. Ruppel, "Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃," Proc. IEEE Ultrasonics Symp., vol. 1, pp. 435-438, 1990.
2. David P. Morgan, Idealised analysis of saw longitudinally coupled resonator (LCR) filters, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (Vol.: 51, Issue: 9, Sept. 2004) pp. 1165-1170.
3. Орлов В.С. Миниатюрные фильтры на поверхностных акустических волнах с продольной связью резонаторов и сборкой по технологии "перевернутого кристалла" для аппаратуры навигационных систем ГЛОНАСС-GPS // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. №4. С. 40-50.
4. Орлов В.С. Лестничные резонаторные фильтры на поверхностных акустических волнах для приемников навигационных систем // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. №5. С. 8-16.
5. Туркин И.А. Автоматизация комплексных измерений электрических параметров ВЧ-фильтров // T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт №5, 2013. ISSN 2072-8735.
6. Материалы лаборатории акустоэлектронных устройств НИЛ-03 МТУСИ – www.saw-filters.ru (дата обращения 30.08.2019).

FEATURES OF TEMPERATURE COEFFICIENT OF FREQUENCY SAW LONGITUDINALLY-COUPLED RESONATOR FILTERS BASED ON LITHIUM TANTALATE YXL/42° CUT

Ilya A. Tourkine, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia, tourezkiy@gmail.com

Abstract

Temperature coefficient of frequency (TCF) is a very significant parameter of surface acoustic wave (SAW) filters. High temperature stability let use SAW-filters in more special radio electronic applications (for example: military, special, aviation or space), in case of strict requirements where operating temperature range can reach more than 140°. SAW filters meet these requirements due to the low absolute values temperature coefficient of delay (TCD) of the monocrystal cut, that is used during production process. Also it depends on the thickness and the coefficient of metallization of the interdigital transducers (IDT) and varies from tenths to tens ppm/°C. This article describes an investigation of SAW longitudinally-coupled resonator filters (LCRF) frequency response behavior at wide temperature range (-60°C +85°C), special attention is paid to measurement technique; presents a large amount of experimental data (18 samples of 6 filters by frequency 465, 607, 836, 1200, 1590 and 2067 MHz), the real average TCF of lithium tantalate (LiTaO₃) yxl/42° cut based filters, reference values and metallization thickness is shown. A regular difference between low and high limit frequencies TCF is also presented; built the averaged (logarithmical approximation method is used) dependence of TCF on frequency. There are given main possible reasons for this difference.

Keywords: surface acoustic wave filters, Longitudinally-Coupled Resonator Filter, temperature coefficient of delay, lithium tantalite.

References

1. G. Kovacs, M. Anhorn, H.E. Engan, G. Visintini, and C.C.W. Ruppel, (1990). "Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃," *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.* Vol. 1, pp. 435-438.
2. David P. Morgan, (2004). Idealised analysis of saw longitudinally coupled resonator (LCR) filters, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* (Vol. 51, Issue: 9, Sept. 2004), pp. 1165-1170.
3. Orlov V.S. (2015). Miniature longitudinally coupled resonator surface acoustic wave filters with "flip-chip" assembly technology for navigation systems GLONASS-GPS. *T-Comm.* Vol 9. No.4, pp. 40-50. (in Russian)
4. Orlov V.S. (2016). The ladder resonator filters on surface acoustic waves for receivers of navigation systems. *T-Comm.* Vol. 10. No.5, pp. 8-16. (in Russian)
5. Tourkine I.A. (2013). The automation of complex measurements electrical parameters of saw-filters. *T-Comm.* No.5, pp. 45-48. (in Russian)
6. Surface acoustic Wave Filters. Official site www.saw-filters.ru, [Electronic Recourse] of MTUCI Filters Laboratory. Access conditions: <http://saw-filters.ru/>. Free (date of communication: 10.09.2019). (in Russian)

Information about author:

Ilya A. Tourkine, candidate of sciences, head of R&D acoustoelectronic laboratory, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia