

УДК 621.3.082.1

Бондаренко Т. Г., канд. тех. наук, доцент (Тел. +380 (50) 351 58 67. E-mail: phoenix94@list.ru)

Зенив И. О., старший преподаватель (Тел. +380 (50) 200 55 05. E-mail: zenechka@ukr.net)

(Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев)

РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИБОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОБРОТНОСТИ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА

Бондаренко Т. Г., Зенив И. О. Розрахунок чутливості приладу для оцінки добротності кварцового резонатора твердотільного хвильового гіроскопа. Проведено теоретичну оцінку чутливості апаратури, що обмежена тепловими шумами, для вимірювання добротності кварцових та сапфірових резонаторів хвильових гіроскопів. Отримані розрахункові формули для коефіцієнта модуляції ємності датчика в залежності від зміни відстані між обкладаннями конденсатора і діелектриком, а також від величини теплового шуму вхідних ланцюгів апаратури. Використання отриманих формул дозволяє обґрунтувати вимоги до вимірювальної апаратури.

Ключові слова: твердотільний хвильовий гіроскоп, кварцовий резонатор, сапфіровий резонатор, добротність резонатора, тепловий шум, коефіцієнт модуляції, вимірювальна апаратура

Бондаренко Т. Г., Зенив И. О. Расчет чувствительности прибора для оценки добротности кварцевого резонатора твердотельного волнового гироскопа. Проведена теоретическая оценка чувствительности аппаратуры, ограниченная тепловыми шумами, для измерения добротности кварцевых и сапфировых резонаторов волновых гироскопов. Получены расчетные формулы для коэффициента модуляции ёмкости датчика в зависимости от изменения расстояния между обкладками конденсатора и диэлектриком, а также от величины теплового шума входных цепей аппаратуры. Использование полученных формул позволяет обосновать требования к измерительной аппаратуре.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, кварцевый резонатор, сапфировый резонатор, добротность резонатора, тепловой шум, коэффициент модуляции, требования к аппаратуре

1. Введение и постановка задачи. При создании твердотельных волновых гироскопов [1, 2] важно предварительно измерить добротность резонатора еще до напыления электродов, которое существенно снижает добротность. Измерение добротности производится путем возбуждения механических колебаний резонатора, например, электростатической раскачкой [3...5], и затем измеряется время, в течение которого наблюдаются колебания. Для измерения амплитуды колебаний предлагается использовать ёмкостной датчик, имеющий две параллельные обкладки, лежащие в одной плоскости. При колебаниях резонатора изменяется расстояние между диэлектриком конденсатора (резонатором) и обкладками, что приводит к изменению ёмкости конденсатора и к изменению напряжения на выходе датчика. Стояла задача оценить самую возможность обнаружения сигнала датчика, вызванного механическими колебаниями резонатора, на фоне маскирующих шумов измерительной аппаратуры.

2. Оценка постоянной составляющей ёмкости емкостного датчика. Структурная схема обработки сигнала от ненапыленного резонатора, которая предназначена для измерения его добротности, показана на Рис. 1. Данная схема является разновидностью ёмкостного датчика [6, 7]. Высокое напряжение подается на одну обкладку конденсатора C_0 , сигнал снимается с другой обкладки.

В работах [3, 5] было показано, что для такой схемы амплитуда сигнала на входе усилителя, вызванная модуляцией ёмкости конденсатора, определяется выражением

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

где R_{ex} – сопротивление входной цепи усилителя; C_{ex} – паразитная ёмкость схемы; $\omega = 2\pi f$ – частота собственных колебаний резонатора ($f \approx 5$ кГц); C_0 – ёмкость между

электродами датчика; U_0 – постоянное напряжение поляризации; m – коэффициент модуляции (относительное изменение ёмкости конденсатора).

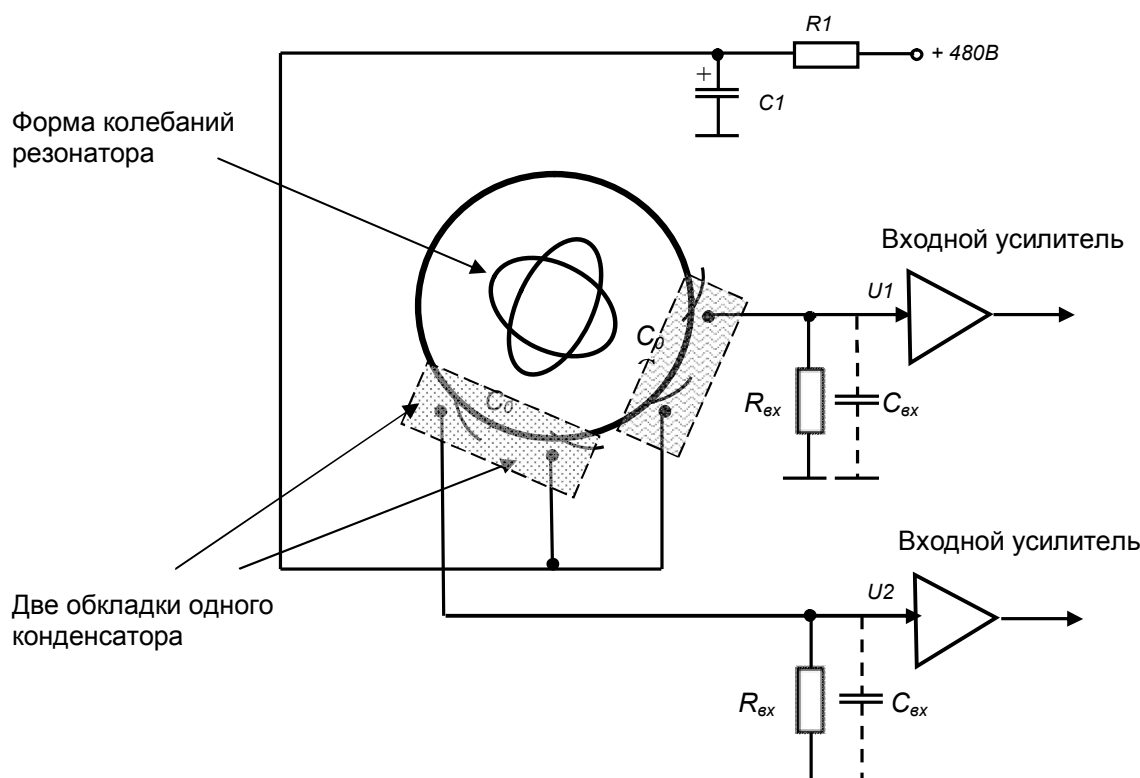


Рис. 1. Структурная схема входных цепей исследуемой схемы обработки сигнала

В результате моделирования в программе MATLAB SimuLink для напыленного резонатора было получено, что коэффициент модуляции может быть $m = \frac{\Delta d}{d_0} = 10^{-3} \dots 10^{-7}$,

где d_0 – среднее расстояние между электродом и резонатором; $d_0 \approx 0,1$ мм; Δd – амплитуда колебаний резонатора.

В [3, 5] было показано, что ёмкость между электродами датчика C_0 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 l – длина сегмента; b – расстояние между диэлектриком резонатора и плёнкой; r_1 и r_2 – расстояние от средней точки между сегментами, соответственно, до ближайшего и до дальнего края сегмента (Рис. 2).

Так как напряжения на соседние сегменты подаётся противоположное, то r_2 , практически равно половине ширины сегмента.

Оценка величины ёмкости по формуле (2) каждого из двух конденсаторов, показанных разными заполнениями на Рис. 1, составляет порядка 0,22 пФ. Расчет ёмкости проводился в

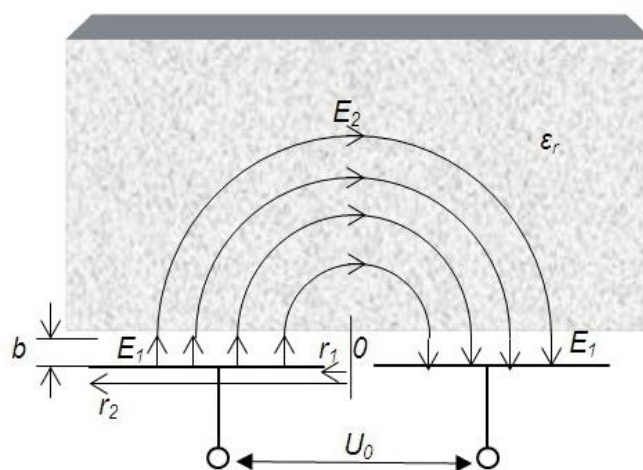


Рис. 2. Расположение электродов датчика колебаний

пренебрежении ёмкостными связями с другими элементами конструкции по таким исходным данным: диаметр резонатора $d = 40$ мм; половина зазора между сегментами $r_1 = 0,5$ мм; средняя ширина сегмента $r_{2cp} = 6,28$ мм; длина сегмента $l = 15,71$ мм; зазор между резонатором и обкладками раскачивающего конденсатора $b = 0,1$ мм; относительная диэлектрическая проницаемость кварца $\epsilon_r = 2,132$.

Далее предстояло оценить влияние изменения расстояния от диэлектрика до пластин на величину выходного сигнала датчика, а также найти минимальную амплитуду механических колебаний резонатора, которые возможно обнаружить на фоне тепловых шумов аппаратуры.

3. Оценка величины теплового шума входных цепей усилителя. Чтобы не задаваться вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги и стоимостями ошибок, приводящих к критерию Неймана-Пирсона [6], приближённо полагалось, что сигнал может быть обнаружен на фоне белого гауссового шума, если полный размах его напряжения больше шести среднеквадратических напряжений шума, как показано на Рис. 3.

При этом амплитуда сигнала будет превышать максимально возможные значения шумового напряжения, и сигнал будет виден, например, на экране осциллографа, и может быть измерена его амплитуда.

Для белого шума с нормальным законом распределения (гуссового шума) все возможные значения напряжения находятся в диапазоне $\pm 3\sigma_u$ от среднего значения.

Следовательно, полагаем, что для обнаружения требуется $2U_{m1} \geq 6\sigma_u$.

Рассчитаем сигнал и шум для принципиальной схемы, показанной на Рис. 4. Основные источники шумов – высокоомные резисторы $2R1$ и $2R2$ (R_{ex}) во входной цепи, а также операционные усилители $2A1$, $2A2$ и $2A3$. Так как буферные усилители $2A1$ и $2A2$ имеют коэффициент усиления 1, вклад в шум вносит также и второй каскад $2A3$, что будет учитываться далее.

Среднеквадратическое напряжение теплового шума каждого из высокоомных резисторов $2R1$ и $2R2$ определяется выражением [6, 7]:

$$\sigma_{uR_{ex}} = \sqrt{4kTR_{ex}\Delta f}, \quad (3)$$

где $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ – постоянная Больцмана; $T = (273+20)^\circ\text{К}$ – абсолютная температура; $\Delta f = 500$ Гц – проектная полоса пропускания фильтра в усилительной цепи. Тогда $4kT = 1,62 \cdot 10^{-20} \frac{В^2}{Гц \times Ом}$.

Суммарное среднеквадратическое напряжение некоррелированного теплового шума двух резисторов определим как

$$\sigma_{uR} = \sqrt{\sigma_{uR1}^2 + \sigma_{uR2}^2} = \sqrt{8kTR_{ex}\Delta f}. \quad (4)$$

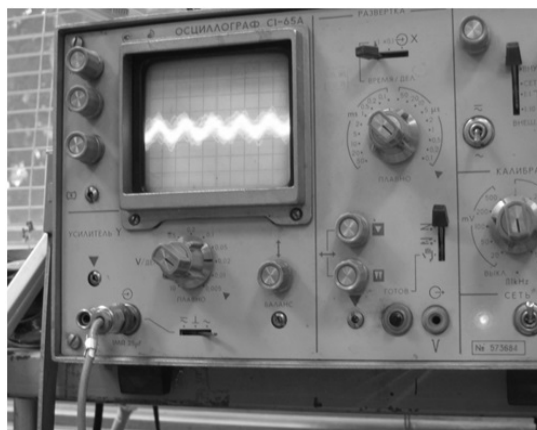


Рис. 3. Наблюдение сигнала на фоне белого шума при условии $2U_{m1} \geq 6\sigma_u$

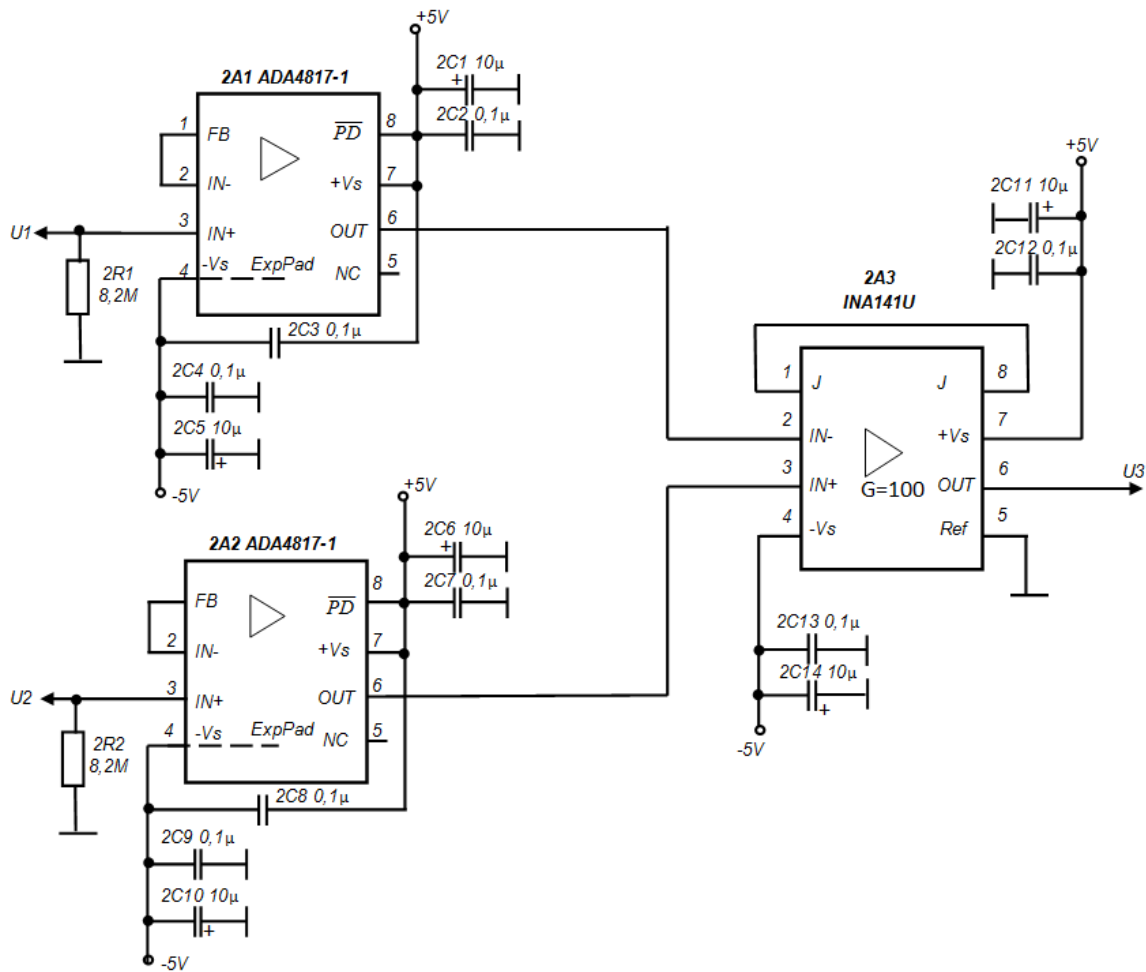


Рис. 4. Принципиальная схема входных цепей

Среднеквадратическое напряжение шума, приведённое ко входу усилителя 2A3, и обусловленное некоррелированным шумом усилителей, определяется выражением:

$$\sigma_{ш\text{у}\text{с}} = \sqrt{(N_{ш\text{2A1}}^2 + N_{ш\text{2A2}}^2 + N_{ш\text{2A3}}^2)\Delta f}, \quad (5)$$

где $N_{ш\text{и}}^2$ – спектральная плотность шума соответствующего усилителя,

$$N_{ш\text{ADA4817-1}} = 4\text{нВ} / \sqrt{\Gamma\text{ц}}, \quad N_{ш\text{INA141}} = 8\text{нВ} / \sqrt{\Gamma\text{ц}}.$$

Отсюда спектральная плотность шума усилителей $N_{ш\text{у}\text{с}} = 9,8\text{нВ} / \sqrt{\Gamma\text{ц}}$.

С учетом (4) и (5) получаем, что результирующий шум, приведенный ко входу усилителей, определяется как

$$\sigma_{ш\text{вх}} = \sqrt{8kTR_{\text{вх}}\Delta f + N_{ш\text{у}\text{с}}^2\Delta f} = 11,5\text{мкВ}. \quad (6)$$

Уточним требования к нужной амплитуде сигнала на входе. На вход схемы обработки подаётся два противофазных сигнала одинаковой амплитуды, снимаемые с расположенных под углом $\pi/2$ датчиков. Эти сигналы вычитаются (с учетом фазы – суммируются) и амплитуда полезного сигнала увеличивается в два раза, а некоррелированное квадратичное сложение шумов двух резисторов уже было учтено. Поэтому нужно $2U_{\text{м1}} \geq 3\sigma_{ш\text{вх}}$.

Отсюда получаем требования к амплитуде сигнала на входе каждого из двух каналов: $U_{\text{м1}} \geq 17,2\text{мкВ}$.

4. Оценка коэффициента модуляции. Нужно найти изменение ёмкости $\Delta C = C(b_0 + \Delta b) - C(b_0)$ при изменении расстояния Δb между обкладками и кварцевым резонатором. Раскладывая функцию $C(b) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l}{\pi} \ln \left| \frac{\pi r_2 + 2b \varepsilon_r}{\pi r_1 + 2b \varepsilon_r} \right|$ в ряд Тейлора в окрестности точки b_0 и ограничиваясь первой производной, получаем:

$$C(b_0 + \Delta b) \approx C(b_0) + \Delta b \cdot C'(b_0).$$

После очевидных преобразований получаем выражение для производной:

$$C'(b_0) = \frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l}{\pi} \ln \left| \frac{\pi r_2 + 2b \varepsilon_r}{\pi r_1 + 2b \varepsilon_r} \right| \right) = - \frac{2 \varepsilon_0 \varepsilon_r^2 l (r_2 - r_1)}{(\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r)}.$$

Отсюда находим изменение ёмкости:

$$\Delta C = C(b_0 + \Delta b) - C(b_0) = \Delta b \cdot C'(b_0) = -\Delta b \cdot \frac{2 \varepsilon_0 \varepsilon_r^2 l (r_2 - r_1)}{(\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r)}.$$

Коэффициент модуляции ёмкости

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

Так как для обнаружения сигнала необходимо выполнение неравенства $U_{1m} \geq \frac{3}{2} \sigma_{шex}$,

то, подставляя в это выражение последовательно $U_{1m} = \frac{m \omega C_0 U_0}{\sqrt{\frac{1}{R_{ex}^2} + \omega^2 (C_0 + C_{ex})^2}}$,

$$\sigma_{шex} = \sqrt{8kTR_{ex} \Delta f + N_{шyc}^2 \Delta f}, \quad m = \Delta b \cdot \frac{2 \pi \varepsilon_r (r_2 - r_1)}{(\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r) \ln \left| \frac{\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r}{\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r} \right|}, \quad \text{получаем}$$

неравенство:

$$\Delta b \cdot \frac{2 \pi \varepsilon_r (r_2 - r_1)}{(\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r) \ln \left| \frac{\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r}{\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r} \right|} \cdot \frac{\omega C_0 U_0}{\sqrt{\frac{1}{R_{ex}^2} + \omega^2 (C_0 + C_{ex})^2}} \geq \frac{3}{2} \sqrt{8kTR_{ex} \Delta f + N_{шyc}^2 \Delta f}.$$

Окончательно неравенство для смещения кварцевого ненапыленного резонатора, которое может быть обнаружено данной схемой, имеет вид:

$$\Delta b \geq \frac{3 \sqrt{8kTR_{ex} \Delta f + N_{шyc}^2 \Delta f} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{ex}^2} + \omega^2 (C_0 + C_{ex})^2} \cdot (\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r) \ln \left| \frac{\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r}{\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r} \right|}{4 \pi \varepsilon_r (r_2 - r_1) \omega C_0 U_0} = \frac{3 \sqrt{8kTR_{ex} \Delta f + N_{шyc}^2 \Delta f} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{ex}^2} + \omega^2 (C_0 + C_{ex})^2} \cdot (\pi r_1 + 2b_0 \varepsilon_r)(\pi r_2 + 2b_0 \varepsilon_r)}{4 \varepsilon_0 \varepsilon_r^2 l (r_2 - r_1) \omega U_0} = 8.87 \cdot 10^{-10} m.$$

Отметим, что полученное теоретическое значение всего в 14,3 раза больше, чем диаметр атома гелия.

5. Выводы. Предложенная теоретическая оценка чувствительности аппаратуры позволяет определить максимально возможную чувствительность, которая ограничена только тепловыми шумами.

Применение этой оценки позволит создать аппаратуру, обеспечивающую высокий уровень чувствительности и точности измерения добротности определенных типов диэлектрических резонаторов.

Указанная аппаратура может быть применена при создании волновых гироскопов.

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. Бондаренко Т. Г. Оценка силы, действующей на диэлектрический резонатор твердотельного гироскопа при электростатической раскачке / Т. Г. Бондаренко, О. Г. Долинская // II Международная научно-технической конференции, Государственный университет телекоммуникаций, 12-13 апреля 2014. – С. 80.

4. Брагинский В. Б. Измерение малых сил в физических экспериментах / В. Б. Брагинский, А. Б. Манукин. – Москва: Наука, 1974. – 152 с.

5. Бондаренко Т. Г. Расчет силы, действующей на диэлектрический резонатор твердотельного гироскопа при электростатической раскачке / Т. Г. Бондаренко, О. Г. Долинська // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – Вип.4(28). – С.39-42.

6. Фалькович С. Е., Статистическая теория измерительных радиосистем / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – Москва: Радио и связь, 1981г. – 288 с.

7. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл : в 3-х томах. Т.3. ; пер. с англ. – 4-е изд. – Москва: Мир, 1993. – 367 с.

Дата надходження в редакцію: 10.04.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. О. Манько