

ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИБОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОБРОТНОСТИ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА

Bondarenko T. G., Zeniv I. O. Measurement of sensitivity of the device for an estimation of Q of the quartz resonator of a solid-state wave gyroscope.

In proposed article an experimental verification of the sensitivity of the apparatus for measuring the quality factor of quartz and sapphire resonators wave gyroscopes is conducted. Sensitivity is restricted by Johnson–Nyquist noise of input stages. The circuit diagram of the device was considered. Measurement of the signal amplitude at which it is possible to observation and measurement of the background noise is conducted. Photos of the digital oscillator and the corresponding oscillograms at different points of the circuit design are resulted. Comparison of experimental data with calculations based on theoretical formulas is conducted. The leading-out is drawn about sufficiently high sensitivity of the offered device and about fundamental necessity of the narrowband bandpass filter. Results of measurements have shown that the observed circuit design is essentially possibly to detection and measurement of amplitude of mechanical oscillations of the quartz resonator of order $\Delta b \geq 2,93 \cdot 10^{-9} \text{ м}$.

Keywords: solid state wave gyroscope, quartz resonator, Johnson–Nyquist noise, measuring the quality factor, sensitivity of equipment

Бондаренко Т. Г., Зенив И. О. Вимірювання чутливості приладу для оцінки добротності кварцового резонатора твердотільного хвильового гіроскопа.

Проведено експериментальну перевірку чутливості апаратури для вимірювання добротності кварцових та сапфірових резонаторів хвильових гіроскопів. Чутливість обмежена "Джонсоновським" шумом вхідних каскадів. Проведено вимірювання амплітуди сигналу, при якій можливо його спостереження та вимірювання на фоні шумів. Проведено порівняння експериментальних даних з розрахунками за теоретичними формулами. Зроблено висновок про достатньо високу чутливість.

Ключові слова: твердотільний хвильовий гіроскоп, кварцовий резонатор, Джонсоновський шум, вимірювання добротності, чутливість апаратури

Бондаренко Т. Г., Зенив И. А. Измерение чувствительности прибора для оценки добротности кварцевого резонатора твердотельного волнового гироскопа.

Проведена экспериментальная проверка чувствительности аппаратуры для измерения добротности кварцевых и сапфировых резонаторов волновых гироскопов. Чувствительность ограничена "Джонсоновским" шумом входных каскадов. Проведено измерение амплитуды сигнала, при которой возможно его наблюдение и измерение на фоне шумов. Проведено сравнение экспериментальных данных с расчетами по теоретическим формулам. Сделан вывод о достаточно высокой чувствительности.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, кварцевый резонатор, Джонсоновский шум, измерение добротности, чувствительность аппаратуры

1. Введение и постановка задачи

На погрешность измерения угла поворота объекта и его угловой скорости с помощью твердотельного волнового гироскопа существенно влияет величина добротности кварцевого (или сапфирового) резонатора [1...6]. Измерение добротности резонатора еще до напыления электродов имеет большое значение. Как правило, добротность измеряется с помощью метода "звона", что предполагает первоначальное механическое (ударное) возбуждение резонатора, а затем наблюдение амплитуды сигналов с соответствующего датчика. В статье [7] для измерения амплитуды колебаний предлагалось использовать ёмкостной датчик, имеющий две параллельные обкладки, лежащие в одной плоскости. Были получены расчетные формулы для оценки амплитуды сигнала и соответствующей амплитуды механических колебаний резонатора.

Стояла задача проверить теоретические формулы экспериментально.

2. Расчетные формулы и принципиальная схема

Конструкция ёмкостного датчика показана на Рис.1. При колебаниях резонатора изменяется расстояние от диэлектрика до пластин и, соответственно, ёмкость.

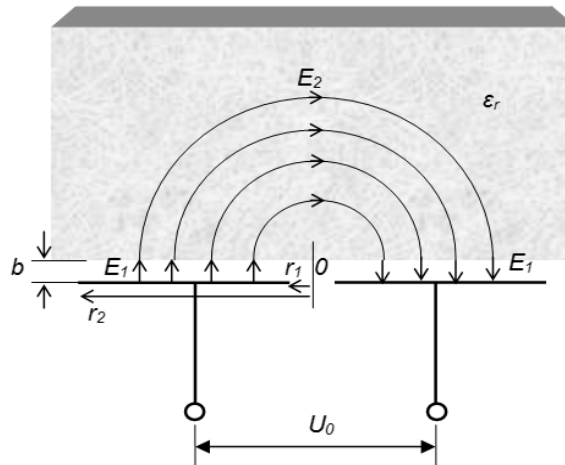


Рис. 1. Конструкция ёмкостного датчика

Структурная схема, обрабатывающая сигналы ёмкостного датчика твердотельного гироскопа, показана на Рис. 2 и 3. Части принципиальной схемы – на Рис. 4, 5 и 6.

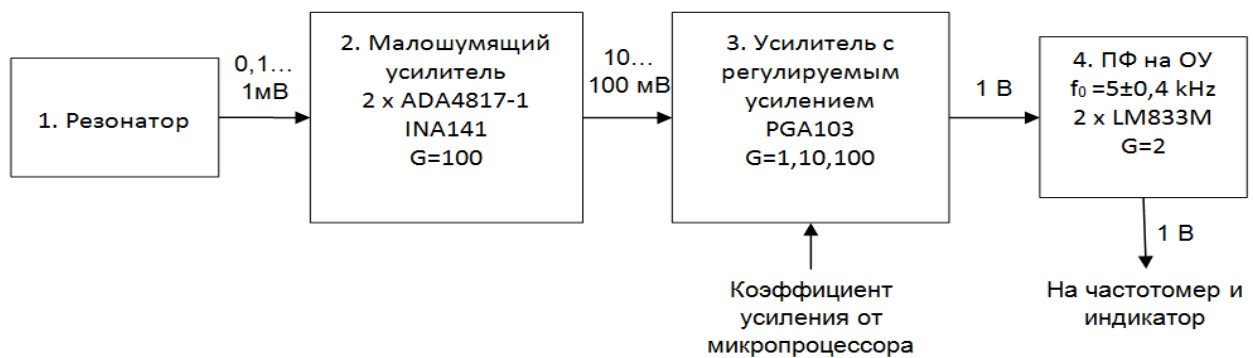


Рис. 2. Структурная схема исследуемого устройства обработки сигнала

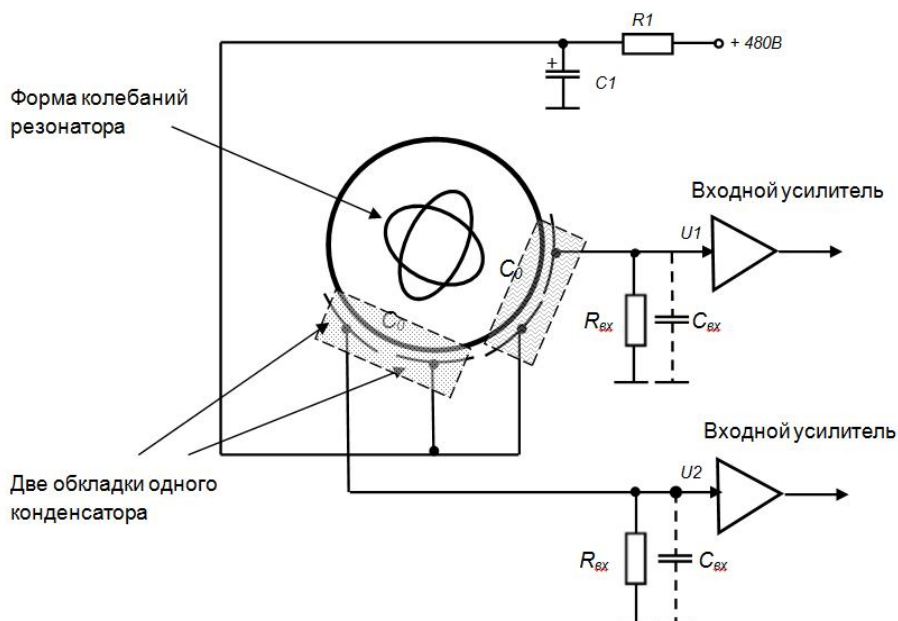


Рис. 3. Структурная схема входных цепей

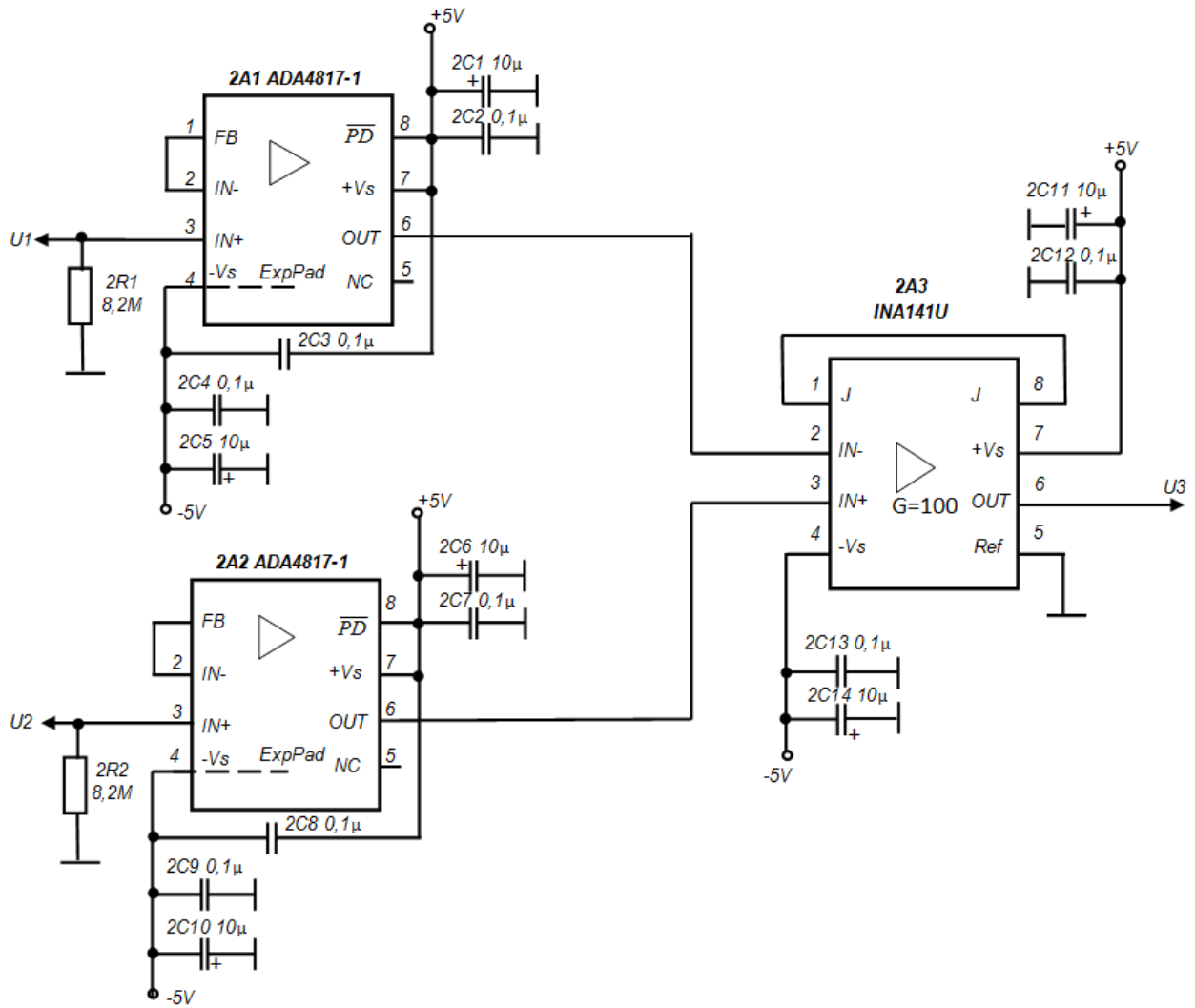


Рис. 4. Принципіальна схема вхідного малошумящего усилителя

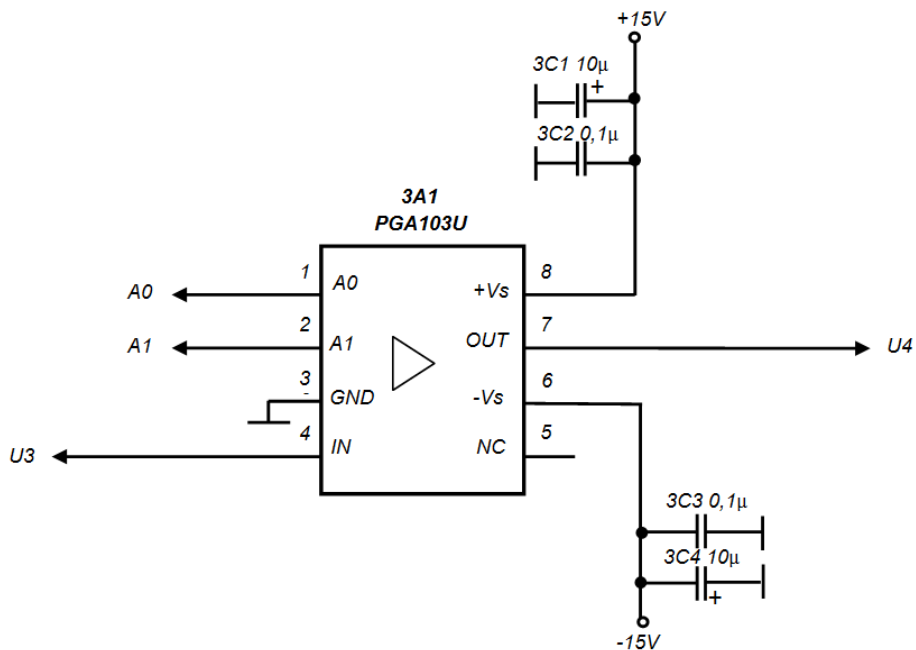


Рис. 5. Принципіальна схема усилителя с регулируемым коэффициентом усиления

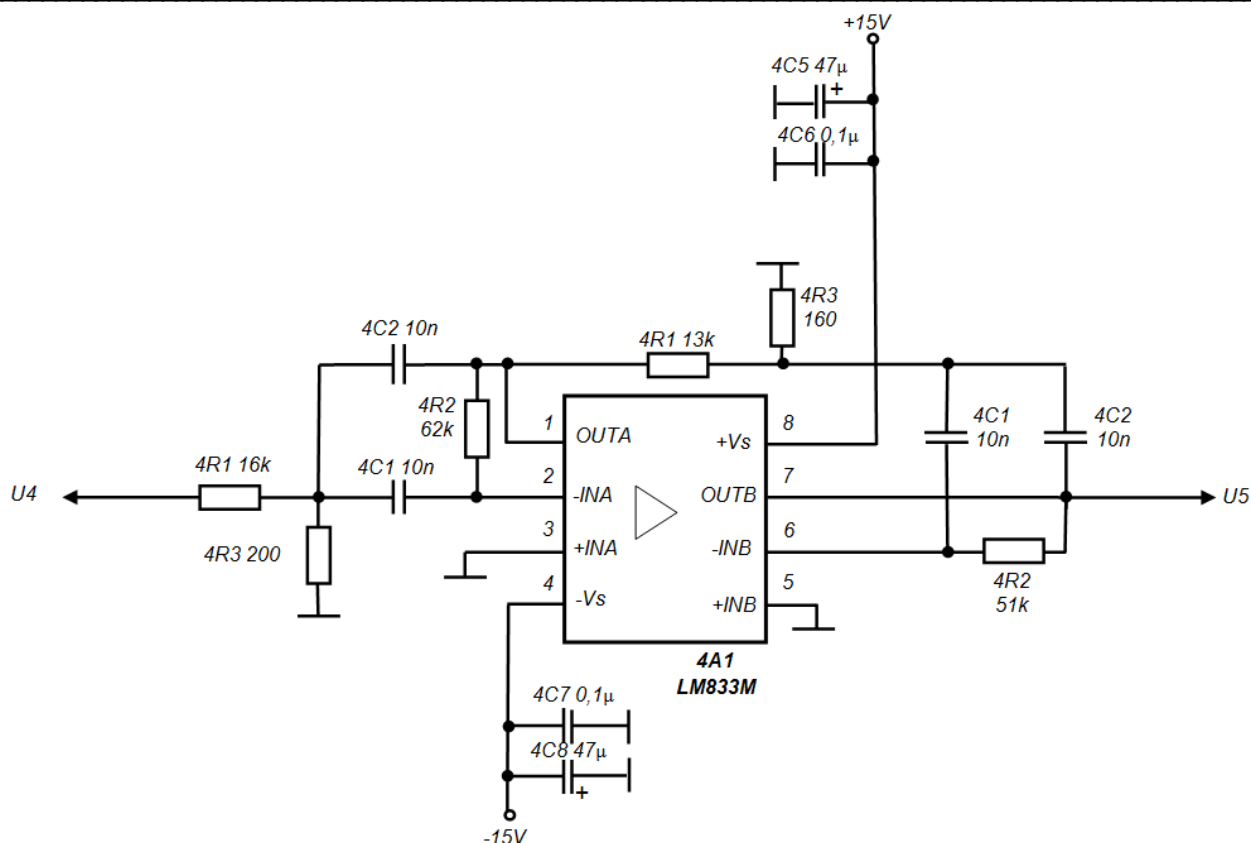


Рис. 6. Принципіальна схема Чебишевського полосового фільтра: (Частота пропускання $f_0 = 5 \pm 0,4$ кГц на рівні -1 дБ. Затухання -20 дБ при расстройке ± 2 кГц. Усилення $G=2$. Расчет елементів проведений з допомогою програми FilterProDTSetup® от Texas Instruments [7])

В статье [8] было получено, что в описанном устройстве для наблюдения сигнала датчика амплитуды противофазных сигналов на входах малошумящих усилителей должны быть не менее $17,2$ мкВ.

Такому значенню амплитуди сигналу датчика відповідає наступне зміщення резонатора від середнього положення:

$$\Delta b \geq \frac{3 \sqrt{8kTR_{\text{ex}} \Delta f + N_{\text{шум}}^2 \Delta f} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{\text{ex}}^2} + \omega^2 (C_0 + C_{\text{ex}})^2} \cdot (\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r) (\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r)}{4 \varepsilon_0 \varepsilon_r^2 l (r_2 - r_1) \omega U_0} = 8.87 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (1)$$

где все обозначения показаны на Рис. 1.

3. Результати вимірювань чутливості

Синусоїдальний сигнал з частотою 5 кГц на вхід малошумящих усилителей подавався з генератора через делитель $1 \text{ МОм} : 10 \text{ Ом}$, т.е. ослаблявся в 100000 раз. Сигнал був подан тільки на один вхід, другий вхід був залишений вільним. Далі враховувалося, що резистор $R_{\text{ex}} = 2R1 = 8,2 \text{ МОм}$ во входній ланці був шунтований резистором 100 Ом .

Для таких умов може бути розраховано середньквдратическе значення шуму по формуле:

$$\sigma_{\text{шум}} = \sqrt{8kTR_{\text{ex}} \Delta f + N_{\text{шум}}^2 \Delta f} = 90 \text{ нВ}, \quad (2)$$

и требуемая амплитуда сигнала для выделения его на фоне шума равна


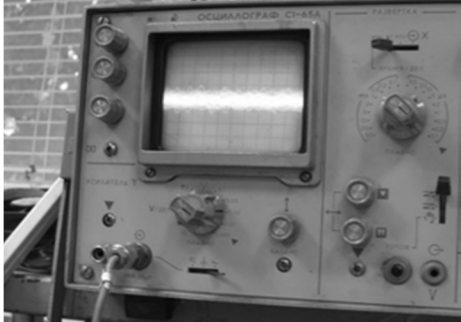

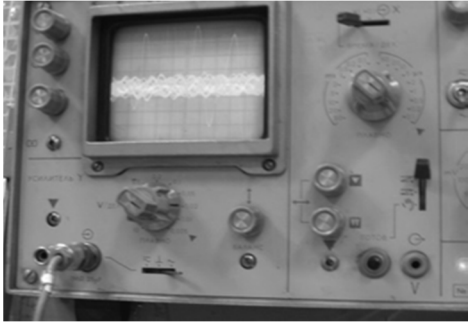

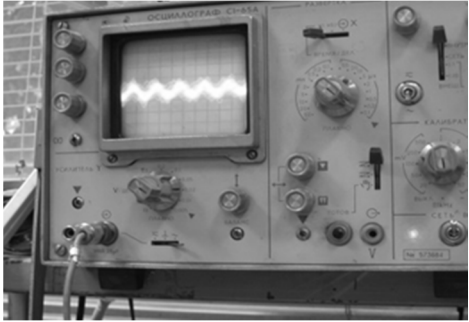

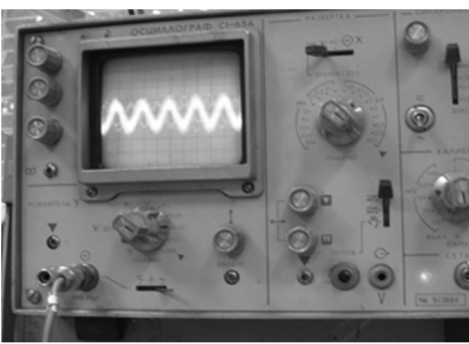
$$U_{\text{мл}} \geq \frac{3}{2} \cdot 90 \cdot 10^{-9} = 135 \text{ нВ}.$$


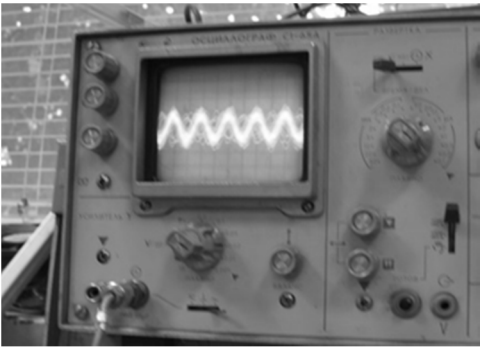

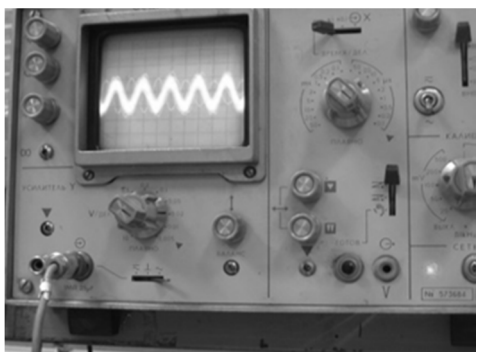

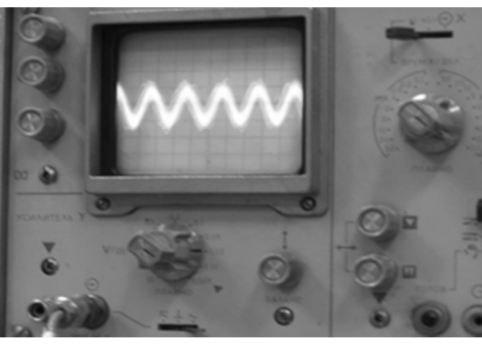
Результаты измерений и осциллограммы приведены в Табл. 1.

На приведённых рисунках видно, что сигнал может быть измерен на фоне шума, если размах сигнала (удвоенная амплитуда), подаваемый только на один из входов, равен 180мВ . Это эквивалентно амплитуде каждого из двух противофазных входных сигналов на каждом

входе $U_{m1} = \frac{180\text{мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 450\text{нВ}$.

Табл. 1

Эквивалентная амплитуда входного сигнала на каждом из двух входах	Размах сигнала генератора на одном из входов до делителя 1:100000 (больше, чем амплитуда на каждом из двух входов, в 400000 раз)	Сигнал на выходе полосового фильтра
$U_{m1} = \frac{140\text{мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 350\text{нВ}$		
$U_{m1} = \frac{160\text{мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 400\text{нВ}$		
$U_{m1} = \frac{180\text{мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 450\text{нВ}$		
$U_{m1} = \frac{200\text{мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 500\text{нВ}$		

$U_{m1} = \frac{220_{мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 550_{нВ}$		
$U_{m1} = \frac{240_{мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 600_{нВ}$		
$U_{m1} = \frac{260_{мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 650_{нВ}$		

Полученная величина в 3,3 раза выше, чем рассчитанное значение $135_{нВ}$. Вероятно, сказываются неучтённые шумы генератора, высокоомного резистора делителя напряжения 1 МОм на входе и осциллографа (включённого, как видно на рисунке, на предел измерений с ценой деления $0,02\text{ В/дел}$).

Последующие осциллограммы показывают необходимость использования узкополосного фильтра при обработке сигнала.

4. Необходимость применения полосового фильтра

Осциллограммы сигналов при размахе сигнала генератора 300 мВ в различных точках схемы показаны в Рис. 7...11.

Проведенные измерения показали принципиальную необходимость применения узкополосного полосового фильтра для измерения амплитуды сигнала в присутствии сильных тепловых ("джонсоновских") шумов высокоомных резисторов во входных цепях. Оптимальное сопротивление этих резисторов ($8,2\text{ МОм}$) было подобрано с целью обеспечения максимального отношения сигнал / шум и не может быть уменьшено.



Рис. 7. Размах сигнала генератора 300 мВ, соответствующий напряжению на входах усилителей после делителя

$$U_{m1} = \frac{300 \text{ мВ}}{100000 \cdot 2 \cdot 2} = 750 \text{ нВ}.$$

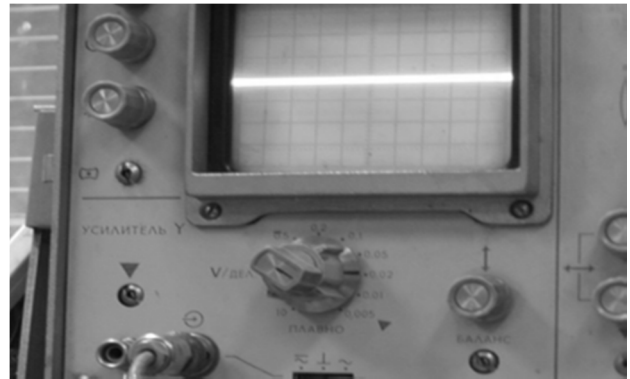


Рис. 8. Входной сигнал после делителя на входе малошумящего первого каскада. Хорошо видна шумовая дорожка, обусловленная исключительно шумами осциллографа. Сигнал с размахом 3 мкВ при цене деления осциллографа 20 мВ/дел не может быть виден.

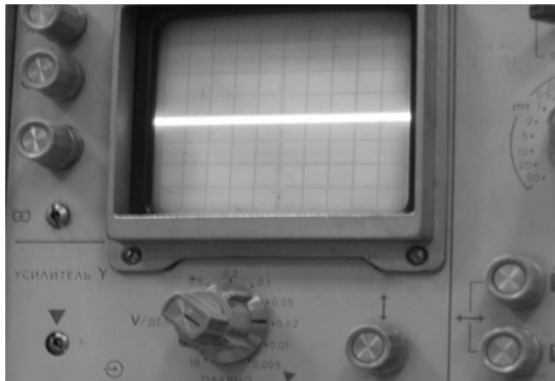


Рис. 9. Выход второго каскада с коэффициентом усиления $G=100$. Размах сигнала 300 мкВ. Цена деления осциллографа 20 мВ/дел. Сигнал слишком слаб и не виден в шумах.

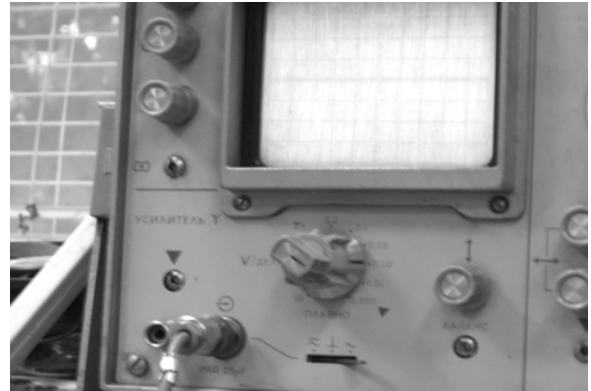


Рис. 10. Выход следующего каскада с коэффициентом усиления $G=100$. Размах сигнала 30 мВ. Экран засвечен шумами. Сигнал полностью маскируется шумами и не может быть обнаружен.

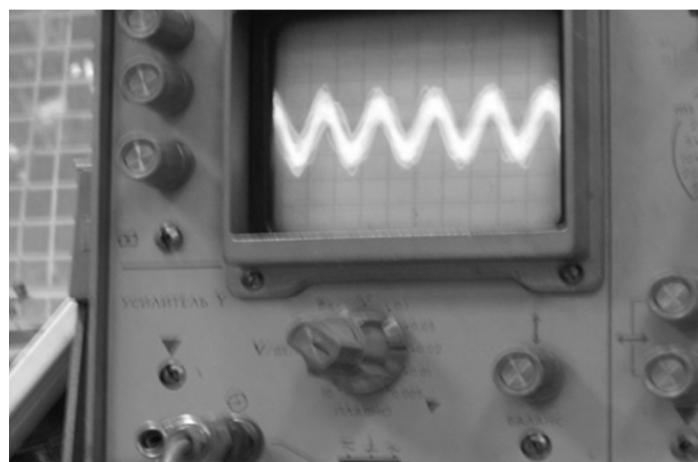


Рис. 11. Выход полосового фильтра. Размах сигнала 60 мВ. Параметры сигнала могут быть легко измерены.

5. Выводы

Результаты измерений показали, что рассмотренной схемой принципиально возможно обнаружение и измерение амплитуды механических колебаний кварцевого резонатора порядка $\Delta b \geq 8.87 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{450}{135} = 2,93 \cdot 10^{-9} \text{ м}$.

Дальнейшие исследования должны быть проведены на реальных резонаторах.

Также должен быть проведен расчет для сапфировых резонаторов, 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. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл ; пер. с англ. – 6-е изд. – Москва: Мир, 2003. – 704 с.
4. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – Москва: Радио и связь, 1981г. – 288 с.
5. Бондаренко Т. Г. Расчет силы, действующей на диэлектрический резонатор твердотельного гироскопа при электростатической раскачке / Т. Г. Бондаренко, О. Г. Долинская // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – Вип. 4 (28). – С. 39-42.
6. Скопа О. О. Обслуговування резервних систем зв'язку / О. О. Скопа // Наукові праці ДонДТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2002. – № 38. – С. 89-91.
7. Texas Instruments [Електронний ресурс] // – Режим доступу : http://e2e.ti.com/support/amplifiers/precision_amplifiers/w/design_notes
8. Бондаренко Т. Г. Расчет чувствительности схемы для измерения амплитуды колебаний кварцевого резонатора твердотельного волнового гироскопа / Т. Г. Бондаренко, И. А. Зенив. // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2015. – №2. – С. 61-66.

Автори статъи

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 Онуфриевна, 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: 10.04.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. О. Манько