

УДК 621.382.001.63

БИС ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЕМКОСТЬ–НАПРЯЖЕНИЕ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

А.И. БЕЛОУС¹, С.Е. ДРОЗД¹, Е.В. КОННОВ¹, Н.И. МУХУРОВ², В.А. ПЛЕБАНОВИЧ¹

¹НПЦ "Белмикросистемы" УП "Завод полупроводниковых приборов"
Корженевского, 12, Минск, 220108, Беларусь

²Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
пр. Независимости, 68, Минск, 220072, Беларусь

Поступила в редакцию 9 апреля 2008

Рассматриваются пути создания БИС преобразователя емкость–напряжение для электронной схемы микромеханического сенсора общего назначения. Предлагаемая структурная схема двухканального микромеханического сенсора может быть использована для построения миниатюрных датчиков с емкостным выходом.

Ключевые слова: микроэлектромеханические датчики, преобразователь емкость–напряжение, интегральные схемы.

Введение

В настоящее время все более широкое применение получают устройства разнообразных датчиков с применением МЭМС технологии [1–3]. Современные микроэлектромеханические системы (МЭМС), выполненные наподобие ИС, представляют собой сформированные на единой подложке датчики, актюаторы, схемы управления с размерами элементов от нескольких сотен до нескольких единиц микрон. Но в отличие от микросхем МЭМС, как правило, имеют трехмерную структуру [4]. Для их изготовления используют соответствующим образом адаптированные технологические операции микроэлектроники. Базовым материалом для 95% микромеханических приборов служит кремний. Специфические особенности технологии МЭМС касаются многих операций. Область применений изделий МЭМС непрерывно расширяется [3]. Функционирование изделий, а также их изготовление в значительной степени опирается на традиционные физические и химические процессы, явления, закономерности и свойства веществ, хотя нередко и в неожиданных сочетаниях.

Исходные данные для построения преобразователя

Для выбора схемотехнических решений реализации в БИС функций измерения изменения емкостей дифференциального конденсатора (ДК) и преобразования их в постоянное напряжение необходимо выполнить следующие требования:

- обеспечить измерение относительного изменения емкостей обкладок чувствительных элементов (ЧЭ) в диапазонах, определяемых чувствительностью элементов;
- изменение выходного напряжения должно быть прямо пропорциональным изменению емкостей обкладок ЧЭ от внешнего воздействия и отклоняться от опорного напряжения в "+" или "-" в зависимости от знака направления воздействия;

- напряжение питания — однополярное $U_{CC}=5\text{ В}\pm 10\%$;
- диапазон рабочих температур от -40 до $+85^\circ\text{C}$.

Номинальная емкость обкладок ДК может быть в пределах от единиц до десятков пФ (максимум до 100 пФ), а типовое изменение емкостей — до $\pm 30\%$ на обкладку в момент максимальных воздействий. Поэтому для выполнения адекватной накачки обкладок ДК в зависимости от его номинальной емкости нужен генератор тактовых сигналов с регулируемой частотой от 10 до 500 кГц. Генератор тактовых сигналов может быть внешним или встроенным. Внешний генератор легко настроить на заданную частоту, но это будет дополнительное устройство в составе гибридной сборки микромеханического сенсора, что экономически не выгодно. Встроенный генератор легко может быть реализован как RC-колебательный контур, но его частоту сложно изменять и она будет иметь высокую погрешность установки до $\pm 30\%$. Кроме того, простой RC-генератор является сильным источником шумов для аналоговых схем на кристалле. Для решения проблемы в НТЦ "Белмикросистемы" разработан малощумящий RC-генератор, отличающийся пилообразным напряжением в колебательном контуре для снижения уровня шумов и наличием внешнего резистора для настройки частоты.

Характеристики составляющих блоков

В соответствии с выбранным алгоритмом преобразования накачка обкладок дифференциального конденсатора производится по определенному закону. Для этого в БИС ПЕН введен блок формирования временной диаграммы, который распределяет тактовую частоту генератора между аналоговыми ключами, коммутирующими прохождение сигналов через обкладки дифференциального конденсатора и внутри БИС ПЕН. Накачка обкладок дифференциального конденсатора производится определенным напряжением накачки, которое должно быть стабильным, так как от него будут зависеть показания сенсора. Для этого в БИС ПЕН введен блок формирования стабильного напряжения накачки.

Выходное напряжение БИС ПЕН отклоняется от опорного напряжения в "+" или "-" в зависимости от знака направления воздействия. Это означает, что у БИС ПЕН должен быть блок опорного напряжения. Более того, от опорного напряжения удобно настраивать все внутренние потенциалы БИС, в том числе и напряжение накачки. Так как БИС ПЕН должна иметь однополярное напряжение питания $U_{CC}=5\text{ В}\pm 10\%$, то опорное напряжение логично установить как $\frac{1}{2}U_{CC}$ для обеспечения максимальной и симметричной области работоспособности. С точки зрения стабильности в диапазоне напряжения питания, наиболее отработанными в НТЦ "Белмикросистемы" являются источники опорного напряжения $U_{REF}=(2,5\pm 0,1)\text{ В}$. Для более точной настройки опорного напряжения в НТЦ "Белмикросистемы" имеется возможность применения установки лазерной подгонки параметров при измерениях микросхем в процессе их изготовления.

Собственно преобразование емкость–напряжение происходит в интегрирующем блоке, структурная схема которого реализует наиболее часто применяемый алгоритм преобразования, который описывается формулой

$$Y1(x)=[C_2(x)-C_1(x)]/C_0, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 — условно обозначенные обкладки дифференциального конденсатора.

Такой алгоритм легко реализуется, но имеет один существенный недостаток — преобразование имеет не высокую линейность из-за того, что интегрирующая емкость C_0 имеет фиксированное значение и не изготавливается в едином технологическом процессе с обкладками дифференциального конденсатора.

В [5] встречается другая формула преобразования:

$$Y2(x)=[C_2(x)-C_1(x)]/[C_1(x)+C_2(x)]. \quad (2)$$

Этот алгоритм существенно уменьшает нелинейность преобразования, но сложно реализуется и поэтому микросхемы с таким алгоритмом преобразования встречаются редко.

Учитывая возможности технологии изготовления дифференциального конденсатора на основе пленок анодного оксида алюминия, представляется возможным создать алгоритм пре-

образования, обладающий преимуществами алгоритма по формуле (2), но легко реализуемый в соответствии с формулой (1). Для этого в дифференциальном конденсаторе надо создать еще одну пару емкостей C_{31} и C_{32} , эквивалентную рабочей, и использовать ее в качестве интегрирующей емкости. Тогда формула преобразования будет иметь вид

$$Y3(x)=[C_2(x)-C_1(x)]/[C_{31}(x)+C_{32}(x)]. \quad (3)$$

Структурная схема универсального интегрирующего блока приведена на рис. 1. Структурная схема универсального интегрирующего блока позволяет применять либо простые дифференциальные конденсаторы первого типа, когда ключ К-выбора замкнут и вход IN2 в обрыве, либо сложные дифференциальные конденсаторы второго типа, когда ключ К-выбора разомкнут и вход IN2 подключается к настроечным емкостям.

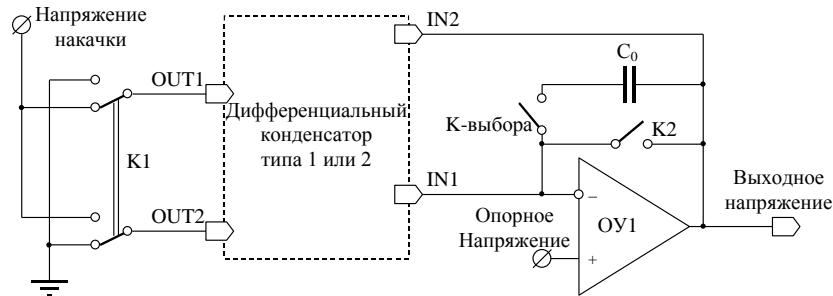


Рис. 1. Структурная схема универсального интегрирующего блока

Выходное напряжение интегрирующего блока представляет собой импульсную функцию от разности емкостей обкладок дифференциального конденсатора, поэтому его надо преобразовать в постоянное напряжение. Для этого служит блок выборки и хранения, структурная схема которого приведена на рис. 2. Ключ К1 замыкается, когда выходное импульсное напряжение достигло установившегося уровня (выборка). Выбранное ключом К1 напряжение накапливается и хранится на конденсаторе С1. Операционный усилитель ОУ1 с высоким входным сопротивлением, включенный в режиме повторителя, обеспечивает нагрузочную способность выходного постоянного напряжения.

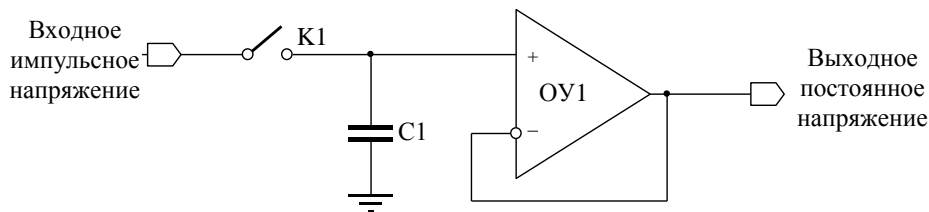


Рис. 2. Структурная схема блока выборки и хранения

Так как номинальная емкость обкладок дифференциального конденсатора может изменяться в весьма широких пределах от назначения сенсора, необходимо предусмотреть усилитель выходного напряжения с управляемым коэффициентом усиления. Коэффициент усиления выходного напряжения должен изменяться от единиц до сотен раз. Такое управление целесообразно выполнять на внешних элементах, что позволит одновременно с изменением коэффициента усиления реализовать эффективный фильтр шумов на верхних частотах с полосой, например, 100 Гц.

На рис. 3 приведена структурная схема блока выходного усилителя с изменяемым коэффициентом усиления и фильтром верхних частот. Соотношение сопротивлений резисторов R1 к R2 будет определять коэффициент усиления. Операционный усилитель ОУ1 обеспечивает заданную нагрузочную способность по выходу сенсора. Конденсаторы С1 и С2 подключаются при необходимости реализации фильтра.

Для эффективного применения микромеханического сенсора у БИС ПЕН необходимо предусмотреть ряд сервисных функций: наличие встроенного температурного датчика с чувствительностью не хуже 2 мВ/°С для обеспечения возможности корректировки показаний сенсора в диапазоне

рабочих температур от -40 до $+85^{\circ}\text{C}$; возможность подачи опорного напряжения от внешнего прецизионного источника с целью повышения точности и стабильности измерений; возможность перевода в режим с пониженным энергопотреблением с целью применения сенсора в устройствах со ждущим режимом. Кроме того, как показывает опыт, у БИС ПЕН должны быть предусмотрены функции, позволяющие ее тестировать без применения сложной и дорогостоящей оснастки, имитирующей работу внешнего дифференциального конденсатора. С учетом изложенного обобщенная структурная схема БИС ПЕН приведена на рис. 4.

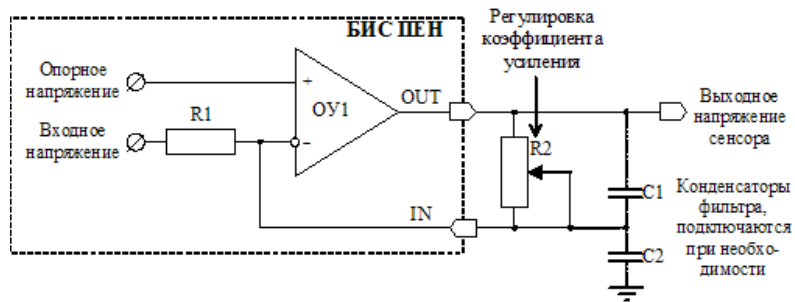


Рис. 3. Структурная схема блока выходного усилителя

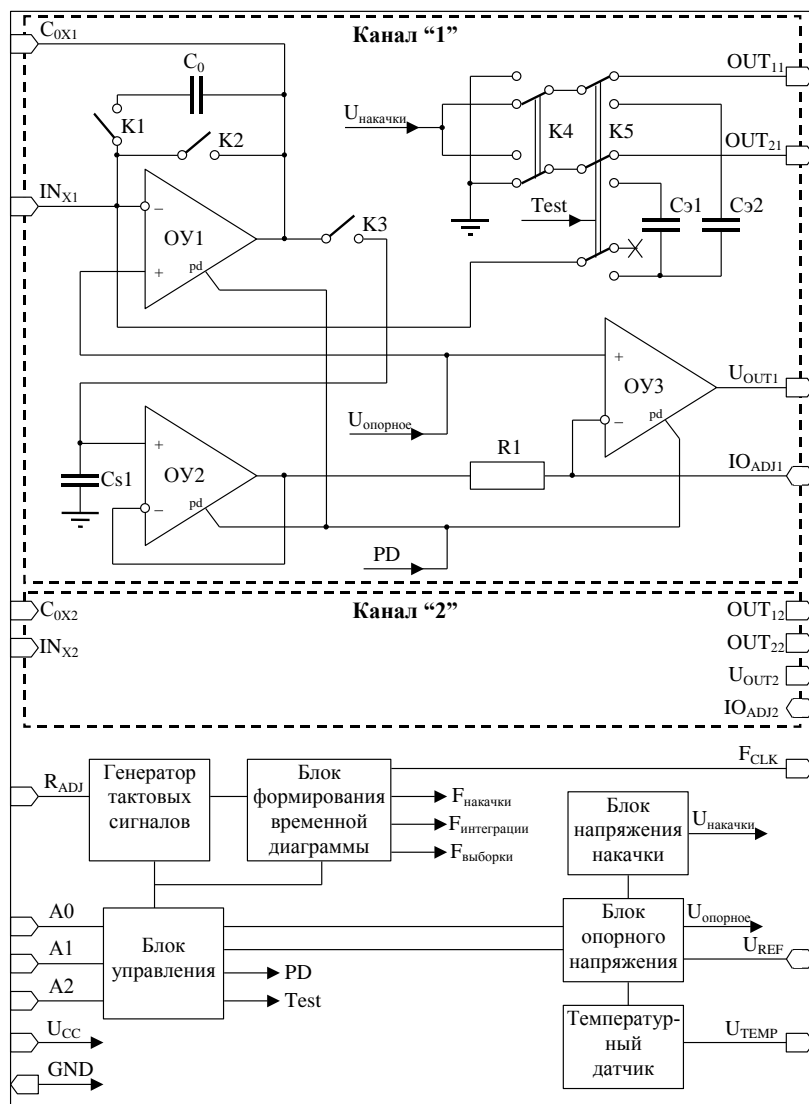


Рис. 4. Обобщенная структурная схема БИС ПЕН

Структурная схема макетного образца микромеханического сенсора с чувствительным элементом в виде дифференциального конденсатора

При разработке структурной схемы макетного образца микромеханического сенсора с чувствительным элементом в виде дифференциального конденсатора были учтены его разнообразные возможности по применению. В общем виде следует рассмотреть два варианта структурной схемы: простая одноканальная, с невысокими требованиями по чувствительности и линейности, например, для датчика детонации в ДВС; сложная двухканальная, с высокими требованиями по чувствительности и линейности, например, для датчика вертикали. На рис. 5 приведена структурная схема двухканального микромеханического сенсора с внешним опорным напряжением и интегрирующими емкостями в составе дифференциальных конденсаторов.

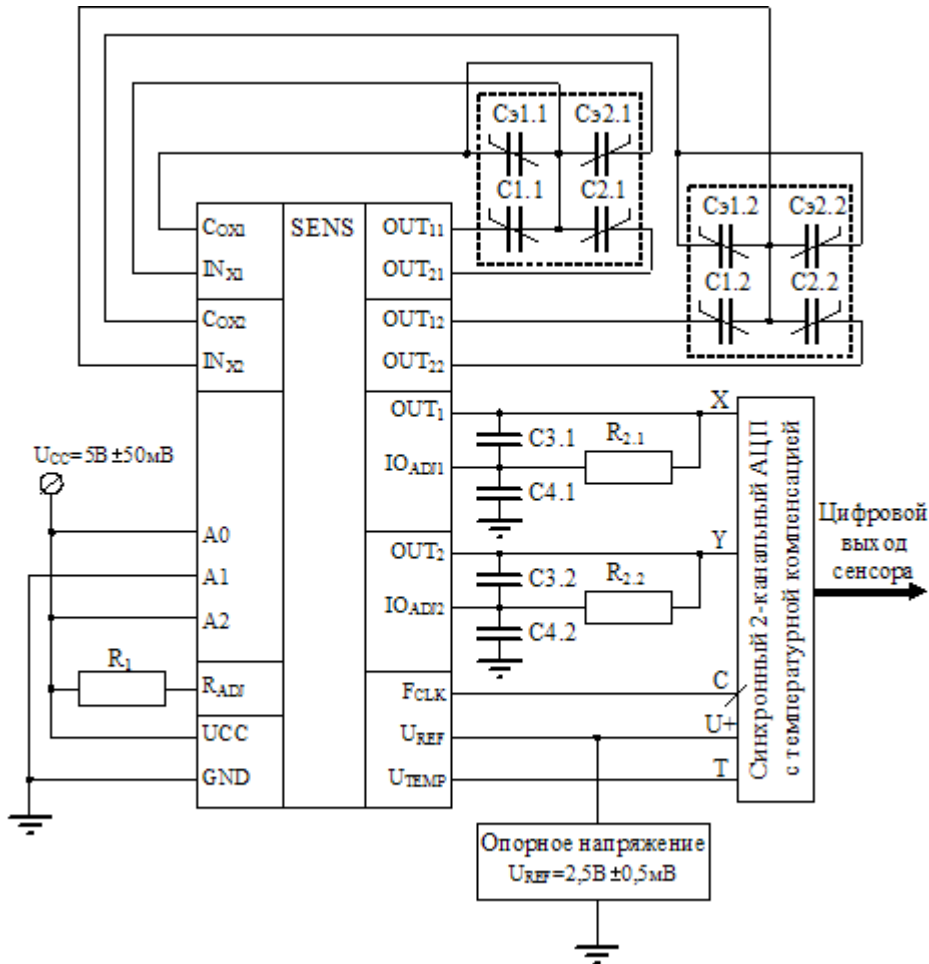


Рис. 5. Структурная схема двухканального микромеханического сенсора

Заключение

Предложен один из путей схемотехнического решения БИС преобразователя емкость–напряжение для микроэлектромеханического сенсора общего назначения с чувствительным элементом в виде дифференциального конденсатора. Разработанная структурная схема универсальной БИС преобразователя емкость–напряжение пригодна для построения разнообразных микромеханических сенсоров с чувствительными элементами емкостного типа.

CAPACITY VOLTAGE CONVERTER LSIC FOR MEMS SENSORS

A.E. BELOUS, S.E. DROZD, E.V. KONNOV, N.I. MUKHUROV, V.A. PLEBANOVICH

Abstract

In the article there the ways of creation capacity-voltage converter LSIC for electronic circuit of general application MEMS sensor are examined. The suggested block diagram of double channel MEMS sensor can be used for making miniature sensors with capacitive output.

Литература

1. *Иванов А.А., Мальцев П.П., Телец В.А.* // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 1. С. 2–12.
2. MEMS market to reach \$12.5 billion by 2010 // Military & Aerospace Electronics. July, 2006.
3. RF MEMS market will reach \$1.1 billion by 2009 // Military & Aerospace Electronics. 23 Nov. 2005.
4. *Мухуров Н.И.* Алюмооксидные микро-наноструктуры для микроэлектромеханических систем. Минск, 2004.
5. *Кудряшов Э.А.* Сравнительный анализ алгоритмов работы емкостных преобразователей // Sensors & Systems. 2001. № 7. С. 10–15.