



УДК 621.382

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ ЧАСТОТОМЕР ДЛЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ-АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

А.О. Попов, e-mail: aspeed_4ever@mail.ru

Южный Федеральный университет, г. Таганрог

В работе приведены результаты разработки и исследования цифрового частотомера для устройств обработки сигналов однокристалльных многоканальных микромеханических гироскопов-акселерометров. Выходной информацией гироскопов-акселерометров емкостного типа является частота, значение которой необходимо измерить и преобразовать в двоичный код для последующей обработки. Разработан и исследован интегральный цифровой частотомер, выполненный по КМОП технологии 90 нм для диапазона частот тактового генератора 0,25-1 ГГц. При данных частотах потребляемая мощность частотомера варьируется от 20 до 60 мкВт. Также был определен диапазон измеряемых частот при изменении числа разрядов счетчика.

INTEGRATED DIGITAL FREQUENCY METER FOR MICROMECHANICAL GYROSCOPES-ACCELEROMETERS

A.O. Popov

South Federal University, Taganrog

This work presents the results of the research and development a digital frequency meter for a signal processing circuit of single-chip multichannel micromechanical gyroscope-accelerometer. The output information of capacitive-type gyroscopes-accelerometers is the frequency, which value must be measured and converted into binary code for further processing. An integrated digital frequency meter implemented using 90nm CMOS technology for a clock frequency range of 0.25-1 GHz was designed and investigated. At these frequencies, the power consumption of the frequency meter varies from 20 to 60 μ W. The range of measuring frequencies under changing number of counter stages was also investigated.

1. Введение

Микроэлектромеханические (МЭМС) гироскопы и акселерометры на сегодняшний день используются повсеместно: от игровых устройств и мобильных телефонов до медицины и аэрокосмических систем [1-5].

Наиболее распространенные МЭМС гироскопы и акселерометры реализованы в виде этажерочной конструкции из двух кристаллов, на одном из которых расположен сенсор (гироскоп/акселерометр), на другом – система обработки получаемой с сенсора информации [6]. Использование этажерочной конструкции приводит к усложнению изготовления, а также к дополнительным финансовым затратам. Даже современные датчики крупнейшей электронной компании «STMicroelectronics» обладают упомянутыми недостатками [7-10].

Наиболее перспективным вариантом является реализация датчика в одном технологическом процессе, то есть совмещение на одном кристалле как гироскопов-акселерометров, так и системы обработки информации. Реализация данного варианта значительно упрощается при применении технологии поверхностной микрообработки для изготовления сенсора, а также замене распространенных на сегодняшний день систем обработки информации, реализованных на операционных усилителях (ОУ), на полностью цифровые схемы.

В работе [11] описан цифровой преобразователь емкости в частоту цифрового сигнала, в котором отсутствуют ОУ. Данный преобразователь является перспективным первичным элементом сбора информации с сенсоров. Выходной информацией данного преобразователя является частота цифрового сигнала, которую необходимо преобразовать в двоичный код для последующей обработки.



Целью данной работы является разработка и исследование цифрового частотомера для систем обработки информации микромеханических гироскопов-акселерометров.

2. Принцип работы и разработка цифрового частотомера

Разработанный цифровой частотомер, построенный в программе редактирования и моделирования логических схем Dsch [12-14], изображен на рисунке 1. Принцип работы частотомера заключен в следующем. После подачи короткого положительного импульса на вход *Reset*, при поступлении на вход *In* измеряемого сигнала с частотой F , на выходе *Z* одноразрядного счетчика *dev1* возникает сигнал с частотой f равной половине измеряемой. Частоты F и f являются управляющими частотами. Две частоты – четыре возможные комбинации значений данных частот – четыре стадии работы частотомера, а именно: сброс на n -разрядном счетчике (обл. 2), подсчет числа импульсов частоты *Clk* тактового генератора за период измеряемой частоты, сброс n -разрядного параллельного регистра (обл. 3), запись подсчитанного числа импульсов тактового генератора из n -разрядного счетчика в регистр. После завершения цикла, измерения происходят сначала с записанным в регистре кодом до следующего сброса. Сигнал сброса *Reset* необходим только в начале работы частотомера. Формирователь задержки (обл. 1) необходим для предотвращения ошибок, связанных с записью двоичного кода из n -разрядного счетчика в регистр.

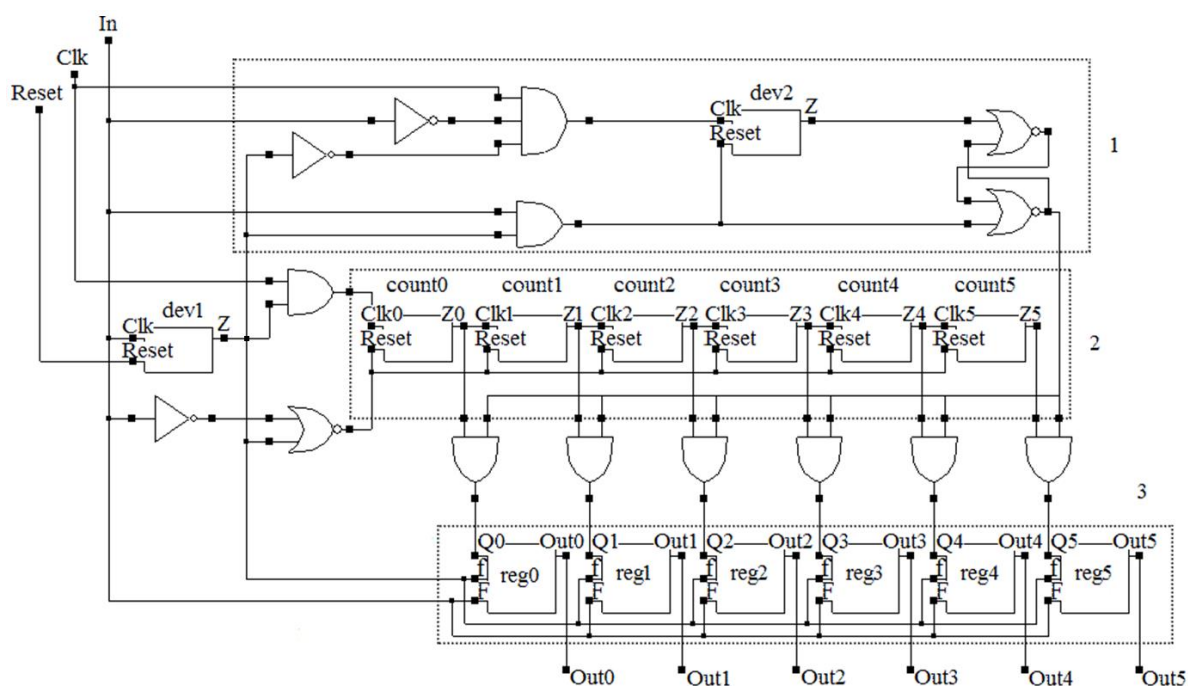


Рис. 1 Схема цифрового частотомера:

1 – формирователь задержки; 2 – n -разрядный счётчик; 3 – n -разрядный параллельный регистр

3. Моделирование и исследование цифрового частотомера

Топология частотомера, построенная в среде кремниевой компиляции Microwind [12-14] для технологии КМОП 90 нм, представлена на рисунке 2. Общая площадь, занимаемая частотомером на кристалле, составляет порядка 4000 $\mu\text{м}^2$.

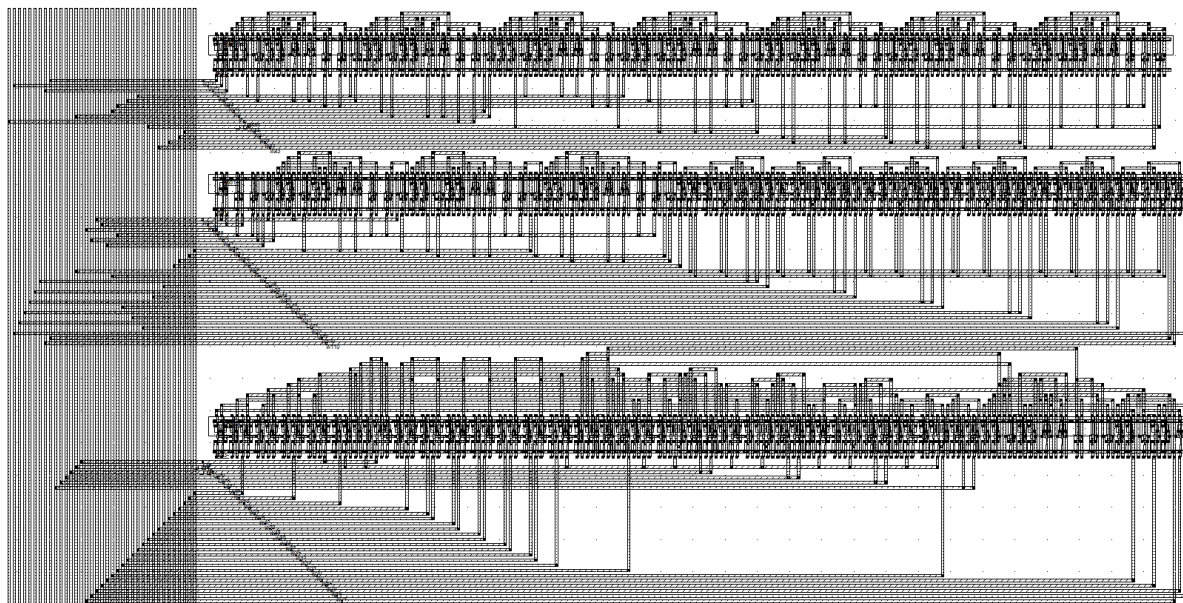


Рис. 2 Топология модуля частотомера

Результат моделирования работы частотомера изображен на рисунке 3.

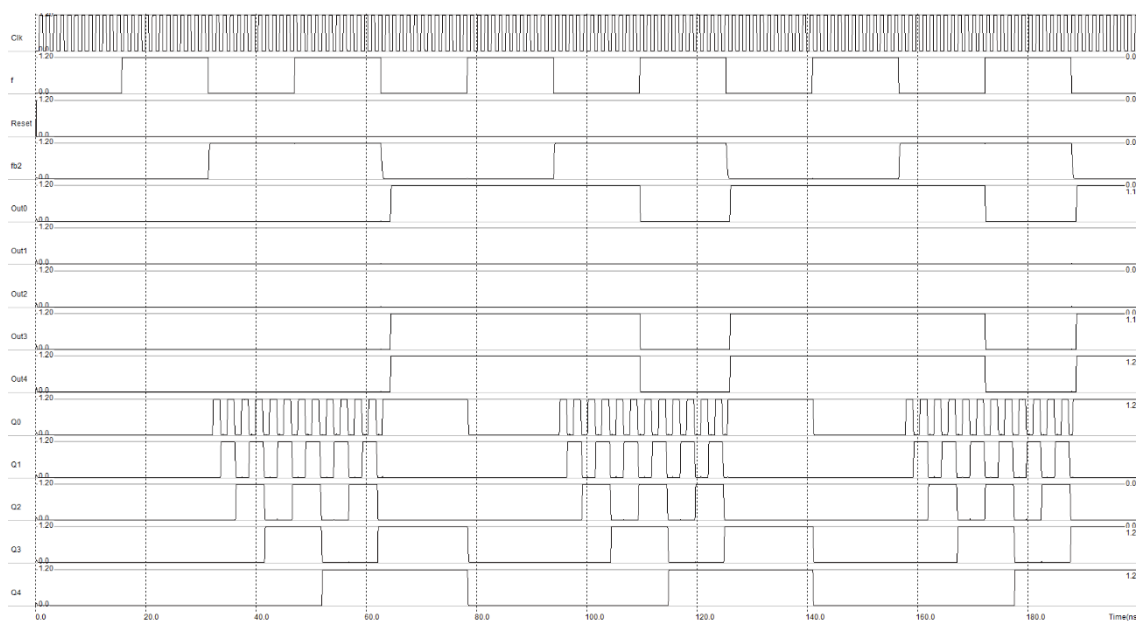


Рис. 3 Результат моделирования работы частотомера

Сигналы показаны следующим образом. Сверху-вниз: частота тактового генератора, измеряемая частота, сигнал сброса, частота сигнала f , выходные сигналы n -разрядного параллельного регистра, выходные сигналы n -разрядного счетчика.

Диапазон измерения частоты определяется выбором частоты тактового генератора и числа разрядов n счетчика и параллельного регистра. Максимально возможная измеряемая частота (без учета внутренних задержек логических элементов) зависит от частоты тактового генератора:

$$F_{max} = \frac{Clk}{2},$$

в то время как минимально возможная измеряемая частота зависит еще и от разрядности n :



$$F_{min} = \frac{Clk}{2^n - 1}.$$

Диапазон D определяется разностью максимально и минимально возможных значений измеряемой частоты:

$$D = F_{max} - F_{min} = Clk * \left(\frac{2^n - 3}{2^{n+1} - 2} \right).$$

Таким образом, задав диапазон изменения измеряемой частоты, можно определить необходимую частоту тактового генератора и разрядность счетчика. Зависимости F_{max} и F_{min} от количества каскадов n при различных тактовых частотах изображены на рисунке 4.

Зависимость потребляемой частотомером мощности от частоты тактового генератора, при фиксированной измеряемой частоте показана на рисунке 5. Из данной зависимости следует, что при увеличении тактовой частоты с 0,25 до 1 ГГц, потребляемая частотомером мощность увеличивается с 18 до 60 мВт.

4. Заключение

В работе представлена разработка цифрового частотомера для микромеханических гироскопов-акселерометров. Рассмотрены схема, топология устройства и результаты моделирования. Получены зависимости диапазона измеряемых частот от количества разрядов счетчика, а также зависимости потребляемой мощности частотомера от частоты тактового генератора. Особенностью предлагаемого частотомера является возможность его реализации в интегральном исполнении в качестве компонента маломощных датчиков, микромеханических сенсоров и других устройств, в которых требуется преобразование частоты сигнала в соответствующий этому сигналу двоичный код.

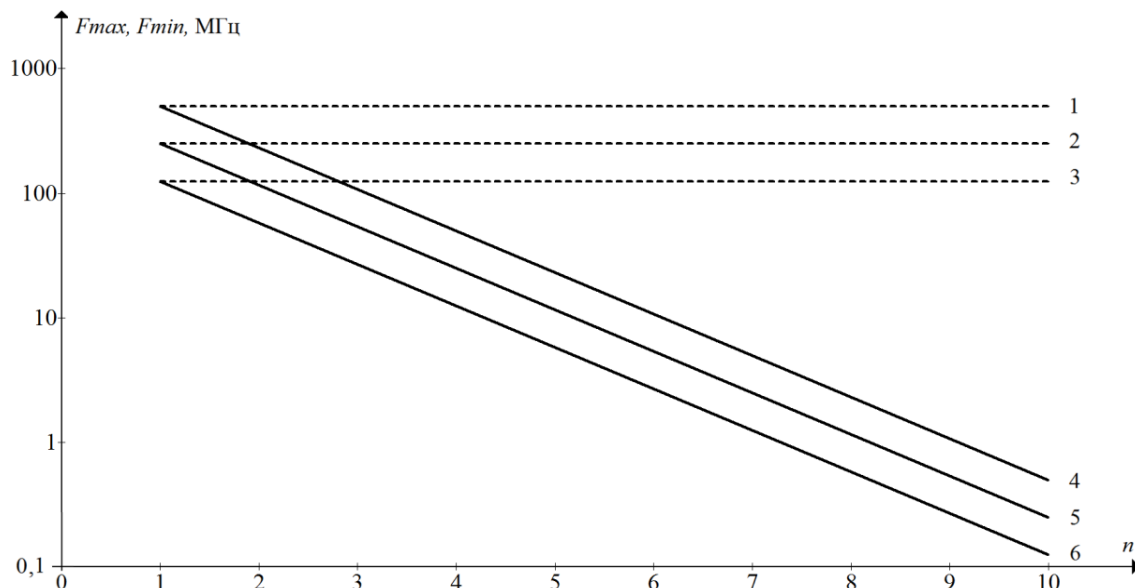


Рис. 4 Зависимости F_{max} и F_{min} от количества каскадов n при различных тактовых частотах (F_{max} : 1 – при $F_{Clk} = 1$ ГГц, 2 – при $F_{Clk} = 0.5$ ГГц, 3 – при $F_{Clk} = 0.25$ ГГц; F_{min} : 4 – при $F_{Clk} = 1$ ГГц, 5 – при $F_{Clk} = 0.5$ ГГц, 6 – при $F_{Clk} = 0.25$ ГГц)

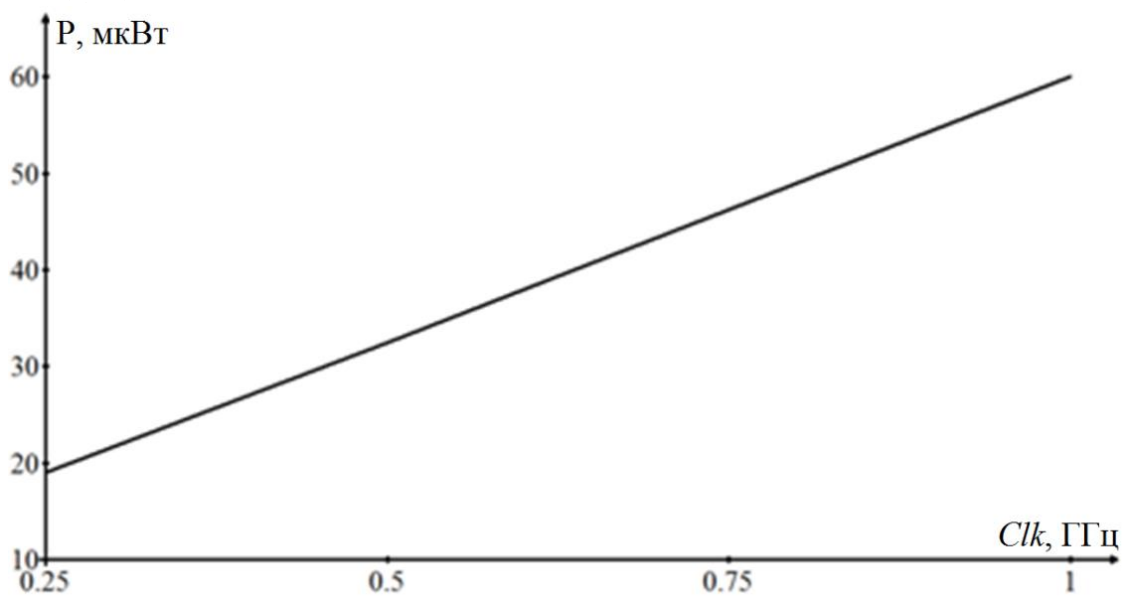


Рис. 5 Зависимость потребляемой мощности от тактовой частоты при измеряемой частоте 10 МГц

Работа выполнена при поддержке Южного Федерального Университета, проект № ВнГр-07/2017-10. Автор выражает благодарность своему научному руководителю Б.Г. Коноплеву за всестороннюю помощь.

Список цитируемой литературы

1. Шелепин Н.А. Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов // Микросистемная техника. – 2000. – № 1. – С. 40-43.
2. Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 103 с.
3. Прокофьев И.В., Тихонов Р.Д. Нано- и микросистемы для мониторинга параметров движения транспортных средств // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 12. – С. 48-50.
4. Гольцова М.М., Юдинцев В.А. МЭМС: большие рынки малых устройств // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 4. – С. 9-13.
5. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
6. МЭМС-датчики движения от STMicroelectronics: акселерометры и гироскопы / [Электронный ресурс] / Время электроники. / URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2193/doc/48456/> (дата обращения 28.02.2018).
7. Акселерометр компании STMicroelectronics / [Электронный ресурс] LIS344ALH / MEMS inertial sensor high performance 3-axis $\pm 2/\pm 6g$ ultracompact linear accelerometer / STMicroelectronics. / URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis344alh.pdf> (дата обращения 25.11.2018).
8. Акселерометр компании STMicroelectronics / [Электронный ресурс] LIS3DSH / MEMS digital output motion sensor: ultra-low-power high-performance three-axis "nano" accelerometer/ STMicroelectronics. / URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3dsh.pdf> (дата обращения 25.11.2018).
9. Гироскоп компании STMicroelectronics / [Электронный ресурс] L20G20IS / Ultra-compact two-axis gyroscope for optical image stabilization. / URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l20g20is.pdf> (дата обращения 25.11.2018).
10. Гироскоп компании STMicroelectronics / [Электронный ресурс] I3G4250D / MEMS motion sensor: 3-axis digital output gyroscope. / URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/i3g4250d.pdf> (дата обращения 25.11.2018).
11. Коноплев Б.Г., Рындин Е.А. Высокочувствительный преобразователь ёмкости в частоту. Патент № 2602493, 01.09.2015.
12. Sicard E., Bendhia S.D. Basics of CMOS Cell Design. - McGraw-Hill, 2007, 427 pp.
13. Sicard E., Bendhia S.D. Advanced CMOS Cell Design, 2nd ed. - McGraw-Hill, 2007, 364 pp.
14. Sicard E. Microwind & DSCH v3.5 – Lite User's Manual. – Toulouse, France: INSA Toulouse, 2009, 130 pp.