



АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.317.08

Рудик А. В., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ДАВАЧІВ НАВИГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

В статті запропоновано використовувати генераторний нульовий метод для побудови пристроїв обробки сигналів ємнісних мікромеханічних давачів навігаційних систем, згідно з яким перетворення ємності в частоту реалізується при виділенні різницевої частоти сигналів двох генераторів, до складу яких входять ємності мікромеханічних перетворювачів (акселерометрів або гіроскопів). Розроблено схеми перетворювачів ємності в частоту, які реалізовані на основі даного методу. Різницевий принцип формування вихідного сигналу забезпечує високу чутливість пристроїв без використання зарядових підсилювачів, що підвищує стійкість схеми до впливу шумів. Використання для формування вихідних імпульсів двох ідентичних генераторів забезпечує часткову компенсацію температурних змін вихідної частоти, що приводить до розширення діапазону робочих температур пристроїв обробки. Також запропонована схема перетворювача частоти в напругу, який має високу лінійність в діапазоні частот до 1 МГц. Проведено моделювання розроблених схем пристроїв обробки сигналів, яке підтвердило можливість використання різницевого принципу формування вихідного сигналу для обробки сигналів мікромеханічних давачів навігаційних систем.

Ключові слова: мікромеханічний давач, акселерометр, гіроскоп, обробка сигналів.

Вступ. Мікромеханічні акселерометри та гіроскопи все більше використовуються в сучасних технічних пристроях різного призначення: від стільникових телефонів та ігрових приставок до спеціалізованих пристроїв аерокосмічної техніки [1-4]. При цьому найбільш поширеними є акселерометри та гіроскопи з ємнісними мікромеханічними перетворювачами [5].

Реалізація мікромеханічних компонентів з використанням інте-

гральних технологій приводить до мінімізації ємностей перетворювачів та зміни даних ємностей при дії кутових швидкостей та лінійних прискорень. Тому основною вимогою, що ставиться до пристроїв обробки сигналів ємнісних перетворювачів, є висока чутливість [6; 7].

Зазвичай вимірювання ємності проводиться при подачі на електроди ємнісного давача сигналу збудження, а зміна ємності давача перетворюється у зміну напруги, струму, частоти або тривалості імпульсів. Відомо декілька типових методів вимірювання ємності [8]. Згідно прямого методу конденсатор спочатку заряджається від джерела струму протягом деякого часу, а потім вимірюється напруга на конденсаторі. Однак такий метод потребує наявності прецизійного джерела малого струму та вимірювача напруги з високоімпедансним входом.

Згідно другого методу ємність входить до складу часозадавального RC-кола генератора, при цьому вимірюються стала часу, період або частота коливань. Даний метод простий, однак не забезпечує потрібної точності.

Наступний метод полягає у вимірюванні імпедансу конденсатора на змінному струмі при підключенні джерела синусоїдального сигналу (при цьому вимірюються напруга та струм через конденсатор, метод амперметра-вольтметра). При використанні чотирипроводного логометричного підключення (при якому вимірюється співвідношення імпедансів) та синхронного детектора можна отримати порівняно високу точність, однак така схема є складною.

Одним з найбільш поширених методів вимірювання ємності прецизійного давача з малою величиною ємності є використання зарядового підсилювача, який перетворює співвідношення вимірюваної та опорної ємностей в напругу (рис. 1). Такі схеми поставляються у вигляді спеціалізованих мікросхем і мають високу чутливість. Однак підсилювачі заряду також характеризуються високою чутливістю до шумів, що суттєво обмежує характеристики пристроїв обробки на їх основі [9].

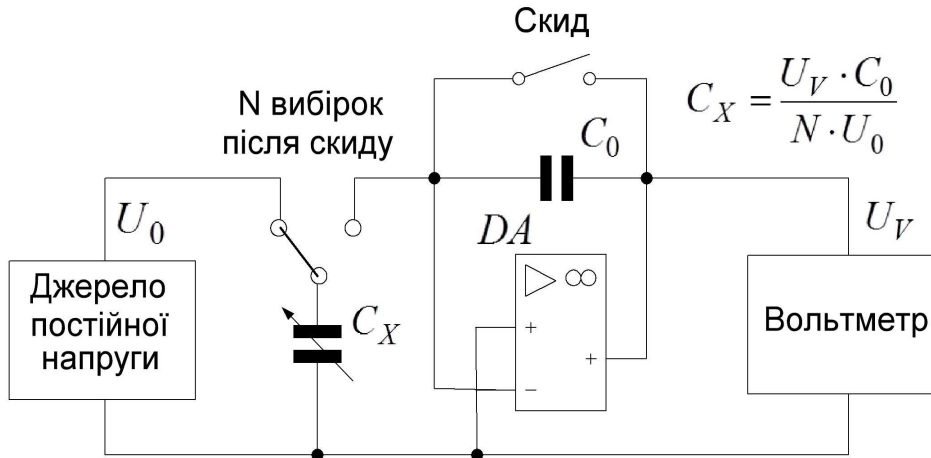


Рис. 1. Структурна схема методу вимірювання ємності, оснований на використанні зарядового підсилювача

Постановка задачі. Метою даної роботи є розробка пристроїв обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів, в яких забезпечується комплексне розв'язання проблеми підвищення чутливості та стійкості до дії шумів, а також схемна реалізація та моделювання розроблених пристроїв.

Таким чином, в статті необхідно:

1) на основі генераторного нульового методу розробити пристрої обробки сигналів ємнісних перетворювачів (аналогові та цифрові) з підвищеною стійкістю до впливу шумів та широким діапазоном робочих температур;

2) провести моделювання розроблених пристроїв обробки сигналів для підтвердження можливості використання різницевого методу для обробки сигналів мікромеханічних давачів навігаційних систем.

Розв' . Розроблені пристрої реалізуються на основі генераторного нульового методу, який полягає у виділенні різницевої частоти сигналів, що формуються двома ідентичними генераторами гармонічних сигналів, в частотозадавальні кола яких включені ємності мікромеханічних перетворювачів (вимірювальні конденсатори 1 та 2 на рис. 2), що протифазно змінюються під дією кутової швидкості (у мікрогіроскопі) або лінійного прискорення (у мікроакселерометрі) [10].

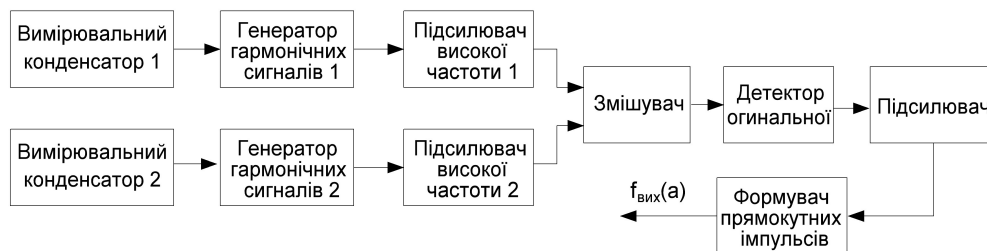


Рис. 2. Структурна схема пристрою обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів

Вихідні гармонічні сигнали генераторів подаються на змішувач, на виході якого формується сигнал биттів з частотою, яка є різницею частот вимірювальних генераторів і визначається різницею ємностей мікромеханічного перетворювача. Сигнал биттів з виходу змішувача подається на детектор огиальної, що виділяє огиальну такого сигналу, яка підсилюється лінійним підсилювачем і подається на формувач вихідних прямокутних імпульсів відповідної частоти для наступної цифрової обробки.

Для оцінки ефективності даного методу розроблено ряд пристроїв обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів. Електрична схема одного з таких пристроїв, реалізована за структурною схемою рис. 2, наведена на рис. 3.

Генератори гармонічних сигналів реалізовані на елементах С1 – С8, R1 – R8, DA1, DA2, підсилювачі високої частоти – на елементах С9 – С12, R9 – R14, DA3, DA4, змішувач – на елементах С13, R15 – R20, DA5, VT1, Vat1, а детектор огиальної – на елементах С14 – С16, R21 – R23, DA6. Лінійний підсилювач реалізовано на інверторі DD1 та резисторах від'ємного зворотного зв'язку R24 і R25. Формувач вихідних прямокутних імпульсів реалізовано на інверторі DD2.

На рис. 4 наведено результати моделювання пристрою обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів, реалізованого за схемою рис. 3.

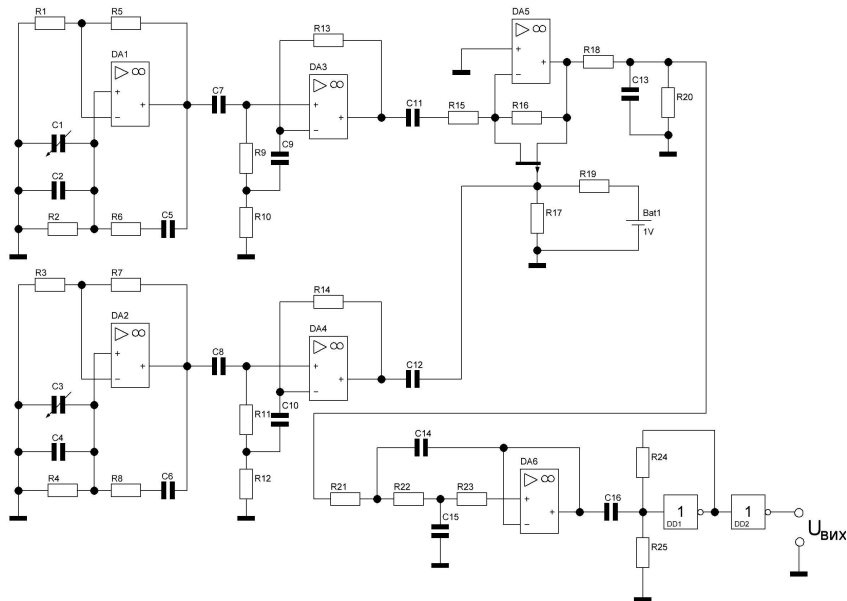


Рис. 3. Електрична схема пристрою обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів

Різницевий принцип формування вихідного сигналу забезпечує високу чутливість пристрою без використання зарядових підсилювачів, що дозволяє підвищити стійкість системи до шумів. Використання для формування вихідних імпульсів двох ідентичних генераторів забезпечує часткову компенсацію температурних змін вихідної частоти, розширюючи діапазон робочих температур пристрою. Однак використання RC-генераторів гармонічних коливань, аналогових схем змішувача, детектора оригінальної та підсилювача створює складності для інтегрального виконання такого пристрою на напівпровідниковому кристалі мікросхеми разом з блоками наступної цифрової обробки.

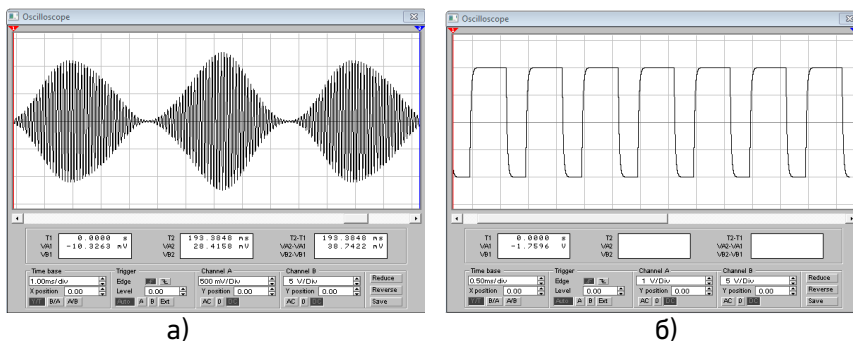


Рис. 4. Часові діаграми пристрою обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів:
а – вихідний сигнал змішувача (сигнал біттів); б – вихідний сигнал формувача прямокутних імпульсів

Для розв'язання цієї проблеми при проведенні досліджень розроблено варіант реалізації пристрою обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів на основі цифрових логічних елементів, структурна схема якого наведена на рис. 5.

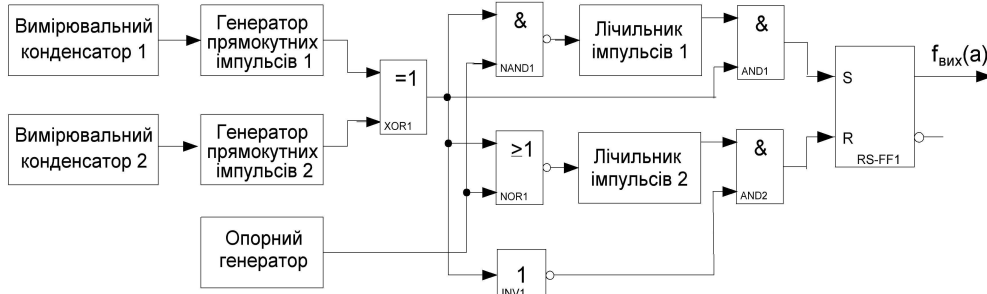


Рис. 5. Структурна схема цифрового пристрою обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів

В такій схемі використовуються два генератори прямокутних імпульсів з вимірювальними конденсаторами у частотозадавальних колах. Вихідні імпульси генераторів подаються на входи логічного елемента ВИКЛЮЧНЕ АБО (XOR1), при цьому на виході елемента формується послідовність прямокутних імпульсів, шпаруватість яких буде періодично змінюватися з часом з частотою, що дорівнює різниці частот генераторів прямокутних імпульсів $f_x = f_2 - f_1$ та пропорційною різниці ємностей вимірювальних конденсаторів мікромеханічного перетворювача ΔC :

$$f_x \approx f_0 \cdot \frac{\Delta C}{C_0}, \quad (1)$$

де f_0 та C_0 – відповідно частота генератора прямокутних імпульсів та ємність вимірювальних конденсаторів за відсутності лінійного прискорення (для акселерометра) або кутової швидкості (для гіроскопа).

На основі генератора опорної частоти, логічних елементів І-НІ (NAND1) та АБО-НІ (NOR1), інвертора (INV1), першого та другого лічильників імпульсів, двох схем збігу або логічних елементів І (AND1 та AND2), а також RS-тригера (RS-FF1) реалізований формувач вихідних прямокутних імпульсів з частотою слідування $f_{вих} = f_x$, пропорційною зміні ΔC ємностей мікромеханічного перетворювача. Частота імпульсів опорного генератора виражається співвідношенням

$$f_{on} \approx 2^n \cdot f_0, \quad (2)$$

де n – розрядність лічильників імпульсів.



Чутливість пристрою визначається таким співвідношенням:

$$\frac{df_x}{d(\Delta C)} = \frac{f_0}{C_0} \sim \frac{1}{C_0^2}. \quad (3)$$

Таким чином, в результаті використання різницевого принципу формування вихідного сигналу зменшення ємності конденсаторів мікромеханічного перетворювача забезпечує квадратичне збільшення чутливості пристрою, а нечутливість до шумів, обумовлена використанням тільки цифрових елементів дворівневої логіки, дозволяє значно зменшити порогове значення вимірюваної ємності. Допустимий рівень шуму визначається різницею між мінімально допустимим рівнем напруги логічної одиниці та максимально допустимим рівнем напруги логічного нуля.

Використання двох ідентичних генераторів прямокутних імпульсів та різницевої принцип формування вихідного сигналу забезпечують високу стабільність роботи пристрою при дії дестабілізуючих факторів. Наприклад, коефіцієнт температурної нестабільності вихідної різницевої частоти $K_{T.f_x}$ можна наближено визначити за таким співвідношенням:

$$K_{T.f_x} \approx K_T \cdot \frac{\Delta C}{C_0}, \quad (4)$$

де K_T – коефіцієнт температурної нестабільності генераторів.

З співвідношення (4) виходить, що нестабільність вихідної частоти у $\Delta C/C_0$ разів менше нестабільності частот генераторів. Ця особливість забезпечує зменшення похибки перетворення ємності в частоту, обумовлену різними факторами нестабільності окремих елементів перетворювача.

Для подальшого перетворення може використовуватися схема, мінімальна з точки зору кількості компонентів (рис. 6), вихідна напруга якої пропорційна частоті вхідного сигналу. При цьому тільки чотири елементи схеми – конденсатор C_1 , резистори R_3 та R_4 , а також операційний підсилювач DA_2 повинні мати високу температурну стабільність. Такий перетворювач забезпечує достатню лінійність в діапазоні частот до 1 МГц.

Середній струм $I_{сер}$, що витікає з виводу живлення операційного підсилювача DA_1 , лінійно залежить від частоти, з якою конденсатор C_2 розряджається в підсумовувальну точку операційного підсилювача. Протікаючи через опір зворотного зв'язку $R_3 + R_4 = 13.3 \text{ кОм}$, цей струм утворює пропорційний спад напруги,

що визначається як

$$U_{вих} = -U_{ж} C_2 f_{вх} (R_3 + R_4), \quad (5)$$

де $f_{вх}$ – частота вхідного сигналу.

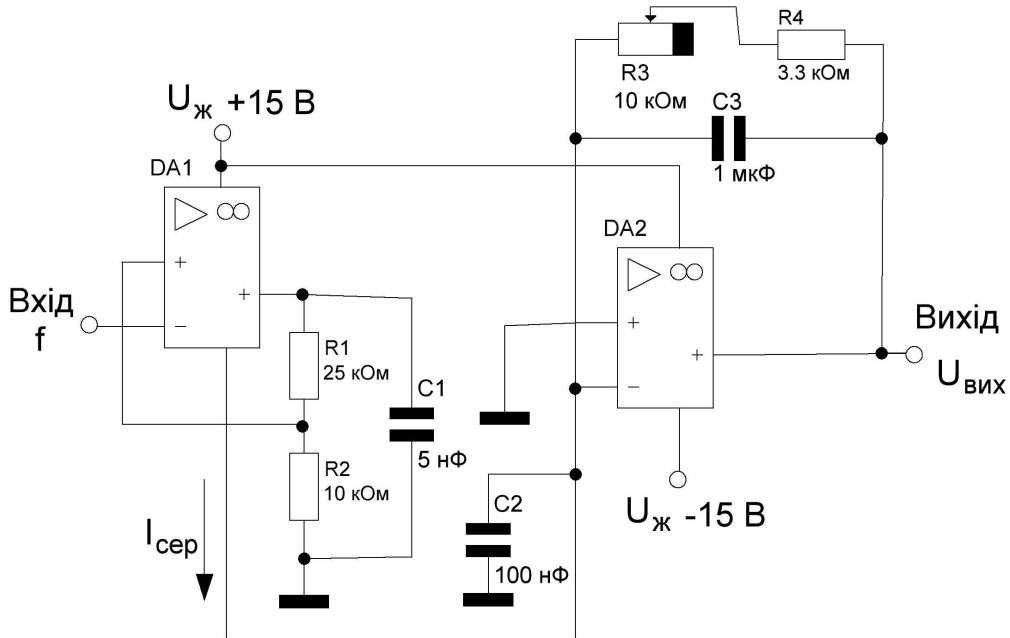


Рис. 6. Електрична схема перетворювача частота - напруга

Такий перетворювач має бути відкалібрований за допомогою підстроювального резистора.

Конденсатори C2 та C3 згладжують викиди, що виникають при швидкому перемиканні операційних підсилювачів. При використанні компонентів з вказаними на рис. 6 номіналами діапазон зміни вихідної напруги складає (0...10) В для вхідних сигналів з частотою (0...10) кГц. При розширенні діапазону робочих частот доведеться враховувати власний споживаний струм операційних підсилювачів, пропорційний частоті (при розрахунках цей струм додається до струму розряду конденсатора).

Враховуючи, що в одному корпусі мікросхеми знаходиться декілька операційних підсилювачів (зазвичай до 6), можна реалізувати суматор частот. Підключивши конденсатор до виходу кожного інвертора і подавши на кожний вхід сигнали з різними частотами, отримаємо вихідну напругу, пропорційну сумі частот

$$U_{вих} = -U_{ж} (R_3 + R_4) (C_1 f_1 + C_2 f_2 + \dots + C_6 f_6).$$

Розширити можливості схеми можна, якщо з'єднати паралельно декілька інверторів. При вказаних на схемі номіналах компонентів



в діапазоні частот від 0 до 10 кГц нелінійність перетворювача не перевищує 0.4%.

Висновки

1. Запропоновано використовувати генераторний нульовий метод для побудови пристроїв обробки сигналів ємнісних мікромеханічних давачів навігаційних систем, згідно з яким перетворення ємності в частоту реалізується при виділенні різницевої частоти сигналів двох генераторів, до складу яких входять ємності мікромеханічних перетворювачів (акселерометрів або гіроскопів).

2. Розроблено схеми перетворювачів ємності в частоту, які реалізовані на основі даного методу. Різницевий принцип формування вихідного сигналу забезпечує високу чутливість пристроїв без використання зарядових підсилювачів, що підвищує стійкість схеми до впливу шумів. Використання для формування вихідних імпульсів двох ідентичних генераторів забезпечує часткову компенсацію температурних змін вихідної частоти, що приводить до розширення діапазону робочих температур пристроїв обробки. Також запропонована схема перетворювача частоти в напругу, який має високу лінійність в діапазоні частот до 1 МГц.

3. Проведено моделювання розроблених схем пристроїв обробки сигналів, яке підтвердило можливість використання різницевого принципу формування вихідного сигналу для обробки сигналів мікромеханічних давачів навігаційних систем.

1. Elwenspoek M., Wiegerink R. Mechanical microsensors. – Springer, 2001. – 308 p.
2. Лысенко И. Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог : Издательство ТРТУ, 2005. – 103 с.
3. Xie H. Gyroscope and micromirror design using vertical-axis CMOS-MEMS actuation and sensing. – Carnegie Mellon university, 2002. – 246 p.
4. Распопов В. Я. Микромеханические приборы / Распопов В. Я. – М. : Машиностроение, 2007. – 400 с.
5. Лысенко И. Е. Интегральный микромеханический гироскоп-акселерометр. Патент РФ №2293338, 2007.
6. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
7. Схемотехническое конструирование БИС преобразователя емкость-напряжение для микроэлектромеханических датчиков / Белоус А. И., Емельянов В. А., Дрозд С. Е., Коннов Е. В., Мухуров Н. И., Плебанич В. А. // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 15–19.
8. Брихта М. Преобразователи ёмкости в цифровой код на основе сигма-дельта модулятора / М. Брихта // Компоненты и технологии. – 2006. – № 1. – С. 34–36.
9. Рудик А. В. Пристрої для вимірювання електричної ємності мікромеханічних давачів навігаційних систем мобільних роботів та її відхилення від номінального значення / Рудик А. В. // Вісник Житомирського

державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2016. – № 3(78). – С. 93–103. **10.** Рудик А. В. Пристрій обробки сигналів мікромеханічних давачів навігаційних систем / Рудик А. В., Шлома А. І. // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2016). Тези доповідей 10 Міжнародної НТК. – Харків : ННЦ «Інститут метрології», 2016. – С. 73.

Рецензент: д.т.н., професор Древецький В. В. (НУВГП)

Rudyk A. V., Candidate of Engineering, Associate Professor (National University of water and Environmental Engineering, Rivne)

SIGNAL PROCESSING DEVICE OF MICROMECHANICAL SENSORS NAVIGATION SYSTEMS

The paper proposed to use a zero-generating method for implementing signal processing devices of capacitive micromechanical sensors navigation systems, according to which the conversion capacity in frequency implemented in the allocation of the difference frequency of the two signal generators, in which composed capacity micromechanical sensors (accelerometers or gyroscopes). Developed the capacity-frequency converters, implemented on the basis of this method. Difference formation principle of the output signal provides a high sensitivity of the device without the use of charge amplifiers, which increases resistance to system noise. It is used to form of output pulses two identical generators provides partial compensation for temperature changes the output frequency, which results in extended operating temperature range of processing devices. Also it is offered the frequency-voltage converter with high linearity in the frequency range up to 1 MHz. The modeling schemes of signal processing devices, which confirmed the possibility of using the differential principle for form an output signal from signal processing micromechanical sensors navigation systems, are developed.
Keywords: micromechanical sensor, accelerometer, gyroscope, signal processing.

Рудык А. В., к.т.н, доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)



УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В статье предложено использовать генераторный нулевой метод для реализации устройств обработки сигналов емкостных микро-механических датчиков навигационных систем, согласно которому преобразование ёмкости в частоту реализуется при выделении разностной частоты сигналов двух генераторов, в состав которых входят ёмкости микромеханических преобразователей (акселерометров или гироскопов). Разработаны схемы преобразователей ёмкости в частоту, реализованные на основе данного метода. Разностный принцип формирования выходного сигнала обеспечивает высокую чувствительность устройств без применения зарядовых усилителей, что повышает устойчивость системы к воздействию шумов. Использование для формирования выходных импульсов двух идентичных генераторов обеспечивает частичную компенсацию температурных изменений выходной частоты, что приводит к расширению диапазона рабочих температур устройств обработки. Также предложена схема преобразователя частоты в напряжение с высокой линейностью в диапазоне частот до 1 МГц. Проведено моделирование разработанных схем устройств обработки сигналов, которое подтвердило возможность использования разностного принципа формирования выходного сигнала для обработки сигналов микромеханических датчиков навигационных систем.

Ключевые слова: микромеханический датчик, акселерометр, гироскоп, обработка сигналов.
