

Измерване и моделиране на кварцови резонатори

проф. Иван Илиев Стоянов, асп. Боянка Маринова Николова, инж. Георги Тодоров Николов - ТУ-София; ФЕТТ; кат. „Електронна техника“

Abstract - The present paper reflects the authors' experience in impedance measurements. An experimental procedure is proposed to measure and model quartz crystals with the aid of the impedance analyzer built in the HP4195A multifunctional device.

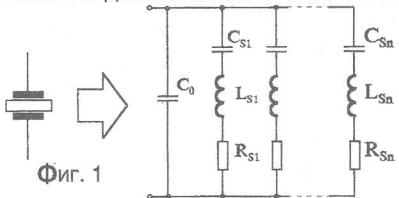
The data amassed from the conducted measurements and simulations provide a reliable starting point in quartz oscillators design.

В настоящия материал е отразен опита на авторите в областта на импедансните измервания. Предложена е и е експериментирана методика за измерване и моделиране на кварцови резонатори с помощта на анализатора на импеданси заложен в многофункционалния уред HP4195A.

I. Особености в характеристиките на кварцовите резонатори.

За създаване на методология за измерване и моделиране на кварцови резонатори е необходимо предварителното изясняване на някои особености в техните характеристики. А те са следните.

1. Кварцовият резонатор е електромеханична трептяща система, която с достатъчна точност се моделира с еквивалентната схема, пока-



Фиг. 1

зана на фиг. 1, където C_0 е статичен междуелектроден капацитет, L_s , C_s , r_s - параметри на серийните трептящи кръгове. Системата за всеки хармоник се отличава с: малко сериен съпротивление $r_s=5\Omega \div 100\Omega$; голяма индуктивност $L_s=xmH \div 10^6H$; малък сериен капа-

итет $C_s=10^{-14} \div 10^{-16}F$; малък паралелен капацитет $C_0=2 \cdot 10^{-12} \div 20 \cdot 10^{-12}F$.

2. Честотите на сериен резонанс f_s и на паралелен резонанс f_p се отличават незначително и се определят с формулите:

$$(1) \quad f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_s \cdot C_s}}$$

$$(2) \quad f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{C_s \cdot C_0}{L_s \cdot (C_s + C_0)}}} \approx f_{1s} \cdot \left(1 + \frac{C_s}{2 \cdot C_0}\right).$$

3. Параметрите на кварцовите резонатори определят изключително големи стойности на качествения фактор Q и резонансното съпротивление R_{oe} за паралелния трептящ кръг.

$$(3) \quad Q = \frac{\omega_s L}{r_s}$$

$$(4) \quad R_{oe} = Q \cdot \omega_s L = \frac{(\omega_s L)^2}{r_s}.$$

4. В осцилиращи схеми паралелно на кварцовия резонатор се появява допълнителен еквивалентен капацитет C_L наречен товарен.

Схемата осцилира за честота f_0 , която се явява резонансната честота на новообразувания паралелен трептящ кръг и се определя с формулата:

$$(5) \quad f_0 = f_{1S} \sqrt{1 + \frac{C_S}{C_O + C_L}} \approx f_{1S} \left(1 + \frac{1}{2(C_O + C_L)} \right)$$

5. Влиянието на товарния капацитет върху генерираната честота е важен фактор, използван за донастройка на осцилаторните схеми.

Чувствителността на изменение на f_0 спрямо C_L е

$$(6) \quad S_{C_L}^{f_0} = \frac{\Delta f_0}{\Delta C_L} = -\frac{1}{2} \frac{C_S}{(C_O + C_L)^2}$$

II. Кратка техническа характеристика на анализатора HP4195A.

Уредът HP4195A е многофункционален уред. За целта на изследванията насочени към измерване и моделиране на кварцови резонатори особено важно е да се знаят характеристики-те му като импеданс - анализатор. А те са следните

1. Измерване на импеданс: модул Z и фаза θ.

Параметър	Обхват	Разделителна способност
$ Z $	от $30m\Omega$ до $30k\Omega$	$10m\Omega$
θ	от -180° до $+180^\circ$	$0,01^\circ$

Грешките при измерване на модул Z зависят от измервателната честота - фиг. 2.

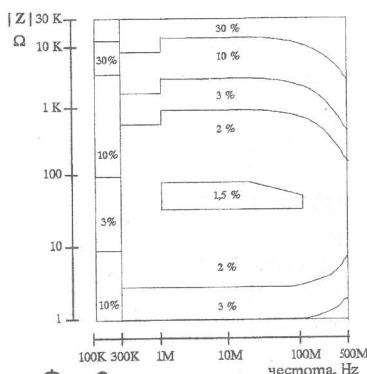
2. Честотна област на измерванията и честотни характеристики

- честотен обхват - от $100kHz$ до $500MHz$;
- точност на задаване на честота $\pm 20ppm$
- развивка на честотата - в линеен или в логаритмичен мащаб при минимална стъпка на дискретизация $\Delta f/401$, където Δf е зададения честотен интервал на развивката, 401 - максимален брой точки на измерванията.

3. Ниво на тестващия сигнал: от $707\mu V$ до $1,26V$ (от $-50dBm$ до $+15dBm$).

III. Методология за измерване и моделиране на кварцови резонатори.

Настоящата методология е разработена с оглед съставяне на програма за провеждане на експресни измервания и моделиране на кварцови резонатори. Базирана е на компютърно - измервателна система конфигурирана с компютър HP VectraVL 4/66 и анализатора HP4195A с помощта на инструменталния интерфейс IEEE488 и контролер HP82335B.



Фиг. 2

Процедурите по измерване и моделиране на кварцови резонатори са систематизирани в четири фази. Тяхното изложение по-долу е съпроводено с резултатите от експеримента проведен върху 10 мегахерцов кристал.

I^{va} фаза: Измерване и моделиране

В тази фаза планирането на експеримента и провеждането на съответните операции обезпечаващи крайния резултат протичат в следната последователност.

1. Предварителна ориентация върху основния параметър на изследвания кристал, а именно честотата на основния хармоник f_{S1} .

2. Изследване с анализатора на импедансните характеристики (модул) в честотна област: $f_{START} = (0,8 \div 0,9)f_{S1} = 9\text{MHz}$ и $f_{STOP} = (8 \div 9)f_{S1} = 90\text{MHz}$; брой на стъпките при честотната развивка - максимален (401); машаб на честотата (ос X) - логаритмичен; машаб на импеданса - логаритмичен; ниво на тестващия сигнал - 0dBm (223,6mV).

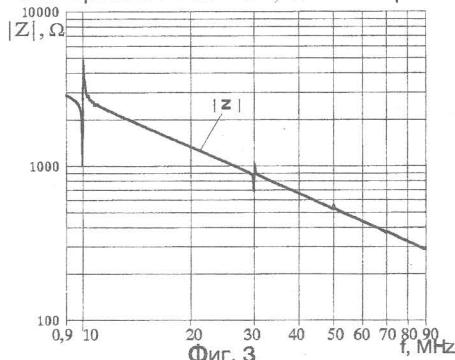
3. Документиране на резултата - изчертани характеристики с отчети на резонансните честоти. Резултатите от измерването са показани на фиг. 3.

4. Избор на хармоник, в чиято честотна област ще се изследва кварцовия резонатор.

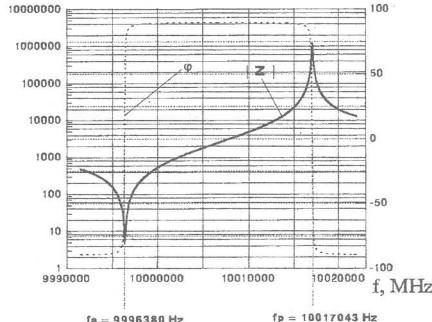
Приемаме означенията за съответните параметри по нанатък без индикация на хармоника.

5. Снемане на модула и фазата на импеданса Z около честотата на избрания хармоник при следните условия: $f_{START} = 0,99f_S = 9,9\text{MHz}$ и $f_{STOP} = 1,01f_S = 10,1\text{MHz}$; брой на точките при честотната развивка - максимален (401); машаб на честотата - линеен; машаб на модул Z - логаритмичен от 1Ω до $1.10^6\Omega$; машаб на фаза Z - линеен от -100° до 100° . Отчитане на резонансните честоти $f_S = 9,9965\text{MHz}$ и $f_P = 10,017\text{MHz}$.

6. Снемане на модула и фазата на импеданса Z в по-тясна честотна област за повишаване точността на измерване на характеристиките. Новите граници на честотната развивка се определят по следния начин: $f_{START} = f_S - 5\text{kHz} = 9,9915\text{MHz}$ и $f_{STOP} = f_P + 5\text{kHz} = 10,022\text{MHz}$. Резултатите от измерването са показани на фиг. 4.

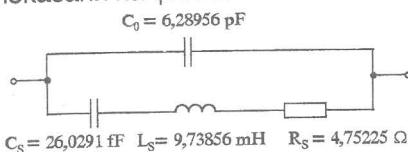


Фиг. 3



Фиг. 4

7. Избор на еквивалентна схема от офертата на анализатора и извличане на моделните параметри на кварцовия резонатор. Изчертаване на еквивалентната схема и нанасяне на получените стойности за параметрите L_s , C_s , R_s , C_0 . Резултатите от анализа са показани на фиг. 5.

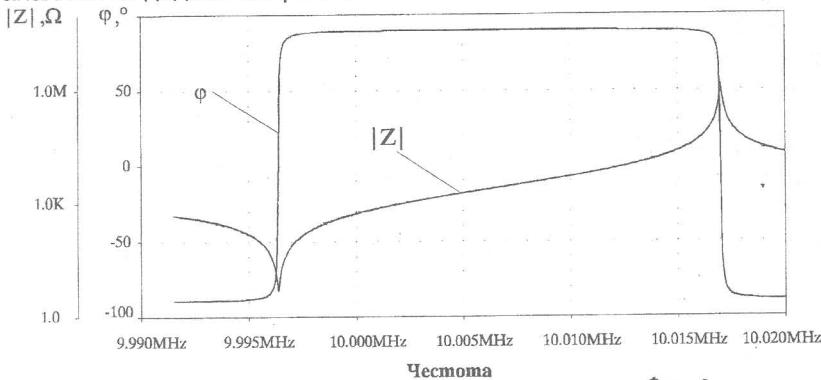


Фиг. 5

схема на модела се изчертава с графичния схемен редактор Schematics.

2. Стартране на симулатора PSPICE при условия еднакви на тези от измерването, а именно: ниво на тестващия сигнал 223,6mV; начална честота 9,9915MHz равна на f_{START} и крайна честота 10,022MHz равна на f_{STOP} от т. 6 от първата фаза на методологията; брой на точките при честотната развивка 401; машаб на честотата линеен; машаб на модул Z логаритмичен от 1Ω до $1.10^6\Omega$; машаб на фаза Z линеен от -100° до 100° .

3. Документиране на резултата - визуализация на характеристиките с PROBE с точни отчети на резонансните честоти. Резултатите от анализа са дадени на фиг. 6.



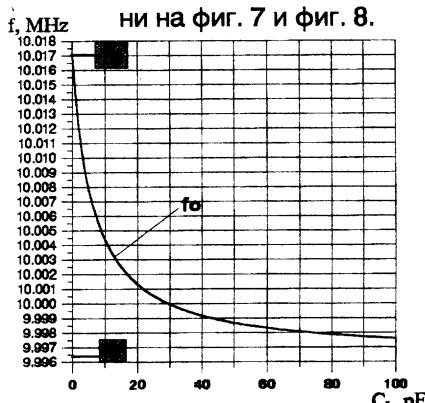
Фиг. 6

III^{ta} фаза: Определяне влиянието на товарния капацитет C_L върху генерираната от кварца честота.

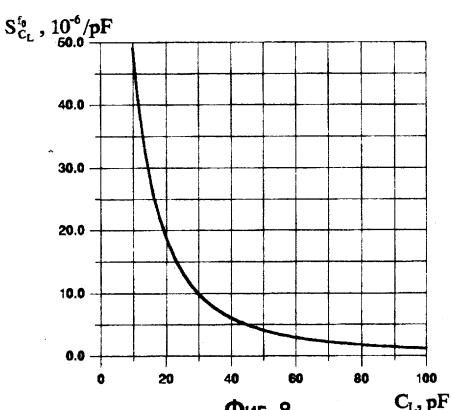
1. На базата на получените от предните две фази стойности на параметрите C_s , C_0 и f_{1s} , по формула (5) се определя зависимостта на генерираната честота f_0 при промяна на товарния капацитет C_L от 10 до 100pF.

2. По формула (6) се определя чувствителността на изменение на f_0 при промяна на C_L от 10pF до 100pF.

3. Документиране на резултатите - графично изчертаване на горните зависимости. Получените характеристики за f_0 и $S_{C_L}^{f_0}$ са показани на фиг. 7 и фиг. 8.



Фиг. 7



Фиг. 8

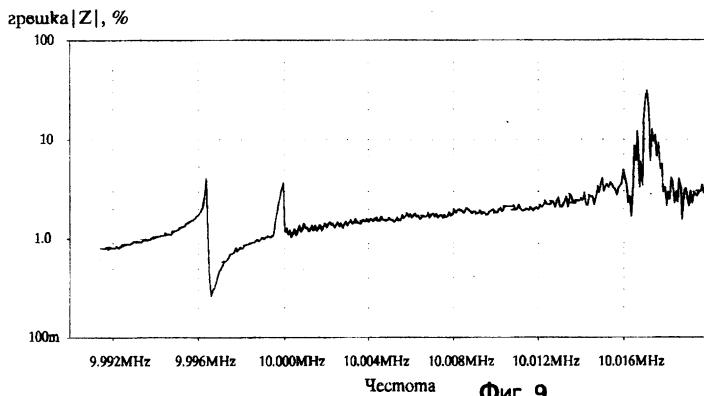
IV^{та} фаза: Анализ на грешките.

1. Определяне на разликите между симулираните посредством SPICE и измерените от анализатора резултати.

- Чрез интерфейса IEEE488 и допълнително създаден софтуер измерените от анализатора стойности се зареждат във файл с формат еднакъв на формата използван от програмния продукт PROBE.
- Получените от втора фаза т. 3 характеристики от симулацията се съпоставят с измерените характеристики посредством команда File/Append на PROBE.

Графично се представя грешката получена от разликата между двете характеристики - грешката на модула на импеданса $\frac{|Z_{sym}| - |Z_m|}{|Z_m|} \cdot 100, \%$

показана на фиг. 9.



Фиг. 9

2. Анализ на резултатите.

От представените резултати за грешката получена от разликите между измерените и симулираните стойности се вижда, че в целия честотен интервал на измерване грешката на $|Z|$ е по-малка от 1%, като изключение правят единствено стойностите измерени в резонансните честоти. Това се дължи на факта, че анализатора HP 4195A измерва импеданс със $Z > 30\text{k}\Omega$ с голяма грешка ($> 30\%$). Тъй като получената грешка не надхвърля грешката от измерване на уреда, следва че с достатъчно голяма точност може да се разчита на резултатите от симулация, като по този начин се избягва недостатъка на уреда при измерване на импеданси с висока стойност.

Заключение

Директното използване на фирмennата документация на Design Center за измерване и моделиране на кварцови резонатори е свързано с редица трудности, които усложняват работата на потребителя и удължават срока на извършваните експерименти. Предложената в настоящия доклад методика дава рецептурни процедури, които позволяват експедитивно провеждане на симулациите и бързо достигане до желаните резултати. Изложените експериментални данни потвърждават правилността на методиката както и точността на симулирането, корегиращо грешките в измерванията.

Натрупаната база данни от проведените измервания и симулации са добра основа за проектиране на генератори с кварцови резонатори.

Литература

1. Hewlett Pakard, *Model 4195A Network/Spectrum Analyzer. Operation Manual*, July 1989
2. Hewlett Pakard, *Model 41951A Impedance Test Kit for 4195A. Operation Note*, February 1990
3. Philips, *Data Handbook. Quartz Oscillators*, September 1992
4. Philips, *Data Handbook. Quartz Crystals for Special and Industrial Applications*, March 1994
5. Honda M, *The Impedance Measurement Handbook. A Guide to Measurement Technology and Techniques*, Yokogawa - Hewlett - Pacard LTD, 1989.
6. MicroSim Schematic, *Schematic Capture User's Guide*, Version 6.2, April 1995
7. MicroSim PSpice A/D, *Circuit Analysis User's Guide with Schematic*, Version 6.2, April 1995