

УДК 621.317.335.2

ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ
В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХП.Ф. Баранов, В.Н. Борилов,
Т.Г. Нестеренко, Э.И. ЦимбалистТомский политехнический университет
E-mail: bpf@tpu.ru

Рассмотрены способы обработки измерительной информации с емкостных датчиков в микромеханических гироскопах. Предложена структурная схема преобразования емкости в ток с использованием синхронного детектирования и последующей фильтрацией результата измерения.

Ключевые слова:

Микромеханический гироскоп, емкостной датчик, синхронное детектирование, преобразование емкости в ток.

Введение

Одним из направлений современного приборостроения является разработка микромеханических инерциальных датчиков – гироскопов (ММГ). В качестве чувствительной структуры в ММГ используются емкостные датчики, обеспечивающие режимы движения и измерения [1].

Емкостный датчик в общем случае представляет собой одну или несколько емкостей с изменяющимися параметрами. В ММГ с линейными перемещениями гребенчатых структур изменения во времени значения емкости $C(t)$ могут быть вызваны или изменениями расстояния между пластинами $d(t)$, или вариацией площади перекрытия пластин $S(t)$, следовательно, такая емкость является параметрической. Для управления ММГ и получения результатов измерений необходимо преобразовать изменение емкости в ток или напряжение, например с помощью синхронного детектирования с последующей фильтрацией [2–5].

Преобразование емкости в ток

Определим связь между напряжением и током в параметрическом конденсаторе. Рассмотрим цепь, образованную источником напряжения сигнала

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

и управляемым конденсатором, емкость которого изменяется во времени по гармоническому закону с частотой накачки:

$$C(t) = C_0 \left[1 + \frac{\Delta C}{C_0} \cos(\Omega t) \right],$$

Баранов Павел Федорович, аспирант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля, заведующий лабораторией технологий, систем и инструментов для автоматизированных сетевых лабораторных практикумов удаленного доступа ТПУ.

E-mail: bpf@tpu.ru

Область научных интересов: методы и средства измерений электрических величин, графические программные технологии, аналитическое приборостроение, интеллектуальные системы.

Борилов Валерий Николаевич, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: borikov@tpu.ru

Область научных интересов: методы и средства измерений электрических величин, компьютеризация научных исследований.

Нестеренко Тамара Георгиевна, канд. техн. наук, доцент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ntg@tpu.ru

Область научных интересов: микромеханические системы.

Цимбалист Эдвард Ильич, канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: tsimbalist@tpu.ru

Область научных интересов: средства измерений, установки и системы, предназначенные для испытаний и поверки метрологических характеристик электронных вольтметров, многозначных мер и масштабных преобразователей напряжения переменного тока.

где $\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C_m}{C_0}$ – коэффициент, характеризующий глубину модуляции емкости гребенчатой структуры и пропорциональный относительному изменению площадей перекрытия ее пластин.

На рис. 1 представлена простейшая схема преобразования изменений емкости в ток с использованием генератора переменного напряжения.

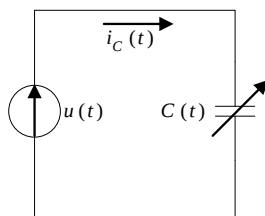


Рис. 1. Простейшая схема преобразования изменений емкости в ток

Тогда по теории электрических цепей:

$$i_C(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}[C(t)u_C(t)] = C(t)\frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t)\frac{dC(t)}{dt}, \quad (1)$$

где q – заряд конденсатора, Кл.

Если к конденсатору с емкостью $C(t)$ приложена сумма напряжений $u_C(t) = u_1(t) + u_2(t)$, то в соответствии с (1):

$$\begin{aligned} i_C(t) &= C(t)\frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t)\frac{dC(t)}{dt} = C(t)\left[\frac{du_1(t)}{dt} + \frac{du_2(t)}{dt}\right] + \\ &+ [u_1(t) + u_2(t)]\frac{dC(t)}{dt} = \left\{C\frac{du_1}{dt} + u_1\frac{dC}{dt}\right\} + \left\{C\frac{du_2}{dt} + u_2\frac{dC}{dt}\right\} = \\ &= i_1(t) + i_2(t), \end{aligned}$$

где $i_1(t)$ и $i_2(t)$ – токи под действием $u_1(t)$ и $u_2(t)$.

Принцип суперпозиции распространяется, очевидно, на сумму любого количества воздействий.

Из приведенных соотношений следует, что в цепях с постоянными параметрами гармоническое воздействие вызывает обязательно гармоническую реакцию. Измениться может начальная фаза и амплитуда колебания. В цепях с переменными параметрами приложенное гармоническое воздействие вызывает реакцию, вид которой зависит от закона изменения параметров емкости во времени.

Пусть гармоническое колебание $u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ воздействует на конденсатор $C(t) = C_0 + \Delta C \cos \Omega t$. Определим токи через конденсатор.

Для конденсатора с переменной во времени емкостью $C(t)$ в соответствии с (1) имеем

$$\begin{aligned} i_C(t) &= C(t)\frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t)\frac{dC(t)}{dt} = -[C_0 + \Delta C \cos \Omega t] \times \\ &\times U_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) - U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Delta C \Omega \sin \Omega t. \end{aligned}$$

После преобразования получим

$$i_C(t) = \omega_0 C_0 U_m \left[1 + \frac{\Delta C}{C_0} \cos \Omega t\right] \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) - \omega_0 \Delta C U_m \sin \Omega t \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Первое слагаемое есть простое амплитудно-модулированное колебание. Второе слагаемое дает колебания боковых частот. В целом $i_C(t)$ представляет собой колебания, модулированные по амплитуде и фазе.

Промоделируем схему на рис. 1 в среде *Simulink* (рис. 2, 3)

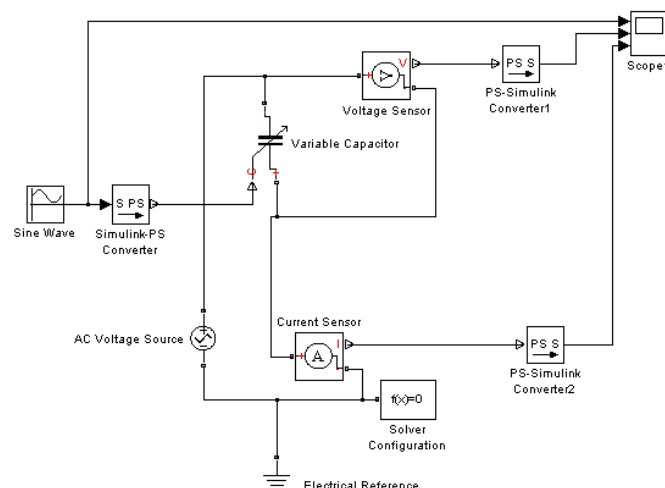


Рис. 2. Simulink – модель преобразования изменений переменной емкости в ток

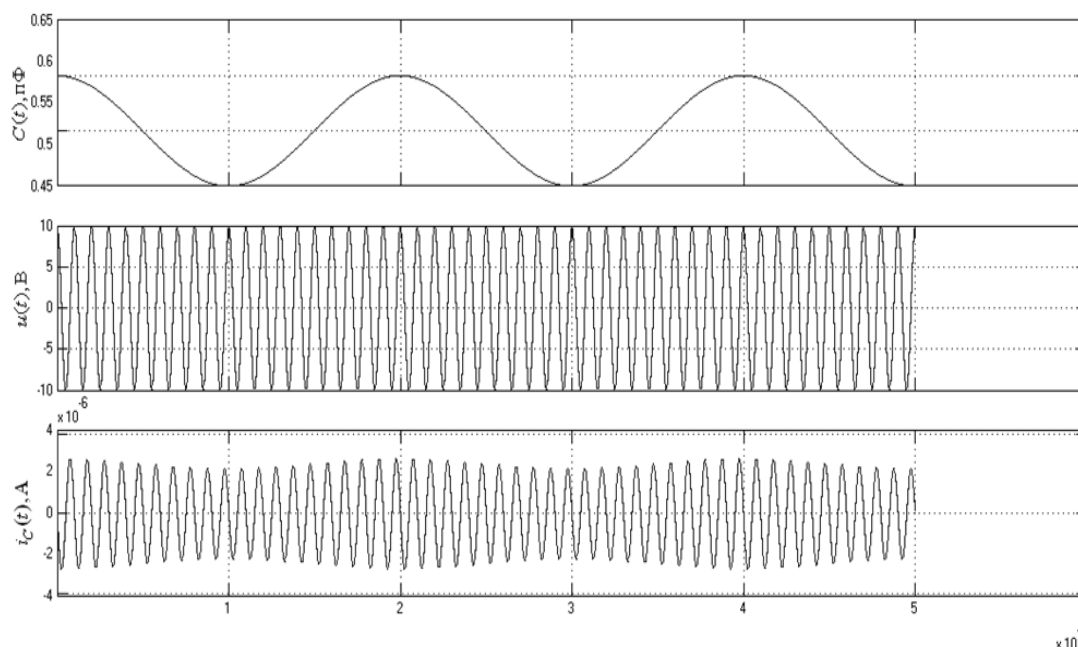


Рис. 3. Сигналы $C(t)$, $u(t)$ и $i_C(t)$

Результаты моделирования подтверждают аналитические выкладки, сделанные ранее, и указывают на следующее свойство цепи с переменными параметрами: при изменении передаточной функции по любому сложному, но периодическому закону с основной частотой Ω , гармонический входной сигнал с частотой ω_0 образует на выходе цепи спектр, содержащий частоты ω_0 , $\omega_0 \pm \Omega$, с $\omega_0 \pm 2\Omega$ и т. д.

При разложении простого амплитудно-модулированного колебания первое слагаемое в правой части представляет собой исходное немодулированное колебание с частотой ω_0 , т. е. колебание несущей. Второе и третье слагаемые соответствуют новым колебаниям (гармоническим), появляющимся в процессе модуляции амплитуды. Частоты этих колебаний $\omega_0 + \Omega$ и $\omega_0 - \Omega$ называются верхней и нижней боковыми частотами модуляции.

Из приведенных выражений и графиков видно, что полезная информация, пропорциональная изменениям емкости ΔC , которые, в свою очередь, пропорциональны физическим величинам, значения которых подвергаются измерениям или стабилизации, заключена в сигналах боковых колебаний.

Пусть $i(t) = \omega_0 C_0 U_m \left[1 + \frac{\Delta C}{C_0} \cos \Omega t \right] \cos \left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2} \right) - \omega_0 \Delta C U_m \sin \Omega t \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$.

При наличии у генератора с частотой ω_0 кроме синфазного квадратурного выхода, на котором действует напряжение $u(t) = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, можно получить информацию, пропорциональную как емкости C_0 , так и изменениям ΔC этой емкости (рис. 4).

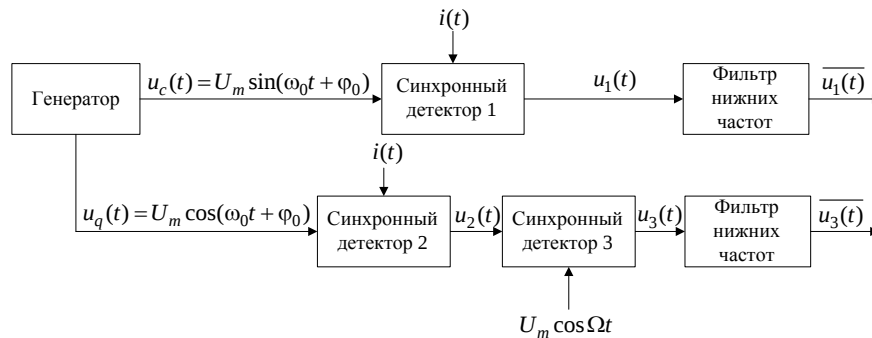


Рис. 4. Структурная схема преобразования емкости в ток с помощью синхронного детектирования

Для напряжения $u_1(t)$ на выходе первого синхронного детектора имеем сигнал, характеризующийся выражением:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= i(t) \times U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= k \left\{ \omega_0 C_0 U_m \left[1 + \frac{\Delta C}{C_0} \cos \Omega t \right] \cos \left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2} \right) - \omega_0 \Delta C U_m \sin \Omega t \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \right\} U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= k \omega_0 C_0 U_m \left[1 + \frac{\Delta C}{C_0} \cos \Omega t \right] \cos \left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2} \right) \times \\ &\quad \times U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) - k \omega_0 \Delta C U_m \sin \Omega t \cos(\omega_0 t + \varphi_0) U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \end{aligned}$$

Среднее значение $u_1(t)$ после фильтра нижних частот (ФНЧ) будет определяться как

$$\overline{u_1(t)} = -k_1 \frac{\omega_0 C_0 U_m^2}{2} \approx C_0 = \frac{\varepsilon S_0}{d},$$

где k_1 – коэффициент передачи первого синхронного детектора, В⁻¹; ε – диэлектрическая проницаемость; S_0 – площадь перекрытия двух пластин, м²; d – расстояние между ними, мм.

При фиксированных значениях напряжения и частоты источника сигнала постоянная составляющая напряжения $u_1(t)$ содержит информацию о начальной емкости C_0 и ее изменениях, которая может быть востребована для целей коррекции.

По второму каналу схемы (рис. 4) в спектре напряжения $u_2(t)$, полученного после второго синхронного детектора, будут образованы сигналы на частоте $2\omega_0$, а также на частотах $2\omega_0 + \Omega$ и $2\omega_0 - \Omega$ с соответствующими фазовыми сдвигами.

При дальнейшей обработке данных сигналов третьим синхронным детектором и ФНЧ в выходном напряжении $u_3(t)$ постоянная составляющая будет отсутствовать. Информативным параметром окажется только токовая составляющая, пропорциональная изменению емкости ΔC .

Действительно для $u_3(t)$ имеем

$$u_3(t) = \frac{-k_2 k_3 \omega_0 \Delta C U_m \sin \Omega t}{2} u \sin \Omega t,$$

где k_2 – коэффициент передачи второго синхронного детектора, В⁻¹; k_3 – коэффициент передачи третьего синхронного детектора, В⁻¹.

После усреднения с помощью ФНЧ выходной сигнал $u_3(t)$ будет иметь вид

$$|u_3(t)| = k_2 k_3 \frac{u \omega_0 \Delta C U_m}{4} \approx \Delta C = \frac{\varepsilon \Delta S}{d}.$$

Промоделируем схему преобразования емкости в ток с помощью синхронного детектирования в среде *Simulink* (рис. 5 и 6).

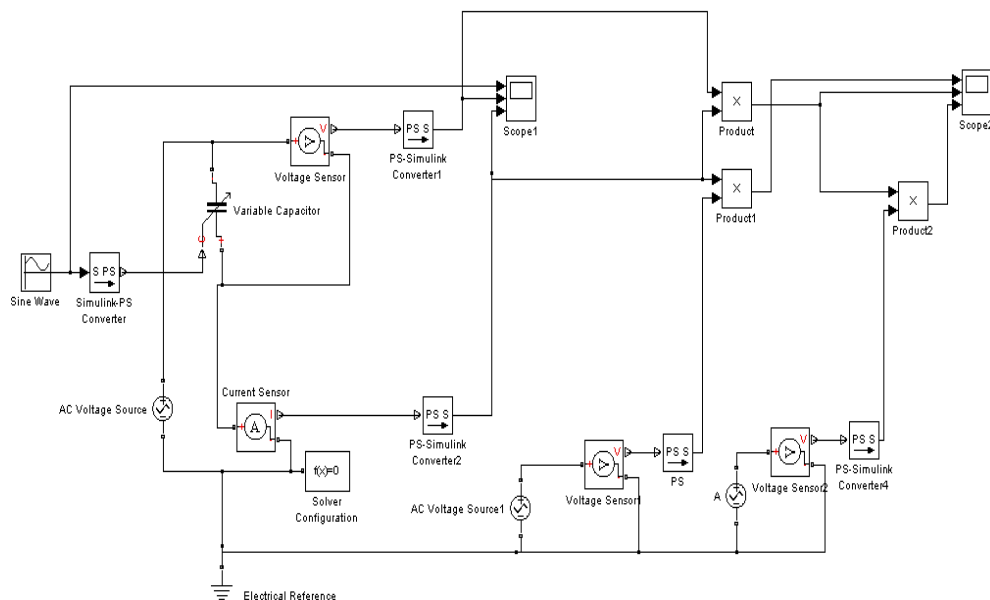


Рис. 5. *Simulink* – модель схемы преобразования емкости в ток с помощью синхронного детектирования

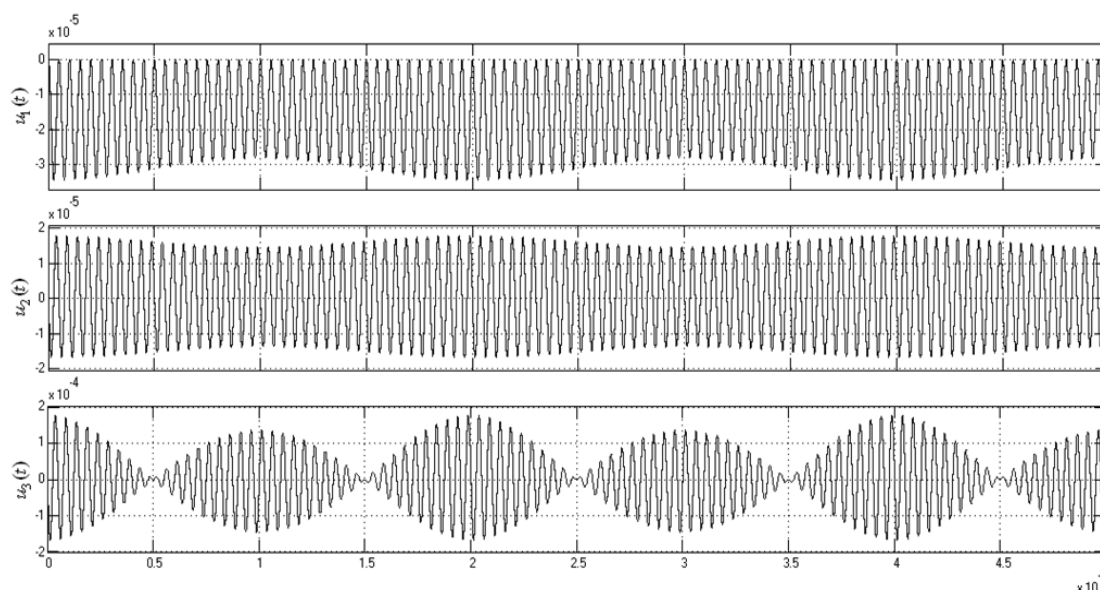


Рис. 6. Сигналы $u_1(t)$, $u_2(t)$, и $u_3(t)$

Результаты моделирования подтверждают аналитические выкладки о работе схемы преобразования емкости в ток с помощью синхронного детектирования.

Преобразование емкости в напряжение

На рис. 7 представлена простая схема преобразования изменений значений $C(t)$ емкости в напряжение с использованием генератора переменного тока.

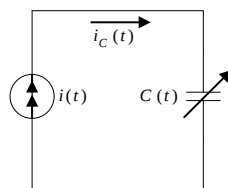


Рис. 7. Схема преобразования изменений емкости в напряжение

Пусть генератор тока выдает ток $i(t) = i_C(t) = I_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, а изменения емкости за счет первичных или вторичных колебаний инерционных масс гироскопа происходит по закону:

$$C(t) = C_0 \left[1 + \frac{\Delta C}{C_0} \cos(\Omega t) \right].$$

Для цепи на рис. 7 можно составить дифференциальное уравнение:

$$i_C(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} [C(t)u_C(t)] = C(t) \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) \frac{dC(t)}{dt} = I_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

которое приводится к виду

$$C(t)U' + C'(t)U = f(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$U(t) = \frac{1}{C_0 + \Delta C \cos \Omega t} \times \frac{I_m}{\omega_0} \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Напряжение на емкости также как в предыдущем случае представляет собой модулированное колебание. В спектре его находится постоянная составляющая, несущая на частоте ω_0 сигналы боковых частот $(\omega_0 + \Omega)$ и $(\omega_0 - \Omega)$ и сигнал на частоте Ω гармонического изменения емкости $C(t)$, который можно выделить с помощью синхронного детектора и фильтра нижних частот.

Промоделируем схему на рис. 7 в среде *Simulink* (рис. 8, 9).

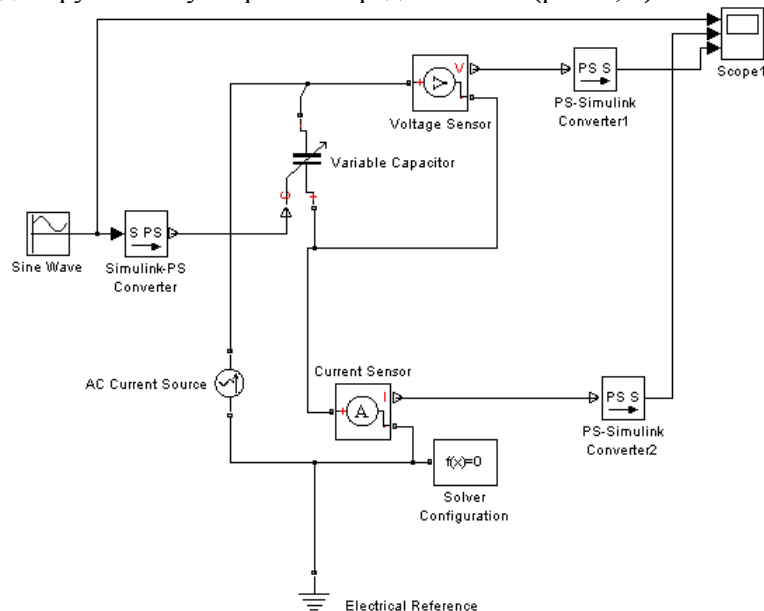


Рис. 8. *Simulink* – модель преобразования изменений переменной емкости в напряжение

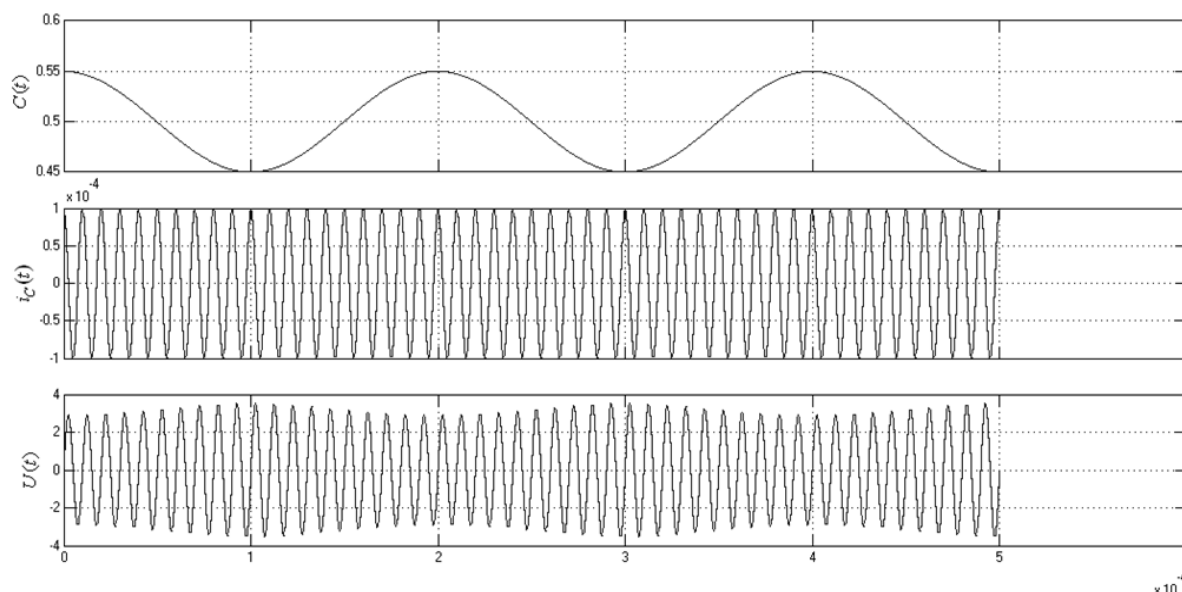


Рис. 9. Сигналы $C(t)$, $i_C(t)$ и $U(t)$

По сравнению с рассмотренным выше преобразованием изменений переменной емкости в ток значение полученной полезной информации зависит от начальной фазы φ_0 тока генератора, и поэтому использование его в измерительных целях проблематично.

Вывод

Рассмотрены способы обработки измерительной информации с емкостных датчиков в микромеханических гироскопах.

Для управления ММГ и получения результатов измерений предложено преобразовать изменение емкости в ток с помощью синхронного детектирования с последующей фильтрацией. При таком подходе результат измерения полезной информации не будет зависеть от начальной фазы задающего генератора переменного напряжения.

Показано, что при использовании генератора с синфазным и квадратурным выходами возможно выделить информацию как об абсолютном значении измеряемой емкости, так и о ее приращении.

Основная сложность в преобразовании изменения емкости в ток с помощью синхронного детектирования заключается в том, что требуется обеспечить стабильность по частоте и фазе синфазного и квадратурного сигнала для управления синхронными детекторами, частота и фаза которых соответствует частоте и фазе измеряемого сигнала.

Увеличение постоянной времени, при фильтрации выходного сигнала после синхронного детектирования, позволяет увеличить точность результата измерений.

Работа выполнена в Томском политехническом университете при финансовой поддержке гранта № 14.B37.21.1951 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбин Е.С., Баранов П.Ф., Коледа А.Н., Нестеренко Т.Г., Пересветов М.В. Моделирование конструкционных и динамических характеристик двухкомпонентного микромеханического гироскопа // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 1 (7). – С. 96–105. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/viewPDFInterstitial/612/464> (дата обращения: 15.04.2013).

2. Azzolini C., Magnanini A., Tonelli M., Chiorboli G., Morandi C. A CMOS vector lock-in amplifier for sensor applications // *Microelectronics Journal*. – 2010. – V. 41. – № 8. – P. 449–457.
3. Ghavanini F.A., Rodjegard H., Enoksson P. An easy-to-implement method for evaluation of capacitive resonant sensors // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2006. – V. 16. – № 6. – P. 156–160.
4. Петин Г. Ключевой синхронный детектор // *Схемотехника*. – 2003. – № 3. – С. 14–17
5. Борилов В.Н., Баранов П.Ф., Цимбалист Э.И., Ким В.Л. Устройство для испытаний и проверки индуктивных делителей напряжения // *Контроль. Диагностика*. – 2011 – № 11. – С. 41–45

Поступила 29.04.2013 г.