

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-116-123

УДК 528.563

А. Г. ТКАЧУК, А. А. ГУМЕНЮК, М. В. БОГДАНОВСЬКИЙ

Державний університет «Житомирська політехніка»

О. М. БЕЗВЕСІЛЬНА

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ

У роботі приведено результати досліджень використання різних методів фільтрації вихідного сигналу чутливого елемента системи стабілізації озброєння. Встановлено, що альтернативним методом використання аналогових та цифрових фільтрів для системи стабілізації є застосування двоканального методу Петрова.

Ключові слова: стабілізація, точність, фільтр, двоканальність.

А. ТКАЧУК, А. HUMENIUK, M. BOGDANOVSKYI

¹State University «Zhytomyr Polytechnic»

O. BEZVESILNA

NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»

RESEARCH OF METHODS OF FILTRATION OF THE OUTPUT SIGNAL OF THE SENSITIVE ELEMENT OF THE WEAPON STABILIZATION SYSTEM

The article considers the purpose of the weapon stabilization system, which allows you to keep the position of the gun in space, as well as to aim the weapon at the target regardless of the oscillations of the hull. Ways to increase the accuracy of stabilization are identified. The results of researches of use of various methods of filtering of an output signal of a sensitive element of system of stabilization of armament with use of analog and digital filters are resulted. Approximations of Butterworth, Chebyshev, and Cower polynomials are most commonly used. Filters obtained on the basis of these approximations are called by the appropriate names - Butterworth filter, Chebyshev filter and Cower filter. Elliptical filters and Bessel filters are also used. The influence of the change of the natural frequency of the sensitive element on its accuracy is also analyzed. It is established that the best method of filtering the output signal of the sensitive element of the weapon stabilization system is the two-channel Petrov method. Based on this method, a new three-coordinate piezoelectric sensing element has been developed. The piezoelectric element of one channel, which is installed by inertial mass on the piezoelectric plates, works on compression. An identical piezoelectric element of another channel, installed by the inertial mass under the piezoelectric plates, works in tension. The output electrical signals of the piezoelectric plates of both channels are summed in the adder. The resulting useful electrical signal will be proportional to twice the useful signal. Due to the use of an additional second measuring channel, there is no error in the output signal of the sensing element errors from the influence of vertical acceleration, from the residual non-identity of the structures of the same piezoelectric plates and masses, from the influence of temperature, humidity and ambient pressure.

Keywords: stabilization, accuracy, filter, dual channel.

Вступ

Однією з тенденцій розвитку систем управління вогнем сучасних бойових машин є створення більш ефективного стабілізатора озброєння з високими параметрами точності, що сприяє підвищенню військової потужності бойової машини і живучості системи «скіпаж-машина». У цьому зв'язку аналіз розвитку сучасних стабілізаторів озброєння є актуальним завданням [1-2].

Стабілізатор озброєння являє собою пристрій, що здійснює стабілізацію прицілювання зброї при переміщенні платформи, на якій ця зброя встановлено. Стабілізатор озброєння дозволяє зберігати незмінним положення гармати в просторі, а також здійснювати наведення озброєння на ціль незалежно від коливань корпусу ЛБТ, що виникають при русі по пересічній місцевості.

Аналіз сучасного стану вітчизняної та зарубіжної легкої броньованої техніки (ЛБТ) показує, що багато країн мають у своєму розпорядженні великою кількістю бойових машин з озброєнням, що не відповідає сучасним вимогам. Однак, ці машини характеризуються досить надійною ходовою частиною, що не виробила свого ресурсу. Заміна всього парку бронемашин на нові в даний час є неможливою навіть для самих економічно розвинених держав, тому найбільш прийнятним виходом є модернізація з використанням універсальних бойових модулів.

Українськими підприємствами розроблено велику кількість бойових модулів (в т.ч. стабілізаторів як компонентів цих модулів), які за основними показниками відповідають кращим світовим зразкам, а за багатьма характеристиками перевершують [1-2].

Досягнення високої точності систем стабілізації (СС) стало можливим сьогодні завдяки значному розвитку теорії гіроскопічних пристроїв працями найвизначніших вчених-математиків і механіків: А.Н. Крилова, Б.В. Булгакова, О.Ю. Ішлінського, Я.М. Ройтенберга, С.С. Рівкіна, В. А. Павлова, Е. Г. Попова, А. І. Лур'є, В.В. Солодовнікова та інших. Провідну роль мають і досягнення у галузі інерціальних систем навігації (ІНС) та чутливих елементів ІНС, висвітлених у наукових працях школи видатних вчених НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»: Одинцова А.А., Павловського М.А., Збруцького О.В.,

Самотокіна Б.Б., Карачуна В.В., Рижкова Л.М. та інших. Питання метрології, корисні при дослідженнях похибок чутливих елементів комплексів стабілізації, широко висвітлені у роботах Кваснікова В.П., Коломійця Л.В., Безвесільної О.М., Новицького П.В. та інших.

У роботі [3] побудовано схемотехнічні моделі та проведено моделювання п'єзоелектричних одноканальних перетворювачів з додатковими електричними коливальними контурами, які можуть бути використані в якості чутливого елемента стабілізатора озброєння. Використання таких моделей дозволяє за допомогою прикладних програм проводити оцінку характеристик і прогнозування параметрів і режимів роботи п'єзоелектричних перетворювачів.

У роботі [4] виконано синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкої броньованої техніки. Розроблено структурну схему системи, компонентами якої є: пропорційно-диференціальний регулятор положення і нейромережевий регулятор швидкості. Виконано синтез нейрорегулятора з прогнозуванням.

У роботах [5-9] запропоновано в якості чутливого елемента системи стабілізації використовувати коріолісовий вібраційний гіроскоп. Проаналізовано склад і принцип роботи відомої системи ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу легкої броньованої техніки.

У статтях [10-11] розглянуто систему стабілізації з оптичним гіроскопом та приведено основні конструкційні розрахунки. Запропоновано програмні методи фільтрації вихідних сигналів акселерометрів та гравіметрів. Відсутнє порівняння із відомими аналогами.

У роботі [12] описано новий мобільний прилад для вимірювання динамічного вектора прискорення сили тяжіння і його градієнтів у підводному середовищі. Даний датчик може встановлюватись на озброєнні військових підводних човнів. Отримані результати досліджень можна використовувати і у проектуванні системи стабілізації озброєння легких броньованих машин, проте необхідно враховувати особливості наземної експлуатації системи.

Метою статті є дослідження використання різних методів фільтрації вихідних сигналів чутливих елементів системи стабілізації озброєння для підвищення її точності.

1. Застосування аналогових та цифрових фільтрів для фільтрації вихідного сигналу чутливого елемента стабілізатора озброєння

Амплітудно-частотні характеристики ідеальних фільтрів, як було показано на рис.4.1. мають різку границю між областями пропуску та затримки сигналів.

Фізична реалізація фільтрів з такого виду характеристиками неможлива, тому доводиться використовувати фільтри, характеристики яких, по можливості, наближені до ідеальних. Степінь близькості ідеальної і реальної характеристик фільтра прийнято оцінювати наступними параметрами ω_c - частота зрізу, яка визначає полосу пропуску зрізу, ω_z - границя області затухання, K_c - рівень АЧХ, що визначає нерівномірність передачі сигналу в полосі пропуску, K_z - рівень АЧХ, що визначає ослаблення в області затухання.

Фізичний зміст вказаних характеристик наглядно представлено на прикладі АЧХ ФНЧ, зображеному на рис.1 [13].

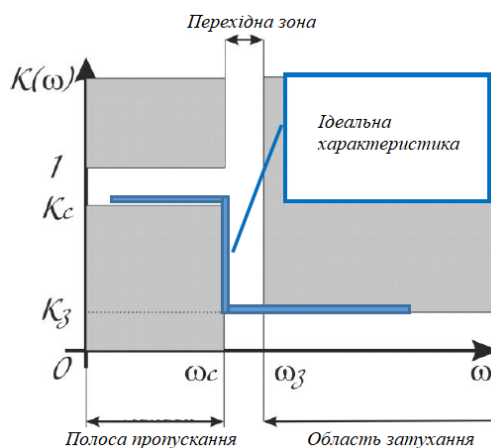


Рис. 1. АЧХ фільтра [13]

Поведінка АЧХ в області пропуску і області затухання, а саме допустимість пульсацій в даних областях являється додатковими умовами.

У загальному випадку можливі чотири основні варіанти поведінки АЧХ:

- монотонна;
- з пульсацією в полосі пропуску;
- з пульсацією в полосі затримки;
- з пульсацією в полосі пропуску і затухання.

На практиці проектування аналогових і цифрових фільтрів найчастіше використовуються наступні характеристики:

- *крутизна АЧХ* - термін, що використовується для опису нахилу амплітудно-частотної

характеристики в перехідній полосі, розташованій між полосами пропуску і затримки. Якщо АЧХ фільтр має крутизну -20 дБ/дек, ослаблення гармонічного сигналу зі збільшенням частоти в десять разів (на декаду) буде більше на 20 дБ;

- *нерівномірність АЧХ* в полосі пропуску - розмір флуктуації АЧХ від піка до піка в полосі пропуску;

- *ослаблення - зменшення* амплітуди гармонічного сигналу (дБ), після проходження через фільтр.

Ослаблення фільтра являє собою відношення амплітуди вихідного гармонічного сигналу на певній частоті, яке визначається таким чином:

$$L = 20 \lg \frac{Xm_{\text{вх}}}{Xm_{\text{вх}}} (\text{дБ}) \quad (1)$$

Через використання логарифмічної залежності у випадку, якщо на заданій частоті амплітуда вихідного гармонічного сигналу фільтра менше амплітуди вхідного сигналу, то ослаблення виражається від'ємним числом.

- *відносне ослаблення* - ослаблення, виміряне по відношенню до найбільшого значення амплітуди.

Найбільшому рівню сигналу зазвичай присвоюється опорний рівень 0 дБ, в результаті чого усі інші значення АЧХ виявляються від'ємними;

- *перехідна полоса* - діапазон частот, в якому АЧХ фільтр переходить від полоси пропуску до полоси затримки;

- *полоса затримки* - діапазон частот, в якому фільтр ослабляє сигнали;

- *полоса пропуску* - діапазон частот сигналу, в якому фільтр пропускає енергію сигналу на вихід з мінімальним ослабленням. Зазвичай визначається як діапазон частот, в якому АЧХ фільтр не виходить за межі зменшення потужності сигналу вдвічі, що відповідає зменшенню АЧХ на 3 дБ;

- *порядок фільтра* - число, що визначає найбільшу степінь чисельника або знаменника передатної функції фільтра;

- *пульсації* - флуктуації АЧХ в полосі пропуску або затримки;

- *центральна частота* (f_0 або ω_0) - частота, що лежить в центрі полоси пропуску фільтра;

- *частота зрізу фільтра* - вища (для ФНЧ) або нижча (для ФВЧ) частота, на якій АЧХ не виходить за межі пульсацій полоси пропуску фільтра.

У системі стабілізації важливим є мати можливість збереження форми сигналу, що накладає додаткові обмеження на вигляд фазочастотної характеристики ідеального фільтра.

Знайти потрібний вигляд ідеальної ФЧХ фізичного реалізованого фільтра доволі просто. Для того, щоб сигнал $u(t)$, що надходить на вхід фільтра, зберіг свою форму, вихідний сигнал фільтра $y(t)$ повинен бути пов'язаний з ним співвідношенням

$$y(t) = k \cdot u(t - t_0), \quad (2)$$

де $k = const$ - масштабний коефіцієнт, $t_0 = const$ - час затримки появи вихідного сигналу по відношенню до вхідного сигналу.

Тобто єдина зміна сигналу, що допускається в такому фільтрі - це затримка в часі і масштабування по амплітуді.

Очевидно, що передатна функція вказаного фільтра має виглядати таким чином:

$$W(s) = ke^{-st_0}, \quad (3)$$

що приводить до ФЧХ у вигляді:

$$\varphi(\omega) = -\omega t_0 \quad (4)$$

тобто дана характеристика повинна бути лінійною відносно частоти [13]. Якщо ФЧХ не буде лінійною однорідною функцією кругової частоти, то різні гармонійні складові сигналу будуть зміщені фільтром на різні інтервали часу, що приведе до викривлення форми сигналу, що містить більше однієї гармонійної складової. Чим ближче ФЧХ фільтра до лінійної однорідної функції, тим викривлення будуть менші ніж викривлення форми сигналу.

Для систем стабілізації доречним було б також проаналізувати можливості використання саме фільтрів нижніх частот для чутливих елементів (гіроскопів, акселерометрів). Властивості таких фільтрів сильно залежать від того, яка саме математична функція обрана для апроксимації частотної характеристики ідеального фільтра, тобто від того якими поліномами описуються їх передатні функції. Саме вибір виду апроксимуючого полінома (а, отже, відповідно і розташування нулів і полюсів на комплексній площині) визначають вид амплітудно-частотних характеристик в полосі пропуску, в перехідній полосі і в полосі затримки.

Найчастіше використовуються апроксимації поліномами Баттерворта, Чебишева і Кауера. Фільтри, отримані на основі даних апроксимацій називають відповідними іменами – фільтр Баттерворта, фільтр Чебишева і фільтр Кауера. Також застосовуються еліптичні фільтри і фільтри Бесселя [13].

Фільтри Баттерворта характеризуються монотонною і найбільш плоскою АЧХ в полосі пропуску, при цьому падіння характеристики відбувається недостатньо різко.

Фільтри Чебишева відрізняються різким спадом АЧХ в перехідній полосі, але в полосі пропуску ці характеристики не являються монотонними (плоскими). На практиці застосовуються два види фільтрів Чебишева, що отримали назви фільтрів першого і другого роду.

Фільтри Бесселя характеризуються ФЧХ близькими до ідеальних, що відповідають однорідній лінійній функції від частоти. Цей тип фільтрів практично не викривляє форму вхідного сигналу, але їх АЧХ в перехідній полосі, ще більш пологі, навіть в порівнянні з фільтрами Баттерворта.

2. Метод фільтрації на основі підбору власної частоти чутливого елементу

Результати вимірювань, отримані за допомогою різних чутливих елементів (струнного, емнісного, двогірскопного, п'єзоелектричного) стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки, містять похибки вимірювань. Ці похибки викликані тим, що чутливий елемент вимірює проекцію сукупності сигналів на власну вісь чутливості: корисного сигналу та сигналу перешкоди (який у декілька разів перевищує корисний сигнал) [1, 14].

Розглянемо вирішення даної проблеми фільтрації вихідного сигналу на прикладі п'єзоелектричного гравіметра (ПГ) [14-15].

Рівняння руху автоматизованої гравіметричної системи для визначення аномалії прискорення сили тяжіння Δg має вигляд [14]:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h} - \gamma_0. \quad (5)$$

де f_z – вихідний сигнал ПГ; g_z – прискорення сили тяжіння вздовж осі чутливості ПГ; v – швидкість об'єкта; r – радіус місцезнаходження об'єкта; e – стиск еліпсоїда; φ – географічна широта; k – курс; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; h – висота літака над еліпсоїдом; \dot{h} – вертикальна швидкість; \ddot{h} – вертикальне прискорення; γ_0 – довідкове значення прискорення сили тяжіння.

Вихідний сигнал гравіметра АГС після обчислення і введення всіх поправок можна записати у вигляді [1, 14]:

$$T = f_z = g_z + \sigma_h, \quad (6)$$

де σ_h – похибка від впливу вертикального прискорення об'єкта.

У роботі [14] отримано аналітичні вирази спектральних щільностей корисного сигналу та вертикального прискорення об'єкта та побудовано їх графіки. Із цих графіків видно, що при частотах, менших за 0,1 рад/с, система літак-автопілот суттєво зменшує ефекти впливу вертикального прискорення; при частотах понад 0,1 рад/с спектральна густина вертикального прискорення прямує до нескінченності. Тому необхідно забезпечити процес фільтрації вихідного сигналу ПГ із частотою 0,1 рад/с. Найпоширенішим методом конструктивної реалізації даного процесу у відомих гравіметрів є використання низькочастотних фільтрів із частотою зрізу 0,1 рад/с. Однак, у тих умовах, у яких передбачена експлуатація ПГ, робота електронних компонентів фільтра стає нестабільною, цим змінюючи його частоту зрізу. У кінцевому результаті фільтр починає пропускати завади на вихід ПГ або не пропускати частину корисного сигналу взагалі. Тому наявність фільтра низьких частот, як окремого блока у складі гравіметра, суттєво зменшує, у першу чергу, надійність приладу та точність.

Запропоновано новий спосіб фільтрації вихідного сигналу ПГ (чутливого елемента системи стабілізації) за рахунок використання п'єзопакета, частота власних коливань якого дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, що може бути виміряна на фоні перешкод – 0,1 рад/с.

Тому, завдяки властивостям п'єзопакета, для вихідного сигналу можна записати співвідношення [14]:

$$T(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(t-\tau) T_0(\tau) d\tau, \quad (7)$$

де $w(t-\tau)$ – вагова функція фільтрації, що реалізується п'єзопакетом; $\tau = 2\pi k$ ($k=1,2,\dots$) – інтервал часу обчислень пристроєм обчислення вихідного сигналу гравіметра. При цьому:

$$w(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} W(j\omega) e^{j\omega t} d\omega = 2\omega_0 \left[\frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0 t} \right], \quad (8)$$

де ω_0 – власна частота гравіметра; $W(j\omega)$ – функція передачі фільтрації, що визначається на основі спектральних щільностей корисного сигналу прискорення сили тяжіння і завад.

Саме за допомогою низькочастотної фільтрації з частотою зрізу 0,1 рад/с, можна відокремлювати g від \ddot{h} із точністю 1 мГал. Отже, частота власних коливань ПГ дорівнює:

Однак, даний спосіб фільтрації передбачає значне збільшення товщини п'єзопакету (габаритів чутливого елемента), тому доцільно розглянути інший спосіб досягнення власної частоти ПГ величиною 0,1 рад/с з уникненням потовщення.

Існує залежність частоти вимірювання від постійної часу, яка має вигляд:

$$\omega_0 \gg \frac{1}{\tau}; \quad \tau = R_{\Sigma} C_{\Sigma}, \quad (9)$$

де R_{Σ} – сумарний опір витоку, утворений поверхневим та об'ємним опором ПГ і вхідним опором вимірювального кола; C_{Σ} – сумарна ємність між гранями пластин ПГ та вхідного кола.

Оскільки власна частота ПГ $\omega_0 = 0,1$ рад/с, тоді маємо:

$$0,1 \gg \frac{1}{\tau} \Rightarrow \tau \gg 10с. \quad (10)$$

У реальних умовах ПГ вмикають у спеціальні вимірювальні схеми, а тому паралельно його власній ємності $C_{ПЕ}$ будуть увімкнені ємності вхідного кола операційного підсилювача $C_{ВХ}$ та з'єднувального кабелю C_K . Аналогічна ситуація відбувається і з опором ПГ $R_{ПЕ}$, до якого ще додається опір ізоляції кабелю R_K та вхідний опір операційного підсилювача $R_{ВХ}$. Тому значення сумарного опору та ємності має наступний вигляд:

$$R_{\Sigma} = R_{ПЕ} + R_K + R_{ВХ}; \quad (11)$$

$$C_{\Sigma} = C_{ПЕ} + C_K + C_{ВХ}. \quad (12)$$

Із формули (10) видно, що чим більше τ , тим менша власна частота ПГ, однак тим повільніший стає процес розряду п'єзоелементу. Через інтервал часу $5\tau = 5 R_{\Sigma} C_{\Sigma}$ напруга та струм у колі зменшаться приблизно 1% від початкового значення, і процес розряду п'єзоелементу можна вважати завершеним.

3. Метод двоканальності Петрова

Як бачимо, точність стабілізації сильно залежить від точності чутливих елементів системи стабілізації. Вихідні сигнали цих чутливих елементів містять значні похибки, описані в [1]. Найпоширенішим методом їх ліквідації є використання фільтрів нижніх частот. Проте існують й інші методи фільтрації, які уникають необхідності використання фільтрів як окремих блоків конструкції системи стабілізації озброєння. Одним із них є метод двоканальності Петрова [17].

Одне з найголовніших питань теорії регулювання за збуренням є питання реалізації умов інваріантності. Якщо застосування принципу регулювання за збуренням дає ряд суттєвих переваг і дозволяє побудувати системи автоматичного регулювання, що характеризуються високою динамічною точністю і базуються на виконанні умов інваріантності, то головною задачею залишається задача реалізації цих умов в реальних системах автоматичного регулювання. Найбільш суттєві результати у вирішенні даної задачі отримані в роботах Б.Н. Петрова [17].

Постановка задачі реалізації умов інваріантності полягає в наступному: вказати загальний «критерій, котрий дозволив би визначити необхідні умови можливості застосування умов інваріантності, як одного із методів розрахунку динамічних систем і виключати ті системи, для яких застосування даних умов є недопустимим, тобто може призвести до фізично нездійсненних результатів».

Вирішення вказаної задачі сформульовано Б.Н. Петровим у виді наступного критерію:

«Необхідною (але не достатньою) ознакою можливості застосування умов інваріантності при розрахунку різних динамічних систем являється обов'язкова наявність в схемі, по меншій мірі, двох каналів впливу між точками прикладання сили збурення і виміру потрібної нам величини».

На ряді конкретних прикладів Б.Н. Петровим проілюстровано випадки систем, при розрахунку яких можливе застосування умов інваріантності, а також вказано протилежний клас систем. Одним з таких прикладів, являється система, що описується рівнянням [17]:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + \dots + a_{13}x_3 &= f_1(t); \\ a_{31}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &= 0; \\ a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

і допускає у випадку, якщо вона впорядкована, представити її в структурній формі (рис. 2).

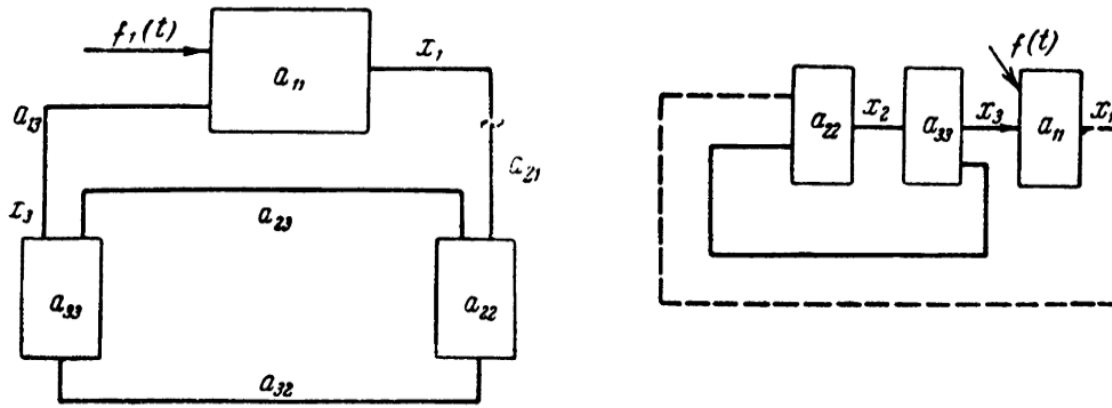


Рис. 2. Структурні перетворення схем

Візьмемо ту саму систему диференціальних рівнянь, але поміняємо їх місцями, тобто напишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} a_{21}x_1 + a_{23}x_2 + a_{33}x_3 &= 0; \\ a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= 0; \\ a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &= f_1(t); \end{aligned} \tag{14}$$

Структурна схема цієї системи у випадку її впорядкованості подана на рис.3.

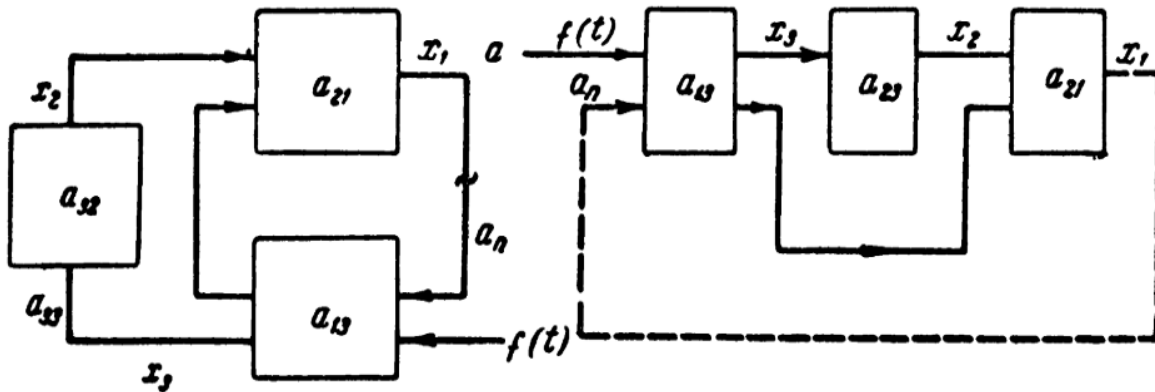


Рис. 3. Приклад структурного перетворення схеми

Перша система має лише один канал взаємодії між точкою прикладання збурення $f(t)$ та $x_1(t)$, а інша – два канали для взаємодії між $f(t)$ та $x_1(t)$.

Згідно критерію Б.Н. Петрова перша система являється такою системою, для якої умови інваріантності неприйнятні, і навпаки, у випадку другої системи (рис.3) умови інваріантності мають фізичну реалізацію.

Слід також вказати на те, що вказаний критерій дійсний для класу автономних систем, комбінованих систем, мостових схем і тд. [17].

Підвищення точності вимірювання у новому чутливому елементі стабілізатора озброєння забезпечується за рахунок того, що створено другий канал вимірювання. Для цього чутливий п'єзоелектричний елемент виконано з двома каналами [16]. П'єзоелемент одного каналу, що встановлений інерційною масою на п'єзопластинах, працює на стиснення. Ідентичний йому п'єзоелемент іншого каналу, що встановлений інерційною масою під п'єзопластинами, працює на розтяг. Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів сумуються у суматорі. Результуючий корисний електричний сигнал буде пропорційним подвоєному корисному сигналу.

Отже, завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання, забезпечується відсутність у вихідному сигналі чутливого елемента сигналів похибок від впливу вертикального прискорення, від залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (тобто інструментальних похибок), які можуть бути значними [16].

Висновки. У роботі приведено результати досліджень використання різних методів фільтрації вихідного сигналу чутливого елемента системи стабілізації озброєння. Встановлено, що альтернативним методом використання аналогових та цифрових фільтрів для системи стабілізації є застосування двоканального методу Петрова. Описано використання даного методу на основі прецизійного п'єзоелектричного чутливого елемента.

Література

1. Безвесільна О.М. Система захисту приладового комплексу від ударних та вібраційних впливів: монографія з грифом НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. – 2018, Київ: НПО «Пріоритети». – 170 с.
2. Тарасенко А. Бронетанковая техника Украины: итоги, потенциал, перспективы / А. Тарасенко // Бронетанковая техника Украины. – 2008. – №4. – С. 29–35 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://militaryarticle.ru/tekhnika-i-vooruzhenie/2008/11678-bronetankovaja-tehnika-ukrainy-2>. Accessed 06 Mar 2020
3. Базіло К.В. Схемотехнічне моделювання п'єзоелектричного перетворювача з додатковими коливальними контурами / К.В. Базіло // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – №6. – С.166-169.
4. Кузнєцов Б.І. Система наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейромережевим регулятором / Б.І. Кузнєцов, Т.Ю. Василюк, О.О. Варфоломійєв // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – №1(13). – Р.112-116.
5. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // Електроніка та системи управління. – №4(34). – 2012р. – С. 56-63.
6. Guerard J. Quartz structures for Coriolis Vibrating Gyroscopes / Guerard J., Janiaud D., Taibi R., Levy R. // Phys. & Instrum. Dept., ONERA, Chatillon, France, 2014. – С. 1-4.
7. Remillieux, G. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized/ Remillieux G., Delhaye F.// Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS), 2014. – С. 1-13.
8. Маляров С.П. Система стабилизации амплитуды колебаний резонатора кориолисового вибрационного гироскопа / С.П. Маляров, Ю.В. Кохан, В.В. Чиковани // Вісник інженерної академії України. – №1.– 2013. – С. 20-25.
9. Цірук В.Г. Система ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу легкої броньованої техніки / В.Г. Цірук // Технологічні комплекси. – №2 (10). – 2014. – С. 134- 141.
10. Sokolov A.V. Development of a gyro stabilization system with fiber-optic gyroscopes for an air-sea gravimeter / Sokolov A.V., Krasnov A.A., Starosel'tsev L.P., Dzyuba A.N. // Gyroscopy Navig. – 2015. – №6. – Р. 338–343.
11. Calvo M. Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records / M. Calvo, J. Hinderer, S. Rosat, H. Legros, J.-P. Boy, B. Ducarme, W. Zürn // Journal of Geodynamics. – 2017. – №106. – Р. 30–32.
12. Roussel C. Integration of a Strapdown Gravimeter System in AN Autonomous Underwater Vehicle / Roussel C., Verdun J., Cali J., Maia M. // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Volume XL-5/W5. – Р. 199–206.
13. С.А. Кудряков, Е.В. Соболев, Е.А. Рубцов Теоретические основы фильтрации сигналов: научное пособие. – С. Пб, 2018. – 198 с.
14. Bezvesilna O. Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System / O. Bezvesilna, I. Korobiichuk, A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – №440. – Р.753-761.
15. Bezvesilna O. Design of piezoelectric gravimeter for automated aviation gravimetric system / O. Bezvesilna, I. Korobiichuk, A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk, T. Chilchenko // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – 2016. – Vol. 10 Issue 1. – Р. 43–47.
16. Патент України на винахід № 113033. Трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи / Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Хильченко Т.В., Бичук Р.В. – № а2015 09858; заявл. 12.10.2015; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22/2016.
17. Уланов Г.М. Регулирование по возмущению. Компенсация возмущений и инвариантность: научное пособие. – М: ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО, 1960. – 110 с.

References

1. Bezvesilna O.M. Systema zakhystu prykladovoho kompleksu vid udarnykh ta vibratsiinykh vplyviv: monohrafiia z hryfom NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho» / O.M. Bezvesilna, A.H. Tkachuk. – 2018, Kyiv: NPO «Priorytety». – 170 s.
2. Tarasenko A. Bronetankovaja tekhnika Ukrainy: ytohy, potentsyal, perspektivy / A. Tarasenko // Bronetankovaja tekhnika Ukrainy. – 2008. – №4. – С. 29–35 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://militaryarticle.ru/tekhnika-i-vooruzhenie/2008/11678-bronetankovaja-tehnika-ukrainy-2>. Accessed 06 Mar 2020
3. Bazilo K.V. Skhemotekhnichne modeliuвання piezoelektrychnoho peretvoriuvacha z dodatkovyvy kolyvalnymy konturamy / K.V. Bazilo // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2013. – №6. – S.166-169.
4. Kuznietsov B.I. Systema navedennia i stabilizatsii ozbroiennia lehkobronovanykh mashyn z neiromerezhevym rehuliatorom / B.I. Kuznietsov, T.Iu. Vasylets, O.O. Varfolomiiev // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – 2010. – №1(13). – R.112-116.
5. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // Elektronika ta systemy upravlinnia. – №4(34). – 2012r. – S. 56-63.
6. Guerard J. Quartz structures for Coriolis Vibrating Gyroscopes / Guerard J., Janiaud D., Taibi R., Levy R. // Phys. & Instrum. Dept., ONERA, Chatillon, France, 2014. – S. 1-4.
7. Remillieux, G. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized/ Remillieux G., Delhaye F.// Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS), 2014. – S. 1-13.
8. Maliarov S.P. Systema stablyzatsyy amplytudy kolebanyi rezonatora koryolysovoho vybratsyonnoho hyroskopa / S.P. Maliarov, Yu.V. Kokhan, V.V. Chykovany // Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy. – №1.– 2013. – S. 20-25.

9. Tsiruk V.H. Systema udaro- i vibrozakhystu navihatsiinoho kompleksu lehkoï bronovanoi tekhniki / V.H. Tsiruk // Tekhnolohichni komplekсы. – №2 (10). – 2014. – S. 134- 141.
10. Sokolov A.V. Development of a gyro stabilization system with fiber-optic gyroscopes for an air-sea gravimeter / Sokolov A.V., Krasnov A.A., Staroseltsev L.P., Dzyuba A.N. // Gyroscopy Navig. – 2015. – №6. – R. 338–343.
11. Calvo M. Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records / M. Calvo, J. Hinderer, S. Rosat, H. Legros, J.-P. Boy, B. Ducarme, W. Zürn // Journal of Geodynamics. – 2017. – №106. – R. 30–32.
12. Roussel C. Integration of a Strapdown Gravimeter System in AN Autonomous Underwater Vehicle / Roussel C., Verdun J., Cali J., Maia M. // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Volume XL-5/W5. – R. 199–206.
13. S.A. Kudriakov, E.V. Sobolev, E.A. Rubtsov Teoreticheskiye osnovy fyltratsyy syhnalov: nauchnoe posobyе. – S. Pb, 2018. – 198 s.
14. Bezvesilna O. Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System / O. Bezvesilna, I. Korobiichuk , A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – №440. – R.753-761.
15. Bezvesilna O. Design of piezoelectric gravimeter for automated aviation gravimetric system / O. Bezvesilna, I. Korobiichuk , A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk, T. Chilchenko // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – 2016. – Vol. 10 Issue 1. – R. 43–47.
16. Patent Ukrainy na vynakhid № 113033. Trykoordinatnyi piezoelektrychnyi hravimetr aviatsiinoï hravimetrychnoi systemy / Bezvesilna O.M., Tkachuk A.H., Khylichenko T.V., Bychuk R.V. – № a2015 09858; zaiavl. 12.10.2015; opubl. 25.11.2016, Biul. № 22/2016.
17. Ulanov H.M. Rehulyrovanye po vozmushcheniyu. Kompensatsiya vozmushcheniy u ynvaryantnost: nauchnoe posobyе. – M: HOSUDARSTVENNOE ENERHETYChESKOE YZDATELSTVO, 1960. – 110 s.

Надійшла / Paper received : 02.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.