

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ НА ДОБРОТНОСТЬ РЕЗОНАТОРА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА

Bondarenko T. G., Zeniv I. O. Research of effect of gas pressure on Q of the resonator of solid-state wave gyroscope.

In proposed article an experimental measurement of Q of quartz and sapphire resonators of a solid-state wave gyroscope is conducted. The basis of merit measurement procedures laid excitation of vibrations mechanical shock method, and then measuring the time during which the fluctuations are observed. We were obtained formulas to estimate the amplitude of the signal and the corresponding amplitude of the mechanical oscillations of the resonator. It described circuit electronics and verified its sensitivity. Q of quartz resonator measured in a vacuum chamber at different levels of air pressure, from atmospheric pressure to $1 \cdot 10^{-5}$ mm Hg. It analyzes the signal amplitude at which it is possible to observe and measure the signal with background thermal noise. Measured the time of ringing the "bell" has been done. Based on this calculation of the Q of the resonator was made. Comparison of experimental data with calculations based on theoretical formulas is conducted.

Keywords: solid state wave gyroscope, quartz resonator, Paschen curve, an electrical breakdown, measuring the quality factor, sensitivity of equipment

Бондаренко Т. Г., Зенив І. О. Дослідження впливу тиску газів на добротність резонатора твердотільного хвильового гіроскопа. Проведено експериментальну перевірку можливості вимірювання добротності кварцового резонатора хвильового гіроскопа. Вимірювання проведено в вакуумній камері при різних рівнях тиску повітря від атмосферного до $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Проаналізовано амплітуду сигналу, при якій можливо його спостереження та вимірювання на фоні теплових шумів. Вимірювався час "дзвону", на підставі чого зроблено розрахунок добротності кварцового резонатора твердотільного хвильового гіроскопа. Проведено порівняння експериментальних даних з розрахунковими.

Ключові слова: твердотільний хвильовий гіроскоп, кварцовий резонатор, крива Пашена, електричний пробій, вимірювання добротності, чутливість апаратури

Бондаренко Т. Г., Зенив І. О. Исследование влияния давления газов на добротность резонатора твердотельного волнового гироскопа. Проведена экспериментальная проверка возможности измерения добротности кварцевого резонатора волнового гироскопа. Измерения проводились в вакуумной камере при давлении газов от атмосферного до $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Анализировалась амплитуда сигнала, при которой возможны наблюдения и измерения на фоне теплового шума. Измерялось время "звона", по которому затем рассчитывалась добротность кварцевого резонаторов волнового гироскопа. Чувствительность ограничена тепловым шумом проводных каскадов. Проведено сравнение экспериментальных данных с расчетами по теоретическим формулам. Сделан вывод о достаточно высокой чувствительности разработанной аппаратуры.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, кварцевый резонатор, кривая Пашена, электрический пробой, измерение добротности, чувствительность аппаратуры

1. Введение и постановка задачи. Погрешность измерения угловых координат объектов твердотельными волновыми гироскопами в большой степени зависит от добротности используемых кварцевых или сапфировых резонаторов [1, 2]. Для особо важных измерений предъявляются требования к точности обеспечить дрейф менее 10^{-5} рад/час, что обуславливает необходимость применения резонаторов с добротностью $(1 \dots 10) \cdot 10^6$ и больше. Поэтому очень важно иметь возможность предварительно измерить добротность резонатора до установки его в прибор. Известно, что напыление токопроводящих пленок на поверхности резонатора существенно снижает его добротность. Также добротность зависит от условий проведения измерений, в частности, от глубины вакуума. В [3, 4] описана аппаратура для измерения добротности кварцевых резонаторов твердотельных гироскопов.

Возбудить механические колебания ненапыленного резонатора можно только механическим способом. Поэтому в основу методики измерений добротности положено возбуждение колебаний механическим ударным способом, а затем измерение времени, в течение которого наблюдаются колебания. Получены расчетные формулы для оценки амплитуды сигнала и соответствующей амплитуды механических колебаний резонатора.

Описана схема электронной аппаратуры и проверена её чувствительность. Приведены результаты экспериментальных исследований в вакуумной камере ненапыленного кварцевого резонатора.

2. Способ возбуждения колебаний. Принципиальная схема электронной части аппаратуры была описана в работе [3]. В установке возбуждались колебания кварцевого резонатора с помощью удара пластмассовым шариком диаметром 4 мм. Шарик находится на металлическом стержне и притягивается в момент удара электрическим магнитом (Рис. 1, 2). Ударный механизм с электромагнитным реле располагался в вакуумной камере, остальные части аппаратуры – вне её.

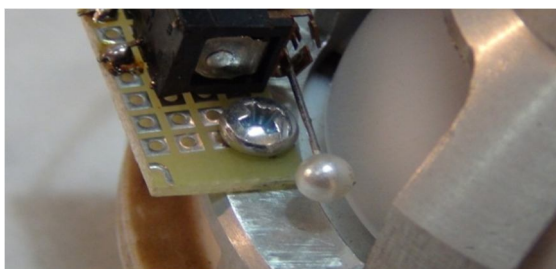


Рис.1. Механизм ударного возбуждения колебаний резонатора

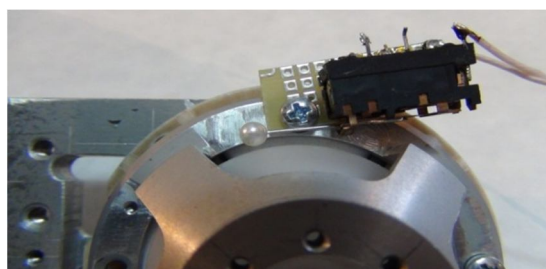


Рис.2. Расположение ударника с электромагнитным реле

Принципиальная схема управления ударным механизмом показана на Рис. 3.

На электромагнит подаётся импульс напряжения при нажатии кнопки включения удара. Начинается разряд конденсатора $C2$, через обмотку электромагнита EM протекает большой ток, электромагнит срабатывает. Чтобы исключить повторное срабатывание электромагнита и повторные удары по резонатору, установлен резистор $R1$, который предназначен для ограничения тока, протекающего через электромагнит EM , до величины, меньшей тока срабатывания. В первый момент времени после нажатия кнопки ток большой, но по мере разряда конденсатора $C2$ ток уменьшается. Поэтому после разряда конденсатора $C2$ электромагнит отпускает якорь и повторных ударов шариком по резонатору нет.

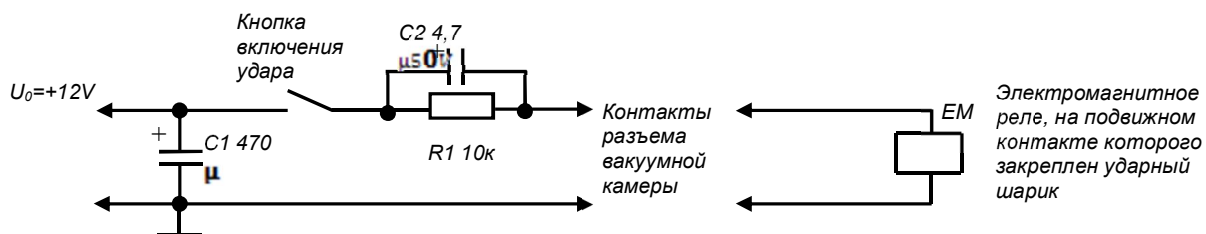


Рис.3. Схема управления ударным механизмом

Перед помещением в вакуумную камеру была сделана проверка работоспособности предложенного решения. На Рис.4 показан электрический сигнал датчика, измеряющего напряжение между обкладками емкостного датчика [3, 4], после удара шарика по резонатору.

Таким образом, можно сделать вывод, что приведенная схема позволяет сделать только один удар шарика по кварцевому резонатору и исключает повторные удары. Сила удара достаточна для наблюдения электрического сигнала датчика.

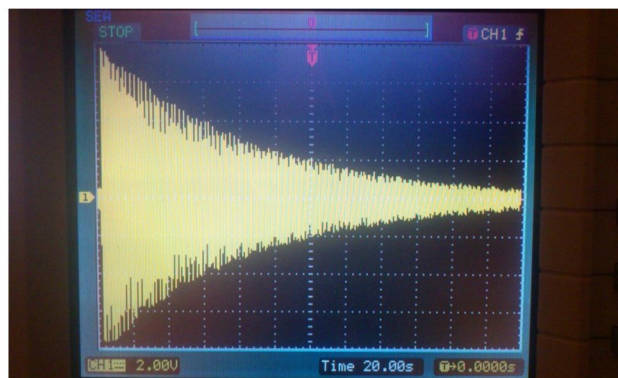


Рис. 4. Осциллограмма сигнала, снимаемого с датчика, после удара по резонатору

3. Оценка шумовых характеристик аппаратуры. Применялось напряжение поляризации 360В. Резонатор был подготовлен к измерениям, промыт спиртом, средством для мытья посуды, дистиллированной водой, проведена сушка промышленным феном при температуре 400°C, после этого резонатор хранился при влажности 90% около трех суток.

Результаты измерений при атмосферном давлении показаны на Рис. 5.

Результаты измерений при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. показаны на Рис. 6.

Цена деления по шкале абсцисс соответствует 200 мс (Рис. 5) или 20 с (Рис. 6). Одно деление по шкале ординат соответствует 2 В.



Рис. 5. Измерения в атмосфере

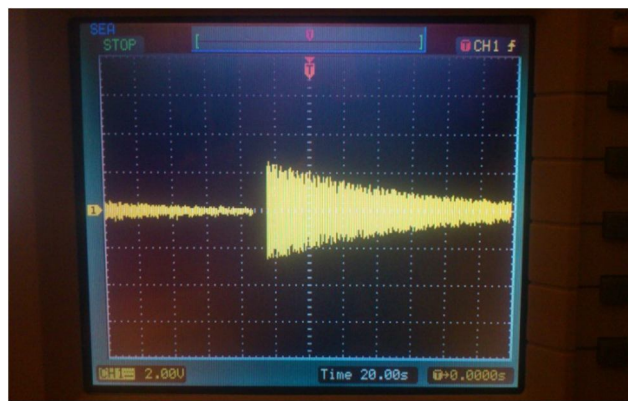


Рис. 6. Измерения в вакууме $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст

Можно сделать вывод, что в обоих случаях при отсутствии колебаний резонатора двойной размах напряжения шума, обусловленного совместным действием шума аппаратуры и шумовыми колебаниями резонатора, составляет менее 0,2 В.

Отсюда среднеквадратическое напряжение шума на выходе усилительной части аппаратуры

$$\sigma_{\text{out}} = \frac{U_{\text{out}}}{6} = \frac{200}{6} \text{ мВ} = 33 \text{ мВ}.$$

Коэффициент усиления предшествующих каскадов схемы составлял 25000. Следовательно, среднеквадратическое значение шума на входе составлял $\sigma_{\text{in}} = 1,32 \text{ мкВ}$.

Оценим величину шумовых механических колебаний. Предположим наихудший вариант, а именно, что весь вклад в шум сигнала обусловлен только механическим шумом резонатора.

Ранее было показано [3, 4], что для использованной схемы датчика амплитуда сигнала на входе усилителя, вызванная модуляцией ёмкости конденсаторов механическими колебаниями расстояний между обкладками, определяется выражением

$$U_{1m} = \frac{m\omega C_0 U_0}{\sqrt{\frac{1}{R_{in}^2} + \omega^2 (C_0 + C_{\text{вх}})^2}}, \quad (1)$$

где R_{in} – сопротивление входной цепи усилителя;

$C_{in} \approx 2...3n\Phi$ – паразитная ёмкость входных цепей схемы;

m – коэффициент модуляции (относительное изменение ёмкости конденсатора при механических колебаниях);

$\omega = 2\pi f$ – частота собственных колебаний резонатора ($f \approx 5$ кГц);

C_0 – ёмкость между электродами датчика.;

$U_0 = 360$ В – постоянное напряжение поляризации.

Для случая ненапыленного резонатора ёмкость C_0 между электродами датчика в случае расположения электродов в одной плоскости может быть рассчитана по следующей формуле:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l}{\pi} \ln \left| \frac{\pi r_2 + 2b \varepsilon_r}{\pi r_1 + 2b \varepsilon_r} \right|, \quad (2)$$

где r_1 – расстояние от средней точки между сегментами до ближайшего края сегмента;
 r_2 – расстояние от средней точки между сегментами до дальнего края сегмента,
 r_2 практически равно половине ширины сегмента;

l – длина сегментов;

b – воздушный зазор между диэлектриком резонатора и металлическим электродом.

Тогда коэффициент модуляции ёмкости

$$m = \left| \frac{\Delta C}{C(b_0)} \right| \approx \left| \frac{\Delta b \cdot C'(b_0)}{C(b_0)} \right| = \Delta b \cdot \frac{2\pi \varepsilon_r (r_2 - r_1)}{(\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r) \ln \left| \frac{\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r}{\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r} \right|}, \quad (3)$$

где b_0 – среднее расстояние между электродом и резонатором, $b_0 \approx 0,1$ мм;

Δb – амплитуда колебаний резонатора.

Из формул (1...3) получаем выражение для амплитуды механических шумовых колебаний резонатора, соответствующее шуму на входе усилителя σ_{nin}

$$\Delta b = \frac{3\sigma_{nin} \sqrt{\frac{1}{R_{in}^2} + \omega^2 (C_0 + C_{ex})^2} \cdot (\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r) \ln \left| \frac{\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r}{\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r} \right|}{2\pi \varepsilon_r (r_2 - r_1) \omega C_0 U_0} =$$

$$= \frac{3\sigma_{nin} \sqrt{\frac{1}{R_{in}^2} + \omega^2 (C_0 + C_{in})^2} \cdot (\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r)}{4\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r^2 l (r_2 - r_1) U_0}. \quad (4)$$

Резонатор и датчик имели следующие размеры:

$d = 40$ мм – диаметр резонатора,

$r_1 = 0,5$ мм – половина зазора между сегментами,

$r_2 = 6,28$ мм – средняя ширина сегмента,

$l = 15,71$ мм – длина сегмента,

$b_0 = 0,1$ мм – зазор между резонатором и металлическими плёнками,

$\varepsilon_r = 4,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость кварца,

$C_{in} = 3$ пФ – паразитная ёмкость входных цепей.

Результаты расчета по формуле (4) дают величину механического смещения:
 $\Delta b = 0,305$ нм $\approx 3,1 \cdot 10^{-10}$ м.

Можно сделать вывод, что механический шум резонатора не превышает $3,1 \cdot 10^{-10}$ м. В действительности реальный шум резонатора существенно меньше, так как в расчете пренебрегалось шумами аппаратуры. Эти шумы могут быть без труда уменьшены в несколько раз (3...10) за счет применения более узкополосного фильтра в схеме обработки.

Как видно из осциллограммы рис.5, среднеквадратическая величина шумового напряжения на выходе составляет $\sigma_{nin} = 33$ мВ, а амплитуда напряжения сигнала на выходе $U_{1out} = 8$ В.

Ранее в [3] было показано, что среднеквадратическая ошибка измерения угла поворота резонатора описывается выражением

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_n}{\sqrt{U_{m10}^2 + U_{m20}^2}} \quad (5)$$

где U_{m1} , U_{m2} – измеренные амплитуды огибающих в двух каналах.

Тогда верхняя граница оценки углового шума для ненапыленного резонатора составляет в одиночном измерении

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{U_{m10}^2 + U_{m20}^2}} = \frac{33_{мВ}}{8В} = 0.0041 \text{ рад} = 0.24^{\circ}.$$

Реальное значение углового шума может быть значительно меньше.

4. Результаты измерения добротности в вакууме. Для расчета добротности использовалась известная формула

$$Q = \frac{2\pi f(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)}, \quad (6)$$

где U_1 – амплитуда напряжения в момент времени t_1 ,
 U_2 – амплитуда напряжения в момент времени t_2 ,
 $f = 5$ кГц – частота колебаний резонатора.

Давление $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Проводилось несколько измерений. На Рис. 7, 8 изображена осциллограмма сигнала, снимаемого с датчика, после удара по резонатору с разными значениями параметров U и t .

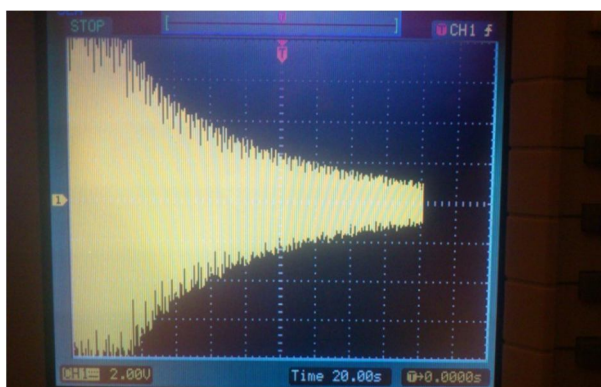


Рис. 7. Осциллограмма сигнала при: $t_1 = 40$ с, $t_2 = 140$, $U_1 = 6,5$ В, $U_2 = 2,0$ В
 В результате расчетов $Q = 2,67 \cdot 10^6$.

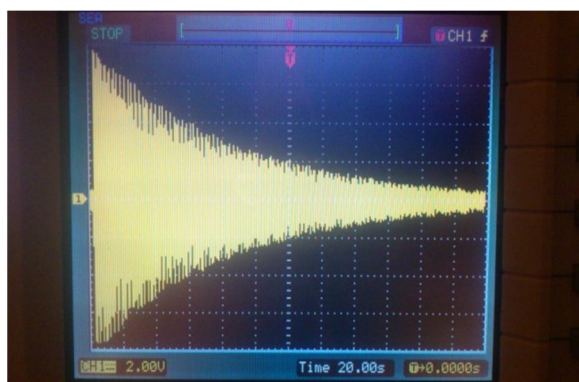


Рис. 8. Осциллограмма сигнала при: $t_1 = 0$ с, $t_2 = 120$, $U_1 = 8,0$ В, $U_2 = 2,0$ В
 В результате расчетов $Q = 2,72 \cdot 10^6$.

Среднее значение добротности при этом давлении $Q = 2,69 \cdot 10^6$.

Давление $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. На Рис. 9 изображена осциллограмма сигнала, снимаемого с датчика, после удара по резонатору для нескольких экспериментов.

В Табл. 1 указаны результаты нескольких измерений, где U_1 – амплитуда напряжения в момент времени t_1 , U_2 – амплитуда напряжения в момент времени t_2 и соответственное рассчитанное значение добротности.

Результаты измерений при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Табл. 1

№	t_1	t_2	U_1	U_2	Q
1	76	260	6,0	1,0	$3,23 \cdot 10^6$
2	60	200	8,0	2,0	$3,17 \cdot 10^6$
3	100	300	4,8	0,7	$3,26 \cdot 10^6$

Среднее значение добротности $Q = 3,22 \cdot 10^6$ при $P = 1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.

Воздух под колпаком, атмосферное давление. На Рис. 10 осциллограмма сигнала для данного измерения, $Q=5,58 \cdot 10^3$.

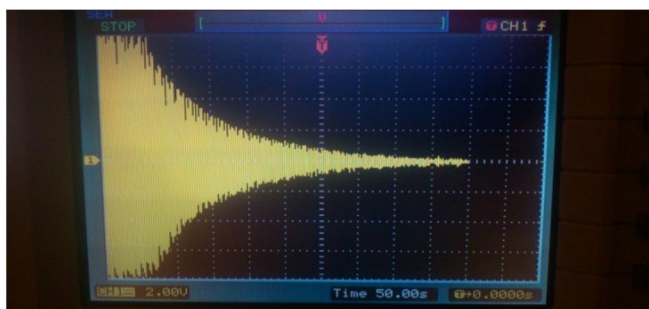


Рис. 9. Осциллограмма сигнала при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.

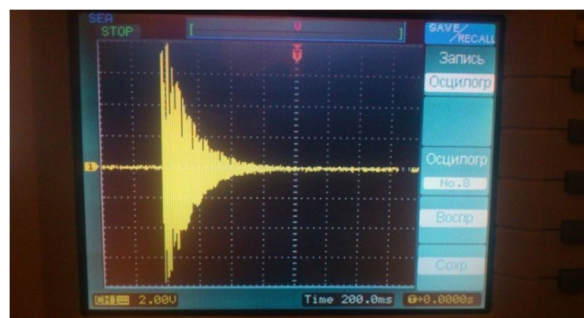


Рис.10. Осциллограмма сигнала при: $t_1 = 0$ с, $t_2 = 400$ с, $U_1 = 3,8$ В, $U_2 = 0,4$ В.

5. Выводы. Результаты измерений подтвердили, что предложенной схемой возможно измерение добротности кварцевого резонатора порядка нескольких миллионов.

Подтверждены известные сведения, что добротность резонатора при атмосферном давлении в тысячи раз меньше, чем при высоком вакууме. Снижение давления с $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. до $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. привело к увеличению добротности резонатора в 1,2 раза.

При проведении экспериментов следует предпринимать меры по защите входных цепей чувствительной аппаратуры от воздействия газового разряда, который наблюдался, в соответствии с кривой Пашена, при давлении около 1 мм рт. ст.

Далее должны быть проведены расчеты и эксперименты на сапфировых резонаторах, отличающихся от кварца диэлектрической проницаемостью и, следовательно, величиной сигнала датчика.

Литература

1. Lynch D. D. Transfer of Sensor Technology from Oil-Drilling to Space Applications / D. D. Lynch, A. Matthews, G. T. Varty // 5th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems 1998.

2. Sarapuloff S. A. 15 Years of Solid-State Gyrodynamics Development in the USSR and Ukraine: Results and Perspectives of Applied Theory / S. A. Sarapuloff // Proc. of the National Technical Meeting of US Institute of Navigation (ION) Santa Monica, Calif., USA. January 14-16, 1997. – P.151-164.

3. Зенив И. О. Расчет чувствительности схемы для измерения амплитуды колебаний кварцевого резонатора твердотельного волнового гироскопа // Зв'язок. – 2013. – №5. – С.17-22.

4. Бондаренко Т. Г. Измерение чувствительности прибора для оценки добротности кварцевого резонатора твердотельного волнового гироскопа / Т. Г. Бондаренко, И. О. Зенив // Телекомунікаційні та інформаційні технології.– 2015. – №3. – С. 37-44.

Авторы статьи

Бондаренко Тарас Григорьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникационных технологий, Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев). Тел. +380 (50) 351 58 67. E-mail: phoenix94@list.ru

Зенив Ирина Онупфиевна, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных технологий, Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев. Тел. +380 (50) 200 55 05. E-mail: zenechka@ukr.net

Дата надходження в редакцію: 11.10.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. О. Манько