

**ПРИСТРОЇ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ МІКРОМЕХАНІЧНИХ
ДАВАЧІВ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ
ТА ЇЇ ВІДХИЛЕННЯ ВІД НОМІНАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ**

Розглянуто методи побудови пристроїв для вимірювання електричної ємності мікромеханічних давачів (акселерометрів та гіроскопів) навігаційних систем мобільних роботів та її відхилення від номінального значення. Запропоновано модифіковану схему сигма-дельта модулятора, в якій реалізовано пряме підключення ємнісного давача до сигма-дельта перетворювача, що забезпечує підвищення розділової здатності, точності та лінійності перетворення. Крім того, такий інтерфейс нечутливий до величини ємності між выводами давача та спільним проводом або до струму витоку на спільний провід. Запропоновано варіанти розширення як номінального значення досліджуваної ємності, так і діапазону перетворення відносного відхилення ємності від номіналу з використанням двох інтеграторів. Розроблено варіанти схемної реалізації пристроїв для вимірювання відхилення електричної ємності мікромеханічного давача від номінального значення на основі закінчених інтегральних мікросхем AD7745/AD7746 і AD7747 фірми Analog Devices та CAV414/424 фірми Analog Microelectronics, а також прецизійного аналогового мікроконтролера ADuCM360/CM361 фірми ARM Limited.

Ключові слова: електрична ємність; мікромеханічний давач; відхилення від номінального значення; AD7745; CAV414; мікроконтролер ADuCM360.

Вступ. Постановка проблеми у загальному вигляді. 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, 6, 7, 11, 12, 18, 21]. При цьому найбільш поширеними є акселерометри та гіроскопи з ємнісними мікромеханічними перетворювачами [5, 8, 10].

Реалізація мікромеханічних компонентів з використанням інтегральних технологій призводить 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 [2, 9, 14].

Зазвичай вимірювання ємності проводиться під час 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 [3]. Відповідно до 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 з другим методом 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 із 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.

У всіх описаних методах ємність спочатку перетворюється в напругу, яка потім перетворюється в цифровий код за допомогою прецизійного аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Представлення сигналів у цифровій формі має суттєву перевагу, навіть якщо в кінцевому результаті потрібний аналоговий сигнал у вигляді напруги або струму в діапазоні (4...20) мА, яка полягає в тому, що лінеаризацію сигналу давача, температурну компенсацію та калібрування значно простіше виконувати в цифровій формі, ніж в аналоговій.

Важливим аспектом при проектуванні схем з прецизійними ємнісними давачами є спосіб підключення давача до схеми. Іноді необхідно, щоб давач був підключений до пристрою обробки сигналу порівняно довгим кабелем, при цьому завади, що діють на кабель, можуть суттєво спотворити сигнал з давача, ємність якого може складати одиниці пФ. Крім того, якщо відстань від давача до пристрою обробки сигналу значна, то методи вимірювань, чутливі до ємності з'єднувального кабелю або струмів витоку, можуть виявитися непридатними.

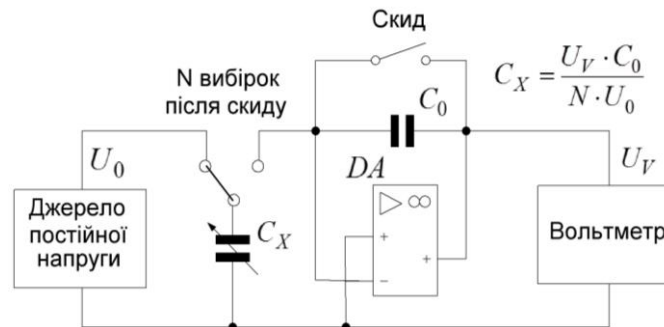


Рис. 1. До методу вимірювання ємності, оснований на використанні зарядового підсилювача

Постановка завдання дослідження. В статті необхідно:

- 1) розглянути методи побудови пристроїв для вимірювання електричної ємності мікромеханічних давачів навігаційних систем мобільних роботів та її відхилення від номінального значення;
- 2) розробити модифіковану схему сигма-дельта модулятора з прямим підключенням ємнісного давача до сигма-дельта перетворювача, що забезпечить підвищення розділової здатності, точності та лінійності перетворення, а також нечутливість інтерфейсу до величини ємності між виводами давача та спільним проводом або до струму витоку на спільний провід;
- 3) розробити варіанти схемної реалізації пристроїв для вимірювання відхилення електричної ємності мікромеханічного давача від номінального значення на основі закінчених інтегральних мікросхем та прецизійного аналогового мікроконтролера.

Сигма-дельта АЦП як вимірювач ємності

На даний час технологія сигма-дельта перетворення добре відпрацьована і використовується в АЦП з високою розділовою здатністю. На рисунку 2 спрощено показана архітектура типового промислового сигма-дельта АЦП, в якому конденсатори $C_{ВХ}$ та C_0 періодично переключаються між входом сигналу $U_{ВХ}$ і джерелом опорної напруги U_0 , «накачуючи» заряд конденсатора інтегратора $C_{ІНТ}$.

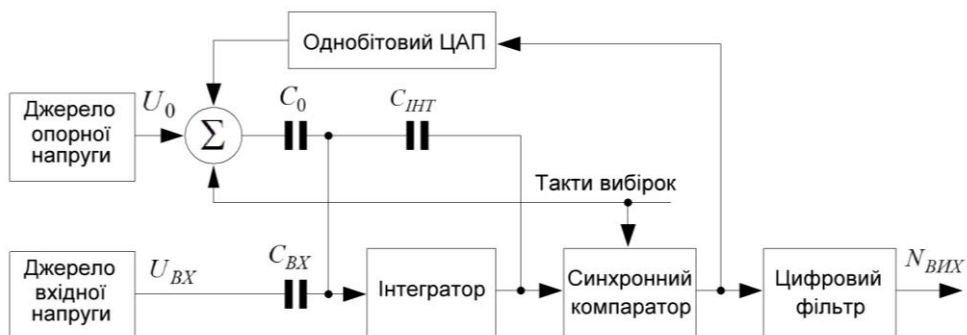


Рис. 2. Спрощена структурна схема сигма-дельта АЦП

Компаратор контролює рівень сигналу на виході інтегратора та керує фазою підключення конденсаторів, замикаючи коло зворотного зв'язку і компенсуючи струми в сигнальному та опорному колах.

Однобітний потік нулів та одиниць на виході компаратора змінюється відповідно до величини заряду, пропорційного напрузі на ємності, що необхідно для балансування кола. Тому що ємність конденсатора в АЦП має фіксовану величину, густина одиниць в однобітному потоці відповідає співвідношенню напруг $U_{ВХ}$ та U_0 . Цифровий фільтр обробляє цей однобітний потік даних та формує результат перетворення в цифровій формі.

Така архітектура має високу лінійність та точність, а її особливістю є компроміс між розділовою здатністю та швидкодією (частотою оновлення даних на виході). Якщо цифровий фільтр накопичує багато однобітних даних, то це збільшує час обробки, однак збільшує кількість розрядів «без тремтіння». Розділова здатність обмежується лише шумом системи. Частота оновлення даних на виході обмежена максимальною тактовою частотою, яка визначається швидкістю перемикавання електронних ключів, смугою пропускання інтегратора та швидкодією синхронного компаратора. Якщо розглянути характеристики типових сигма-дельта АЦП, то 24-розрядний перетворювач гарантовано забезпечує 18 стабільних розрядів від мінімуму до максимуму, інтегральна нелінійність складає $4 \cdot 10^{-6}$, а частота оновлення даних на виході – від 10 кГц до 40 кГц [3].

У звичайному сигма-дельта АЦП відбувається перемикавання конденсаторів фіксованої ємності, що призводить до вирівнювання заряду між змінним сигналом на аналоговому вході та постійним сигналом джерела опорної напруги. Однак тому, що заряд пропорційний напрузі на ємності, можна зафіксувати вхідну напругу та змінювати ємність.

Модифікована схема сигма-дельта модулятора наведена на рисунку 3, в якій як фіксована вхідна напруга використовується напруга збудження, а конденсатор, ємність якого змінюється, розглядається як ємнісний давач. У результаті вихідний код буде відповідати співвідношенню ємності давача C_D та опорної ємності C_0 . Такий новий підхід дозволяє реалізувати пряме підключення ємнісного давача до сигма-дельта перетворювача, що забезпечує підвищення розділової здатності, точності та лінійності перетворення. Крім того, такий інтерфейс нечутливий до величини ємності між виводами давача та спільним проводом або до струму витоку на спільний провід.

Перетворювач ємності в цифровий код може бути повністю виконаний у вигляді однокристалного пристрою, що забезпечує високий ступінь інтеграції, простоту реалізації схеми, високу повторюваність, високу надійність та значне зменшення собівартості модуля.

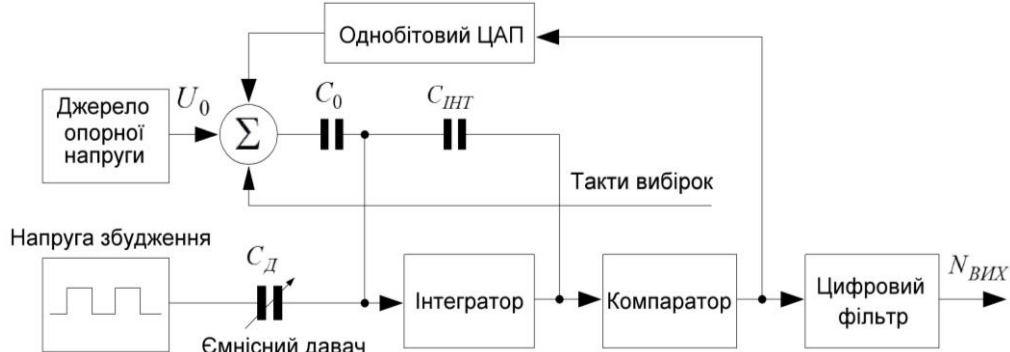


Рис. 3. Структурна схема сигма-дельта АЦП як вимірювача ємності

Пристрої для вимірювання відхилення електричної ємності від номінального значення

В більшості задач вимірювання, контролю та керування з використанням ємнісних давачів різного призначення інформацію несе не абсолютне значення їх електричної ємності, а її відхилення від деякого номінального значення. Однак принцип дії більшості вимірювальних перетворювачів оснований на вимірюванні повної ємності давача, що не дозволяє ефективно використовувати повний діапазон перетворення вимірювальних пристроїв. Тому ряд фірм та окремі розробники пропонують оригінальні варіанти побудови вимірювачів відхилення електричної ємності давача відносно деякого еталонного значення. Тут необхідно виділити закінчені інтегральні мікросхеми, серед яких найбільш поширеними є AD7745/AD7746 [22] та AD7747 [23] фірми Analog Devices.

Дані мікросхеми дозволяють з високою розділовою здатністю (ефективна розділова здатність до 21 розряду) та точністю до ± 4 фФ вимірювати прирости до ± 4 пФ щодо еталонного значення ємності від 0 до 17 пФ.

Схема включення двох ємнісних давачів C_0 та C_D (рис. 4, а) забезпечує перетворення відхилення ємності в цифровий код $N_{ВИХ} = k \cdot \Delta C = k \cdot (C_0 - C_D)$, де k – коефіцієнт перетворення. Один з цих конденсаторів, наприклад C_0 , має бути еталонним з номіналом від 0 до 17 пФ, відносно якого вимірюється приріст $|\Delta C| \leq 4$ нФ. Ємності підключаються між відповідними входами $Cin(+)$, $Cin(-)$ та виходом EXC джерела збудження (*Excitation Source*), що формує прямокутні імпульси, які керують колами перезаряду сигма-дельта модулятора. На рисунку 4, а CDC (*capacitance to digital converter*) – перетворювач ємності в цифровий код.

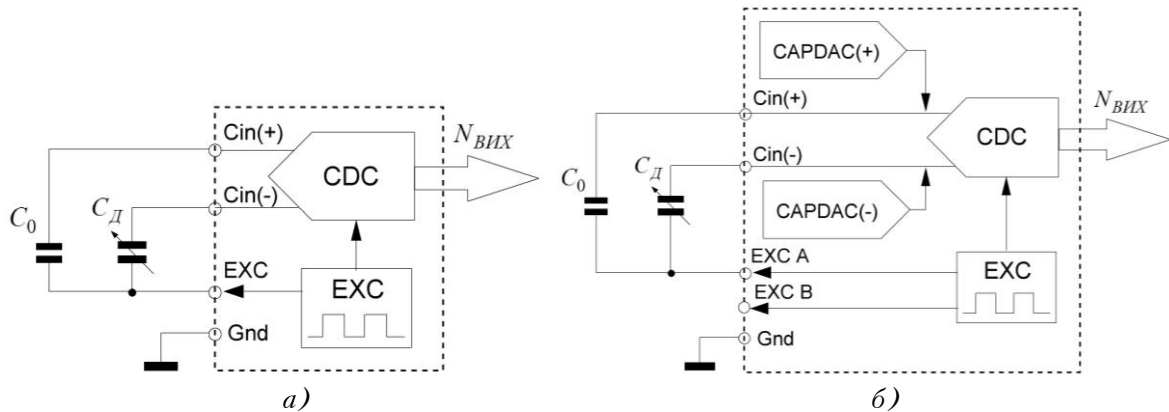


Рис. 4. Спрощені схеми підключення двох ємнісних давачів до вимірювального пристрою на мікросхемі AD7745 (а) та з використанням вбудованих програмованих перетворювачів код – ємність ($CAPDAC$) (б)

Якщо в мікросхемах наявні програмно перестроювані перетворювачі код–ємність ($CAPDAC$), то це дозволяє програмно зміщувати рівні ємностей C_0 та (або) C_D на величину до 17 пФ (рис. 4, б). Результат перетворення різниці двох ємностей з врахуванням впливу $CAPDAC$:

$$N_{ВИХ} = k \cdot [(C_0 + CAPDAC(+)) - (C_D - CAPDAC(-))]. \quad (1)$$

Наприклад, при підключенні тільки ємності C_0 (ємності C_D бітом керування $CAPDIFF$ задається нульове значення) та значенні $CAPDAC(+)=17$ нФ буде фіксуватися зміна C_0 від 13 пФ до 21 пФ.

Перетворювачі $CAPDAC$ мають розрядність 7 біт, що при діапазоні 21 пФ відповідає дискретності зміни ємності 164 фФ. Однак така точність не відповідає 21-розрядній розділовій здатності власне CDC . Ця похибка може бути скомпенсована при калібруванні внесенням у 16-розрядний реєстр CAP *Offset Calibration Register* поправки нульового зміщення в діапазоні ± 1 пФ з дискретністю 31 аФ.

Обмеженням для широкого використання таких перетворювачів є обмежений діапазон номінальних значень ємності (0...20) пФ, відносно якого вимірюється приріст ємності (до ± 8 пФ). Розширити вказаний діапазон можна при зміні величини заряду ємності давача імпульсами джерела опорної напруги [19], тому що заряд ємності прямо пропорційний напрузі на ній: $Q = CU$.

Якщо підключається ємність одного давача, то вона заряджається імпульсами джерела збудження (*Excitation Source*) U_{EXC} , а внутрішня еталонна ємність заряджається від внутрішньої опорної напруги U_0 . При використанні як джерела збудження напруги $U_{EXC(A-B)} = U_{EXC A} - U_{EXC B}$, яка формується додатковою зовнішньою схемою, можна зменшити амплітуду сигналу збудження у α разів, що призводить до розширення діапазону перетворюваних ємностей при незмінній величині заряду.

Мікросхеми типу AD7745/AD7746 та AD7747 мають по два джерела напруги збудження $EXC A$ та $EXC B$, амплітуди напруг яких можуть задаватися програмно (зазвичай їх задають як половину напруги джерела живлення). Крім того, можна для кожного виводу запрограмувати пряме або інверсне значення вихідного сигналу і отримати $U_{EXC\ peak-to-peak} = E_{Ж}$.

Сигнали з виходів джерел напруги збудження подаються на неінвертуючий підсумовуючий підсилювач з одиничним коефіцієнтом передачі. При рівності амплітуд $U_{EXC A} = U_{EXC B} = U_{EXC}$ та їх протифазному режимі роботи отримуємо необхідне значення коефіцієнта α за умов потрібного розширення величини номінального значення контрольованої ємності та діапазону перетворення:

$$\alpha = \frac{C_{0,ном}}{C_{0,он}} = \frac{U_{EXC}}{U_{EXC(A-B)}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 - R_2}, \quad (2)$$

де R_1 та R_2 – зовнішні резистори, підключені до входів неінвертуючого підсумовуючого підсилювача, які забезпечують необхідне значення коефіцієнта α .

При використанні мікросхеми AD7745 для збільшення номінального значення ємності давача з $C_{0,он} = 17\text{ нФ}$ до $C_{0,ном} = 150\text{ нФ}$ необхідно підбором опорів резисторів R_1 та R_2 забезпечити значення $\alpha = 8.82$. З тим самим коефіцієнтом збільшується і діапазон вимірюваного приросту ємності, тобто при заданому для AD7745 значенні $\Delta C = \pm 4\text{ нФ}$ отримуємо можливість вимірювати відхилення ємності в діапазоні $\pm 35.28\text{ нФ}$.

На відміну від мікросхем AD7745/7746, у яких обкладки досліджуваних конденсаторів не мають зв'язку з сигнальною землею Gnd , в мікросхемах AD7747 передбачено підключення одного з виводів конденсатора безпосередньо до землі, однак при цьому постає проблема впливу паразитних ємностей, що шунтують досліджувану. Для зменшення цього ефекту передбачена можливість підключення екрануючої обкладки вхідного кола до виводу $SHLD$ (рис. 5), з якого знімається сигнал з формою, аналогічною формі сигналу збудження, що вирівнює потенціали входу Cin та екрануючої обкладки $SHLD$.

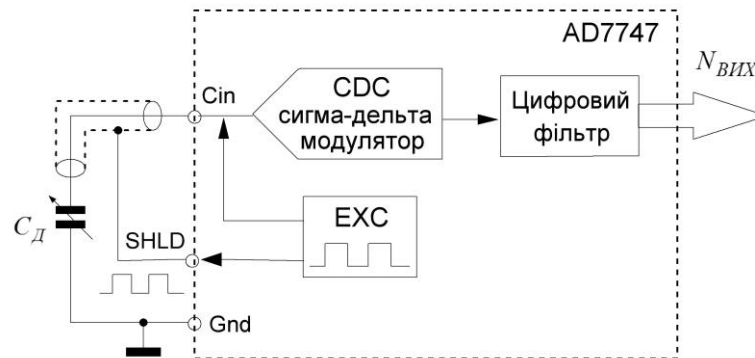


Рис. 5. Схема включення досліджуваної ємності з підключенням безпосередньо до сигнальної землі

Більш широкий діапазон перетворення відносної зміни ємності забезпечують перетворювачі приросту ємності в напругу на двох інтеграторах (рис. 6). Заряд вимірюваного та еталонного конденсаторів від двох джерел струму I_1 та I_2 з синхронною зміною напрямку струму заряду приводить до формування двох пилкоподібних напруг з періодом T , які знімаються з конденсаторів C_0 і C_D та мають амплітуди:

$$U_{m1} = \frac{I_1 T}{2C_0} \quad \text{та} \quad U_{m2} = \frac{I_2 T}{2C_D}. \quad (3)$$

Зміна напрямку струмів заряду відбувається при комутації струмових кіл ключами $S1...S4$, що керуються тактовим генератором прямокутних імпульсів G .

При забезпеченні рівності струмів $I_1 = I_2 = I$ амплітуда різницевого сигналу, що виділяється віднімальним підсилювачем з коефіцієнтом підсилення K_U :

$$\Delta U_m = \frac{K_U I T}{2 \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_D} \right)}. \quad (4)$$

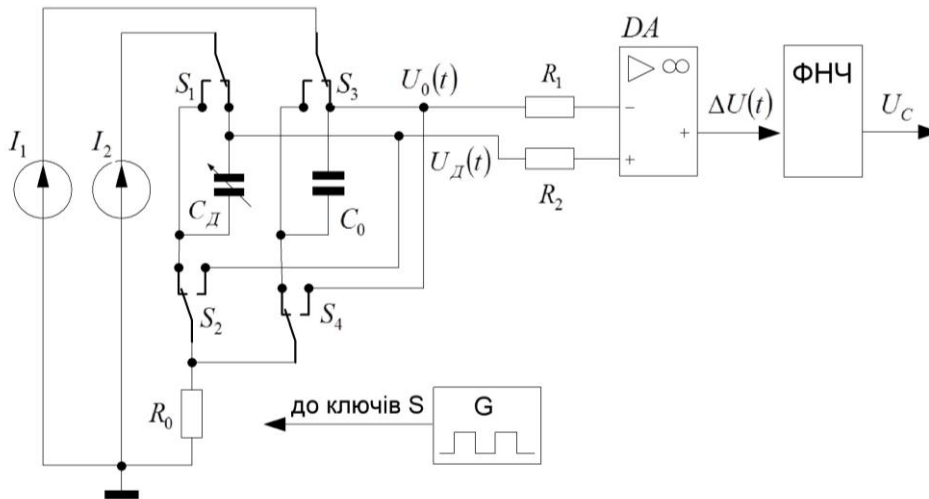


Рис. 6. Пояснення принципу перетворення відносного приросту ємності від номіналу на базі двох інтеграторів

Якщо покласти, що номінальне значення вимірюваної ємності дорівнює ємності опорного конденсатора, тобто $C_{Д.ном} = C_0$, то напругу на виході підсилювача можна визначити як:

$$\Delta U(t) = K_U I \frac{\Delta C_D t}{2C_0 (C_0 \pm \Delta C_D)}. \quad (5)$$

Виділена за допомогою фільтра нижніх частот (ФНЧ) постійна складова сигналу $\Delta U(t)$ є вихідним сигналом перетворювача U_C , який далі подається на вхід АЦП:

$$U_C = K_U I \frac{\Delta C_D T}{4C_0 (C_0 \pm \Delta C_D)}. \quad (6)$$

Відносна зміна вимірюваної ємності відповідно до співвідношення (6):

$$\delta C_D = \frac{\Delta C_D}{C_0} = \frac{U_C k_C}{1 \mp U_C k_C}, \quad (7)$$

де δC_D – відносне відхилення вимірюваної ємності від номінального значення $C_{Д.ном}$;

$k_C = \frac{4C_0}{K_U I T}$ – масштабний коефіцієнт.

За отриманими співвідношеннями можна при заданому номінальному значенні вимірюваної ємності вибрати потрібні величину струму та період слідування імпульсів синхронізуючого генератора або за відомими максимальними значеннями періоду T та струму I визначити мінімальне номінальне значення вимірюваної ємності.

На рисунку 7 наведена реалізація схеми рисунка 6 на сучасній елементній базі при використанні прецизійного аналогового мікроконтролера ADuCM360/CM361 [20] з вбудованим диференціальним підсилювачем з програмованим коефіцієнтом підсилення (PGA), двома 24-розрядними АЦП, двома вбудованими програмованими джерелами струму та 32-розрядними таймерами, а також додаткових зовнішніх ключів та ФНЧ. Функція тактового генератора прямокутних імпульсів G реалізується на базі вбудованого таймера.

Для використання повного діапазону перетворення необхідно забезпечити виконання умови:

$$U_0 = K_U U_{C_{д.макс}} \quad (8)$$

де $U_0 = 0.5U_C = 1.2 \text{ В}$ – внутрішня опорна напруга АЦП; $U_{C_{д.макс}}$ – напруга на вході АЦП.

При максимальному значенні відхилення $\delta C_{д.макс} = 1$ відповідно до співвідношення (7)

$$\text{отримаємо необхідне значення } k_c = \frac{\delta C_{д.макс}}{U_C(1 \pm \delta C_{д.макс})} = \frac{1}{2.4 \cdot (1+1)} = 0.208 \text{ .}$$

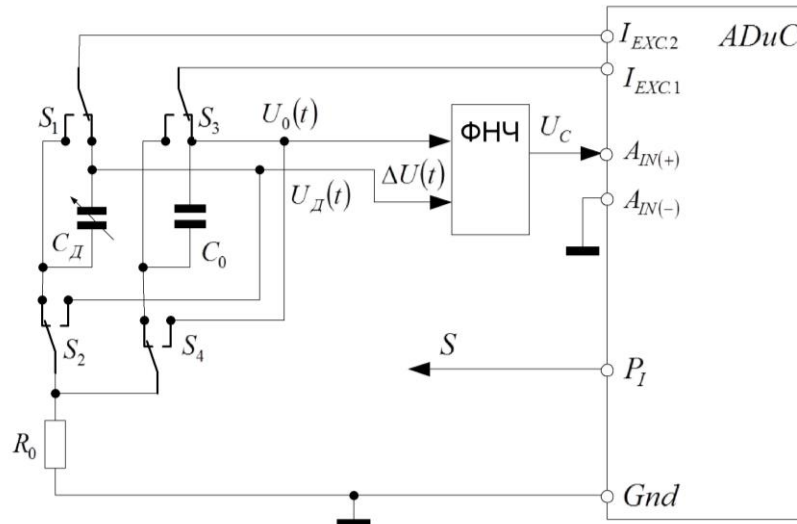


Рис. 7. Структурна схема перетворювача відносного відхилення значення ємності від номіналу на базі аналогового мікроконтролера

За відомим значенням k_c при мінімальному значенні струму збудження $I = 10 \text{ мкА}$, періоді тактової частоти таймера $T = 62.5 \text{ нс}$ та $K_U = 1$ за формулою (6) можна визначити мінімальне номінальне значення вимірюваної ємності. Теоретично дана схема може забезпечити мінімальне номінальне значення $C_{0,\text{мін}} = 32 \text{ нФ}$ з дискретністю 1 фФ (при ефективній розрядності АЦП 15 розрядів та частоті опитування 8 кГц). Однак досягнення таких параметрів обмежується впливом паразитних параметрів (кінцевий входний опір PGA, опори витoku ключів тощо). При використанні швидкодіяного АЦП функцію ФНЧ реалізують програмними засобами.

Перетворювач відносної зміни величини вимірюваної ємності в напругу на базі двох інтеграторів реалізований в серійних мікросхемах CAV414/424 Analog Microelectronics [15, 16] (рис. 8). Струми інтеграторів I_1 та I_2 задаються зовнішніми резисторами R_2 та R_3 і опорною напругою $U_{оп}$, тобто $I_1 = U_{оп}/R_3$ та $I_2 = U_{оп}/R_2$ [13].

Частота тактового генератора G (reference oscillator):

$$f_{osc} = \frac{U_{оп}}{2R_6 C_{osc} U_{osc}} \quad (9)$$

де U_{osc} – амплітуда вихідної напруги тактового генератора.

Подальше перетворення різниці зарядів ємностей $C_{д}$ та C_0 в диференціальну напругу відбувається аналогічно схемі рисунка 5.

Інший принцип перетворення відхилення електричної ємності від номінального значення використовується в мікросхемі CAV444 [17]. В схемі спочатку відбувається частотно-імпульсне перетворення контрольованої ємності, а отриманий тактовий сигнал далі використовується в перетворювачі частота – напруга, на виході якого формується напруга $U_{вих} = k_c \delta C_M$.

Таким чином, використання розглянутих мікросхем дозволяє розв'язати більшість технічних задач, пов'язаних з контролем приростів електричної ємності ємнісних давачів. Однак значна кількість необхідних зовнішніх навісних елементів створює деякі ускладнення

для забезпечення високої точності вимірювань. Використовувані в розглянутих мікросхемах принципи перетворення можуть бути успішно реалізовані на базі сучасних мікроконтролерів.

Висновки:

1. Розглянуто методи побудови пристроїв для вимірювання електричної ємності мікромеханічних датчиків (акселерометрів та гіроскопів) навігаційних систем мобільних роботів та її відхилення від номінального значення.

2. Запропонована модифікована схема сигма-дельта модулятора, в якій як фіксована вхідна напруга використовується напруга збудження, а вихідний код відповідає співвідношенню ємності датчика та опорної ємності. Такий новий підхід реалізує пряме підключення ємнісного датчика до сигма-дельта перетворювача, що забезпечує підвищення розділової здатності, точності та лінійності перетворення. Крім того, такий інтерфейс нечутливий до величини ємності між виводами датчика та спільним проводом або до струму витoku на спільний провід.

3. Розроблено варіанти схемної реалізації пристроїв для вимірювання відхилення електричної ємності мікромеханічного датчика від номінального значення на основі закінчених інтегральних мікросхем AD7745/AD7746 і AD7747 фірми Analog Devices та CAV414/424 фірми Analog Microelectronics, а також прецизійного аналогового мікроконтролера ADuCM360/CM361 фірми ARM Limited.

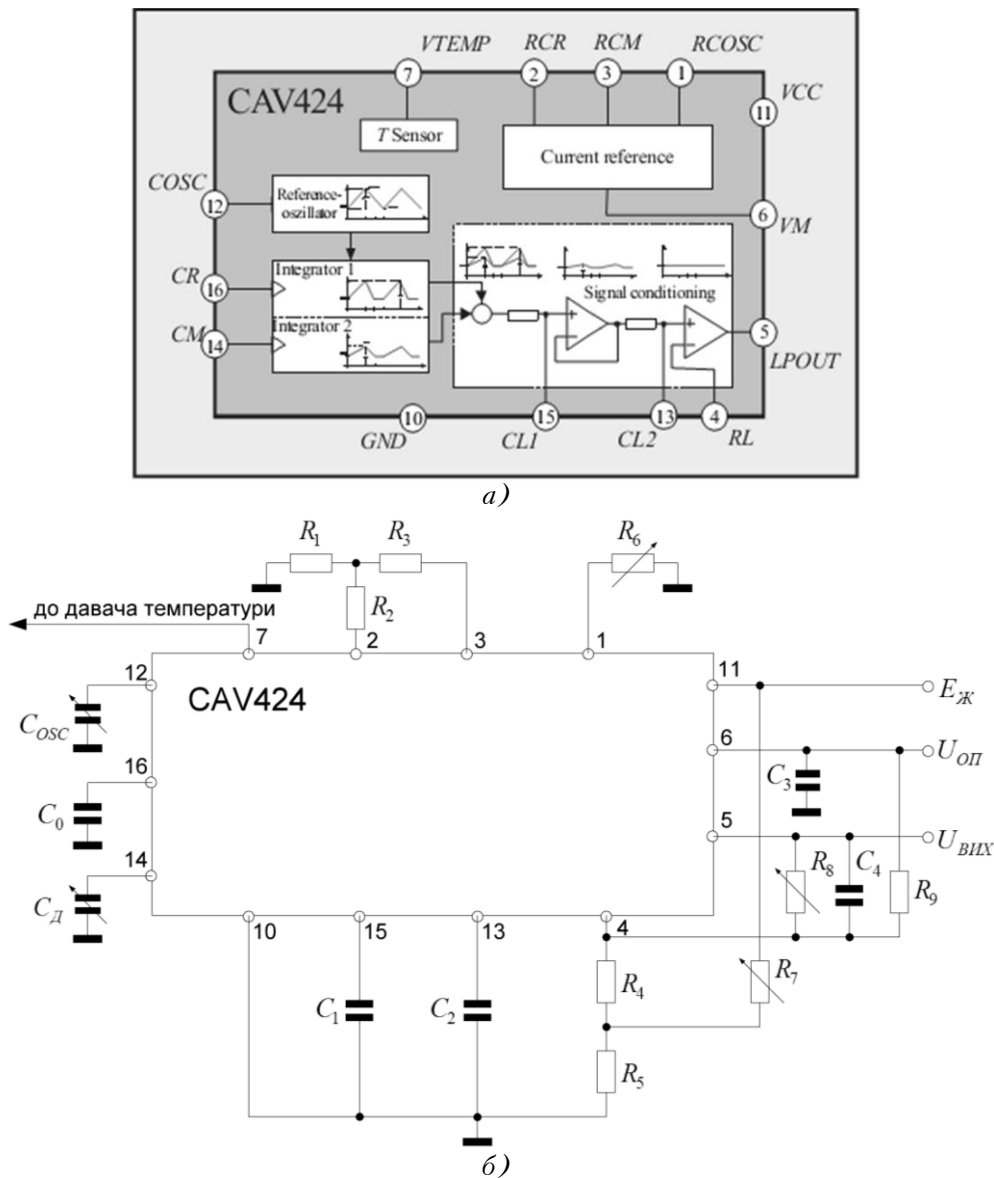


Рис. 8. Структурна схема перетворювача ємність – напруга (а) та схема підключення зовнішніх елементів (б)

Список використаної літератури:

1. Блок инерциальных датчиков / С.А. Анчури, В.Н. Максимов, Е.С. Морозов та ін. // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 1. – С. 50–53.
2. Схемотехническое конструирование БИС преобразователя емкость-напряжение для микроэлектромеханических датчиков / А.И. Белоус, В.А. Емельянов, С.Е. Дрозд та ін. // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 15–19.
3. Брехта М. Преобразователи ёмкости в цифровой код на основе сигма-дельта модулятора / М.Брехта // Компоненты и технологии. – 2006. – № 1. – С. 34–36.
4. Современные тенденции развития микросистемной техники / В.Д. Вернер, П.П. Мальцев, А.А. Резнев та ін. // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 2–6.
5. Коноплев Б.Г. Интегральный микромеханический гироскоп-акселерометр на основе углеродных нанотрубок / Б.Г. Коноплев, И.Е. Лысенко, Е.В. Полищук // Патент РФ № 2334237. – 2008.
6. Королев М.А. Интегрированные микросистемы – перспективные элементы микросистемной техники / М.А. Королев, Р.Д. Тихонов, Ю.А. Чаплыгин // Микросистемная техника. – 2003. – № 7. – С. 6–7.
7. Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники / Лысенко. – Таганрог : ТРТУ, 2005. – 103 с.
8. Лысенко И.Е. Интегральный микромеханический гироскоп-акселерометр / И.Е. Лысенко // Патент РФ № 2293338. – 2007.
9. Пейтон А.Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А.Дж. Пейтон, В.Воли. – М. : БИНОМ, 1994. – 352 с.
10. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла / А.И. Погалов, В.П. Тимошенко, С.П. Тимошенко, Ю.А. Чаплыгин // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 36–41.
11. Прокофьев И.В. Нано- и микросистемы для мониторинга параметров движения транспортных средств / И.В. Прокофьев, Р.Д. Тихонов // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 12. – С. 48–50.
12. Распопов В.Я. Микромеханические приборы / В.Я. Распопов. – М. : Машиностроение, 2007. – 400 с.
13. Рудик А.В. Інтегральні перетворювачі відхилення електричної ємності від номінального значення / А.В. Рудик // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій / Тези доповідей 8-ої міжнародної НПК. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – С. 67–68.
14. Шаранов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шаранов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шаранова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
15. CAV414 – Capacity/voltage (C/V-) transducer IC with adjustable output voltage [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.analogmicro.de>.
16. CAV424 – C/U transducer IC with adjustable output voltage [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.analogmicro.de>.
17. CAV444 – C/V transmitter IC with adjustable output voltage for capacitive input signals [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.analogmicro.de>.
18. Elwenspoek M. Mechanical microsensors / M.Elwenspoek, R.Wiegerink. – Springer, 2001. – 308 p.
19. Extending the Capacitive Input Range of the AD7745/AD7746 Capacitance-to-Digital Converter / CircuitNote CN-0129 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.analog.com>.
20. Using the ADuCM360/ADuCM361 Low Power, Precision Analog Microcontroller with Dual Sigma-Delta ADCs, ARM Cortex-M3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.analog.com>.
21. Xie H. Gyroscope and micromirror design using vertical-axis CMOS-MEMS actuation and sensing / H.Xie. – Carnegie Mellon university, 2002. – 246 p.
22. 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7745/AD7746 Analog Devices [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.analog.com>.

23. 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7747 Analog Devices [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.analog.com>.

References:

1. Anchurin, S.A., Maksimov, V.N., Morozov, E.S., Golovan', A.S. and Shilov, V.F. (2011), "Blok inertsiyal'nykh datchikov", *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, Vol. 1, pp. 50–53.
2. Belous, A.I., Emel'yanov, V.A., Drozd, S.E., Konnov, E.V., Mukhurov, N.I. and Plebanovich, V.A. (2008), "Skhemotekhnicheskoe konstruirovaniye BIS preobrazovatelya emkost'-napryazheniye dlya mikroelektromekhanicheskikh datchikov", *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, Vol. 8, pp. 15–19.
3. Brikhta, M. (2006), "Preobrazovately emkosti v tsifrovoy kod na osnove sigma-del'ta modulyatora", *Komponenty i tekhnologii*, Vol. 1, pp. 34–36.
4. Verner, V.D., Mal'tsev, P.P., Reznov, A.A., Saurov, A.N. and Chaplygin, Yu.A. (2008), "Sovremennyye tendentsii razvitiya mikrosistemnoy tekhniki", *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, Vol. 8, pp. 2–6.
5. Konoplev, B.G., Lysenko, I.E. and Polishchuk, E.V. (2008), *Integral'nyy mikromekhanicheskiy giroskop-akselerometr na osnove uglerodnykh nanotrubok*, Patent RF No. 2334237.
6. Korolev, M.A., Tikhonov, R.D. and Chaplygin, Yu.A. (2003), "Integrirovannyye mikrosistemy – perspektivnyye elementy mikrosistemnoy tekhniki", *Mikrosistemnaya tekhnika*, Vol. 7, pp. 6–7.
7. Lysenko, I.E. (2005), *Proektirovaniye sensorynykh i aktyuatornykh elementov mikrosistemnoy tekhniki*, TRTU, Taganrog, 103 p.
8. Lysenko, I.E. (2007), *Integral'nyy mikromekhanicheskiy giroskop-akselerometr*, Patent RF No. 2293338.
9. Peyton, A.Dzh. and Volsh, V. (1994), *Analogovaya elektronika na operatsionnykh usilitelyakh*, BINOM, Moscow, 352 p.
10. Pogalov, A.I., Timoshenkov, V.P., Timoshenkov, S.P. and Chaplygin, Yu.A. (1999), "Razrabotka mikrogiroskopov na osnove mnogoslennykh struktur kremniya i stekla", *Mikrosistemnaya tekhnika*, Vol. 1, pp. 36–41.
11. Prokof'ev, I.V. and Tikhonov, R.D. (2011), "Nano- i mikrosistemy dlya monitoringa parametrov dvizheniya transportnykh sredstv", *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, Vol. 12, pp. 48–50.
12. Raspopov, V.Ya. (2007), *Mikromekhanicheskie pribory*, Mashinostroeniye, Moscow, 400 p.
13. Rudyk, A.V. (2016), "Integral'ni peretvorjuvachi vidhlyennja elektrychnoi' jemnosti vid nominal'nogo znachennja", *Proceedings of the 8-th International SPC "Suchasni problemy i dosjagnennja v galuzi radiotekhniki, telekomunikacij ta informacijnyh tehnologij"*, ZNTU, Zaporizhzhia, Ukraine, pp. 67–68.
14. Sharapov, V.M., Musienko, M.P. and Sharapova, E.V. (2006), *P'ezoelektricheskie datchiki*, Tekhnosfera, Moscow, 632 p.
15. Analog Microelectronics (2016), "CAV414 – Capacity/voltage (C/V-) transducer IC with adjustable output voltage", available at: www.analogmicro.de
16. Analog Microelectronics (2016), "CAV424 – C/U transducer IC with adjustable output voltage", available at: www.analogmicro.de
17. Analog Microelectronics (2016), "CAV444 – C/V transmitter IC with adjustable output voltage for capacitive input signals", available at: www.analogmicro.de
18. Elwenspoek, M. and Wiegerink, R. (2001), *Mechanical microsensors*, Springer, 308 p.
19. Analog Devices (2016), "Extending the Capacitive Input Range of the AD7745/AD7746 Capacitance-to-Digital Converter. CircuitNote CN-0129", available at: www.analog.com
20. Analog Devices (2016), "Using the ADuCM360/ADuCM361 Low Power, Precision Analog Microcontroller with Dual Sigma-Delta ADCs, ARM Cortex-M3", available at: www.analog.com
21. Xie, H. (2002), *Gyroscope and micromirror design using vertical-axis CMOS-MEMS actuation and sensing*, Carnegie Mellon university, Pittsburgh, 246 p.

22. Analog Devices (2016), "24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7745 / AD7746 Analog Devices", available at: www.analog.com
23. Analog Devices (2016), "24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7747 Analog Devices", available at: www.analog.com

РУДИК Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету, м. Київ.

Наукові інтереси:

- вимірювання електричних та механічних величин;
- системи навігації мобільних робототехнічних комплексів;
- обробка сигналів мікромеханічних датчиків навігаційних систем.

E-mail: andrey05011971@mail.ru.

Тел.: (050) 445-31-17.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2016.