

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЕМКОСТНЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

В. П. АРБУЗОВ, М. А. МИШИНА

*Пензенский государственный университет, 440026, Пенза, Россия
E-mail: arbuzov_yp@mail.ru*

Рассмотрены схемы замещения емкостного микромеханического гироскопа и проведен анализ используемых схем измерительных преобразователей. С целью исключения влияния паразитных емкостей и сопротивлений схемы замещения параметрического преобразователя и неидеальности усилителей измерительного преобразователя предложено использовать временное разделение каналов преобразования искомым параметров. Приведена схема измерительного преобразователя на основе микроконтроллера, реализующая метод фазового разделения каналов, и предложен алгоритм вычисления выходного сигнала, пропорционального информативному параметру дифференциального емкостного датчика.

Ключевые слова: емкостной микромеханический гироскоп, схема замещения, информативный параметр, измерительный преобразователь, коррекция погрешности, фазовое разделение каналов

Применение технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) для датчиков механических величин, позволяющих определить как техническое состояние объекта, так и параметры его движения, существенно расширило функциональные возможности систем управления многомерными объектами без увеличения их массогабаритных параметров. Качество функционирования системы управления в значительной степени обеспечивается точностью датчиков, в связи с этим повышаются требования к ней [1, 2]. Изготовление чувствительного элемента (ЧЭ) датчика с помощью методов и средств микроэлектроники позволило создавать измерительные преобразователи (ИП) выходных сигналов ЧЭ, в одной микросхеме содержащие лишь пассивные электрические элементы (сопротивление или емкость) [3]. Для дифференциальных конструкций МЭМС [4] информативным параметром является либо $(R_1 - R_2)/(R_1 + R_2)$, либо $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$ [5], где R_1 , R_2 , C_1 , C_2 — рабочие параметры расположенных в ЧЭ резисторов и конденсаторов, образующие параметрический преобразователь (ПП). ПП преобразует механическую величину, воспринимаемую ЧЭ, в пассивную электрическую: сопротивление или емкость (информативным параметром ПП является соотношение между параметрами рабочих элементов ЧЭ, наиболее точно отражающее функцию преобразования датчика).

Помимо рабочих элементов в схеме замещения ПП емкостного микромеханического гироскопа (ММГ) существуют паразитные емкости и сопротивления, определяемые технологией изготовления ЧЭ датчика. В связи с этим целью настоящей статьи является разработка ИП емкостного ММГ, обеспечивающего преобразование именно информативного параметра ПП и коррекцию погрешности, возникающей как в нем, так и в ПП гироскопа.

При создании ИП учитываются схема замещения параметрического преобразователя ММГ, информативный параметр ПП и паразитные емкости и проводимости (сопротивления). Специфика структуры емкостного ММГ (с точки зрения создания ИП) состоит в том, что она содержит цепь возбуждения колебаний инерционной массы и цепь измерения, формирующую выходной сигнал гироскопа.

На рис. 1, а приведена упрощенная эквивалентная схема замещения ПП одноосевого ММГ [6], где $C_{\text{дм}_1}$ и $C_{\text{дм}_2}$ — емкости датчика момента, значения которых определяются амплитудой виброколебаний инерционной массы; $C_{\text{ду}_1}$ и $C_{\text{ду}_2}$ — емкости датчика угла вторичных колебаний вокруг измерительной оси гироскопа; $C_{\text{п}_1}$, $C_{\text{п}_2}$, $R_{\text{п}}$ — емкости и сопротивление потерь. Результат измерения разности емкостей $C_{\text{дм}_1}$ и $C_{\text{дм}_2}$ используется в системе стабилизации амплитуды первичных колебаний инерционной массы, от точности работы которой зависит наклон функции преобразования ММГ и, следовательно, ПП емкостного ММГ представляет собой многомерный объект измерения [7].

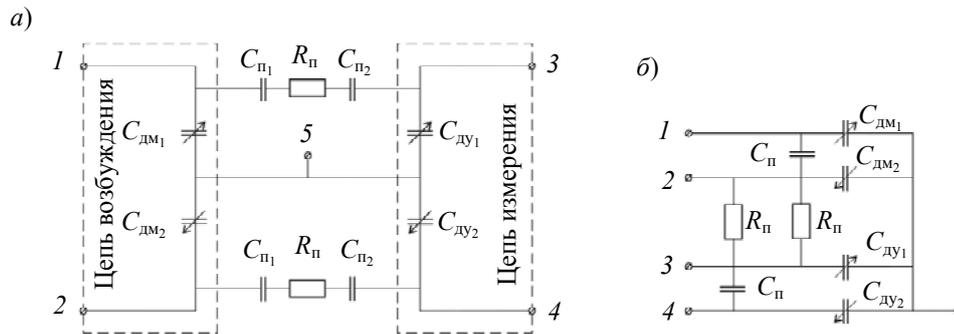


Рис. 1

Цепь возбуждения и цепь измерения имеют общую точку, обозначенную на рис. 1 как зажим 5, а для независимого преобразования их емкостей используют два источника напряжения, различающиеся частотами колебаний, которые выступают в роли несущих в процессе преобразования. Изменение значения емкостей ЧЭ приводит к модуляции токов, протекающих через них к входам усилителей, подключенных к зажимам 1—4. Из рис. 1, б видно, что часть тока из цепи возбуждения поступает в цепь измерения, и наоборот. Это обстоятельство требует использования в ММГ синхронного детектирования в каждой из цепей конденсаторов со своей постоянной времени, следовательно, для устойчивости ММГ необходимо обеспечить развязку контуров уравнивания по времени. Поэтому при разработке новых структур ИП для ММГ необходимо измерять $C_{\text{дм}_1}$, $C_{\text{дм}_2}$, $C_{\text{ду}_1}$ и $C_{\text{ду}_2}$ отдельно на одной частоте.

В известных измерительных преобразователях, входящих в состав разрабатываемых ММГ, емкости преобразуются в напряжение на основе или усилителя заряда, или трансрезисторного усилителя [8—10]. В обоих случаях такие преобразователи пассивной электрической величины в активную величину представляют собой дифференциатор (это обуславливает дополнительные требования к обеспечению устойчивости). В то же время преобразование параметров цепи возбуждения и цепи измерения осуществляют не связанные между собой узлы, причем несущие частоты также не совпадают, хотя принцип преобразования один и тот же.

На рис. 2 приведена функциональная схема преобразователя цепи измерения ММГ [11], которая обеспечивает преобразование разности емкостей C_1 и C_2 в напряжение $U_{\text{вых}}$. Емкости цепи измерения ММГ C_1 и C_2 преобразуются на усилителях Y_1 и Y_2 в напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 соответственно:

$$\dot{U}_1 = j\omega C_1 R_1 \dot{U}_{\text{вх}} \quad \text{и} \quad \dot{U}_2 = j\omega C_2 R_2 \dot{U}_{\text{вх}},$$

а на усилителе Y_3 реализуется вычитание этих напряжений

$$\dot{U}_3 = j\omega C_1 R_1 \dot{U}_{\text{вх}} (C_2 - C_1).$$

Выходной сигнал, формируемый квадратурным фазочувствительным выпрямителем, равен

$$U_{\text{ВЫХ}} = \text{Im} \dot{U}_{\text{ВХ}} \dot{U}_3 = \omega C_1 R_1 U_{\text{ВХ}} (C_2 - C_1),$$

он пропорционален только разности емкостей, а не информативному параметру дифференциального ПП: $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$. Преобразование именно информативного параметра позволяет исключить или существенно уменьшить погрешности, вызванные как паразитными связями между электродами ЧЭ, так и изменениями геометрических размеров электродов при изменении температуры ММГ, а также исключить влияние диэлектрической проницаемости межэлектродной среды или степени ее вакуумирования на выходной сигнал ММГ. Другим фактором, влияющим на погрешность рассматриваемого преобразователя, является преобразование емкостей ПП усилителями, параметры которых не идентичны, следовательно, вносимые ими погрешности различаются, а именно от их разности зависит результирующая погрешность ММГ.

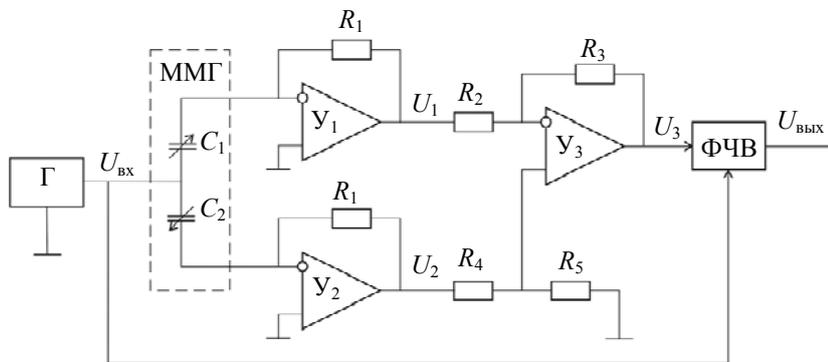


Рис. 2

Усовершенствованный вариант ИП представлен на рис. 3 [12], где Σ_1 и Σ_2 — сумматоры, причем первый из них формирует разность напряжений, пропорциональных емкостям ММГ, а второй — их сумму. Выходное напряжение измерителя отношения напряжений (ИОН) $U_{\text{ВЫХ1}}$ пропорционально информативному параметру ПП емкостного ММГ

$$U_{\text{ВЫХ1}} = U_{\text{ВХ}} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

и не зависит ни от диэлектрической проницаемости межэлектродной среды, ни от температурных изменений геометрических размеров ЧЭ, ни от начального значения емкостей C_1 и C_2 .

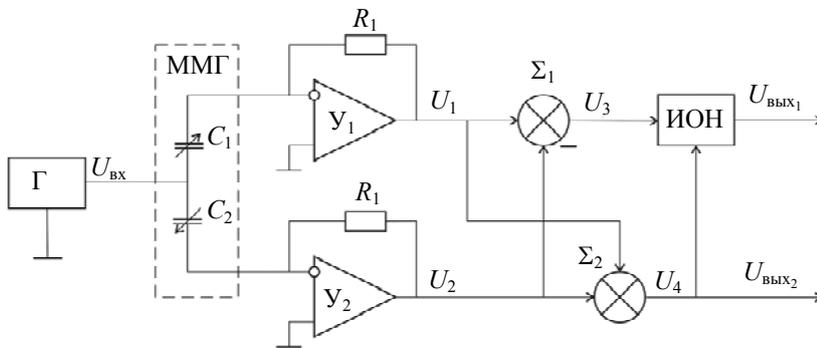


Рис. 3

Второй выходной сигнал — напряжение $U_{\text{ВЫХ2}}$ рассматриваемого ИП — прямо пропорционален сумме начальных значений емкостей C_1 и C_2 , которая определяется начальным

значением зазора между электродами конденсаторов ЧЭ и влияет на наклон функции преобразования ММГ компенсационного типа. Для ММГ прямого преобразования второй выходной сигнал используется при стабилизации первичных колебаний, причем его можно использовать, например, в цепи коррекции погрешности, вызванной температурным смещением инерционной массы.

Оба рассмотренных выше измерительных преобразователя используются и в цепи возбуждения, и в цепи измерения (см. рис. 1). Однотипность структур используемых в ММГ измерительных преобразователей существенно упрощает процесс проектирования всей измерительной системы емкостного гироскопа, но создает дополнительные проблемы по развязке контуров уравнивания, необходимой для обеспечения заданной точности и устойчивости работы систем регулирования. На точность работы гироскопа влияет наличие большого количества связей между обкладками конденсаторов ЧЭ [11] цепи измерения и цепи возбуждения, которые объединены на эквивалентной схеме замещения (см. рис. 1) в виде емкостей и сопротивления потерь: $C_{п1}$, $C_{п2}$, $R_{п}$. В измерительном преобразователе гироскопа они подключены между входами усилителей ИП цепи возбуждения и ИП цепи измерения, имеющих две общие точки: общая шина и электрод, расположенный на инерционной массе, причем значение емкостей $C_{п1}$ и $C_{п2}$ во много раз превосходит значение искомым емкостей ММГ [11]. Это приводит к взаимному влиянию на работу каждой из цепей и к необходимости преобразования информативного параметра ПП гироскопа при больших значениях $C_{п1}$ и $C_{п2}$. Для повышения помехоустойчивости ИП применяется фазочувствительное выпрямление (см. рис. 2), что, однако, приводит к увеличению постоянной времени передаточной функции ММГ.

Исключить влияние паразитных емкостей и сопротивлений схемы замещения ПП и неидеальности усилителей ИП можно, используя временное разделение каналов преобразования искомым параметров с последующей обработкой полученных результатов преобразования. Для разделения каналов во времени используют коммутацию каналов (метод коммутации) либо сдвиг по фазе периодических напряжений, подаваемых на элементы ПП (метод фазового разделения каналов), либо подачу периодических напряжений разной формы, но одинаковой частоты (метод полигармонических тест-сигналов) [13, 14], причем оптимальным вариантом для ММГ является фазовое разделение каналов. При реализации любого из методов временного разделения каналов коэффициент отрицательной обратной связи усилителя за время измерения остается неизменным. Именно это обеспечивает возможность исключить погрешность, вызванную неидеальностью усилителя [5, 13—16] и, следовательно, позволяет снизить к нему требования по коэффициенту усиления и по входному сопротивлению. На рис. 4, а приведена функциональная схема ИП, в основе принципа действия которого лежит метод фазового разделения каналов (АЛУ — арифметическое логическое устройство; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; УВХ — устройство выборки и хранения; БУ — блок управления; Кл.1—Кл.4 — ключи).

Под воздействием сигнала с блока управления ключи, подавая к конденсаторам ММГ опорное напряжение амплитудой $\pm U_{оп}$, формируют тест-сигналы $U_1—U_4$ (рис. 4, б), необходимые для разделения каналов (в пределах полупериода тест-сигнала) одновременного преобразования емкостей ПП в составляющие выходного напряжения усилителя U_y . В результате все конденсаторы ПП гироскопа одновременно подключены к входу усилителя У, выходное напряжение которого определяется как

$$U_y(t) = - \left(U_1(t) \frac{C_{дм1}}{C} + U_2(t) \frac{C_{дм2}}{C} + U_3(t) \frac{C_{ду1}}{C} + U_4(t) \frac{C_{ду2}}{C} \right) (1 + \gamma)$$

или

$$U_y(t) = \begin{cases} \frac{-U_{оп}(1+\gamma)}{C} (C_{дм1} - C_{дм2} - C_{ду1} - C_{ду2}), & 0 < t < t_1, \\ \frac{-U_{оп}(1+\gamma)}{C} (C_{дм1} + C_{дм2} - C_{ду1} - C_{ду2}), & t_1 < t < t_2, \\ \frac{-U_{оп}(1+\gamma)}{C} (C_{дм1} + C_{дм2} + C_{ду1} - C_{ду2}), & t_2 < t < t_3, \\ \frac{-U_{оп}(1+\gamma)}{C} (C_{дм1} + C_{дм2} + C_{ду1} + C_{ду2}), & t_3 < t < t_4, \end{cases}$$

где γ — погрешность преобразования емкостей в напряжение, обусловленная неидеальностью усилителя.

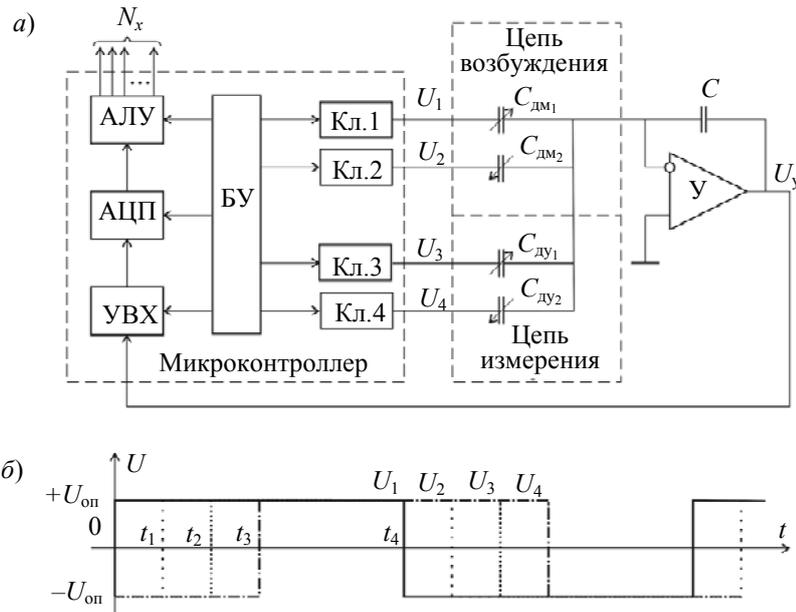


Рис. 4

Паразитные связи при этом шунтированы малыми выходными сопротивлениями источников напряжения ($U_1 — U_4$).

По сигналу с БУ устройство выборки и хранения запоминает значения U_{y_i} выходного напряжения усилителя в моменты времени $t_1 > t > 0$, $t_2 > t > t_1$, $t_2 > t > t_3$ и $t_3 > t > t_4$, которые АЦП преобразует в код. Оцифрованное значение выходного напряжения усилителя поступает в АЛУ, где по заданной программе вычисляется выходное напряжение гироскопа. В результате получим систему

$$\left. \begin{aligned} U_{y_1} &= a_{11}C_{дм1} + a_{12}C_{дм2} + a_{13}C_{ду1} + a_{14}C_{ду2}, \\ U_{y_2} &= a_{21}C_{дм1} + a_{22}C_{дм2} + a_{23}C_{ду1} + a_{24}C_{ду2}, \\ U_{y_3} &= a_{31}C_{дм1} + a_{32}C_{дм2} + a_{33}C_{ду1} + a_{34}C_{ду2}, \\ U_{y_4} &= a_{41}C_{дм1} + a_{42}C_{дм2} + a_{43}C_{ду1} + a_{44}C_{ду2}, \end{aligned} \right\}$$

уравнения которой являются линейными, а их число определяется числом неизвестных (искомых) параметров ПП, при этом коэффициенты a_{ij} равны:

$$\begin{aligned} a_{11} &= k, a_{12} = -k, a_{13} = -k, a_{14} = -k, \\ a_{21} &= k, a_{22} = k, a_{23} = -k, a_{24} = -k, \\ a_{31} &= k, a_{32} = k, a_{33} = k, a_{34} = -k, \end{aligned}$$

$$a_{41} = k, a_{42} = k, a_{43} = k, a_{44} = k,$$

где $k = -U_{\text{оп}}(1 + \gamma) / C$.

Решив систему линейных уравнений относительно $C_{\text{дм}_1}$, $C_{\text{дм}_2}$, $C_{\text{ду}_1}$, $C_{\text{ду}_2}$, получим:

$$C_{\text{дм}_1} = \frac{U_{y_1} + U_{y_4}}{2k}, C_{\text{дм}_2} = \frac{-U_{y_1} + U_{y_2}}{2k}, C_{\text{ду}_1} = \frac{-U_{y_2} + U_{y_3}}{2k}, C_{\text{ду}_2} = \frac{-U_{y_3} + U_{y_4}}{2k}.$$

Из этих выражений следует, что значения емкостей ПП определяются не только измеряемой физической величиной, но и параметрами измерительного канала. Пропорциональность выходного сигнала ИП информативному параметру дифференциального емкостного датчика вида $(C_1 - C_2) / (C_1 + C_2)$ позволяет исключить влияние коэффициента k и обеспечивает инвариантность к параметрам усилителя и кабельной перемычки, а также к нестабильности амплитуды опорного напряжения $\pm U_{\text{оп}}$:

$$N_{x_1} = \frac{C_{\text{дм}_1} - C_{\text{дм}_2}}{C_{\text{дм}_1} + C_{\text{дм}_2}} = \frac{2U_{y_1} - U_{y_2} + U_{y_4}}{U_{y_4} - U_{y_2}} \quad \text{и} \quad N_{x_2} = \frac{C_{\text{ду}_1} - C_{\text{ду}_2}}{C_{\text{ду}_1} + C_{\text{ду}_2}} = \frac{-U_{y_2} + 2U_{y_3} - U_{y_4}}{-U_{y_2} + U_{y_4}}.$$

В рассматриваемом случае параметрический преобразователь ММГ является многомерным объектом измерения [7] с четырьмя выходными параметрами, два из которых ($C_{\text{ду}_1}$ и $C_{\text{ду}_2}$) используются для получения информации об измеряемой гироскопом физической величине, а два других ($C_{\text{дм}_1}$ и $C_{\text{дм}_2}$) применяются в цепи стабилизации первичных колебаний. У двухосевого гироскопа шесть выходных параметров ПП.

Все емкости параметрического преобразователя ММГ одинаково зависят от амплитуды первичных колебаний инерционной массы, в гироскопе имеется система стабилизации этой амплитуды со своим запаздыванием, ограничивающим динамические свойства ММГ. Приведенный на рис. 4 измерительный преобразователь позволяет осуществить логотрическую коррекцию погрешности, вызванной нестабильностью амплитуды колебаний инерционной массы, выполняя операцию деления N_{x_2} на N_{x_1} [17]. При этом микроконтроллер рассчитывает выходной сигнал гироскопа $N_{\text{вых}}$ по формуле:

$$N_{\text{вых}} = \frac{-U_{y_2} + 2U_{y_3} - U_{y_4}}{2U_{y_1} - U_{y_2} + U_{y_4}}.$$

Такой подход позволяет не применять стабилизацию первичных колебаний, что расширяет динамический диапазон работы гироскопа.

Для преобразования n выходных параметров многомерного ПП ($C_1 \dots C_n$) в активную электрическую величину следует использовать n тест-сигналов, формируемых способом, представленным на рис. 4, б. А для определения значений n искомых параметров необходима система из n уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_{y_1} &= a_{11}C_1 + a_{12}C_2 + a_{13}C_3 + \dots + a_{1n}C_n, \\ U_{y_2} &= a_{21}C_1 + a_{22}C_2 + a_{23}C_3 + \dots + a_{2n}C_n, \\ &\dots \\ U_{y_n} &= a_{41}C_1 + a_{42}C_2 + a_{43}C_3 + \dots + a_{4n}C_n, \end{aligned} \right\}$$

решение которой позволит вычислить выходной сигнал через найденные параметры многомерного ПП ($C_1 \dots C_n$).

Таким образом, предложенный ИП емкостного ММГ с фазовым разделением каналов, осуществляя преобразование информативного параметра, обеспечивает логотрическую коррекцию погрешности, вызванной нестабильностью амплитуды колебаний инерционной массы, и инвариантность к параметрам измерительного канала и паразитным емкостям. Представленный подход может быть использован при построении чувствительного элемента МЭМС-гироскопа в интегральном исполнении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пешихонов В. Г.* Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1. С. 3—17.
2. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. *Б. С. Алёшина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 424 с. ISBN 5-9221-0735-6.
3. *Аверин И. А., Пауткин В. Е.* Особенности формирования микроэлектромеханических элементов первичных преобразователей информации // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 2. С. 24—32.
4. *Бохов О. С., Спивак А. М., Орехов Ю. А.* Миниатюрные навигационно-ориентационные интегрированные модули на основе микроэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 12(149). С. 55—60.
5. *Arbuzov V. P.* The use of time division of the channels in capacitive and inductive sensor measuring circuits // Measurement Techniques. 2007. Vol. 50, N 7. P. 752—757. DOI: 10.1007/s11018-007-0144-x.
6. *Моисеев Н. В.* Микромеханический гироскоп компенсационного типа с расширенным диапазоном измерения: Автореф. дис. канд. техн. наук. СПб, 2015.
7. *Arbuzov V. P., Vodovskova P. N., Mishina M. A.* The use of phase division of the channels of measuring circuits to measure the parameters of multidimensional objects // Measurement techniques. 2014. Vol. 57, N 6. P. 621—626. DOI: 10.1007/s11018-014-0508-y.
8. *Распопов В. Я.* Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
9. *Белоус И. А., Емельянов В. А., Дрозд С. Е.* и др. Схемотехническое конструирование БИС преобразователя емкость—напряжение для микромеханических датчиков // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 8. С. 15—19.
10. *Xie H.* Gyroscope and micromirror design using vertical axis CMOS-MEMS actuation and sensing. Carnegie Mellon University, 2002. 246 p.
11. *Некрасов Я. А., Беляева Т. А., Беляев Я. В., Багаева С. В.* Электрические схемы емкостных датчиков микромеханического гироскопа RR-типа // Научное приборостроение. 2008. Т. 18, № 1. С. 91—97.
12. *Люкшионков Р. Г., Моисеев Н. В.* Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 4 (74). С. 67—72.
13. *Arbuzov V. P.* Time division of the channels of the measuring circuits of capacitive and inductive sensors // Measurement techniques. 2009. Vol. 52, N 5. P. 528—535. DOI: 10.1007/s11018-009-9294-3.
14. *Arbuzov V. P., Mishina M. A.* System of basis function of the functions for the measurement circuit of a sensor with temporally separated channels // Measurement techniques. 2012. Vol. 55, N 9. P. 978—983. DOI: 10.1007/s11018-012-0085-x.
15. *Arbuzov V. P., Larkin S. E., Mishina M. A.* Phase separation of sensor measuring circuit channels // Measurement techniques. 2013. Vol. 55, N 11. P. 1247—1251. DOI: 10.1007/s11018-013-0115-3.
16. *Arbuzov V. P., Mishina M. A.* Phase division of the channels in capacitive sensor measuring circuits // Measurement Techniques. 2009. Vol. 52, N 9. P. 965—970. DOI: 10.1007/s11018-009-9377-1.
17. *Люкшионков Р. Г.* Термокомпенсация в микромеханических гироскопах с контуром стабилизации амплитуды первичных колебаний: Автореф. дис. канд. техн. наук. СПб, 2016.

Сведения об авторах

Виктор Петрович Арбузов

— д-р техн. наук, доцент; Пензенский государственный университет, кафедра автоматики и телемеханики; E-mail: arbuzov_vp@mail.ru

Марина Александровна Мишина — канд. техн. наук; Пензенский государственный университет, кафедра автоматизации и телемеханики; E-mail: marina_mishina81@mail.ru

Рекомендована кафедрой
автоматики и телемеханики

Поступила в редакцию
01.04.14 г.

Ссылка для цитирования: Арбузов В. П., Мишина М. А. Измерительные преобразователи емкостных микромеханических гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 12. С. 1138—1145.

MEASURING TRANSDUCERS FOR CAPACITIVE MICROMECHANICAL GYROSCOPES

V. P. Arbuzov, M. A. Mishina

Penza State University, 440026, Penza, Russia

E-mail: arbuzov_vp@mail.ru

Equivalent circuits are considered for replacement the capacitive micromechanical gyroscope. Measuring convertors circuit used in gyroscopes are analyzed. In order to exclude the influence of parasitic capacitances and resistances of the parametric transformer replacement circuit and the imperfection of the measuring transducer amplifiers, the use of time separation of the required parameters conversion channels is suggested. A microprocessor-based measuring convertor circuit implementing the method of phase separation of the channels is developed. An algorithm for computing an output signal proportional to the differential sensor informative parameter, is presented.

Keywords: capacitive micromechanical gyroscope, equivalent circuit, informative parameter, measuring converter, error correction, phase separation of the channels

Data on authors

- Viktor P. Arbuzov** — Dr. Sci., Associate Professor; Penza State University, Department of Automation and Remote Control; E-mail: arbuzov_vp@mail.ru
- Marina A. Mishina** — PhD; Penza State University, Department of Automation and Remote Control; E-mail: marina_mishina81@mail.ru

For citation: Arbuzov V. P., Mishina M. A. Measuring transducers for capacitive micromechanical gyroscopes. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 12. P. 1138—1145 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-12-1138-1145