

СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ ГРАВІТАЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ЛІНІЙНУ ШВИДКІСТЬ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО КОЛІСНОГО РОБОТА

© Козленко М. І., 2015

Описано створену систему компенсації гравітаційного впливу на лінійну швидкість колісного автономного мобільного робота, що обладнаний колекторним ходовим двигуном. Встановлено характеристики сигналів, що надходять від сенсорів нахилу. Обґрунтовано вибір способу здійснення ШІМ керування двигуном. Запропоновано спосіб програмної реалізації регулятора ходу.

Ключові слова: автономний мобільний робот, датчик нахилу, регулятор ходу.

This paper describes the velocity stabilization system of the wheeled autonomous mobile robot. The experimental research results of the tilt sensor characteristics are presented. The features of the PWM approaches are established and the best method is selected. Based on the established features software realization conception is proposed.

Key words: autonomous mobile robot, tilt sensor, electronic speed controller.

Вступ

Сфера застосування автономних мобільних роботів на даний час є такою, що швидко розширюється. Розвиток технологій на основі штучного інтелекту дозволяє вирішувати все більш складні задачі в автономному режимі у складних умовах. Надзвичайно важливим питанням під час функціонування робота є визначення його координат та орієнтації в просторі. Отже, проведення досліджень спрямованих на вдосконалення процедур визначення положення та орієнтації автономних мобільних роботів у просторі є актуальним.

Постановка проблеми в загальному

Наявність інформації про орієнтацію робота у просторі дозволяє компенсувати гравітаційний вплив на його поведінку. Необхідність у простих та надійних засобах визначення положення та орієнтації зумовлює практичне завдання по створенню таких засобів, а також методів та засобів опрацювання сигналів, що надходять від сенсорів. Результативне вирішення цього завдання можливе за умови всебічного дослідження характеристик сигналів, що надходять від сенсорів. В той же час, дуже часто в якості ходових двигунів в мобільній робототехніці часто використовуються колекторні двигуни, що, як правило, не обладнані сенсорами швидкості обертання, тому системи керування

такими двигунами працюють, переважно, за розімкненим принципом. Отже, побудова широтно-імпульсних контролерів, що забезпечують високі показники якості керування швидкістю обертання двигуна в таких умовах в т. ч. і з врахуванням нахилу робота є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Використання лінійних акселерометрів для визначення орієнтації у просторі, зокрема, кута нахилу описано в [1]. Використання акселерометрів для визначення орієнтації та руху портативних пристроїв міститься у [2]. Застосування лінійних акселерометрів для визначення положення автомобіля описано у [3]. Про необхідність фільтрації сигналів акселерометра можна ознайомитись в [4]. Основні прикладні моменти визначення кута нахилу містяться в багатьох публікаціях, зокрема, в [5]. Робота з акселерометрами фірми STMicroelectronics описана у [6]. Прикладні моменти дослідження характеристик сигналів описано у [7, 8] та [9].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Раніше невирішеною частиною загальної проблеми є отримання та аналіз спектральних та статистичних характеристик сигналів, що надходять під час функціонування автономних мобільних роботів з датчиків нахилу в якості яких використано лінійні акселерометри, обґрунтування вибору способу здійснення ШІМ керування двигуном та ефективна програмна реалізація регулятора швидкості, саме цьому і присвячена дана робота.

Формулювання цілей даної роботи

Отже, об'єктом дослідження є автономні мобільні роботи. Предметом дослідження є система стабілізації лінійної швидкості робота. Метою роботи є розробка такої системи та дослідження її характеристик.

Викладення основного матеріалу досліджень

Розроблена структура системи компенсації гравітаційного впливу на лінійну швидкість автономного мобільного колісного робота, що обладнаний колекторним ходовим двигуном представлена на рисунку 1. Сигнал з сенсора нахилу після фільтрації надходить до регулятора ходу і використовується в каналі компенсації збурення. Як відомо, такий підхід не впливає на стійкість системи автоматичного керування. Паралельно цей сигнал надходить також і до інтелектуальної частини системи і може використовуватись для формування інформації про орієнтацію робота в просторі. На основі аналізу вимог, що ставляться до інерціальних навігаційних систем колісних автономних мобільних роботів, розроблено модуль [10], що містить наступні основні вузли: двохосьовий датчик кутової швидкості (MEMS-"гіроскоп") типу LPY550AL фірми ST, трьохосьовий акселерометр типу LIS302SG, трьохосьовий магнітометр типу LSM303DLHC тієї ж фірми, мікроконтролер типу ATXmega32A4 фірми Atmel та стабілізатор живлення типу L78L33AC. Стабілізатор формує напругу живлення значенням 3,3 V з максимальним струмом до 100 mA для живлення усіх компонентів модуля. Мікроконтролер здійснює введення сигналів акселерометра та датчика кутової швидкості за допомогою аналого-цифрового перетворення за 5 каналами зі швидкістю 2 MSPS і введення сигналів магнітометра за допомогою шини I²C.

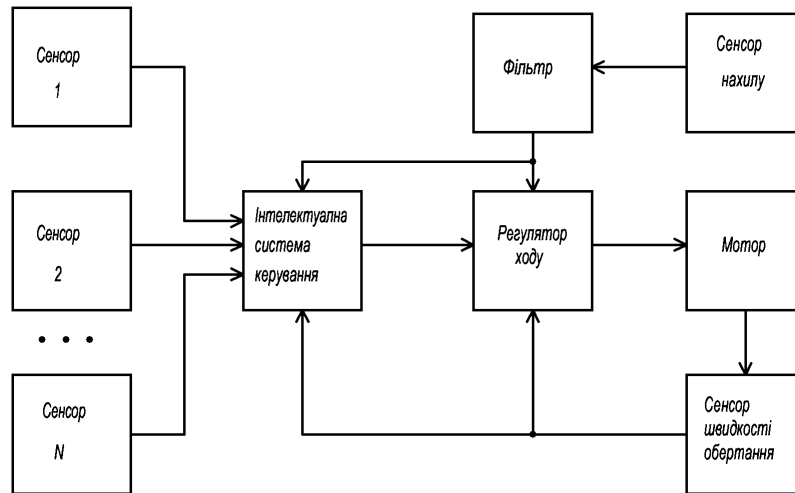


Рис. 1. Структурна схема системи керування

Також мікроконтролер реалізує фільтр та програмний інтегратор кутової швидкості, забезпечує доступ зовні до навігаційних даних за інтерфейсами I²C, SPI, UART. Крім того, два сигнали можуть бути виведені в аналоговому форматі зі швидкістю до 1 MSPS. Конфігурування параметрів мікромодуля здійснюється через UART. Забезпечується безпосередній доступ до аналогових виходів сенсорів.

Основні характеристики мікромодуля є наступні: діапазон вимірювання (повна шкала) магнітометра від 1,3 до 8,1 Гс з роздільною здатністю 2 мГс. Діапазон вимірювання кутових швидкостей від 500 до 2000 °/с, шум 0,059 °/с/√Гц, частотний діапазон до 140 Гц. Чутливість акселерометра 0,478 В/g, шум 200 мг/√Гц. Конструктивно модуль виконано у вигляді друкованої плати з двохстороннім монтажем компонентів.

Вихідні дані для дослідження характеристик сигналів було отримано експериментальним шляхом. Повнопривідний чотирьохколісний автономний інтелектуальний робот було обладнано даним модулем інерціальної навігації, сигнал, що відповідає куту нахилу робота за напрямом його руху знімався з відповідного виходу лінійного акселерометра. Сигнал для досліджень багатократно фіксувався за допомогою 16-розрядного АЦП з частотою $f_s = 48$ кГц (інтервал дискретизації $T_s = 2,08(3) \cdot 10^{-5}$ с) та спеціально розробленого апаратного і програмного забезпечення для збереження отриманих даних у файлах на комп'ютері.

Приклад часової форми фрагменту сигналу подано на рис. 2.

Дослідження часових, частотних та статистичних характеристик сигналів проведено за допомогою спеціально розробленого раніше [9] у середовищі MATLAB програмного забезпечення.

Для імпорту досліджуваних сигналів у середовище та перетворення їх у вектори було використано вбудований інтерфейс `uimport`, який дозволяє працювати з широким спектром файлів, зокрема .wav та .txt форматів.

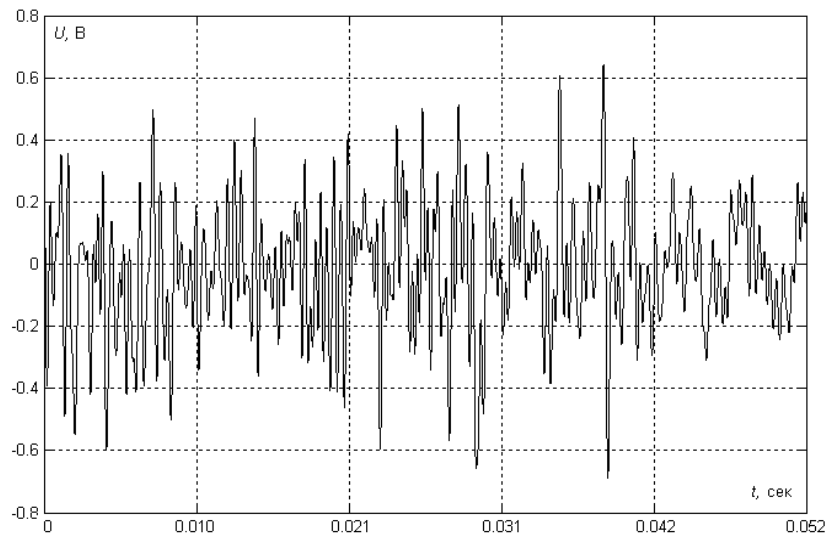


Рис. 2. Приклад часової форми фрагменту сигналу

Графік автокореляційної функції розглянутого фрагменту сигналу представлено на рис. 3. Як можна побачити, автокореляційна функція загасає швидко, що свідчить про наявність суттєвого впливу високочастотної випадкової складової в досліджуваному сигналі. Обчислена експонента Херста для дискретизованого часового ряду складає 0,0507, що свідчить про антиперсистентність ряду.

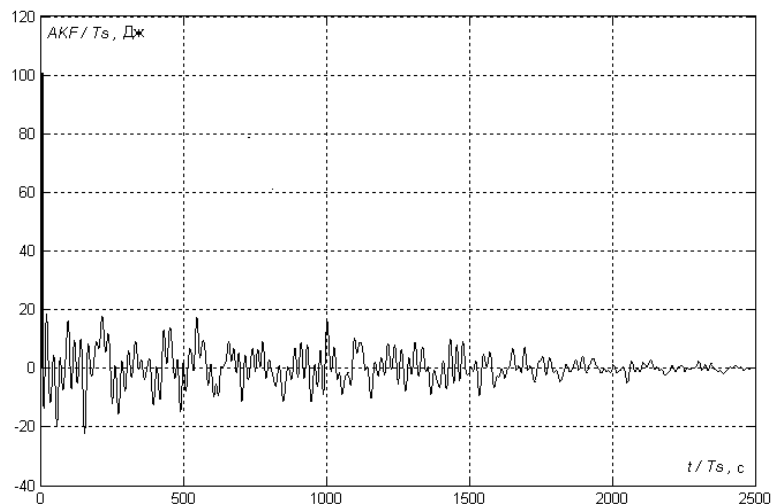


Рис. 3. Автокореляційна функція фрагменту сигналу

Частотний спектральний аналіз сигналів проведено у відповідності до перетворення Фур'є, шляхом розрахунку дискретного перетворення з подальшим обчисленням спектральної щільності енергії. Для обчислення перетворення Фур'є було використано вбудовану функцію `fft()`, яка реалізує дискретне перетворення вектора (масиву). Результатом її роботи є спектральна щільність амплітуд, у вигляді вектора комплексних чисел. Для зміщення елемента, що відповідає нульовій частоті в центр масиву використано вбудовану функцію `fftshift()`. Отримана однобічна спектральна щільність енергії розглянутого фрагменту сигналу представлена на рисунку 4.

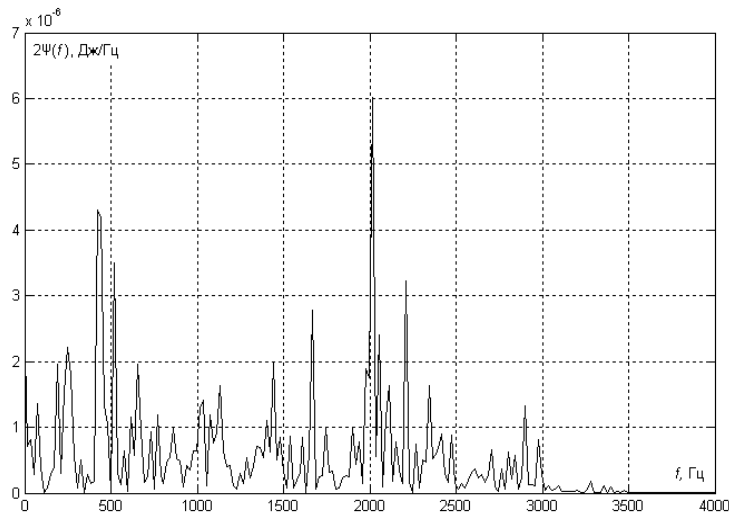


Рис.4. Однобічна спектральна щільність енергії фрагменту сигналу

Для визначення спектральної щільності енергії та повної енергії сигналу розроблено процедура `esd()`, що організована у вигляді `m`-файла. Візуалізація отриманих результатів здійснюється за допомогою вбудованих засобів. Як можна побачити з рис. 4. спектральна щільність енергії є суттєво нерівномірною в широкий смузі частот і має яскраво виражені максимуми на певних частотах, що може бути пояснено механічним впливом двигунів робота, що створюють вібрацію, властивостями поверхні якою рухався робот, наводками від силових ланцюжків, шумом тракту передачі сигналу та іншими факторами. Корисна інформація міститься у низькочастотній області представленого сигналу. В умовах експерименту частота зміни нахилу складала менше 1 Гц (за даними виробника датчика він здатен працювати в смузі до 140 Гц). В той же час, можна побачити, що сигнал, що надходить від датчика до пристрою оброблення має значно ширший спектр. Тому, очевидно, що сигнал перед використанням слід фільтрувати. Також слід враховувати, що шумова (завадна) компонента сигналу не може бути апроксимована білим шумом, що слід брати до уваги при визначенні характеристик та параметрів фільтра.

Гістограма емпіричного розподілу значень сигналу показана на рисунку 5.

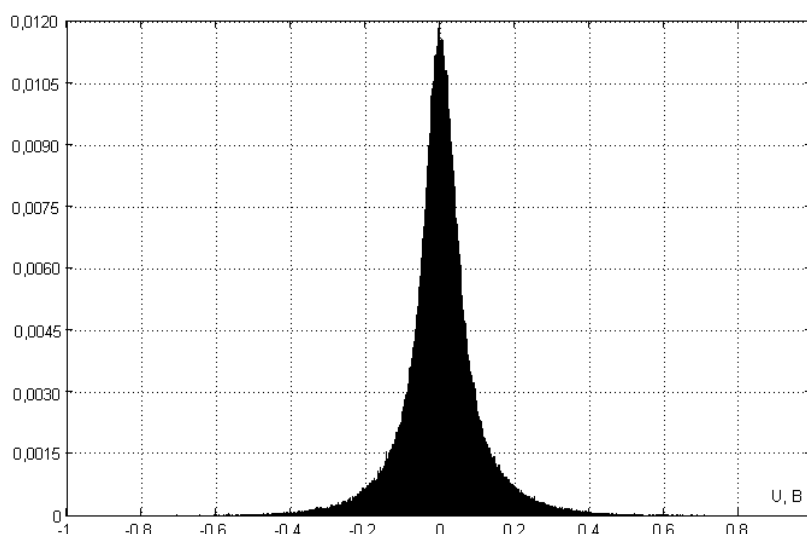


Рис. 5. Гістограма емпіричного розподілу значень сигналу

Як можна побачити характер розподілу суттєво відрізняється від нормального. Було проведено тестування вибірки з 333056 відліків сигналу на нормальність за допомогою тестів

Жарка-Бера (тестова статистика $7,7202 \cdot 10^5$), Колмогорова-Смірнова (статистика 0,3835) та Ліллієфорса (статистика 0,1052) при широковживаному значенні рівня значущості 5%. Усі тести показали, що гіпотезу про нормальність розподілу можна відкинути.

Таким чином, слід вважати недоцільним застосування широковживаного в системах інерціальної навігації фільтра Калмана для опрацювання сигналу, оскільки розподіл шуму відрізняється від нормального.

Іншою, не менш важливою стороною системи є забезпечення ефективного керування швидкістю ходового мотору в залежності від кута нахилу. Використання колекторних двигунів постійного струму в різних галузях автоматизації на даний час є надзвичайно поширеним завдяки багатьом факторам, зокрема, співвідношенню ціна/якість. Дешеві колекторні двигуни часто не обладнані сенсорами швидкості обертання, тому системи керування такими двигунами працюють, як правило, за принципом "feed forward". Тому, будувати контролер швидкості (регулятор ходу) слід так, що б при зміні навантаження у широких межах забезпечити мінімально можливу зміну частоти обертання як за наявності, так і при відсутності зворотного зв'язку. За наявності датчика швидкості (наприклад, енкодера) і зворотного зв'язку цей фактор не втрачає своєї актуальності. На даний час відомо багато способів здійснення широтно-імпульсного реверсивного керування двигуном постійного струму за допомогою Н-моста [11]. Найбільш поширені з них наступні. Позначимо верхній ключ лівого напівмоста номером 1, нижній - 2, верхній ключ правого напівмоста - 3, нижній - 4. Перший спосіб полягає у тому ключ 1 знаходиться у замкненому стані, ключі 2 та 3 у розімкненому, а ключ 4 періодично перемикається із замкненого стану в розімкнений у відповідності до сигналу широтно-імпульсної модуляції, що формується контролером. При другому способі ключ 1 замкнений, 2 – розімкнений, ключі 3 і 4 періодично перемикаються контролером у протифазі, тобто, якщо ключ 3 замкнений, то ключ 4 розімкнений і навпаки. Існує модифікація другого способу, яка полягає періодичній зміні ролі ключів для забезпечення рівномірності їх навантаження. Для зміни напряму обертання двигуна використовуються аналогічні схеми перемикавання з іншими відповідними ключами. У третьому способі формуються біполярні імпульси на двигуні шляхом синхронного перемикавання ключів 1, 4 та 2, 3 в протифазі. В четвертому способі ключі 1 і 2 перемикаються в протифазі та ключі 3, 4 також перемикаються в протифазі, а результуючі імпульси є різницею між тривалістю імпульсів двох напівмостів.

Проведено експериментальне дослідження [12] статичних та динамічних властивостей керування швидкістю обертання двигуна для вищезгаданих способів. Під час експерименту здійснювався розгін двигуна до 50% ШІМ заповнення під навантаженням, що складає 25% від номінального, збільшення навантаження до 50%, повторне зменшення до 25% від номінального та гальмування двигуна до 0% ШІМ заповнення. Перехідні часові характеристики представлено на рисунку 6.

Як можна побачити, статичні та динамічні властивості 2-го, 3-го, та 4-го способів практично не відрізняються між собою, в той час коли статичні властивості 1-го є суттєво гіршими. Відносна просадка швидкості є більшою приблизно в 1,4 рази. Динамічні властивості при розгоні практично однакові для усіх способів, а при гальмуванні час перехідного процесу є суттєво, приблизно у 3 рази, гіршим для першого способу.

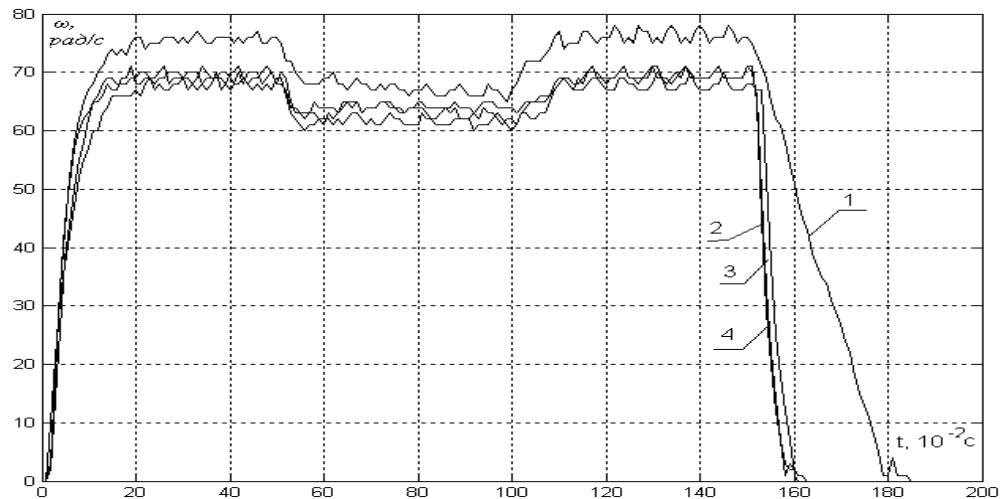


Рис. 6. Перехідні характеристики під навантаженням

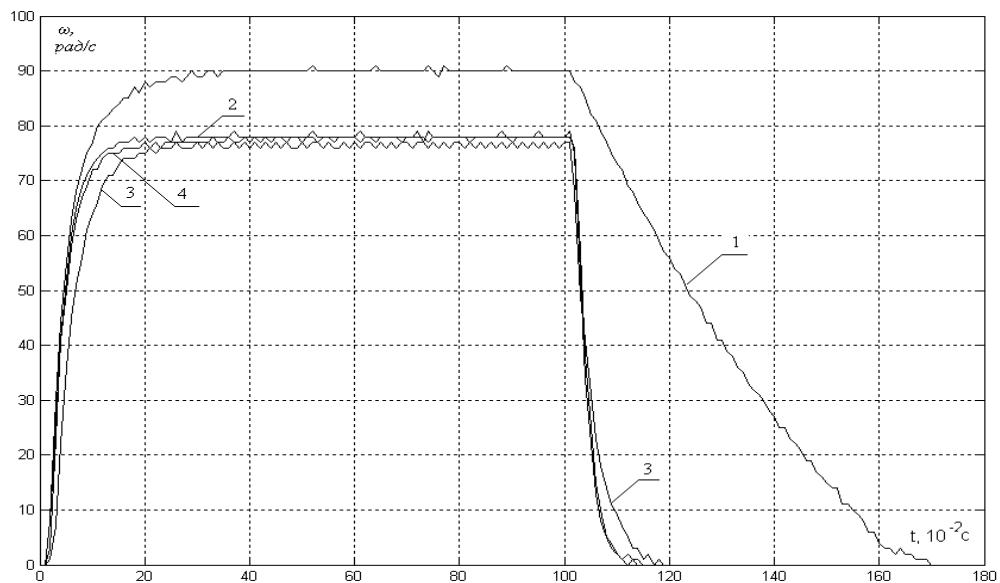


Рис. 7. Перехідні характеристики без навантаження

Також проведено дослідження перехідних характеристик при відсутності навантаження (див. рис. 7). Як можна побачити, і в цьому випадку, динамічні властивості 2-го, 3-го, та 4-го способів практично не відрізняються між собою (3-й незначно гірший). Проте, час вільного вибігу при першому способі суттєво, приблизно у 4,7 рази, більший.

Експериментальну модель електронного контролера швидкості побудовано на базі недорогого мікроконтролера AVR архітектури типу ATmega168-20PU. Наявність вбудованого аналого-цифрового перетворювача, таймерів та значної кількості різноманітних цифрових інтерфейсів дозволяє ефективно вирішити задачі введення-виведення інформації з мінімальною кількістю додаткових електронних компонентів.

Відома програмна реалізація мовою C цифрового регулятора на базі мікроконтролера AVR описана в документі Application Note AVR221 [13], що доступний на сайті виробника. Особливістю є застосування окремої функції для обчислення вихідного сигналу регулятора, розмір якої складає 534 байти програмної пам'яті. Характерним є зберігання параметрів та змінних стану регулятора у структурі. Повний цикл обчислень складає 877 циклів процесора, що відповідає часу 54,812 мкс при тактовій частоті 16 МГц без врахування часу, необхідного на виклик функції та часу аналого-цифрового перетворення, в разі якщо воно проводиться при необхідності опрацювання аналогових сигналів.

Автором запропоновано інший підхід, а саме реалізація регулятора в основному циклі програми. Це зменшує час обчислень за рахунок відсутності виклику функцій, отже, відсутності передавання значень аргументів і результатів. Параметри регулятора і його стан зберігаються у глобальних змінних. Кількість змінних також є суттєво меншою – усього 16 байт. Запропоновані рішення дозволили отримати час виконання повного циклу обчислень 31,075 мкс, що відповідає частоті 32,180 кГц. Таким чином, спостерігається збільшення продуктивності в 1,76 рази. В разі необхідності опрацювання одного аналогового сигналу, АЦП слід сконфігурувати в режимі "free-run" і це не призведе до додаткових втрат часу. Якщо є потреба опрацювати два і більше аналогових сигнали, то потрібний додатковий час на програмне перемикання каналів АЦП та стабілізацію сигналів після перемикання (близько 10 мкс). Аналого-цифрове перетворення слід здійснювати паралельно з обчисленнями і тільки перемикання каналів проводити у перериваннях. Для випадку використання двох каналів вбудованого АЦП (тактова частота 125 кГц) частота регулятора склала 28,690 кГц, що відповідає часу 34,855 мкс. Отже, спостерігається збільшення продуктивності в 1,57 рази.

Слід відзначити, що означена область застосування регуляторів вимагає підвищеної надійності і стабільності роботи як апаратного так і програмного забезпечення, що може вимагати спеціальних заходів, зокрема, використання сторожового таймера, перенаправлення невикористовуваних векторів переривань, контролю за поведінкою програмного лічильника, контролю часу виконання переривань та функцій, використання зовнішнього супервізора живлення з можливістю незалежного від мікроконтролера переведення виходів регулятора в безпечний стан у випадку збоїв в роботі.

Висновки

1. Розроблено систему компенсації гравітаційного впливу на лінійну швидкість автономного мобільного колісного робота, що обладнаний колекторним ходовим двигуном. У якості датчика нахилу використано лінійний акселерометр.

2. Досліджено характеристики сигналів, що надходять від датчика нахилу. Встановлено, що сигнал є суттєво антиперсистентним. Спектральна щільність енергії шумової компоненти сигналу є суттєво нерівномірною і не може бути представлена у вигляді білого шуму. Ймовірнісний розподіл шуму відрізняється від нормального. Оптимальне опрацювання таких сигналів потребує розробки спеціалізованих засобів фільтрації.

3. Досліджено статичні та динамічні характеристики ходового колекторного двигуна при різних способах здійснення широтно-імпульсного керування. Обґрунтовано вибір способу ШИМ.

4. Запропоновано концепцію програмної реалізації регулятора ходу, що забезпечило збільшення продуктивності більш ніж у півтора рази.

Перспективи подальших досліджень

Основними напрямками подальшого дослідження є створення методів та засобів оптимального опрацювання та фільтрації сигналів датчиків. Зокрема, автор вважає перспективним створення спеціалізованих фільтрів на базі сучасних програмованих систем на кристалі.

Література

1. Бузыканов С. Датчик наклона на основе твердотельного акселерометра / С. Бузыканов // Современная электроника. – 2004. – № 2. – С. 42-45. 2. Jiayang Liu. uWave: Accelerometer-based personalized

gesture recognition and its applications / Jiayang Liu, Lin Zhong, Jehan Wickramasuriya Venu Vasudevan // Pervasive and Mobile Computing. – vol. 5. – issue 6. – December, 2009. – P. 657-675. 3. Клець Д. М. *Применение акселерометров в качестве элементов контрольно-измерительной системы автомобиля / Д. М. Клець // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 9 (180) Ч. 1. – Луганськ: Видавництво Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2012.* 4. Пестов Е. *Распознавание движения мобильного устройства / Е. Пестов // International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – № 1(3). – С. 5-10.* 5. Mark Pedley. *Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. Document Number: AN3461 Rev. 6, 03/2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf* 6. *Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer. Application note AN3182. Doc ID 17289 Rev 1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00268887.pdf* 7. Козленко М. І. *Характер та симетрія функції правдоподібності при демодуляції шумоподібних сигналів в мобільній робототехніці / М. І. Козленко // Вісник Хмельницького національного університету (технічні науки). – 2013. – № 6 (207). – Хмельницький: ХНУ, 2013. – С. 135–139.* 8. Козленко М. І. *Ефективність застосування ймовірнісних характеристик при формуванні ширококутових випадкових сигналів в телекомунікаційних та комп'ютерних системах / Козленко М. І. // Вісник Хмельницького національного університету (технічні науки). – 2012. – № 4 (191). – Хмельницький: ХНУ, 2012. – С. 118–125.* 9. Козленко М. І. *Ефективність використання частотної смуги при формуванні ширококутових сигналів в розподілених комп'ютерних та телекомунікаційних системах / Козленко М. І. // Проблеми інформаційних технологій. – 2012. – № 1 (011). – Херсон: ХНТУ, 2012. – С. 115-120.* 10. Козленко М. І. *Мікромодуль інерціальної навігаційної системи для діючої моделі автономного транспортного засобу / М. І. Козленко // Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування 2013: стан і перспективи", 23-24 квітня 2013 р, м. Київ, ПБФ, НТУУ "КПІ". – Київ: НТУУ "КПІ" ВПІ ВПК "Політехніка", 2013. – С. 26–27.* 11. Dave Wilson. *So, Which PWM Technique is Best? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://e2e.ti.com/blogs_/b/motordrivecontrol/archive/2012/03/19/so-which-pwm-technique-is-best-part-1.aspx.* 12. Козленко М. І. *Статичні та динамічні властивості двигуна постійного струму при різних способах здійснення шім-керування / М. І. Козленко // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014). XII Міжнародна конференція. Тези доповідей. Вінниця, 14-16 жовтня 2014 року. – Вінниця: ВНТУ. – 2014. – С. 124.* 13. *AVR221: Discrete PID controller on tinyAVR and megaAVR devices. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.atmel.com/Images/doc.2558.pdf>*