

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЗЕЙН АЛІ ВАХІБ



УДК 621.11-32

**РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОЛЯ ЗОРУ
ПРИЛАДУ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НАЗЕМНОГО РУХОМОГО ОБ'ЄКТУ**

Спеціальність 05.13.03 – системи та процеси керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформаційних технологій і систем колісних і гусеничних машин ім. О.О. Морозова Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Александров Євген Євгенович,
Національний технічний університет «ХПІ»,
м. Харків, професор кафедри інформаційних
технологій і систем колісних та гусеничних машин
імені О.О. Морозова.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Алексієв Олег Павлович,
Харківський національний автомобільно дорожній
університет, м. Харків,
професор кафедри інформаційних технологій та
мехатроніки

кандидат технічних наук, професор
Аблесімов Олександр Костянтинович,
Національний авіаційний університет, м. Київ,
професор кафедри авіаційних комп'ютерно-
інтегрованих комплексів.

Захист відбудеться 19 листопада 2015 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «16» жовтня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ліберг І.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наземні рухомі об'єкти спеціального призначення (танки, гусеничні та колісні бронетранспортери, поліцейські автомобілі) обладнані приладами спостереження за ціллю або об'єктом переслідування. При русі в умовах бездоріжжя підресорена частина рухомого об'єкту здійснює вертикальні, подовжньо-кутові і поперечно-кутові коливання, що ускладнюють спостереження. У цьому зв'язку на таких об'єктах використовують стабілізатори поля зору приладу спостереження, що представляють собою спеціальні системи автоматичного керування, які в умовах збуреного руху об'єкту зберігають незмінний напрямок у просторі лінії спостереження (лінії прицілювання). Вперше такі стабілізатори знайшли використання в середині 60-х років минулого сторіччя в танкових прицілах танків Т-64 і деяких закордонних танків. Стабілізація поля зору танкових прицілів здійснювалась за допомогою трьохступеневого гіроскопу, що виконував одночасно функцію гіроскопічного датчика кута.

Відомо, що вібрації і коливання підресореної частини наземного рухомого об'єкту приводять до високочастотних прецесійних і нутаційних коливань рамок трьохступеневого гіроскопу, які приводять до зниження точності стабілізації поля зору приладу спостереження. У цьому зв'язку в приладах спостереження здійснюється перехід від силової стабілізації до індикаторної, коли зв'язок між гіроскопом і рухомим дзеркалом прицілу здійснюється не за допомогою механічної передачі, а за допомогою слідкуючої електромеханічної системи автоматичного керування, яка в змозі реалізувати складні алгоритми керування, що забезпечують високу точність стабілізації поля зору приладу спостереження.

Таким чином, науково-практична задача розробки цифрових систем стабілізації поля зору приладів спостереження наземних рухомих об'єктів, яка полягає у виборі структури і значень варійованих параметрів алгоритмів керування, що забезпечують високу точність стабілізації лінії спостереження відносно заданого напрямку, являється актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі інформаційних технологій і систем колісних і гусеничних машин імені О.О.Морозова у відповідності з госпдоговірною темою між Львівським науково-дослідним радіотехнічним інститутом Державної компанії «Укроборонпром» та НТУ «ХПІ» «Інформаційно-керуючі системи для колісних та гусеничних машин спеціального призначення» (2006-20012 р.р.), де здобувач був виконавцем окремого етапу.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи являється розробка цифрової системи стабілізації поля зору приладу спостереження підвищеної точності для наземного рухомого об'єкту.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- здійснити аналіз існуючих систем стабілізації поля зору приладів спостереження силового та індикаторного типів;
- з урахуванням особливостей цифрових систем стабілізації розробити структуру і визначити значення параметрів стабілізатора поля зору приладу спостереження при використанні трьохступеневого гіроскопу;
- розробити структуру і визначити значення параметрів цифрового стабілізатора поля зору приладу спостереження при використанні безплатформеної інерціальної системи;
- оцінити вплив величини періоду квантування цифрового стабілізатора поля зору приладу спостереження на точність стабілізації.

Об'єкт дослідження – процеси стабілізації поля зору приладу спостереження наземного рухомого об'єкту.

Предмет дослідження – цифрова система стабілізації поля зору приладу спостереження індикаторного типу.

Методи дослідження. Методи теорії автоматичного керування, а саме, методи аналізу і синтезу слідкуючих систем, методи аналізу і синтезу цифрових систем керування для визначення структури і значень параметрів цифрового стабілізатора поля зору приладу спостереження індикаторного типу; методи синтезу цифрових рекурсивних і нерекурсивних низькочастотних фільтрів для порівняльного аналізу і вибору фільтрів для цифрового стабілізатора поля зору приладу спостереження; методи теорії безплатформених інерціальних систем для побудови безплатформеного стабілізатора поля зору приладу спостереження, в якому відсутній гіроскопічний датчик кута, а кут розбіжності між лінією спостереження і напрямком на об'єкт спостереження не вимірюється, а обчислюється бортовою ЕОМ за допомогою спеціального алгоритму.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблена структура і отримані чисельні значення параметрів цифрової системи стабілізації поля зору приладу спостереження індикаторного типу для наземного рухомого об'єкту;
- отримала подальший розвиток методика параметричного синтезу цифрових низькочастотних фільтрів;
- вперше доведена можливість використання в стабілізаторах поля зору приладів спостереження наземних рухомих об'єктів безплатформених інерціальних систем;
- досліджений вплив величини періоду квантування цифрового електронного блоку на точність стабілізації поля зору приладу спостереження відносно заданого напрямку.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи знайшли впровадження в Національному технічному університеті «Харківський Політехнічний Інститут» при виконанні госпдоговірної роботи з Державним підприємством «Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут» в процесі створення цифрових систем наведення і стабілізації основного озброєння військових гусеничних та колісних машин, а також при підготовці студентів спеціальності 7.050702 – електричні системи і комплекси транспортних засобів в лекційних курсах «Математичне моделювання динамічних систем» і «Системи автоматизованого проектування електронних і мікропроцесорних систем транспортних засобів».

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, розробки і висновки, що приведені в дисертації, являються результатом самостійних досліджень здобувача. Серед них: структура і чисельні значення параметрів цифрової системи стабілізації поля зору приладу спостереження індикаторного типу; методика параметричного синтезу цифрових нерекурсивних низькочастотних фільтрів; запровадження в стабілізаторах поля зору приладів спостереження наземних рухомих об'єктів безплатформених інерціальних систем; дослідження впливу величини періоду квантування цифрового електронного блоку на точність стабілізації поля зору приладу спостереження відносно заданого напрямку.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати досліджень, приведених в дисертаційній роботі, доповідалися, обговорювалися і були схвалені на: II Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобиль и электроника» (Харків, 2011); XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» (Миколаївка, 2012); XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Силовая электроника и энергоэффективность» (Алушта, 2012); XIX Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика/Automatics-2012» (Київ, 2012); XXIII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2015).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в наукових публікаціях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України (3 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 1 – в іноземному періодичному фаховому виданні, 1 патент України, 1 – у матеріалах міжнародної науково-технічної конференції.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 128 сторінок, 37 рисунків за текстом, 2 таблиці за

текстом. Список використаних джерел складає 103 найменування на 12 сторінках. 2 додатки на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, сформульовано мету й основні задачі досліджень, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію та публікацію основних результатів роботи.

В **першому розділі** подано аналітичний огляд наукової і патентної літератури з питань розробки систем стабілізації поля зору приладів спостереження колісних і гусеничних машин спеціального призначення. Показано, що перша така система знайшла практичне застосування в прицілі танка Т- 64 в середині 60-х років минулого сторіччя. В цій системі рухоме дзеркало прицілу-далекоміру було пов'язане стрічковою передачею з вісями гіроскопічних датчиків кутів каналів вертикального і горизонтального наведення танкової гармати, тобто здійснювалась силова стабілізація поля зору танкового прицілу-далекоміру. В процесі подальшої модернізації танка Т- 64, а саме, у зв'язку з розміщенням на ньому комплексу керуемого озброєння, який дозволяє вести вогонь з гармати протитанковими керуєними ракетами, що наводяться на ціль по лазерному променю танкового прицілу-далекоміру, посилювалися вимоги до точності стабілізації лазерного променю відносно напрямку на ціль. В подальшому це привело до відмови від силової стабілізації поля зору прицілу і до використання індикаторних стабілізаторів лінії прицілювання.

Розробка індикаторних стабілізаторів поля зору приладів спостереження рухомих об'єктів здійснювалась під керівництвом проф. Р.Х. Гафіятуліна співробітниками СКБ «Ротор» (м. Челябінськ) В.Л. Кодкіним, Г.Б. Бармасовим, Н.Е. Ляхом, Л.І. Щелкановою із застосуванням методів теорії аналізу і синтезу слідкуючих систем, що отримала розвиток в роботах В.В. Барковського, В.М. Захарова, О.С. Шаталова, Дж. К. Ньютона, Л.А. Гулда, Дж. Ф. Кайзера. Теорія цифрових слідкуючих систем розвинута в роботах Ю.Г. Якушенкова, В.М. Луканцева, М.П. Колесова, Л.П. Лазарева, Ю.М. Астапова, Л.З. Крикунова, О.Г. Барських, Б.І. Кузнецова, Є.Є. Александрова, Б.О. Оліярника, О.К. Аблесімова та інших. Сучасні цифрові слідкуючі системи широко застосовують цифрові низькочастотні фільтри, суттєвий внесок в розробку яких здійснили Р. Богнер, А. Константи́нідіс, Е. Оппенгейм, Р.В.Хеммінг, В.А. Лукас, А.В. Івашко.

Сучасний розвиток обчислювальної теорії автоматичного керування і сучасної елементної бази систем автоматики дозволяє постійно коригувати задачу створення високоточних цифрових систем стабілізації поля зору приладів спостереження наземних рухомих об'єктів, зокрема, об'єктів бронетанкової техніки. Для рішення поставленої задачі потребується:

- провести порівняльний аналіз систем стабілізації поля зору приладів спостереження рухомих об'єктів силового та індикаторного типу;
- з урахуванням особливостей цифрових систем стабілізації розробити структуру і визначити значення параметрів цифрового стабілізатора поля зору приладу спостереження;
- дослідити можливість використання безплатформеної інерціальної системи в цифровому стабілізаторі поля зору приладу спостереження;
- дослідити вплив значення періоду квантування цифрового електронного блоку на точність цифрового стабілізатора поля зору приладу спостереження;
- шляхом проведення розрахункового експерименту підтвердити роботоспроможність розробленої цифрової системи стабілізації.

У **другому розділі** проведений порівняльний аналіз точності стабілізації поля зору приладу спостереження для стабілізаторів силового та індикаторного типів з цифровим електронним блоком типів. Розроблена математична модель стабілізації гіроплатформи з трьома ступенями свободи з урахуванням нелінійної характеристики систем корекції та «сухого» тертя у вісях карданова підвісу. Ця модель має наступний вигляд:

$$I_{\alpha} \ddot{\alpha}(t) + H \dot{\beta}(t) = -k_{\alpha} \operatorname{sign} \dot{\alpha}(t) + M_p(t); \quad (1)$$

$$I_{\beta} \ddot{\beta}(t) - H \dot{\alpha}(t) = -k_{\beta} \operatorname{sign} \dot{\beta}(t),$$

де I_{α} , I_{β} – моменти інерції відповідно зовнішньої та внутрішньої рамок гіроплатформи; k_{α} , k_{β} – модулі моментів «сухого» тертя у вісях відповідно зовнішньої та внутрішньої рамок; M_p – момент розвантаження, що визначається статичною характеристикою, яка приведена на рис. 1; H – кінетичний момент ротору.

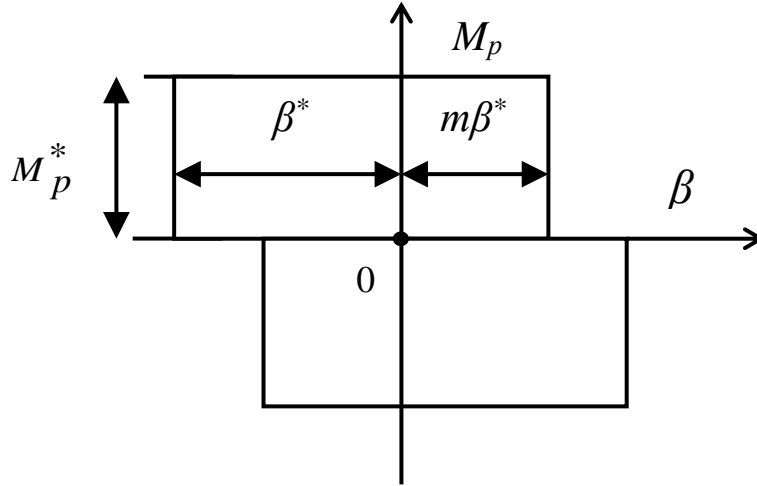


Рисунок 1. Нелінійна характеристика системи розвантаження

Із застосуванням методу гармонічної лінеаризації нелінійностей отримано характеристичне рівняння гармонічно-лінеаризованої системи (1), яке має наступний вигляд

$$\begin{aligned}
 & \frac{I_{\alpha} I_{\beta}}{H} s^3 + \left[\frac{4I_{\alpha} k_{\beta}}{\pi H B \omega} + \frac{4I_{\beta} k_{\alpha}}{\sqrt{\pi^2 I_{\beta}^2 B^2 \omega^4 + 16k_{\beta}^2}} \right] s^2 + \\
 & + \left[H + \frac{16k_{\alpha} k_{\beta}}{\pi B \omega \sqrt{\pi^2 I_{\beta}^2 B^2 \omega^4 + 16k_{\beta}^2}} - \frac{2M_p^* \beta^*}{\pi B^2 \omega} (1+m) \right] s + \\
 & + \frac{2M_p^*}{\pi B} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\beta^*}{B} \right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{m\beta^*}{B} \right)^2} \right) = 0.
 \end{aligned} \quad (2)$$

В рівнянні (2) через B позначена амплітуда автоколивань внутрішньої рамки, а через ω – частота автоколивань. Амплітуда автоколивань зовнішньої рамки і фазовий зсув визначаються формулами:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{\pi H \omega} \sqrt{\pi^2 I_{\beta}^2 B^2 \omega^4 + 16k_{\beta}^2}, \\
 \varphi &= -\arctg \frac{4k_{\beta}}{\pi I_{\beta} B \omega^2} - \frac{\pi}{2}.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Для гіроплатформи з параметрами

$$I_{\alpha} = 0.189 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2; \quad I_{\beta} = 0.451 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2;$$

$$H = 0.2 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; \quad k_{\alpha} = k_{\beta} = 0.653 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_p^* = 0.196 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad m = 0.5,$$

шляхом аналізу рівнянь (1) і (2) доведено, що амплітуда автоколивань зовнішньої рамки становить рад. Оскільки рухоме дзеркало танкового прицілу механічно пов'язане із зовнішньою рамкою гіроплатформи, то ця величина й визначає точність силової стабілізації поля зору приладу спостереження.

Недостатньо висока точність силової стабілізації поля зору приладу спостереження обумовлює перехід до систем індикаторної стабілізації, які являються слідкуючими системами автоматичного керування. Розрахункова схема індикаторної системи стабілізації приведена на рис. 2

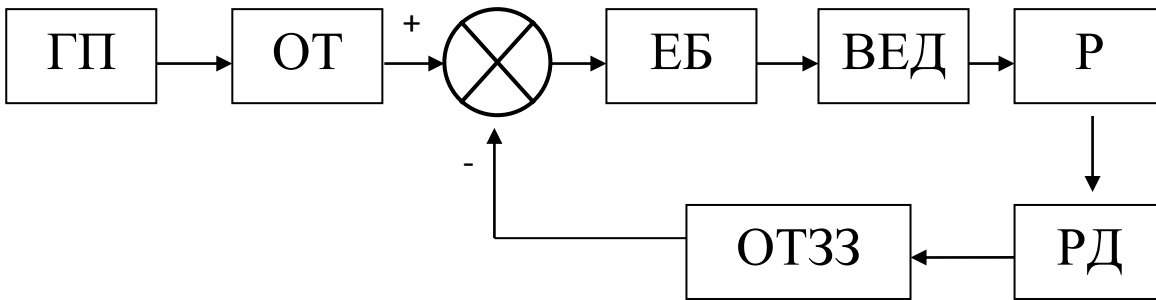


Рисунок 2. Розрахункова схема індикаторного стабілізатора поля зору приладу спостереження

На рис.2 прийняті позначення: ГП – гіроплатформа; ОТ – обертовий трансформатор, ЕБ – електронний блок; ВЕД – виконавчий електродвигун; Р – редуктор; РД – рухоме дзеркало прицілу; ОТЗЗ – обертовий трансформатор зворотнього зв'язку.

В роботі доведено, що характеристичне рівняння замкненої цифрової системи стабілізації при реалізації електронним блоком ПД-алгоритму стабілізації

$$U[nT] = k_{\phi} \varphi[nT] + k_{\phi} \cdot \frac{\varphi[nT] - \varphi[(n-1)T]}{T} \quad (4)$$

набуває вигляд

$$z^3 - \left[a_3 - k_{\text{НЧ}} \left(k_{\phi} + \frac{k_{\dot{\phi}}}{T} \right) a_1 \right] z^2 + \quad (5)$$

$$+ \left[a_4 - k_{\text{НЧ}} \frac{k_{\dot{\phi}}}{T} a_1 - k_{\text{НЧ}} \left(k_{\phi} + \frac{k_{\dot{\phi}}}{T} \right) a_2 \right] z + k_{\text{НЧ}} \frac{k_{\dot{\phi}}}{T} a_2 = 0,$$

де введені позначення

$$a_1 = T_{\text{д}} \left(e^{\frac{T}{T_{\text{д}}}} - 1 \right) + T ; \quad a_2 = T_{\text{д}} \left(e^{\frac{T}{T_{\text{д}}}} - 1 \right) + T e^{\frac{T}{T_{\text{д}}}} ; \quad a_3 = e^{\frac{T}{T_{\text{д}}}} + 1 ; \quad a_4 = e^{\frac{T}{T_{\text{д}}}},$$

T – період квантування, $T_{\text{п}}$ – постійна часу виконавчого електродвигуна.

Область стійкості замкненого цифрового стабілізатора, яка побудована за допомогою співвідношення (5), приведена на рис.3.

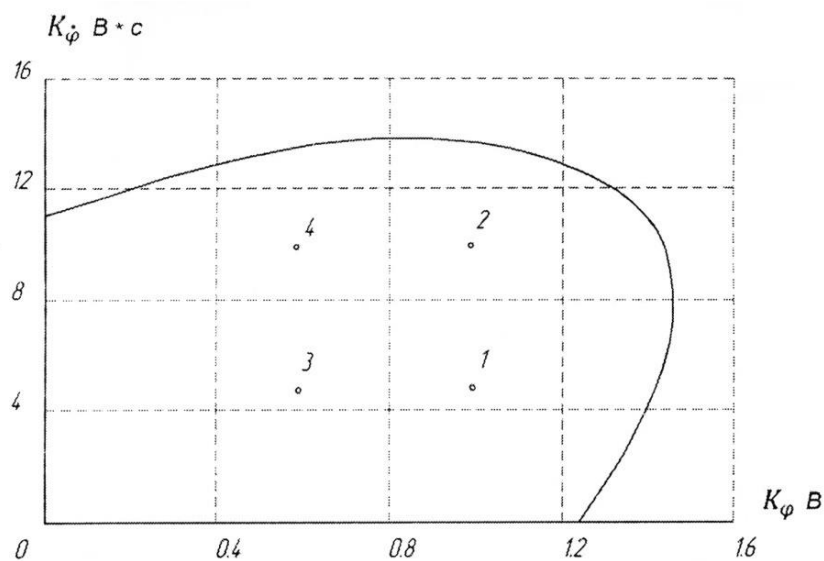


Рисунок 3. Область стійкості замкненого цифрового стабілізатора

На рис. 4 приведені АЧХ і ФЧХ цифрового стабілізатора, що відповідають точкам 1,2,3 і 4 рис.3.

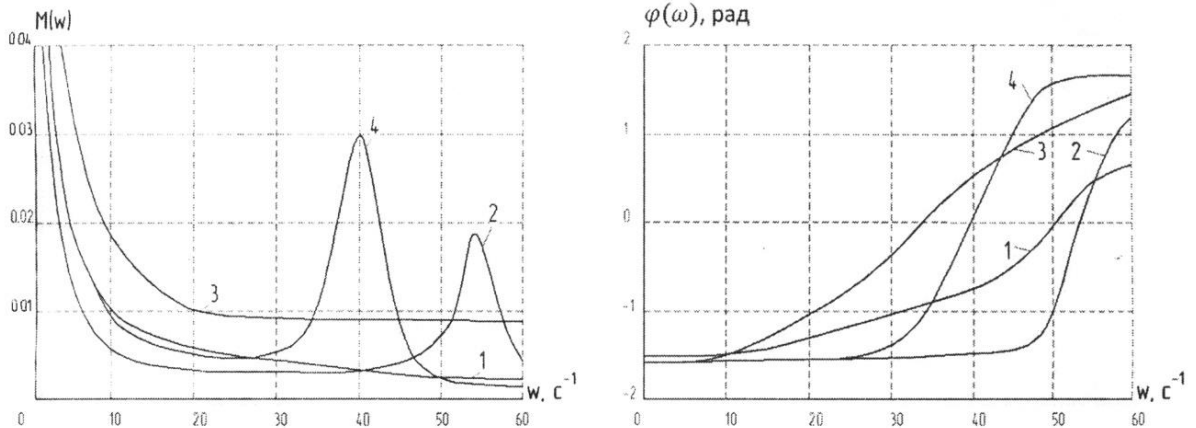


Рисунок 4. АЧХ і ФЧХ цифрового стабілізатора

Аналіз цих характеристик дозволяє зробити висновок, що застосування ПД-стабілізатору (4) приводить до значних спотворень сигналу, що передається, а саме, до пригнічення амплітуд і значному фазовому запізненню в області робочих частот. Зроблено висновок, що для зменшення цих спотворень доцільно використання в цифровому ПД-стабілізаторі цифрових низькочастотних фільтрів.

В **третьому розділі** роботи проведений порівняльний аналіз рекурсивних і нерекурсивних цифрових низькочастотних фільтрів. Пропонується метод оптимального синтезу цифрових нерекурсивних фільтрів. Доведено, що найбільш ефективним для застосування в стабілізаторах поля зору приладів спостереження являються рекурсивні цифрові фільтри Баттеруорта і диференціюючі фільтри Ланцоша, а найбільш ефективною структурною схемою ПД-стабілізатора поля зору приладу спостереження являється послідовно-паралельна схема сполучення фільтрів Баттеруорта і Ланцоша (рис.5).

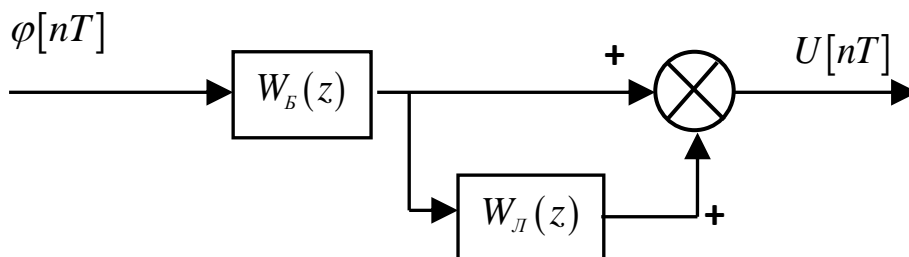


Рисунок 5. Цифровий ПД-стабілізатор.

Передавальна функція ПД-стабілізатора, схема якого приведена на рис.5, дорівнює

$$W(z) = k_{\phi} W_B(z) [1 + k_{\phi} W_L(z)], \quad (6)$$

де $W_B(z)$, $W_L(z)$ – дискретні передавальні функції відповідно фільтрів Баттеруорта і Ланцоша:

$$W_B(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}, \quad (7)$$

$$W_L(z) = c_0 + c_1 z^{-1} - c_1 z^{-3} - c_0 z^{-4}. \quad (8)$$

Після підстановки (7) і (8) у співвідношення (6) отримується формула для передавальної функції $W(z)$

$$W(z) = \frac{k_{\phi} \{d_0 + d_1 z^{-1} + d_0 z^{-2} + k_{\phi} (f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} - f_2 z^{-4} - f_1 z^{-5} - f_0 z^{-6})\}}{1 + l_1 z^{-1} + l_2 z^{-2}}, \quad (9)$$

де

$$d_0 = \frac{a_0}{b_0}; \quad d_1 = \frac{a_1}{b_0}; \quad f_0 = c_0; \quad f_1 = \frac{b_0 c_1 + b_1 c_0}{b_0}; \quad f_2 = \frac{b_1 c_1 + b_2 c_0}{b_0}; \quad l_1 = \frac{b_1}{b_0}; \quad l_2 = \frac{b_2}{b_0}.$$

Параметри фільтрів мають значення: $a_0 = 0,08073$; $a_1 = 0,16147$; $b_0 = 1,48256$; $b_1 = -1,83854$; $b_2 = 0,67789$; $c_0 = 5$; $c_1 = 2,5$.

АЧХ і ФЧХ ПД-стабілізатора з передавальною функцією (9), мають вид, зображений на рис. 6.

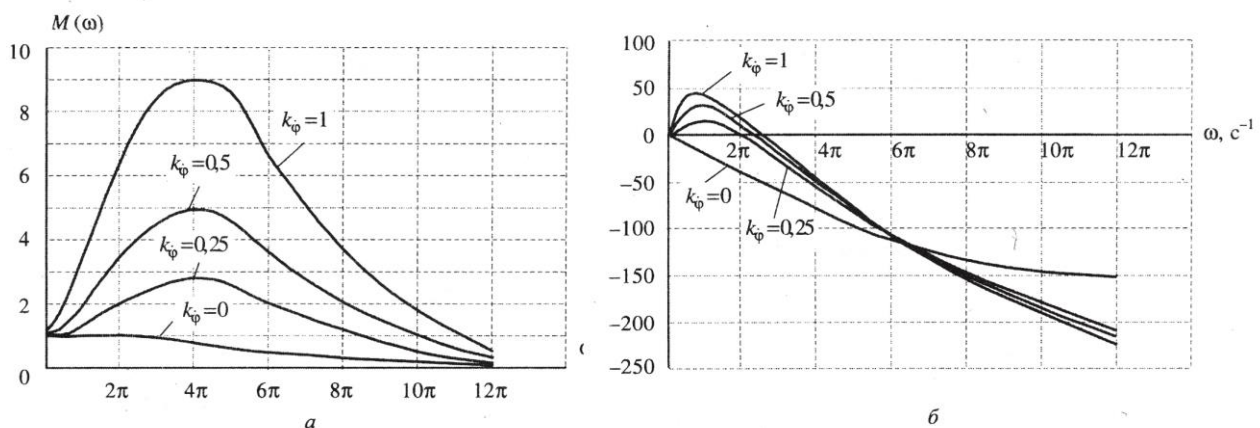


Рисунок 6. АЧХ і ФЧХ ПД-стабілізатора (9)

Різничне рівняння, що відповідає передавальній функції (9), має вигляд

$$U[nT] = k_{\varphi} \left\{ \begin{array}{l} d_0\varphi[nT] + d_1\varphi[(n-1)T] + d_0\varphi[(n-2)T] + \\ + k_{\varphi} \left[f_0\varphi[nT] + f_1\varphi[(n-1)T] + f_2\varphi[(n-2)T] - \right. \\ \left. - f_2\varphi[(n-4)T] - f_1\varphi[(n-5)T] - f_0\varphi[(n-6)T] \right] \\ \left. - l_1U[(n-1)T] - l_2U[(n-2)T] \right\} \quad (10) \end{array} \right.$$

Аналіз рис.4 і рис.6 доводить, що стабілізатор (10) «виправляє» недоліки АЧХ та ФЧХ стабілізатора (4), а саме розширює смугу пропускання і корегує фазове запізнення в області робочих частот.

Четвертий розділ присвячений проблемі використання в стабілізаторі поля зору приладу спостереження принципів безплатформених інерціальних систем, в яких положення пов'язаної із стабілізуємим об'єктом системи координат не вимірюється за допомогою гіростабілізованої платформи, а обчислюється в бортовій ЕОМ шляхом інтегрування кінетичних співвідношень, що містять вихідні сигнали датчиків кутових швидкостей стабілізуємого об'єкту.

В роботі запропонована схема безплатформеного стабілізатора танкової гармати, в якому відсутня гіростабілізована платформа, а стабілізація поля зору танкового прицілу-далекоміру відносно напрямку на ціль і стабілізація вісі каналу стволу танкової гармати відносно лінії прицілювання здійснюється за допомогою втілених в бортову ЕОМ алгоритмів безплатформених інерціальних систем. Схема приведена на рис. 7.

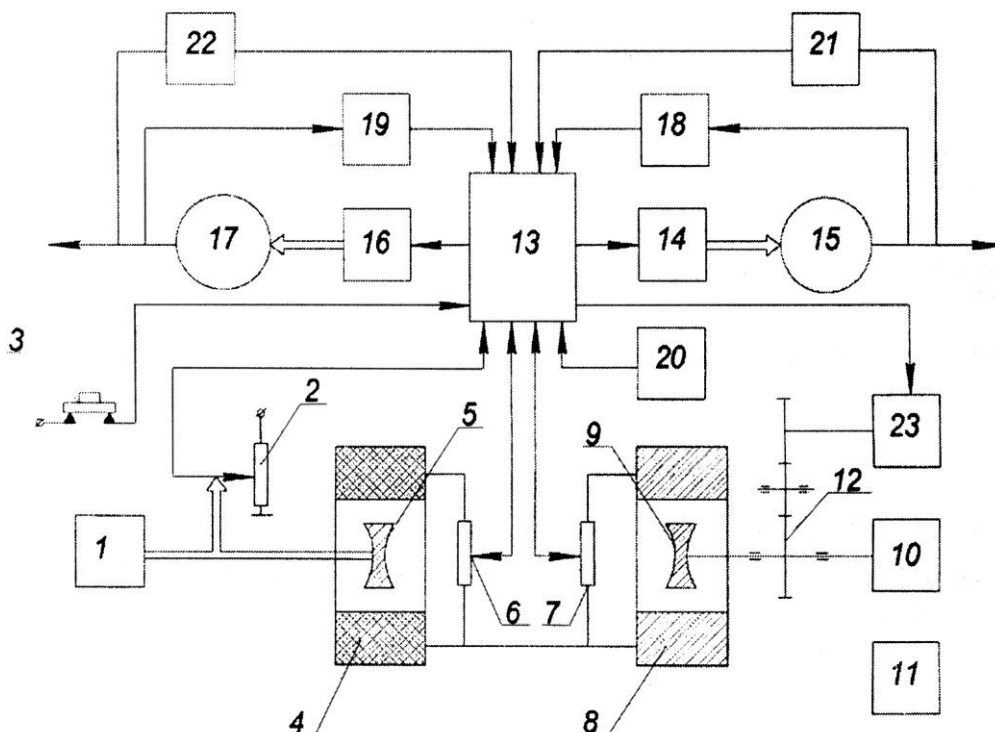


Рисунок 7. Схема безплатформеного стабілізатора танкової гармати і поля зору прицілу-далекоміру

На рис.7 прийняти позначення: 1 – пульт наведення; 2 – потенціометр; 3 – кнопка «наведення-стабілізація»; 4,5 – статор і ротор задаючого обертового трансформатору; 6,7 – вихідні потенціометри задаючого і вимірювального обертових трансформаторів; 8,9 – статор і ротор вимірювального обертового трансформатору; 10,11 – рухоме і нерухоме дзеркала танкового прицілу-далекоміру; 12 – редуктор; 13 – бортова ЕОМ; 14 – електрогідравлічний підсилювач; 15 – танкова гармата; 16 – електромашинний підсилювач; 17 – танкова башта; 18,19 – потенціометричні датчики кутів повороту гармати і башти; 20,21,22 – гіроскопічні датчики кутової швидкості підресореної частини корпусу танка відносно власної подовжньої вісі $\omega_{xT}(t)$, гармати відносно вісі цапф $\omega_{yII}(t)$ і башти відносно вісі повороту $\omega_{zB}(t)$.

Стабілізація лазерного променя танкового прицілу-далекоміру у вертикальній і горизонтальній площинах здійснюється шляхом реалізації в бортовій ЕОМ алгоритмів стабілізації

$$U_{\varphi}[nT] = k_{\varphi} \delta\varphi[nT] + k_{\varphi} \omega_{yII}[nT]; \quad (11)$$

$$U_{\psi}[nT] = k_{\psi} \delta\psi[nT] + k_{\psi} \omega_{zB}[nT],$$

де k_{φ} , k_{ψ} , k_{φ} , k_{ψ} - варійовані параметри алгоритмів (11), T – період квантування бортової ЕОМ. Решітчасті функції $\delta\varphi[nT]$ і $\delta\psi[nT]$ формуються у вигляді

$$\delta\varphi[nT] = 2\lambda_0[nT]\lambda_3[nT]; \quad (12)$$

$$\delta\psi[nT] = 2\lambda_0[nT]\lambda_2[nT],$$

де $\lambda_0[nT]$, $\lambda_2[nT]$ і $\lambda_3[nT]$ – параметри Родріга-Гамільтона, що обчислюються за допомогою алгоритмів:

- нечетний крок

$$\begin{aligned} \lambda_1[nT] = & \lambda_1[(n-1)T] + \frac{T}{2} \{ (U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \cos \phi_0[nT] + \\ & + U_{zB}[nT] \sin \phi_0[nT]) \lambda_0[(n-1)T] + (-U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \sin \phi_0[nT] + \\ & + U_{zB}[nT] \cos \phi_0[nT]) \lambda_2[(n-1)T] + U_{yII}[nT] \lambda_{32}[(n-1)T] \}; \end{aligned}$$

(13)

$$\begin{aligned} \lambda_2[nT] = & \lambda_2[(n-1)T] + \frac{T}{2} \{ (U_{yII}[nT] \lambda_0[(n-1)T] + \\ & + (U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \cos \phi_0[nT] + U_{zB}[nT] \sin \phi_0[nT]) \lambda_3[(n-1)T] - \\ & - (-U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \sin \phi_0[nT] + U_{zB}[nT] \cos \phi_0[nT]) \lambda_1[nT] \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_3[nT] = & \lambda_3[(n-1)T] + \frac{T}{2} \{ (-U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \sin \phi_0[nT] + \\ & + U_{zB}[nT] \cos \phi_0[nT]) \lambda_0[(n-1)T] + U_{yII}[nT] \lambda_1[nT] - \\ & - (U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \cos \phi_0[nT] + U_{zB}[nT] \sin \phi_0[nT]) \lambda_2[nT] \}; \end{aligned}$$

$$\lambda_0[nT] = \sqrt{1 - \lambda_1^2[nT] - \lambda_2^2[nT] - \lambda_3^2[nT]};$$

- четний крок

$$\begin{aligned} \lambda_3[nT] = & \lambda_3[(n-1)T] + \frac{T}{2} \{ (-U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \sin \phi_0[nT] + \\ & + U_{zB}[nT] \cos \phi_0[nT]) \lambda_0[(n-1)T] + U_{yII}[nT] \lambda_1[(n-1)T] - \\ & - (U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \cos \phi_0[nT] + U_{zB}[nT] \sin \phi_0[nT]) \lambda_2[(n-1)T] \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_2[nT] = & \lambda_2[(n-1)T] + \frac{T}{2} \{ U_{yII}[nT] \lambda_0[(n-1)T] + \\ & + (U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \cos \phi_0[nT] + U_{zB}[nT] \sin \phi_0[nT]) \lambda_3[nT] - \\ & - (-U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \sin \phi_0[nT] + U_{zB}[nT] \cos \phi_0[nT]) \lambda_1[(n-1)T] \}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \lambda_1[nT] = & \lambda_1[(n-1)T] + \frac{T}{2} \{ (U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \cos \phi_0[nT] + \\ & + U_{zB}[nT] \sin \phi_0[nT]) \lambda_0[(n-1)T] + (-U_{xT}[nT] \cos \psi_0[nT] \sin \phi_0[nT] + \\ & + U_{zB}[nT] \cos \phi_0[nT]) \lambda_2[nT] + U_{yII}[nT] \lambda_3[nT] \}; \end{aligned}$$

$$\lambda_0[nT] = \sqrt{1 - \lambda_1^2[nT] - \lambda_2^2[nT] - \lambda_3^2[nT]}.$$

В алгоритмах (13) і (14) через $U_{xT}[nT]$, $U_{yII}[nT]$ і $U_{zB}[nT]$ позначені вихідні сигнали фільтрів Баттеруорта, що фільтрують високочастотні завади сигналів з гіроскопічних датчиків кутових швидкостей:

$$\begin{aligned} U_{xT}[nT] = & a_1 \{ \omega_{xT}[nT] + 2\omega_{xT}[(n-1)T] + \omega_{xT}[(n-2)T] \} - \\ & - d_1 U_{xT}[(n-1)T] - d_2 U_{xT}[(n-2)T]; \end{aligned}$$

(15)

$$U_{yII}[nT] = a_1 \{ \omega_{yII}[nT] + 2\omega_{yII}[(n-1)T] + \omega_{yII}[(n-2)T] \} - d_1 U_{yII}[(n-1)T] - d_2 U_{yII}[(n-2)T];$$

$$U_{zB}[nT] = a_1 \{ \omega_{zB}[nT] + 2\omega_{zB}[(n-1)T] + \omega_{zB}[(n-2)T] \} - d_1 U_{zB}[(n-1)T] - d_2 U_{zB}[(n-2)T],$$

а через $\varphi_0[nT]$ і $\psi_0[nT]$ – решітчасті функції, що відповідають поточним кутам повороту гармати і башти відповідно.

З урахуванням (15) алгоритми (11) набувають вигляд:

$$U_{\varphi}[nT] = k_{\varphi} \delta\varphi[nT] + k_{\varphi} U_{yII}[nT]; \tag{16}$$

$$U_{\psi}[nT] = k_{\psi} \delta\psi[nT] + k_{\psi} U_{zB}[nT].$$

Аналіз процесів стабілізації поля зору танкового прицілу-далекоміру довів, що при величині періоду квантування бортової ЕОМ в межах $(0,005 \div 0,01)$ с точність стабілізації являється цілком прийнятною. Максимальна амплітуда коливань рухомого дзеркала прицілу не перевищує $6 \cdot 10^{-4}$ рад. Подальше збільшення періоду квантування призводить до зниження точності стабілізації. Так при $T=0,02$ с. максимальна амплітуда коливань дзеркала доходить до $8 \cdot 10^{-3}$ рад. Таким чином, точність безплатформеного індикаторного стабілізатору в $2 \div 3$ рази перевищує точність силового стабілізатору.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розробки цифрової системи стабілізації поля зору приладу спостереження індикаторного типу для наземного рухомого об'єкту.

За результатами проведеного дослідження зроблено наступні висновки:

1. Аналіз науково-технічної і патентної літератури за темою дисертаційної роботи приводить до висновку, що в останній час має місце тенденція до переходу від силової стабілізації поля зору приладів спостереження рухомих транспортних засобів до індикаторної стабілізації з використання бортових цифрових обчислювальних машин.

2. Висока заводо захищеність цифрової системи стабілізації поля зору приладу спостереження забезпечену використанням цифрових низькочастотних фільтрів при застосуванні гіростабілізованої платформи, або використанням

безплатформеної інерціальної системи, що містить датчики кутових швидкостей в якості чутливих елементів.

3. Проведене дослідження точності силової стабілізації поля зору танкового прицілу-далекоміру довело, що сили «сухого» тертя і нелінійна характеристика системи розвантаження обумовлюють високочастотні автоколивання рамок гіростабілізованих платформ, які передаються на рухоме дзеркало прицілу. При цьому амплітуда автоколивань рухомого дзеркала досягає величини рад.

4. Система індикаторної стабілізації поля зору прицілу має підвищену заводо захищеність у порівнянні з системою силової стабілізації при використанні пропорційного закону стабілізації, яка ще більш підвищується при використанні пропорційно-диференціального закону стабілізації поля зору приладу спостереження і може досягти потрібного рівня заводо захищеності лише у випадку використання цифрових низькочастотних фільтрів.

5. Запропоновані дві методики синтезу цифрових нерекурсивних низькочастотних фільтрів. Одна з них полягає в побудові фільтру із заданою смугою пропускання, а друга – в побудові оптимального фільтру, який мінімізує площу під його АЧХ, з якої виключена смуга пропускання. Порівняльний аналіз обох методик приводить до висновку, що оптимальні фільтри мають більш високі фільтруючі властивості у порівнянні з класичними фільтрами при однакових смугах пропускання. В той же час, крутизна кривої АЧХ в районі границі смуги пропускання всіх без виключення нерекурсивних фільтрів недостатня, що являється їх загальним недоліком.

6. Вказаний вище недолік нерекурсивних цифрових низькочастотних фільтрів привів к дослідженню використання цифрових рекурсивних фільтрів в стабілізаторах поля зору прицілу-далекоміру. В якості таких фільтрів в роботі рекомендується використання рекурсивних фільтрів Баттеруорта другого або третього порядків і диференціюючих фільтрів Ланцоша другого або першого порядків. При використанні фільтрів Баттеруорта і Ланцоша доцільно здійснювати побудову цифрового пропорційно-диференціального стабілізатора за послідовно-паралельною схемою, що забезпечує підвищення його фільтруючих властивостей.

7. Для підвищення заводо захищеності стабілізатора лазерного променю танкового прицілу-далекоміру запропоновано використання безплатформеної інерціальної системи (БІНС), що містить датчики кутових швидкостей обертання гармати відносно вісі цапр, башти відносно вісі повороту і підресореної частини корпусу танка відносно власної подовжньої вісі, а також обчислювальний пристрій, що реалізує алгоритм обчислення кутового розходження лазерного променю прицілу-далекоміру і напрямку на ціль.

8. Величина періоду квантування бортової ЕОМ, яка реалізує алгоритм БІНС, повинна знаходитися у межах $T=(0,005\div 0,01)$ с, що забезпечує достатню точність стабілізації лазерного променя танкового прицілу-далекоміру точність індикаторної стабілізації лазерного променя з використанням БІНС в 2÷3 рази перевищує точність силової стабілізації. Використання цифрових низькочастотних фільтрів в безплатформеному стабілізаторі лазерного променя не приводить до суттєвих ускладнень алгоритмів стабілізації, що реалізується бортовою ЕОМ.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджені в наукові розробки і навчальний процес кафедри інформаційних технологій і систем колісних і гусеничних машин ім. О.О. Морозова Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Зейн А.В. Структурно-параметрический синтез цифрового электромеханического стабилизатора поля зрения прибора наблюдения/ Т.Е.Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн// Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені М.Остроградського, 2012. - №3. – С.375-377.

Здобувачем розроблена математична модель замкненої слідкуючої системи стабілізації поля зору приладу спостереження відносно заданого напрямку.

2. Зейн А.В. Рекурсивные цифровые фильтры Баттеруорта для стабилизаторов подвижных объектов / Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн// Технічна електродинаміка.– К: Інститут електродинаміки НАНУ, 2012. – Ч.І. – С.86-89.

Здобувачем доведено, що найбільш ефективними низькочастотними фільтрами в цифрових системах стабілізації являються рекурсивні фільтри Баттеруорта.

3. Зейн А.В. Сравнительный анализ цифровых ПД-стабилизаторов подвижных объектов с низкочастотными фильтрами Баттеруорта и Ланцоша / Т.Е. Александрова, В.А. Кононенко, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. -№2. – С.148-152.

Здобувачем доведено, що найкращу завадо захищеність має цифровий ПД-стабілізатор з послідовно-паралельним сполученням фільтрів Баттеруорта і Ланцоша.

4. Зейн А.В. Цифровые фильтры в системах автомобильной автоматики / И.Е. Александрова, Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – М: МАДИ, 2014. - №1(36). –С.49-53.

Здобувачем проведений порівняльний аналіз паралельного і послідовно-паралельного з'єднання фільтрів Баттеруорта і Ланцоша.

5. Зейн А.В. Оптимизация параметров нерекурсивных низкочастотных фильтров цифровых систем управления и диагностики / Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. - №1. – С.169-178.

Здобувачеві належить ідея побудови оптимального нерекурсивного високочастотного фільтру.

6. Зейн А.В. об особенностях построения инвариантной системы наведения и стабилизации танковой пушки / Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн // Системи озброєння і військова техніка. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил, 2014. - № 4 (40). – С.3-6.

Здобувачем запропонована блок-схема цифрового стабілізатора лінії прицілювання.

7. Пат. UA 83904 від 10.10.2013, Україна, МПК F41G 3/02. Стабілізатор лінії прицілювання танкової гармати / Т.Є. Александрова, А.О. Лазаренко, А.В. Зейн. НТУ «ХПІ». Заявка № 20130069 від 21.01.2013. Опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19.

Здобувачем розроблена принципова схема стабілізатора поля зору приладу спостереження.

8. Зейн А.В. Структурно-параметричний синтез цифрового ПД-стабілізатора поля зору приладу спостереження / Т.Є. Александрова, А.О. Лазаренко, А.В. Зейн // Матеріали ХІХ Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика/Automatics-2012». – Львів, 2012. – С.326-327.

Здобувачем отримані співвідношення для передавальних функцій ПД-стабілізатора поля зору приладу спостереження.

АНОТАЦІЇ

Зейн Алі Вахіб. Розробка цифрової системи стабілізації поля зору приладу спостереження наземного рухомого об'єкту. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи і процеси керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2015.

Метою дисертаційної роботи являється розробка цифрової системи стабілізації поля зору приладу спостереження підвищеної точності для наземного рухомого об'єкту. Доведена необхідність переходу від систем стабілізації силового типу до систем стабілізації індикаторного типу з цифровим електронним блоком. Висока заводо захищеність і точність системи індикаторного типу може бути забезпечена застосуванням в цифровому електронному блоці цифрових низькочастотних фільтрів, зокрема фільтрів Баттеруорта і Ланцоша з послідовно-паралельним з'єднанням. Розглянута можливість використання в алгоритмах, що реалізуються цифровим електронним блоком, принципів безплатформених інерціальних систем, в яких кут розбіжності між лазерним променем прицілу-далекоміру і напрямком на ціль не вимірюється, а обчислюється, за допомогою кінематичних співвідношень відносно параметрів кватерніона орієнтації. Доведено, що стабілізатор, побудований на цих принципах забезпечує у 2÷3 рази вищу точність у порівнянні із стабілізатором силового типу.

Ключові слова: силова стабілізація, індикаторна стабілізація, танковий приціл, гіростабілізована платформа, безплатформена інерціальна система, цифрові низькочастотні фільтри.

Зейн Али Вахиб. Разработка цифровой системы стабилизации поля зрения прибора наблюдения наземного подвижного объекта. -На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03-системы и процессы управления.-Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015.

Целью диссертационной работы является разработка цифровой системы стабилизации поля зрения прибора наблюдения повышенной точности для наземного подвижного объекта. Проведенный анализ научно-технической и патентной литературы по теме диссертации привел к выводу о необходимости перехода от систем стабилизации силового типа, в которых осуществляется

механическая связь между подвижным зеркалом прибора и внешней рамкой гиросtabilизированной платформы, к системам индикаторной стабилизации с использованием электромеханической следящей системы с цифровым электронным блоком. Показано, что высокая помехозащищенность и точность индикаторной системы стабилизации может быть достигнута использованием в алгоритмах стабилизации цифрового электронного блока низкочастотных фильтров, подавляющих высокочастотные помехи информационных сигналов. Проведен сравнительный анализ различных цифровых фильтров и сделан вывод о целесообразности использования цифровых рекурсивных фильтров Баттеруорта и Ланцоша, соединенных по последовательно-параллельной схеме. С целью повышения помехозащищенности и точности системы стабилизации поля зрения прибора наблюдения наземного транспортного средства рассмотрена возможность реализации в электронном блоке стабилизатора принципов бесплатформенных инерциальных систем, в которых угол рассогласования между лазерным лучом прицела-дальномера и направлением на цель не измеряется с помощью дорогостоящей и высокочувствительной к вибрациям гиросtabilизированной платформы, а вычисляется с помощью специальных алгоритмов на основе информации об угловых скоростях поворота танковой пушки относительно оси цап, танковой башни относительно оси поворота и подрессоренной части корпуса танка относительно собственной продольной оси, а также информации о текущих углах поворота башни и возвышения пушки. Показано, что такой стабилизатор может обеспечить в 2-3 раза более высокую точность стабилизации лазерного луча относительно направления на цель по сравнению с силовой системой стабилизации.

Результатом диссертационной работы внедрены в научные разработки НТУ «ХПИ» при выполнении хозяйственной работы для Львовского научно-исследовательского института, а также в учебный процесс подготовки специалистов и магистров.

Ключевые слова: силовая стабилизация, индикаторная стабилизация, танковый прицел, гиросtabilизированная платформа, бесплатформенная инерциальная система, цифровые низкочастотные фильтры.

Zein Ali Wahib. Development of digital system of stabilization of the visual field of observation instrument of surface-mobile object. – As manuscript.

Thesis for the of Candidate of technical sciences, Specialty 05.13.03-System and management processes. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2015.

Aim of the thesis is to develop a digital system of stabilization of the visual field of extended precision observation instrument of surface-mobile object. Proved the necessity of conversion from the power type systems of stabilization to the indicator

type systems of stabilization with digital electronic unit. High interference immunity of the indicator type system can be achieved by the using of digital electronic block of digital low-frequency filter, including filters of Batteruort and Lanzrosh with series-parallel connection. Considered the possibility of its using in the algorithms, which are implemented by the digital electron block, principles of strapdown inertial system in which the angle of divergence between the laser beam of range unit sight and direction to the target is not measured but calculated by using kinematic formulas relative the orientation quaternion parameters. Established that the stabilizer built on these principles provides 2+3 times higher accuracy compared to the power type stabilizer.

Keywords: power stabilization, indicator stabilization, tank sight, gyrostabilized platfor, strapdown inertial system, digital low-frequency filters.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping letters that appear to be 'ADK' or similar, with a horizontal line underneath.

Підписано до друку 13.10.2015р.

Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.

Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 188

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»

(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)

М. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1

Тел. 7-170-354

www.modelist.in.ua