

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ И ГИРОСКОПОВ

В. П. АРБУЗОВ

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

Рассмотрены измерительные цепи дифференциальных емкостных параметрических преобразователей, предназначенных для съема информации о колебаниях инерционной массы акселерометров или гироскопов. Проведен анализ погрешности измерительной цепи на основе операционного усилителя и намечены пути уменьшения каждой из рассмотренных составляющих результирующей погрешности. Приведены схемы измерительных цепей, обеспечивающих преобразование информативного параметра дифференциального емкостного датчика и коррекцию погрешности, обусловленной неидеальностью операционного усилителя. Отмечено, что область применения измерительных цепей без операционного усилителя ограничена узким диапазоном изменения рабочих емкостей; структуры, построенные на основе операционного усилителя, имеют линейную функцию преобразования независимо от девиации рабочих емкостей.

Ключевые слова: измерительная цепь, емкостный дифференциальный датчик, акселерометр, гироскоп, погрешность, фазовое разделение каналов

Введение. Емкостные параметрические преобразователи датчиков физических величин могут работать в широком температурном диапазоне и характеризуются высокими метрологическими характеристиками и малым энергопотреблением. Множество различных измеряемых объектов и условий их эксплуатации определяет многообразие реализаций как параметрических преобразователей датчиков, так и измерительных цепей, причем в одних случаях это может быть моноблок, а в других — параметрический преобразователь, соединенный с измерительной цепью кабелем связи. Коррекция погрешности, вызванной емкостью соединительного кабеля, приводит к структурной избыточности измерительной цепи, а создание моноблока требует изготовления в одном корпусе или на одной подложке упрощенного варианта измерительной цепи. Эти факторы обуславливают актуальность исследований измерительных цепей емкостных датчиков (акселерометров и гироскопов) с единых позиций.

Параметрические преобразователи емкостных акселерометров и гироскопов, выполненные по технологии МЭМС, имеют, как правило, дифференциальную конструкцию, состоящую из двух неподвижных электродов конденсатора, между которыми на инерционной массе расположен подвижный электрод. При изменении значения измеряемого датчиком параметра инерционная масса перемещается между неподвижными электродами, и емкости C_1 и C_2 , образованные неподвижным электродом и подвижными электродами, изменяются. В отличие от акселерометра, в гироскопе инерционная масса дополнительно совершает вынужденные виброперемещения вокруг или вдоль оси, перпендикулярной одной или двум осям гироскопа, но информативный параметр параметрического преобразователя гироскопа, так же как акселерометра, равен отношению разности емкостей C_1 и C_2 рабочих конденсаторов к их сумме, т.е. $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$ [1—3], который обозначим как $P_{\text{инф}}$.

Дифференциальная конструкция параметрического преобразователя (ПП) любого датчика, по сравнению с другими конструкциями, позволяет:

— повысить линейность функции преобразования;

- увеличить чувствительность датчика;
- уменьшить влияние условий эксплуатации на погрешность датчика;
- исключить влияние, например диэлектрической проницаемости среды в межэлектродном пространстве (для емкостных датчиков), магнитной проницаемости магнитопровода (для индуктивных и магнитострикционных датчиков), удельного сопротивления резисторов (для тензорезисторных и терморезисторных датчиков), на точность.

Преобразование измеряемого датчиком параметра в относительную величину, равную $P_{инф}$, обусловило появление квазидифференциальных конструкций. Наличие емкости C_0 в квазидифференциальной конструкции не столько усложняет параметрический преобразователь, сколько затрудняет его реализацию, например, в емкостных датчиках, выполненных по технологии МЭМС [4]. Однако выходной сигнал как дифференциальных, так и квазидифференциальных емкостных датчиков характеризуется либо отношением $(C_1 - C_2) / (C_1 + C_2)$, либо отношением $(C_x - C_0) / C_x$, либо отношением C_0 / C_x , где C_x — емкость рабочего конденсатора. В некоторых публикациях такой сигнал называют ратиометрическим [5], хотя практически все измерительные цепи параметрических датчиков осуществляют относительное измерение, поскольку их выходной сигнал представляет собой отношение параметров чувствительного элемента, причем один из параметров для данного датчика является опорным [6, 7].

Измерительные цепи дифференциальных емкостных датчиков (см. рис. 1). Простейшей измерительной цепью дифференциального емкостного датчика является мост переменного тока (рис. 1, а) [8], состоящий из двух рабочих конденсаторов датчика (C_1 и C_2) и двух одинаковых резисторов R , сопротивление которых много меньше емкостных сопротивлений рабочих конденсаторов.

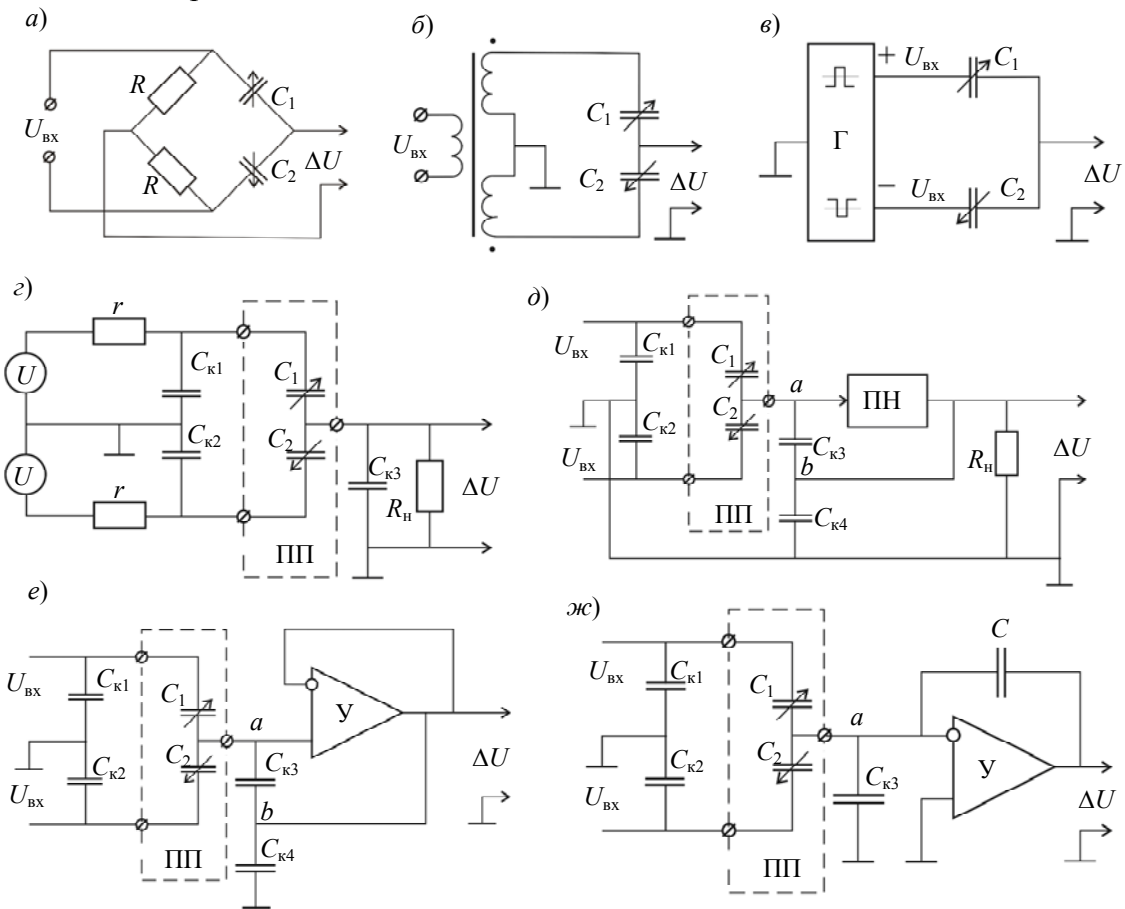


Рис. 1

Как правило, $C_1 = C_0 + \Delta C$, а $C_2 = C_0 - \Delta C$, где ΔC — изменение емкости рабочего конденсатора [2]. Выходной сигнал, снимаемый с диагонали моста, пропорционален информативному параметру датчика

$$\Delta U = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_{\text{вх}} \quad \text{или} \quad \Delta U = \frac{\Delta C}{C_0} U_{\text{вх}}$$

при бесконечно большом сопротивлении нагрузки. Кроме того, приведенное выражение справедливо при отсутствии кабеля, соединяющего конденсаторы чувствительного элемента с мостом, емкости которого, шунтируя диагонали моста, приводят к погрешности датчика.

Следующая модификация измерительных цепей дифференциальных емкостных датчиков заключалась в применении трансформаторов с тесной индуктивной связью для реализации двух плеч моста (рис. 1, б) [9], внутреннее сопротивление которых стремится к нулю. В результате две емкости кабеля шунтируются малыми внутренними сопротивлениями вторичных обмоток трансформатора, наличие которого позволяет обеспечить гальваническую развязку цепи выходного сигнала от цепи питания моста. Такие измерительные цепи использовались в емкостных инклинометрах, значения емкостей рабочих конденсаторов которых зависят от наклона изделия.

Измерительная цепь, приведенная на рис. 1, в, отличается от рассмотренной лишь тем, что напряжения, подаваемые на емкостный полумост от генератора Г, представляют собой разнополярные импульсы прямоугольной формы амплитудой $\pm U_{\text{вх}}$, сдвинутые относительно друг друга на половину периода. Такая измерительная цепь осуществляет первичное преобразование информативного параметра $P_{\text{инф}}$ в напряжение в интегральных микромеханических акселерометрах и гироскопах, выпускаемых компанией „Analog Devices“ [10—14]. Выходные параметры этих изделий определяются последующим преобразованием полученного напряжения в один из унифицированных сигналов. Такие измерительные цепи составляют основу интегральных датчиков ускорения и положения.

На рис. 1, г приведена эквивалентная схема замещения рассмотренных выше измерительных цепей, учитывающая выходное сопротивление r генератора, емкости соединительных кабелей $C_{\text{к1}} \div C_{\text{к3}}$ и сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$.

Каждая из рассмотренных измерительных цепей обеспечивает преобразование информативного параметра $P_{\text{инф}}$ в напряжение ΔU с его последующим синхронным или фазочувствительным выпрямлением. Однако это справедливо при $r \rightarrow 0$, $R_{\text{н}} \rightarrow \infty$ и отсутствии емкостей кабеля, т.е. при $C_{\text{к1}} = C_{\text{к2}} = C_{\text{к3}} = 0$.

Если емкости $C_{\text{к1}}$ и $C_{\text{к2}}$ шунтированы малым выходным сопротивлением генератора, то емкость $C_{\text{к3}}$ подключена к диагонали моста и шунтирует его выходной сигнал, что обуславливает погрешность преобразования информативного параметра датчика в напряжение. Значение этой погрешности зависит от соотношения $C_0 / C_{\text{к3}}$. Одним из путей коррекции указанной погрешности является (традиционное для мостов переменного тока) применение кабеля с двойным экранированием. В этом случае между токоведущей жилой кабеля и землей появляется дополнительный экран и, как следствие, дополнительная емкость $C_{\text{к4}}$ между экранами (рис. 1, д) кабеля. В результате уменьшается значение емкости, шунтирующей выходной сигнал, а следовательно, уменьшается погрешность, вызванная емкостью кабеля. Для дальнейшего уменьшения влияния емкости $C_{\text{к3}}$ на погрешность преобразования в измерительную цепь вводится повторитель напряжения (ПН), между эквипотенциальными точками a и b которого (рис. 1, д, е) и подключают $C_{\text{к3}}$. Поскольку потенциалы в точках a и b равны, то через емкость кабеля $C_{\text{к3}}$ ток не течет, а значит, отсутствует рассматриваемая погрешность.

Самый распространенный вариант измерительной цепи дифференциальных емкостных датчиков представлен на рис. 1, ж [5, 8, 10—15], причем на рабочие емкости конденсатора может подаваться напряжение $U_{вх}$ как постоянного, так и переменного тока. В первом случае изменение значений емкостей рабочих конденсаторов приводит к модуляции тока в цепи заряда конденсатора, включенного в обратную связь усилителя [10, 15]. Во втором варианте модулируется переменное напряжение [16, 17], а измерительная цепь представляет собой сумматор напряжений. В обоих случаях емкость кабеля $C_{кз}$ подключена к инвертирующему входу операционного усилителя, потенциал которого (точка a на рис. 1, ж) стремится к нулю, а следовательно, влияние емкости кабеля существенно меньше, чем в мостовых измерительных цепях; при этом выходное напряжение снимается с выхода усилителя, выходное сопротивление которого стремится к нулю.

Наиболее широкое применение в зарубежных акселерометрах и гироскопах нашел первый вариант, где измерительная цепь расположена либо на одном кристалле с чувствительным элементом (system-on-chip), либо в одном с ним корпусе при $C_{кз} \ll C_0$ [11, 12]. В отечественных акселерометрах и гироскопах, как правило, используется второй вариант, когда измерение информативного параметра емкостного дифференциального датчика осуществляется при переменном токе. Однотипность систем съема информации о колебаниях инерционной и вибрирующей массы по всем осям датчика и наличие одного общего электрода (проводящий ротор) для всех емкостных датчиков [3] обусловили применение интегрирующих усилителей для преобразования изменения емкостей дифференциальных датчиков в напряжение, различающихся только постоянными времени. При таком проектировании акселерометров и гироскопов необходимо решить задачу оценивания предельно минимальных погрешностей, значения которых определяются как механикой, так и электроникой.

Анализ погрешности системы съема информации. При оценивании погрешности устройства в целом особое значение имеет емкостная система съема информации или измерительные преобразователи информативных параметров емкостных датчиков. На рис. 2 приведена модель емкостной системы съема информации, где источники погрешности интерпретированы шумами [1]: $\delta_{iш1}$, $\delta_{iш2}$ — случайные шумовые токи утечки соответственно через емкости C_1 и C_2 ; $\delta_{Uш1}$, $\delta_{Uш2}$ — шумы соответствующих источников опорного напряжения U_1 и U_2 ; $\delta_{UшУ}$ — шум усилителя, приведенный к его входу; $\delta_{UшZ}$ — шум эквивалентного входного сопротивления Z усилителя.

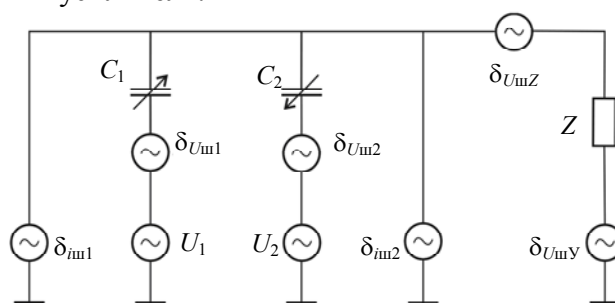


Рис. 2

Рассмотрим каждый из источников возникновения погрешности. Схема замещения дифференциального емкостного параметрического преобразователя датчика в зависимости от его габаритов содержит от 12 до 30 элементов (резисторов и конденсаторов) [3], емкости C_1 , C_2 являются некоторыми эквивалентными параметрами, а шумы $\delta_{iш1}$, $\delta_{iш2}$ отражают токи утечки в вакуумном кремниевом механизме, характеризую „чистоту“ процесса изготовления изделия. Нестабильность напряжений U_1 и U_2 — $\delta_{Uш1}$ и $\delta_{Uш2}$ — обусловлена наличием погрешности формирования опорных напряжений разной полярности. Неидеальность операционного

усилителя, на основе которого выполнен интегрирующий усилитель, приводит к нестабильности входного сопротивления усилителя ($\delta_{U_{шZ}}$) и нелинейности коэффициента усиления усилителя ($\delta_{U_{шY}}$), а следовательно, к погрешности преобразования разности емкостей C_1 и C_2 в напряжение. Анализ модели емкостной системы (см. рис. 2) показывает, что для уменьшения погрешности датчика (акселерометра или гироскопа) необходимо, во-первых, обеспечить формирование образцовых напряжений U_1 и U_2 с использованием одного опорного напряжения; во-вторых, использовать для создания интегратора операционные усилители, охваченные безынерционной обратной связью; в-третьих, осуществить отдельный отсчет емкостей C_1 и C_2 независимо от сопротивлений утечек и, в-четвертых, использовать структурные методы повышения точности для уменьшения или исключения погрешности, обусловленной неидеальностью операционного усилителя.

Перечисленные пути повышения точности частично используются в аналоговых измерительных цепях гироскопов. В измерительной цепи, рассмотренной в работе [16], уменьшены погрешности $\delta_{i_{ш1}}$ и $\delta_{i_{ш2}}$, обусловленные токами утечек конденсаторов, за счет использования фазочувствительного выпрямителя, а также погрешности, вызванные нестабильностью напряжений, подаваемых на конденсаторы датчика. Другой пример — универсальный преобразователь [17], на основе которого созданы измерительные цепи емкостных датчиков, в том числе с дифференциальной конструкцией параметрического преобразователя. На рис. 3 приведена функциональная схема аналоговой измерительной цепи дифференциального емкостного датчика [18], в которой устранены некоторые недостатки рассмотренных выше измерительных цепей.

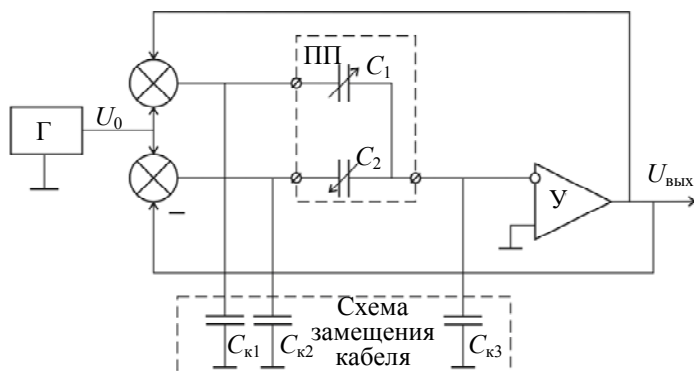


Рис. 3

На емкости C_1 , C_2 параметрического преобразователя измерительной цепи поступают напряжения, сформированные выходным напряжением генератора U_0 , и, следовательно, их нестабильности или шумы будут равны, т.е. $\delta_{U_{ш1}} = \delta_{U_{ш2}}$. Поэтому выходное напряжение измерительной цепи $U_{\text{вых}}$ не зависит от нестабильности выходных напряжений сумматора и описывается выражением [18]

$$U_{\text{вых}} = U_0 \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \left(1 - \frac{1}{1 + K_y \beta} \right),$$

где K_y — коэффициент усиления операционного усилителя на рабочей частоте; β — коэффициент отрицательной обратной связи усилителя:

$$\beta = \frac{C_1 + C_2}{2(C_1 + C_2) + C_{к3}},$$

а выражение для погрешности измерительной цепи имеет следующий вид:

$$\gamma = -\frac{1}{1 + K_{\gamma}\beta}.$$

Емкости кабеля $C_{к1}$ и $C_{к2}$ шунтированы малыми выходными сопротивлениями сумматоров и не вносят погрешность в выходное напряжение, а емкость кабеля $C_{к3}$ шунтирует входное сопротивление операционного усилителя и приводит к появлению погрешности измерительной цепи.

Ни одна из рассмотренных выше измерительных цепей не исключает погрешности, обусловленные неидеальностью операционного усилителя, а именно, нестабильностью параметра $\delta_{U_{шZ}}$, а также нелинейностью и конечностью коэффициента $\delta_{U_{шY}}$. Исключить влияние неидеальности операционного усилителя измерительной цепи можно, используя временное разделение каналов C_1 и C_2 с последующей обработкой полученных результатов. Исследование, описывающее применение микропроцессорной измерительной цепи для преобразования информации об амплитудах первичных и вторичных колебаний в емкостном микромеханическом гироскопе RR-типа, представлено в работе [19].

Заключение. Каждая из рассмотренных в статье измерительных цепей обеспечивает преобразование относительного приращения рабочих емкостей акселерометров и гироскопов, имеющих дифференциальную конструкцию параметрического преобразователя, при этом отмечается следующее:

— область применения измерительных цепей без операционного усилителя ограничена узким диапазоном изменения рабочих емкостей;

— структуры, построенные на основе операционного усилителя, имеют линейную функцию преобразования независимо от девиации рабочих емкостей и их можно располагать совместно с параметрическим преобразователем (system—on—chip);

— измерительные цепи, обеспечивающие коррекцию погрешности, вызванной параметрами кабеля, необходимо использовать, когда параметрический преобразователь и измерительная цепь соединены между собой кабелем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под. ред. Б. С. Алешина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 424 с.
2. *Топильский В. Б.* Микроэлектронные измерительные преобразователи: Учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 493 с.
3. *Распопов В. Я.* Микромеханические приборы: Учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
4. Элементы концепции построения интеллектуальных систем мониторинга и контроля изделий ракетно-космической техники и объектов наземно-космической инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 2 (24). С. 5—13.
5. *Карпов В. А., Хананов В. А.* Измерительный преобразователь дифференциального емкостного чувствительного элемента с ратиометрическим выходным сигналом // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. 2013. № 3. С. 58—62.
6. *Свистунов Б. Л.* Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 2 (20). С. 94—100.
7. *Чернецов М. В., Чураков П. П.* Инвариантное преобразование в измерительных системах с параметрическими датчиками // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1 (23). С. 11—17.
8. *Левшина Е. С., Новицкий П. В.* Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи): Учеб. пособие. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

9. Трансформаторные измерительные мосты / Ф. Б. Гриневич, А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский, М. П. Цепенко; Под ред. К. Б. Карандеева. М.: Энергия, 1970. 280 с.
10. Волович А., Волович Г. Интегральные акселерометры // Компоненты и технологии. 2002. № 1.
11. Stiction in surface micromachining / N. Tas, T. Sonnenberg, H. Jansen, R. Legtenberg, M. Elwenspoek // J. of Micromechanics and Microengineering. 1996. Vol. 6, N 4. P. 385—397.
12. Maubodian R., Howe R. T. Critical Review: Adhesion in surface micromechanical structures // J. of Vacuum Science and Technology B. 1997. Vol. 15, iss. 1. P. 1—20.
13. Аверин И. А., Пауткин В. Е. Особенности формирования микроэлектромеханических элементов первичных преобразователей информации // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 2. С. 24—32.
14. Поспелов А. В. Измерительные цепи акселерометров на переключаемых конденсаторах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2002. № 1.
15. Арбузов В. П. Структурные методы повышения точности измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков: Монография. Пенза: Инф.-изд. центр Пенз. гос. ун-та, 2008. 230 с.
16. 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.
17. Карпов В. А., Хананов В. А. Универсальный измерительный преобразователь для дифференциального чувствительного элемента // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. 2014. № 1. С. 91—96.
18. Арбузов В. П. Измерительные цепи емкостных датчиков: Монография. Пенза: Инф.-изд. центр Пенз. гос. ун-та, 2002. 134 с.
19. Арбузов В. П., Мишина М. А. Измерительные преобразователи емкостных микромеханических гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 12. С. 1138—1145.

Сведения об авторе

Виктор Петрович Арбузов

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

Поступила в редакцию
01.08.19 г.

Ссылка для цитирования: Арбузов В. П. Измерительные цепи прямого преобразования для емкостных акселерометров и гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 997—1004.

**MEASURING CIRCUITS OF DIRECT CONVERSION
FOR CAPACITIVE ACCELEROMETERS AND GYROSCOPES**

V. P. Arbuzov

*Penza State University, 440026, Penza, Russia
E-mail: arbuзов_vp@mail.ru*

Measuring circuits of differential capacitive parametric converters intended for taking information about inertial mass oscillations of accelerometers or gyroscopes are considered. Error analysis of the measuring circuit based on operational amplifier is carried out, and ways of reduction of each of the considered components of the resulting error are outlined. Schematics of measuring circuits providing transformation of informative parameter of the differential capacitive sensor and correction of the error caused by imperfection of the operational amplifier are presented. It is noted that the scope of measurement circuits without an operational amplifier is limited by a narrow range of working capacitance; structures built on an operational amplifier have a linear conversion function regardless of the deviation of the working capacitance.

Keywords: measuring circuit, capacitive differential sensor, accelerometer, gyroscope, error, channel phase separation

REFERENCES

1. Aleshin B.S., Veremeyenko K.K., Chernomorskiy A.I., ed., *Oriyentatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob"yektov: sovremennyye informatsionnyye tekhnologii* (Orientation and Navigation of Moving Objects: Modern Information Technology), Moscow, 2006, 424 p. (in Russ.)

2. Topil'skiy V.B. *Mikroelektronnyye izmeritel'nyye preobrazovateli* (Microelectronic Transducers), Moscow, 2012, 493 p. (in Russ.)
3. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskiye pribory* (Micromechanical Devices), Moscow, 2007, 400 p. (in Russ.)
4. Dmitriyenko A.G., Nikolayev A.V., Lyashenko A.V., Tyurin M.V., Yaroslavtseva D.A. *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2018, no. 2(24), pp. 5–13. (in Russ.)
5. Karpov V.A., Khananov V.A. *Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel*, 2013, no. 3, pp. 58–62. (in Russ.)
6. Svistunov B.L. *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2017, no. 2(20), pp. 94–100. (in Russ.)
7. Chernetsov M.V., Churakov P.P. *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2018, no. 1(23), pp. 11–17. (in Russ.)
8. Levshina E.S., Novitskiy P.V. *Elektricheskiye izmereniya fizicheskikh velichin (izmeritel'nyye preobrazovateli)* (Electrical Measurements of Physical Quantities (Measuring Transducers)), Leningrad, 1983, 320 p. (in Russ.)
9. Grinevich F.B., Grokhol'skiy A.L., Sobolevskiy K.M., Tsapenko M.P. *Transformatornyye izmeritel'nyye mosty* (Transformer Measuring Bridges), Karandeyev K.B., ed., Moscow, 1970, 280 p. (in Russ.)
10. Volovich A., Volovich G. *Components & Technologies*, 2002, no. 1. (in Russ.)
11. Tas N., Sonnenberg T., Jansen H., Legtenberg R., Elwenspoek M. *J. of Micromechanics and Microengineering*, 1996, no. 4(6), pp. 385–397.
12. Maubodian R., Howe R.T. *J. of Vacuum Science and Technology B*, 1997, no. 1(15), pp. 1–20.
13. Averin I.A., Pautkin V.E. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*, 2014, no. 2, pp. 24–32. (in Russ.)
14. Pospelov A.V. *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2002, no. 1. (in Russ.)
15. Arbuzov V.P. *Strukturnyye metody povysheniya tochnosti izmeritel'nykh tsepey yemkostnykh i induktivnykh datchikov* (Structural Methods for Improving the Accuracy of Measuring Circuits of Capacitive and Inductive Sensors), Penza, 2008, 230 p. (in Russ.)
16. Nekrasov Ya.A., Belyayeva T.A., Belyayev Ya.V., Bagayeva S.V. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2008, no. 1(18), pp. 91–97. (in Russ.)
17. Karpov V.A., Khananov V.A. *Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel*, 2014, no. 1, pp. 91–96. (in Russ.)
18. Arbuzov V.P. *Izmeritel'nyye tsepi yemkostnykh datchikov* (Measuring Circuits for Capacitive Sensors), Penza, 2002, 134 p. (in Russ.)
19. Arbuzov V.P., Mishina M.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 12(60), pp. 1138–1145. (in Russ.)

Data on author

Viktor P. Arbuzov — Dr. Sci., Associate Professor; Penza State University, Department of Automation and Remote control; E-mail: arbuzov_vp@mail.ru

For citation: Arbuzov V. P. Measuring circuits of direct conversion for capacitive accelerometers and gyroscopes. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 11. P. 997—1004 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-997-1004