

# Стабилизация установки центральной частоты ЖИГ-фильтров в измерительных СВЧ-приборах компании «Микран»

Фильтры на основе технологии железо-иттриевого граната (ЖИГ) широко применяются в измерительной СВЧ-аппаратуре сканирующего типа в качестве перестраиваемых преселекторов. К достоинствам таких фильтров относятся широкий диапазон перестройки по частоте, узкая полоса пропускания, высокое затухание за полосой пропускания, малые потери, удобство управления установкой центральной частоты и компактные размеры. Основные типы приборов, в которых применяются ЖИГ-фильтры, — это широкополосные измерительные приемники и анализаторы спектра с рабочим диапазоном до 50 ГГц.

В статье рассмотрен ряд проблем, возникающих при использовании ЖИГ-фильтров в анализаторах спектра, и представлены оригинальные способы их решения, реализованные в серийных изделиях НПФ «Микран». Приведен краткий обзор характеристик анализаторов, определяемых параметрами преселектора. Описан метод повышения температурной стабильности преселектора путем применения схемы термостата с термоэлектрическими преобразователями Пельтье, а также внутренних автоматически регулируемых нагревательных элементов. Приведены результаты тестирования термостатированного преселектора. Рассмотрено влияние эффекта магнитного гистерезиса и предложен алгоритм управления перестройкой ЖИГ-фильтра, уменьшающий это влияние.

Дмитрий ЯНЧУК

dmitry.yanchuk@micran.ru

Никита ХАРИТОНОВ

nikita.kharitonov@micran.ru

Николай ДРОБОТУН

nikolay.drobotun@micran.ru

## Введение

Применение ЖИГ-фильтров (фильтров с резонаторами на основе железо-иттриевого граната) в современных профессиональных сверхширокополосных анализаторах спектра дает ряд преимуществ по сравнению с другими способами реализации преселекторов, но в то же время приводит к существенным ограничениям некоторых важных технических характеристик. Обычно преселектор используется в диапазоне частот от нескольких гигагерц до верхней рабочей частоты прибора. Анализ характеристик современных при-

боров показывает, что в диапазоне работы преселектора существует заметное ухудшение точности измерения амплитуды сигналов. Основной вклад в погрешность такого измерения вносит неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Для иллюстрации этого в таблице 1 приведены характеристики неравномерности АЧХ для двух современных приборов фирмы Agilent [3, 4].

Судя по данным таблицы 1, применение ЖИГ-преселектора заметно снижает точность измерения амплитуды. Причем при расширении температурного диапазона работы приборов точность измерения ампли-

туды в канале с преселектором ухудшается сильнее, чем в канале без преселектора.

Основные причины ухудшения точности измерения амплитуды при использовании ЖИГ-фильтра:

- влияние температуры на центральную частоту ЖИГ-фильтра;
- влияние магнитного гистерезиса при перестройке центральной частоты ЖИГ-фильтра;
- алгоритм управления перестройкой центральной частоты ЖИГ-фильтра.

## Влияние температуры на центральную частоту ЖИГ-фильтра

Принцип работы ЖИГ-фильтров основан на резонансных свойствах железо-иттриевого граната. Когда к кристаллу приложено постоянное магнитное поле, магнитные моменты диполей начинают прецессировать вокруг направления поля с частотой, пропорциональной напряженности магнитного поля.

Таблица 1. Максимальная ошибка измерения уровня мощности, определяемая неравномерностью АЧХ

Характеристики	Agilent PSA E4440A	Agilent PXA N9030A-526
Неравномерность АЧХ (максимальная ошибка относительно опорных условий в диапазоне температур +20...+30 °С) до 3 ГГц (диапазон без преселектора), дБ	±0,38	±0,35
Неравномерность АЧХ (максимальная ошибка относительно опорных условий в диапазоне температур 0...+55 °С) до 3 ГГц (диапазон без преселектора), дБ	±0,7	±0,44
Неравномерность АЧХ (максимальная ошибка относительно опорных условий в диапазоне температур +20...+30 °С) выше 3 ГГц (диапазон с преселектором), дБ	От ±1,5 до ±2,5	От ±1,5 до ±2,5
Неравномерность АЧХ (максимальная ошибка относительно опорных условий в диапазоне температур 0...+55 °С) выше 3 ГГц (диапазон с преселектором), дБ	От ±2 до ±3,5	От ±2,5 до ±3,7

Если к материалу приложить переменное магнитное поле с частотой прецессии в плоскости, перпендикулярной постоянному магнитному полю, то амплитуда прецессии начнет расти — появится ферромагнитный резонанс (ФМР). Частота прецессии имеет сильную температурную нестабильность [1].

Кроме того, существует еще один источник температурной нестабильности, связанный с конструкцией корпуса ЖИГ-фильтра. Учитывая то, что температура самого фильтра при перестройке значительно изменяется, девиация центральной частоты при одной и той же величине управляющего тока может составлять до 10–20 МГц при номинальной полосе пропускания фильтра порядка 40–70 МГц и неравномерности АЧХ в полосе порядка  $\pm (0,5-1)$  дБ. Это может привести к значительной ошибке измерения абсолютного уровня мощности сигналов.

### Конструкция ЖИГ-фильтров компании «Микран»

ЖИГ-фильтры, разработанные НПФ «Микран» и применяемые в анализаторах спектра СК4М-18 и измерителях коэффициента шума Х5М-18, имеют ряд оригинальных технических решений, которые позволяют значительно уменьшить температурную нестабильность установки центральной частоты путем термостатирования элементов конструкции.

ЖИГ-фильтр (рис. 1а) представляет собой массивный пермалловый куб (магнитопровод), состоящий из двух плотно смыкающихся половин. Внутри каждой из них выполнена обмотка из 350–400 витков медного провода. Обмотки соединены последовательно, образуя единую катушку, на которую через гермовыводы (выводы Е1 и Е2) поступает управляющий ток. Между наконечниками сердечников обмоток (полусов) есть некоторый зазор, в котором при пропускании тока через катушку возникает постоянное магнитное поле. Таким образом, конструкция представляет собой подобие электромагнита вейссовского типа.

В зазор между полюсами помещена так называемая СВЧ-камера (рис. 1а) — керамическая металлизированная пластина с отверстиями, в центрах которых на специальных вращающихся стержнях удерживаются ЖИГ-сферы. Поворотом стержней при настройке фильтра изменяют ориентацию кристаллографических осей ЖИГ [1] в магнитном поле, добиваясь оптимальных параметров ФМР. Связь между резонаторами обеспечивается парами взаимно перпендикулярных индуктивных полупетель, окружающих ЖИГ-сферу. Вход и выход фильтра выполнены с помощью коаксиальных кабелей, впаянных в корпус камеры, и фланцевых СВЧ-разъемов, закрепленных на корпусе фильтра [5].

Оригинальным техническим решением (патент № 117721 от 27.06.2012 г.) является раз-

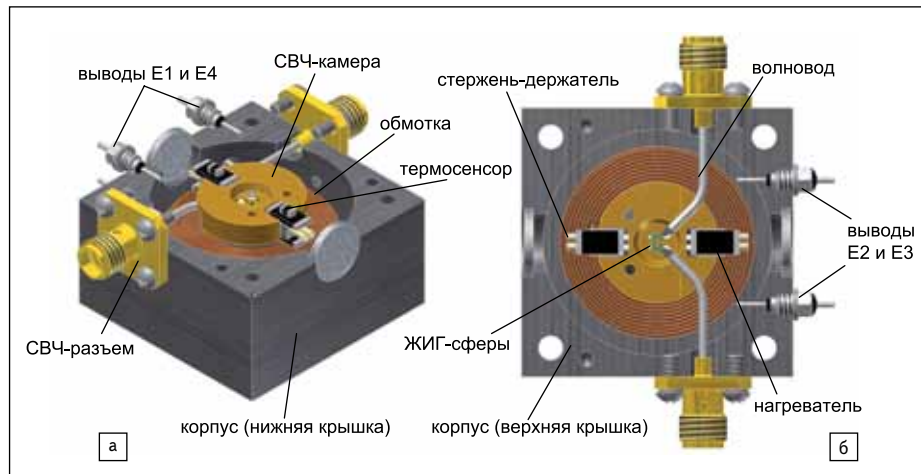


Рис. 1. ЖИГ-фильтр: а) общий вид (без верхней крышки); б) вид снизу (без нижней крышки)

мещение в корпусе СВЧ-камеры нагревательных элементов и температурного сенсора.

#### Термостатирование СВЧ-камеры ЖИГ-фильтра

При перестройке фильтра, установленного в приборах СК4М-18 и Х5М-18, во всем частотном диапазоне управляющий ток в обмотках изменяется от 0,15 до 1 А. При этом рассеиваемая на них мощность по результатам измерений вызывает нагрев ЖИГ-фильтра до +36 °С на частоте 3,2 ГГц и до +44 °С на частоте 20 ГГц (в установленном режиме при температуре окружающей среды +20 °С).

С помощью встроенного в СВЧ-камеру термосенсора корректируется напряжение, подаваемое на встроенный нагреватель, в результате чего, независимо от величины тока в обмотке, температура СВЧ-камеры остается постоянной.

#### Термостатирование корпуса ЖИГ-фильтра

При перестройке частоты температура корпуса ЖИГ-фильтра может принимать различные значения, что приводит к изменению зазора между наконечниками сердечников, а следовательно, распределение электромагнитного поля в области ЖИГ-сфер тоже меняется.

Наиболее оптимальным решением для поддержания постоянной температуры корпуса является применение термоэлектрических элементов Пельтье. Принцип их работы заключается в поглощении или выделении тепла в месте контакта двух материалов с разными уровнями энергии электронов в зоне проводимости при протекании через них электрического тока. В элементах Пельтье используются пары полупроводниковых параллелепипедов *p*- и *n*-типа, расположенные таким образом, что одна из сторон корпуса элемента нагревается, а другая охлаждается. Разность температур тем выше, чем больше пропускаемый через элемент ток.

По сравнению с другими устройствами элементы Пельтье (ЭП) имеют ряд преимуществ [2]:

- возможность как охлаждать, так и нагревать;
- простые схемные решения для управления температурой;
- отсутствие каких-либо движущихся частей, небольшие размеры;
- сравнительно высокое быстродействие.

По результатам измерений установлено, что температура ЖИГ-фильтра, в зависимости от частоты настройки, может принимать значения от +36 °С на частоте 3,2 ГГц и до +44 °С на частоте 20 ГГц (в установленном режиме при температуре окружающей среды +20 °С), а рабочая температура эксплуатации приборов СК4М-18 и Х5М-18 — от +5 до +40 °С. Из этого следует, что расчетная температура ЖИГ-фильтра может изменяться от +21 до +64 °С.

Для равномерного и быстрого нагревания или охлаждения фильтра была разработана конструкция (патент № 116723 от 27.05.2012 г.), в которой используется два ЭП, закрепленных на двух противоположных сторонах корпуса с применением теплопроводной пасты. На обратных сторонах ЭП были установлены алюминиевые радиаторы (рис. 2). Контроль температуры корпуса ЖИГ-фильтра осуществляется с помощью термодатчика, закрепленного на корпусе фильтра.

Эффективность работы такой системы оценивалась зависимостью температуры корпуса фильтра, установленного на максимальную или минимальную центральную частоту, от величины протекающего через ЭП тока во всем рабочем диапазоне температур.

Результаты измерений представлены на рис. 3, на котором видно, что корпус фильтра, нагретый до максимальной температуры  $T_{\max} = +64$  °С, можно охладить до температуры не ниже 50 °С. Также, нагревая фильтр, находящийся при минимальной температуре  $T_{\min} = +21$  °С, нельзя получить

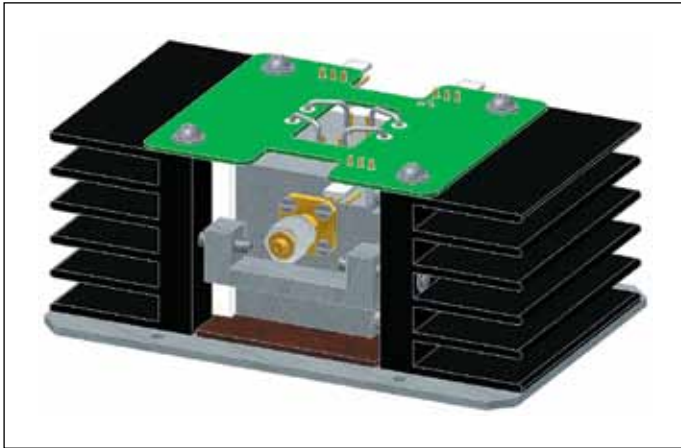


Рис. 2. Общий вид термостатированного ЖИГ-фильтра

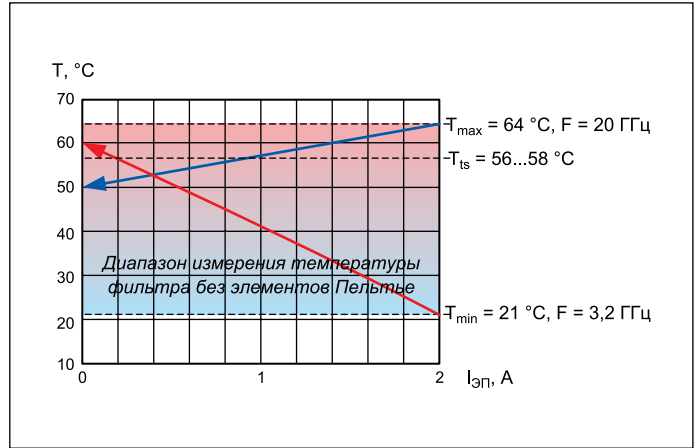


Рис. 3. Зависимость температуры корпуса фильтра от тока, протекающего через ЭП

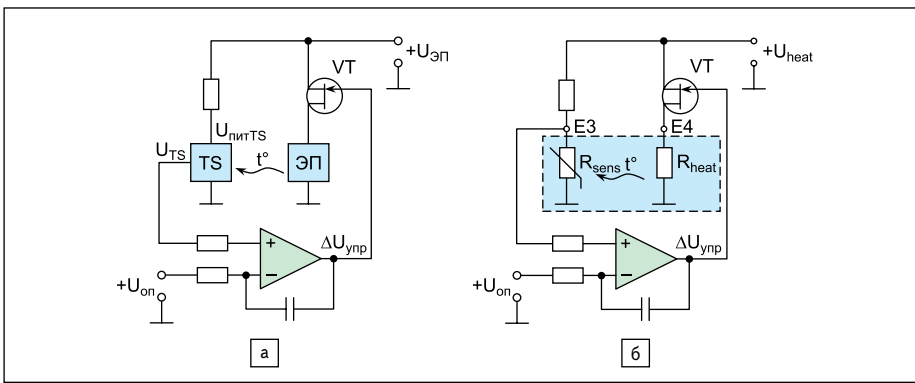


Рис. 4. Упрощенные схемы термостатирования: а) корпуса фильтра; б) СВЧ-камеры

температуру выше 60 °С. Следовательно, температура термостатирования корпуса должна лежать в диапазоне +50...60 °С. Драйвер тока ЭП работает с эффектом гистерезиса по внешней температуре, чтобы не происходило переключений между режимами нагрева и охлаждения при достижении внешней температуры, равной температуре термостатирования.

Упрощенная схема термостатирования корпуса фильтра представлена на рис. 4а.

В основе работы схемы — применение закрепленного на корпусе температурного датчика (TS), выходное напряжение которого ( $U_{TS}$ ) прямо пропорционально его температуре. Это напряжение сравнивается интегратором, выполненным на операционном усилителе, с опорным напряжением ( $U_{on}$ ), которое выбирают равным  $U_{TS}$  при требуемой температуре корпуса  $T_{st}$ . В случае отклонения величины  $U_{TS}$  от  $U_{on}$  на выходе интегратора формируется некоторое приращение напряжения управления  $\Delta U_{упр}$ , которое в ту или иную сторону изменяет сопротивление стока-истока транзистора VT, тем самым регулируя ток, протекающий через ЭП, и, соответственно, изменяя интенсивность охлаждения корпуса. Это происходит до тех пор, пока напряжения  $U_{TS}$  и  $U_{on}$  не выровняются, что и будет соответствовать заданной рабочей температуре фильтра.

Аналогичная схема применена для термостатирования СВЧ-камеры (рис. 4б). Здесь  $R_{sens}$  — термосенсор, установленный в СВЧ-камеру,  $R_{heat}$  — нагревательный элемент, а  $U_{heat}$  — напряжение питания схемы термостага.

В результате можно оценить, как влияет термостатирование ЖИГ-фильтра на стабильность центральной частоты во времени, а также на амплитудную ошибку (то есть на разницу между коэффициентами передачи на центральной частоте сразу и через 5 мин. после установки фильтра), вызванную дрейфом центральной частоты фильтра. На рис. 5 показаны АЧХ ЖИГ-фильтра, настроенного на частоту 15 ГГц, прибор находится при температуре +20 °С. Во всех случаях фильтр перестраивался с частоты 3 на 15 ГГц (черная кривая), остальные кривые — это АЧХ, измеренные через 5 мин. при разных режимах термостатирования (красная кривая — без термостатирования, синяя — термостатирование корпуса фильтра, розовая — термостатирование корпуса фильтра и СВЧ-камеры). Температуру термостатирования СВЧ-камеры выбирают равной температуре термостатирования корпуса.

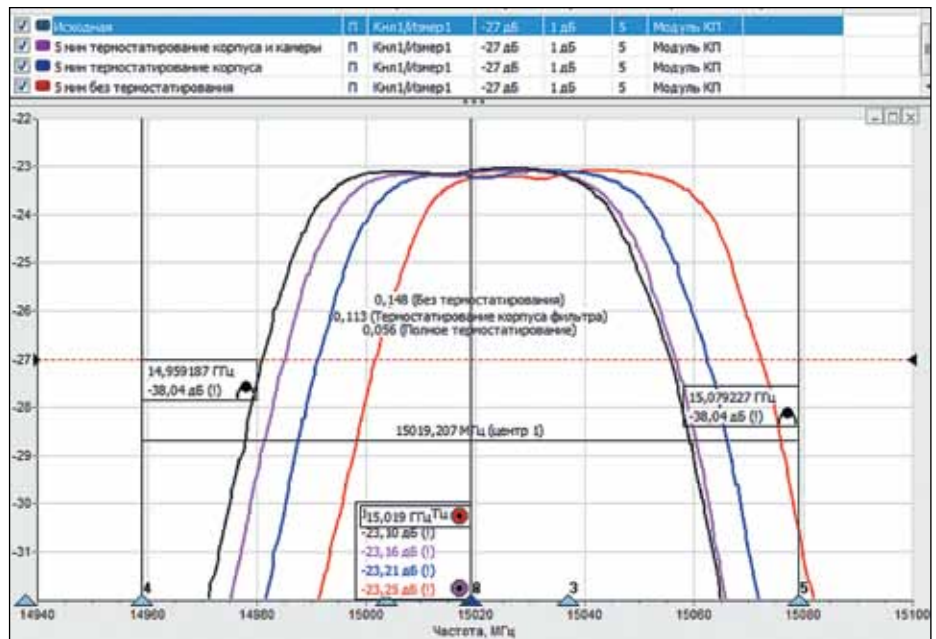


Рис. 5. АЧХ ЖИГ-фильтра на частоте 15 ГГц

**Таблица 2.** Сравнение характеристик режимов термостатирования ЖИГ-фильтра, настроенного на частоту 15 ГГц при температуре 20 °С

Характеристики	Без термостата	Термостатирование корпуса фильтра	Термостатирование корпуса фильтра и СВЧ-камеры
Смещение центральной частоты после 5 мин., МГц	20	10	5
Амплитудная ошибка, дБ	0,148	0,113	0,056

Судя по данным таблицы 2, термостатирование ЖИГ-фильтра позволяет уменьшить ошибку установки центральной частоты более чем в четыре раза, а амплитудную ошибку (на частоте 15 ГГц) — более чем в два раза относительно ошибки (без термостата) в децибелах. Следует учесть, что эти измерения проводились при фиксированной внешней температуре +20 °С, то есть при изменении внешней температуры амплитудная ошибка для фильтра без термостата будет еще больше. Для термостатированного фильтра изменение внешней температуры не приведет к изменению амплитудной ошибки.

**Влияние магнитного гистерезиса при перестройке ЖИГ-фильтра**

В измерительных приборах СК4М-18 и Х5М-18 управление перестройкой преселектора осуществляется программой, которая отсылает соответствующие команды на специальную плату ЖИГ-драйвера. В соответствии с калибровочной характеристикой фильтра каждое дискретное значение центральной частоты (с шагом около 300 кГц) задается цифровым кодом (от 0 до 2<sup>16</sup>), который преобразуется платой драйвера с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) в аналоговый сигнал соответствующей величины.

Помимо температурной нестабильности центральной частоты ЖИГ-фильтра существует влияние гистерезиса магнитопровода. При перестройке фильтров, управляемых магнитным полем, имеет место эффект, когда точность установки частоты зависит от направления и величины изменения магнитного потока в обмотках. Другими словами, при

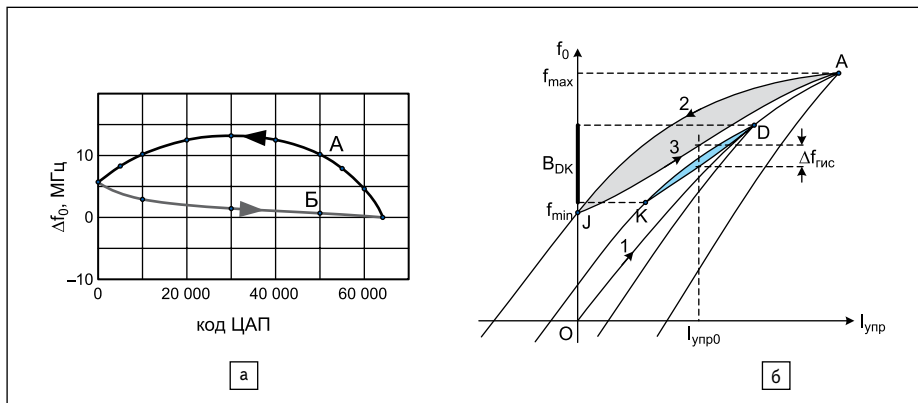
изменении, например, диапазона сканирования измерительного прибора одной и той же величине кода ЦАП (тока управления) преселектора будет соответствовать разное значение частоты установки фильтра. Следует отметить, что схема ЖИГ-драйвера и ее элементная база должны обладать очень высокой температурной стабильностью, так как изменение тока через обмотку всего на 1 мА приведет к смещению центральной частоты ЖИГ-фильтра на 20 МГц [5].

На рис. 6а приведены экспериментально полученные графики, иллюстрирующие эффект гистерезиса в фильтре. В ходе эксперимента вручную задавались значения кода ЦАП преселектора в следующем порядке:

- от нуля до значения, соответствующего максимальной частоте 20 ГГц (прямой ход);
- от последнего значения кода до нуля (обратный ход);
- прямой ход повторно.

Представленные графики показывают отклонение центральной частоты фильтра Δf<sub>0</sub> при обратном ходе (кривая А) и повторном прямом ходе (кривая Б) от частоты, соответствующей тем же величинам кода ЦАП при первоначальном прямом ходе.

Качественно петлю гистерезиса можно изобразить так, как показано на рис. 6б. График для наглядности изображен в координатах f<sub>0</sub> = F(I<sub>упр</sub>), где I<sub>упр</sub> — управляющий ток в катушке фильтра. Так как в нашем случае ток отрицательной величины на катушку не подается, петля АJ целиком находится выше первоначальной кривой намагничивания 1. Для различных полос сканирования петли будут разными (например, петля DK для полосы В<sub>DK</sub>), соответственно, для значения управляющего тока I<sub>упр0</sub> существует некоторая неоднозначность установки частоты фильтра Δf<sub>зус</sub>



**Рис. 6.** Неточность установки центральной частоты преселектора Δf<sub>0</sub> в зависимости от направления перестройки (а) и примерный вид петли гистерезиса при разных полосах сканирования (б)

Для того чтобы преселектор при любой полосе сканирования перестраивался по одной кривой (в нашем случае это может быть только кривая 3), необходимо условие «прохождения» фильтром точек А и J характеристики.

**Алгоритм управления перестройкой ЖИГ-фильтра**

В результате этих исследований был разработан специальный алгоритм управления преселектором. В конце каждого цикла сканирования происходит перестройка фильтра на частоту 20 ГГц (по кривой 3 до точки А), а затем возвращение в положение, соответствующее нулю кода ЦАП (по кривой 2 в точку J). После этого фильтр возвращается (по кривой 3) на начальную частоту сканирования. Такая же процедура происходит при каждом новом запуске измерения, а также смене диапазона обзора.

**Заключение**

Все описанные разработки были внедрены при серийном производстве приборов Х5М-18 и СК4М-18.

Метрологические испытания серии приборов показали, что ошибка измерения амплитуды сигналов, обусловленная нестабильностью ЖИГ-фильтра, была существенно снижена и составила ±0,5 дБ во всем диапазоне рабочих температур, в то время как у лучших зарубежных аналогов она составляет от ±2 до ±3,7 дБ (табл. 1). При решении ряда инженерных задач такой результат делает анализатор спектра СК4М-18 более предпочтительным.

Следует отметить, что, несмотря на значительное развитие измерительной техники и колоссальные достижения в результате применяющихся в ней технологий, проблема стабильности установки частоты в ЖИГ-фильтрах актуальна до сих пор, а сама конструкция преселекторов остается весьма консервативной. В то же время достойной замены фильтрам на основе железо-иттриевого граната в диапазоне, занимающем несколько десятков гигагерц, в настоящее время нет и в ближайшем будущем, вероятно, не появится.

**Литература**

1. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1971.
2. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Элемент\\_Пельтье](http://ru.wikipedia.org/wiki/Элемент_Пельтье)
3. N9030A PXA Signal Analyzer. Specifications Guide. Agilent Technologies.
4. PSA Spectrum Analyzer. Specifications Guide. Agilent Technologies.
5. Харитонов Н. М. Стабилизация установки частоты ЖИГ-фильтров в измерительных СВЧ-приборах // Доклады ТУСУР. Томск, 2011. Ч. I. № 2 (24).