

УДК 621.372.543.2 (045)

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОГО КВАРЦОВОГО ФІЛЬТРА

*І. Г. Прокопенко*, д-р техн. наук., *Н. С. Бабанська*

Національний авіаційний університет

nadiyababanska@gmail.com

*Наведено методику розрахунку кварцового фільтра відповідно до заданих параметрів: центральної частоти, номінального значення ширини смуги пропускання по рівню 3 дБ, загасання у смугі затримки, загасання у смугі пропускання, заглушування другої гармоніки сигналу генератора. Проведено розрахунок фільтра з центральною частотою 25 МГц, номінальним значенням ширини смуги пропускання 15 кГц, загасанням у смугі затримки більше 30 дБ, загасанням у смугі пропускання менше 4,5 дБ, заглушуванням другої гармоніки сигналу генератора більше 30 дБ. Доведено ефективність розрахованого фільтра шляхом побудови та практичного застосування фільтра в модулі діючої радіолокаційної станції. Побудовано і порівняно дві реалізації фільтра: з навісними елементами та з smd (surface-mounted) елементами.*

**Ключові слова:** кварцовий фільтр, смуга пропускання, центральна частота, загасання у смугі затримки, високочастотний фільтр, кварцовий резонатор, розрахунок параметрів фільтра, фільтр Батерворта.

*A methodology of high frequency crystal filter design with specified parameters, such as central frequency, bandwidth on 3 dB level, attenuation in delay band, attenuation in pass band, attenuation of signal generator second harmonic, is provided. A calculation of filter parameters on central frequency 25 MHz, with the bandwidth 15 kHz, attenuation in delay band more than 30 dB, attenuation in pass band less than 4.5 dB, attenuation of signal generator second harmonic more than 30 dB was made. The effectiveness of developed filter, due to construction and practical use in module of operating radar, was proved. Furthermore, two kinds of filter: with external elements and with surface-mounted ones, were built and their characteristics compared.*

**Keywords:** crystal filter, bandwidth, central frequency, attenuation in delay band, high frequency filter, filter parameters calculation, Butterworth filter.

### Вступ

Розробка нових радіолокаційних станцій (РЛС), а також модернізація РЛС, що експлуатуються, потребують створення нових модулів. Одним з найважливіших є когерентний гетеродин (КГ). До форми сигналу КГ висуваються високі вимоги, зокрема до рівня бокових гармонік. Для їх заглушування застосовуються різні методи фільтрації.

Особливості конкретних РЛС накладають обмеження на характеристики фільтрів, які не завжди можна задовольнити продукцією, що є на ринку радіокомпонентів.

У роботі розв'язується задача розробки методики для розрахунку фільтра з відповідними параметрами, створення фільтра та перевірки його ефективності. З огляду на ефективність і технологічність обрано фільтри на основі кварцових резонаторів. Отже, необхідно виготовити фільтр з такими параметрами:

- центральною частотою 25 МГц;
- смугою пропускання не менше 10 кГц;
- загасанням у смугі затримки не менше 30 дБ;
- загасанням у смугі пропускання не більше 4,5 дБ;
- заглушування другої гармоніки сигналу генератора не менше 30 дБ.

Згідно із заданими параметрами було обрано фільтр Батерворта.

### Аналіз існуючих методик розрахунку кварцових фільтрів

Аналіз літератури [1–4] показав, що більшість методик придатні для розрахунку фільтрів з відмінними від потрібних параметрами: центральними частотами фільтра до 10 МГц та смугами пропускання до 3 кГц.

Для отримання необхідних результатів, з використанням джерел [1–5] був розроблений і застосований синтез методик з розрахунку кварцових фільтрів та коригування їх параметрів.

### Вимірювання параметрів кварцового резонатора

Особливо корисною є методика з вимірювання параметрів кварців, наведена у праці [1, стр. 18–19].

Було зібрано схему, як показано на рис. 1, а, а також отримано такі значення:  $f_s = 249911$  Гц — послідовний резонанс кварцового резонатора,  $f_p = 250050$  Гц — паралельний резонанс кварцового резонатора, і отже, різниця між паралельним та послідовним резонансами  $\Delta f = 14$  кГц.

Вимірний реактивний опір еквівалентного контуру  $R_k = 16$  Ом.

Як генератор стандартних сигналів Г1 використовувався прилад Г4-107.

Значення  $f_s$  та  $f_p$  були отримані за допомогою осцилографа TDS 1012.

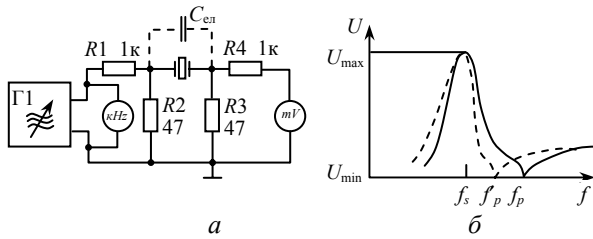


Рис.1. Схема резонансного методу вимірювання параметрів кварцового резонатора (а) і залежність напруги від частоти (б)

**Розрахунок номіналів необхідних елементів фільтра**

Використавши отримані значення та формули, наведені в методиці [4, стор. 21–27] та обравши певні значення величин (див. таблицю):  $B = 7,5$  кГц — більше ніж необхідна смуга пропускання,  $R_0 = 300$  Ом — більший ніж  $R_{end}$  [4, 24],  $F_0 = 25$  МГц,  $C_p = 6$  пФ — приймається 6 пФ в усіх рівняннях,  $k_{jk} = 0,7071$  і  $q = 1$  згідно з рис. 2 [4, 23],  $N = 3$ , розраховуємо параметри триполюсного кварцового фільтра, схему якого показано на рис. 3.

**Параметри фільтра**

Параметр	Значення параметра	Величина параметра
$\Delta f$	Виміряна різниця між паралельним та послідовним резонансом кварцового резонатора	$\Delta f = 14$ кГц
$B$	Орієнтовна смуга пропускання фільтра	$B = 7,5$ кГц
$R_0$	Навантаження схеми	$R_0 = 300$ Ом
$R_{end}$	Кінцевий узгоджувальний опір, Ом	$R_{end} = 214$ Ом
$C_{end}$	Кінцева узгоджувальна ємність, пФ	$C_{end} = 18,86$ пФ
$C_m$	Динамічна ємність резонатора, Ф	$C_m = 0,03$ пФ
$L_m$	Динамічна індуктивність резонатора, Гн	$L_m = 1,37$ мкГн
$F_0$	Центральна частота резонатора, МГц	$F_0 = 25$ МГц
$R_s$	Вимірний опір з послідовними втратами резонатора	$R_s = 16$ Ом
$C_{jk}$	Узгоджувальна ємність, пФ	$C_{jk} = 11$ пФ
$C_p$	Паралельна ємність резонатора	$C_p = 6$ пФ
$k_{jk}$	Нормований узгоджувальний коефіцієнт	$k_{jk} = 0,7071$
$q$	Нормований коефіцієнт $Q$ на кінцевій ділянці	$q = 1$
$N$	Кількість резонаторів, які використовуються при побудові фільтра	$N = 3$

$N$	$q$	$k_{12}$	$k_{23}$	$k_{34}$	$k_{45}$
2	1,414	0,7071			
3	1	0,7071	0,7071		
4	0,7654	0,8409	0,4512	0,8409	
5	0,8180	1	0,5559	0,5550	

Рис. 2. Нормовані узгоджувальні коефіцієнти  $k$  і  $q$  для фільтра Батерворта без попередніх спотворень

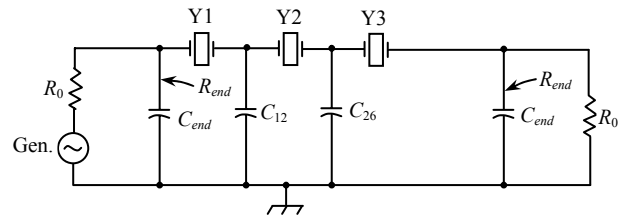


Рис. 3. Приклад триполюсного кварцового фільтра

Варто зазначити, що формули відмінні від тих, що використовувались автором у праці [4, стор. 21–27], адже тут розраховується приклад фільтра на частоту 5 МГц і не висуваються вимоги, які має задовольнити побудований фільтр. Формули, застосовані у цієї статті — емпіричні і можуть бути використані для розрахунків фільтрів з подібними заданими параметрами.

$$C_{jk} = 1326 \cdot \left( \frac{\Delta f}{B \cdot k_{jk} \cdot F_0} \right) - \frac{F_0 \cdot 10}{2.31} - 20, \text{ пФ};$$

$$R_{end} = \frac{123 \cdot \Delta f}{q \cdot B} - R_s, \text{ Ом};$$

$$C_{end} = \frac{1.59 \cdot 10^5}{R_0 \cdot F_0} \sqrt{\frac{R_0}{R_{end}} - 1} - \frac{F_0}{1.38}, \text{ пФ};$$

$$Q_u = \frac{1.2 \cdot 10^8 \cdot F}{\Delta f \cdot R_s};$$

$$C_m = 1.326 \cdot 10^{-15} \cdot \left( \frac{\Delta f}{F_0^2} \right), \text{ Ф};$$

$$L_m = \frac{19.1}{\Delta f}, \text{ Гн}.$$

Виміряні та розраховані параметри фільтра, наведено в таблиці.

**Налаштування та узгодження фільтра**

Використовуючи результати розрахунків, можна схему рис. 3 подати вигляді рис. 4.

Під час вимірювання амплітудно-частотної характеристики фільтра виявилось, що центральна частота фільтра відхиляється від бажаної.

Причиною такого відхилення вважається власне зміщення центральних частот резонаторів. Для коригування центральної частоти фільтра може бути використана методика, наведена в праці [5, с. 158].

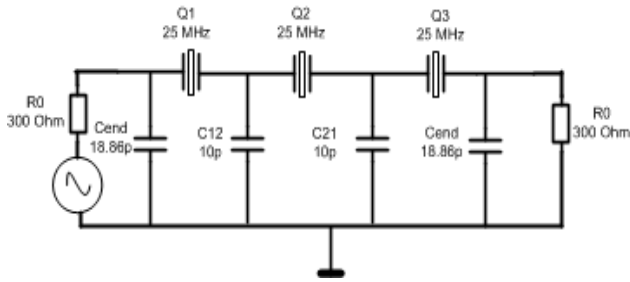
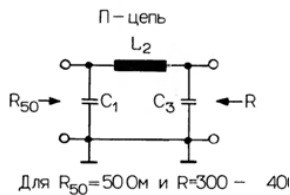


Рис. 4. Схема триполюсного кварцового фільтра з розрахованими номіналами

Для переходу від високого значення вхідного опору фільтра до значення 50 Ом були використані схеми та формули з рис. 5 та рис. 6 [5, стор. 49].



$$C_n = \frac{1}{\omega_{mg} \cdot X_{Cn}} ; L_n = \frac{L_{Ln}}{\omega_{mg}} ; B_{p/-3dB} = \frac{f_{mg}}{Q_B} ; Q_{\text{дл}} \geq 18 \cdot Q_B$$

Рис. 5. Широкопasmові вибіркові узгоджувальні кола

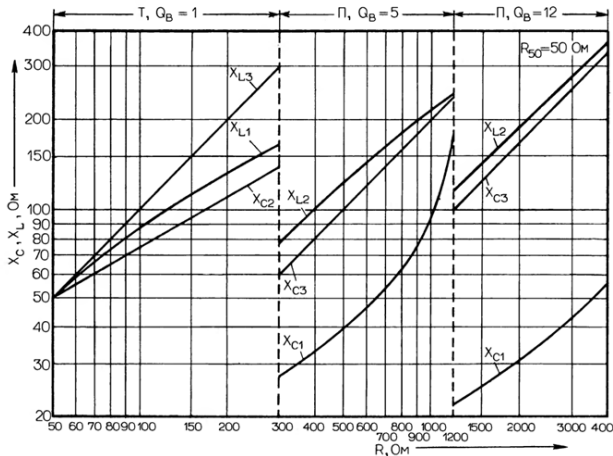


Рис. 6. Значення реактивних складових фільтрів

Значення  $R_0 = 300 \text{ Ом}$ , отже,  $X_{C1} = 28 \text{ Ом}$ ,  $X_{C3} = 60 \text{ Ом}$ ,  $X_{L2} = 80 \text{ Ом}$ . За формулами, наведеними на рис. 5, розрахуємо значення  $C_1 = 227,5 \text{ пФ}$ ,  $C_3 = 106 \text{ пФ}$ ,  $L_2 = 0,51 \text{ мГн}$ .

**Порівняння параметрів фільтра у вигляді схеми з навісними та smd-елементами**

Схему узгодженого триполюсного кварцового фільтра з необхідними номіналами показано на рис. 7.

На рис. 8 показано зовнішній вигляд розробленого фільтра. Плата має розмір  $3 \times 4 \text{ см}$ . Для дослідження використовувались такі елементи: кварцові резонатори Q-25.0 МГц-НС49/U3Н-30-100-16-I, конденсатори 0603 NPO 50 V, індуктивності 0805 LQM18NNR56K00.

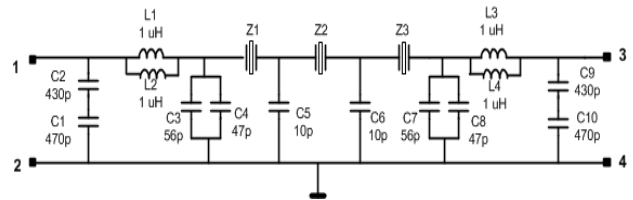


Рис. 7. Схема узгодженого триполюсного кварцового фільтра

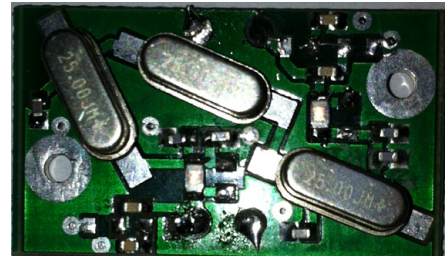


Рис. 8. Схема кварцового фільтра на smd-елементах

Вимірювання проводились за допомогою аналізатора спектра HMS-X із вбудованим генератором. Вимірні характеристики:

- центральна частота 25,003 МГц;
- смуга пропускання 15 кГц;
- загасання у смузі затримки 37 дБ;
- загасання у смузі пропускання 4,04 дБ.

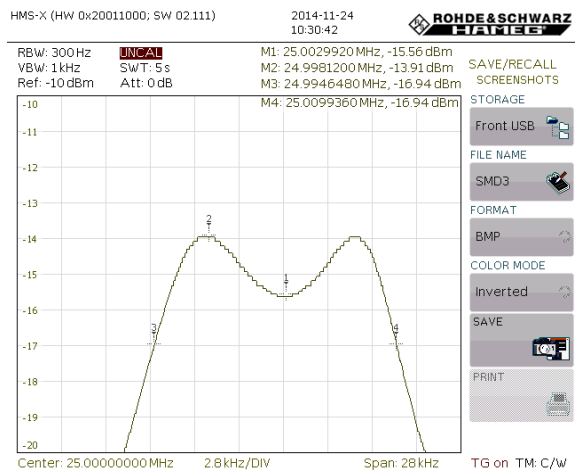


Рис. 9. Амплітудно-частотна характеристика фільтра з рис. 8

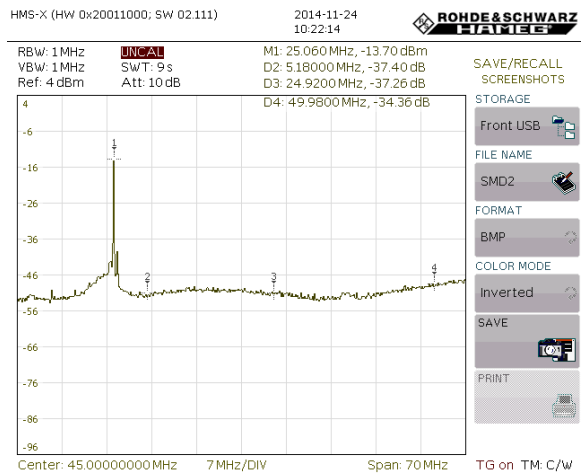


Рис. 10. Зображення заглушення другої гармоніки сигналу генератора

У фільтрі з навісними елементами використовувались ті самі резонатори, вимірювання проводилось за допомогою генератора Г4-107 та аналізатора спектра HMS-X:

- центральна частота 24,993 МГц;
- смуга пропускання 15 кГц;
- загасання у смузі затримки більше 40 дБ;
- загасання у смузі пропускання 1,33 дБ.



Рис. 11. Схема кварцового фільтра на навісних елементах

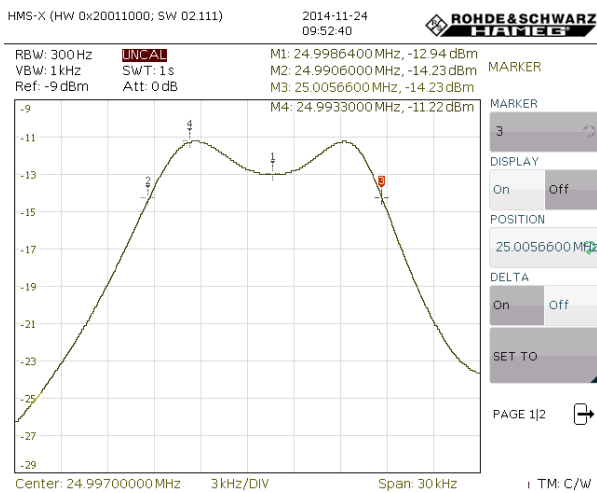


Рис. 12. Амплітудно-частотна характеристика фільтра з рис. 11

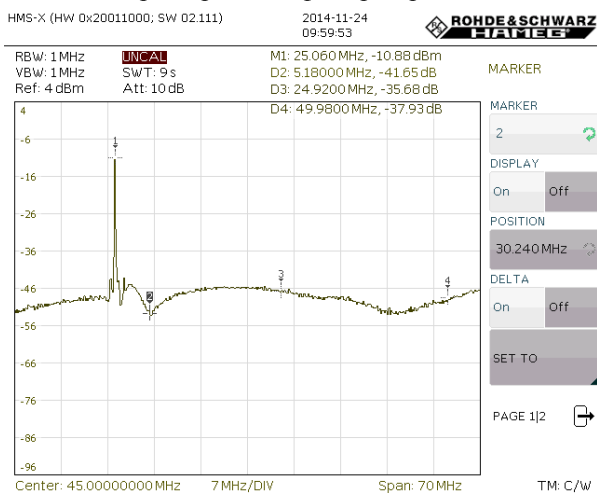


Рис. 13. Зображення заглушення другої гармоніки сигналу генератора

На рис. 14 зображено амплітудно-частотну характеристику модуля КГ із вбудованим кварцовим фільтром та показано заглушення другої гармоніки сигналу кварцового генератора.

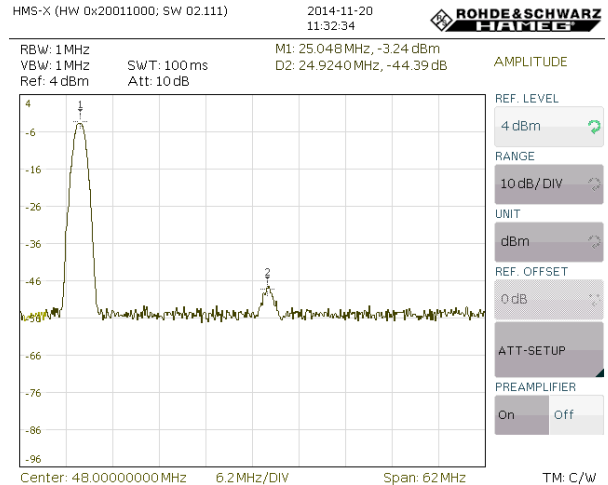


Рис. 14. Зображення заглушення другої гармоніки сигналу кварцового генератора

## Висновки

1. Перевагами запропонованого і подібних за розрахунками фільтрів є узгодженість і можливість використання за різним призначенням як під час прийому, так і передавання сигналів, вузька смуга пропускання, високий рівень загасання у смузі затримки, дешевизна та простота виготовлення.

2. Основна відмінність між характеристиками фільтрів, зібраних на smd-елементах та навісних елементах, у вимірних втратах (4,04 та 1,33 дБ відповідно), пояснюється властивостями мікро-смугових індуктивностей, які мають більший рівень активних втрат, ніж навісні індуктивності.

У ході дослідження і написання роботи були використані ресурси і матеріали компанії «ПАТ «Холдингова компанія «Укрспецтехніка»».

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бунин С. Г. Справочник радиолюбителя-коротковолновика / С. Г. Бунин, Л. П. Яйленко. — 2-е изд., перераб. и доп. — К. : Техніка, 1984. — 264 с., ил. — Библиограф. по главам.
2. Hardcastle J. A. (G3JIR), "Ladder crystal filter design", Radio communication, February 1979.
3. Hardcastle J.A.(G3JIR) "Some experiments with high frequency ladder crystal filter", "Radio communication", December 1976, January, February and September 1977.
4. Hayward W. (W7ZOI) "A unified approach to the design of crystal ladder filters", QST, May 1982. — P. 21–27.
5. Ред Э. Т. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: Схемы, блоки, 50-омная техника: пер. с нем. / Э. Т. Ред. — М. : Мир, 1990. — 256 с.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2014.