

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**Ільченко Микола Васильович**

УДК 528.563

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНІСНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ  
МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі приладобудування та Публічному акціонерному товаристві «Науково-виробниче товариство «Київський завод автоматики» у Конструкторсько-технологічному управлінні.

**Науковий керівник:** Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор  
**БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри приладобудування.

**Офіційні опоненти:** Заслужений метролог України, доктор технічних наук, професор,  
**КВАСНІКОВ Володимир Павлович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій;

Кандидат технічних наук, доцент  
**ІГНАТЕНКО Павло Леонідович**  
Національний університет  
«Чернігівська політехніка»,  
доцент кафедри технологій  
машинобудування та деревообробки

Захист відбудеться «27» листопада 2020 р. о 16.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.07 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 1, кімната 317.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «20» жовтня 2020 р.

**Учений секретар**  
спеціалізованої вченої ради



**Ю.В. Киричук**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасний стан вітчизняного виробництва приладових систем вимірювання механічних величин характеризується значним підвищенням вимог до точності, швидкодії, жорсткості, люфтів, моментів опору обертанню, точності виставлення датчиків вимірювання кутової швидкості каналів наведення стабілізатора та інших.

Задача підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації є надзвичайно важливою.

Науково-технічний прогрес у галузі приладових систем стабілізації потребує удосконалення компонентів, використання нових принципів побудови цифрових стабілізаторів, використання сучасного кутомірного засобу для покращення метрологічних характеристик приладової системи а саме: точності, швидкодії, вимірювання похибок стабілізації.

Розв'язання даної складної науково-технічної задачі вимагає застосування нової більш досконалої приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, а також визначення з високою точністю похибки стабілізації, застосування нової елементної бази на основі нових твердотільних прецизійних чутливих елементів мікромеханічних гіроскопів (МЕМС), Коріюлісових вібраційних гіроскопів (КВГ) та волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ).

Забезпечення підвищення точності приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації є найважливішою проблемою сучасності, вирішення якої забезпечує безпеку України.

Тому, тема дисертаційної роботи «Методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації» є актуальною.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження та розробки, що узагальнені у роботі, виконувались у рамках відповідних науково-дослідних робіт між кафедрою приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України з підприємством Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики»:

– тема № 2803-ф «Теорія й принципи побудови сучасного обчислювального інтегрального діагностичного комплексу із застосуванням нанотехнологій і нейронних мереж» (номер державної реєстрації 0105U001085, 2004-2005 р.р.);

– тема № 21 «Дослідження нового динамічно настроюваного гіроскопа

для прецизійних навігаційних систем» (номер державної реєстрації 0209U 002127, 2007-2009 р.р.);

– тема № 2411-ф «Науково-теоретичні дослідження нової прецизійної інерціальної навігаційної системи в екстремальних умовах з використанням нейронних мереж» (номер державної реєстрації 0111U 000714, 2011-2013р.р.);

– тема № 2019 «Система керування навігаційного комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин» (номер державної реєстрації 0117U000405, 2017 р.) та згідно планів науково-технічної ради Публічного акціонерного товариства «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики».

**Мета і задачі дослідження.** *Метою* дисертаційного дослідження є вирішення важливої наукової задачі визначення методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, покращення основних характеристик стабілізаторів (підвищення точності, швидкодії, швидкостей наведення, зменшення похибок стабілізації), підвищення точності вимірювання механічних величин (кута виставлення датчиків кутової швидкості, жорсткості, люфтів, моментів опору обертанню каналів наведення стабілізатора та інших.) в екстремальних умовах роботи (широкий діапазон зовнішніх вібраційних і температурних збурень) шляхом використання запропонованих нових прецизійних методів та засобів.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких *задач*:

1. Обґрунтувати актуальність досліджень, можливість та доцільність; підвищення методів та засобів точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;

2. Проведення аналітичного аналізу літератури у галузі наукових досліджень та розробок шляхів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, вимірювання динамічної похибки стабілізації;

3. Проведення теоретичного аналізу приладового складу приладової системи в частині шляхів підвищення точності та швидкодії окремих приладів. Надати опис роботи;

4. Розробки математичної моделі основних компонентів та каналів управління приладової системи стабілізації приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;

5. Проведення розрахунково-моделюючої роботи з визначення методів підвищення точності та динамічних характеристик стабілізатора на основі розробленої математичної моделі стабілізатора;

6. Проведення експериментального дослідження щодо шляхів підвищення точності приладової системи;

7. Дослідження основних технічних характеристик нових перспективних твердотільних чутливих елементів;
8. Наведення основних нових компонентів нового стабілізатора;
9. Розробки структурно-функціональної схеми стабілізатора підвищеної точності;
10. Розробки методики вимірювання динамічної похибки приладової системи.

*Об'єкт дослідження:* процес вимірювання механічних величин приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації шляхом використання запропонованих методів та засобів.

*Предмет досліджень дисертації:* методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації.

**Методи дослідження:**

- аналіз науково-технічної літератури, патентних баз даних та мережі Internet щодо принципів побудови стабілізаторів, засобів та методів підвищення точнісних характеристик, методики визначення динамічної похибки стабілізації (розділи 1, 2);
- математичне моделювання, яке включає в себе розробку математичних моделей основних компонентів та каналів управління приладової системи стабілізації (розділ 3);
- оптимізація параметрів стабілізатора для вимірювання механічних параметрів та стабілізації (розділ 2);
- оцінка швидкодії окремих складових стабілізатора (розділ 2),
- оцінка правильності вибору методу виміру динамічної похибки стабілізації, тобто методика виміру кутових відхилень блоку озброєння по горизонтальному та вертикальному каналу (розділи 4, 5);
- експериментальні дослідження результатів аналітичних розрахунків та результатів математичного моделювання (розділ 4);
- статистична обробка даних експериментальних досліджень (визначення параметрів руху рухомого об'єкту (РО) на інтервалі часу) (розділи 2, 4).

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що у дисертаційній роботі отримані такі найбільш суттєві результати, що визначаються наступними положеннями:

1. Розроблено нові методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;
2. Проведено розробку математичних моделей основних компонентів та каналів управління приладової системи стабілізації;
3. Визначені шляхи підвищення точності цифрової системи

вимірювання механічних параметрів шляхом:

- застосування нових твердотільних гіроскопів з більшою смугою пропускання, замість традиційних електромеханічних гіротахometrів,

- підвищення частоти інформаційного обміну,

- застосування нової моделі побудови стабілізатора;

4. Уперше розроблено метод усунення відводів вертикального та горизонтального каналів наведення у режимі функціонування стабілізатора із підвищеною точністю (режим «УПР»);

5. Розроблено нову модель побудови стабілізатора підвищеної точності;

6. Розроблено метод компенсації взаємовпливу горизонтального та вертикального каналів один на одного за рахунок введення додаткових електронних налаштувальних коефіцієнтів;

7. Уперше проведено математичне моделювання щодо визначення методу вимірювання динамічної похибки стабілізації.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Запропоновано методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;

2. Розроблено математичні моделі основних компонентів та каналів управління приладової системи, що дозволило провести моделювання окремих режимів роботи;

3. Розроблено та підтверджено математичним моделюванням шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів шляхом:

- застосування твердотільних гіротахometrів із смугою пропускання не менше 100 Гц замість традиційних електромеханічних гіротахometrів,

- підвищення частоти інформаційного обміну з 400 Гц до 1000 Гц,

- зміни моделі побудови стабілізатора – заміна «залежної» стабілізації на «незалежну» стабілізацію з використанням у контурі управління приладу із стабілізованим полем зору;

4. Розроблено та підтверджено методом математичного моделювання правильність запропонованого методу усунення відводів вертикального та горизонтального каналів наведення у режимі функціонування з підвищеною точністю (режим «УПР»);

5. Визначено функціональну модель цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації підвищеної точності з використанням нових чутливих елементів та приладу спостереження за об'єктами із стабілізованим полем зору;

6. Розроблено методику електронної виставки датчиків кутової швидкості, що враховує похибки його виставки та усуває взаємний вплив каналів без застосування трудомістких ручних операцій;

7. Розроблено та впроваджено у виробництво метод вимірювання похибки цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, що дозволяє:

- проводити вимірювання на етапах налаштування, пред'явницьких та приймально-здавальних випробувань приладової системи стабілізації без виконання трудомістких робіт,

- підвищити якість перевірок одного з основних технічних параметрів приладової системи – точності стабілізації.

**Впровадження результатів роботи.** Теоретичні і практичні здобутки впроваджено на підприємствах УКРОБОРОНПРОМУ, ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» та у навчальному процесі кафедри приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при проведенні лекційних, лабораторних та практичних занять із навчальних дисциплін «Перетворювачі фізичних величин», «Основи наукових досліджень».

**Особистий внесок здобувача.** Особисто автором виконано аналіз літературних даних за темою досліджень, плануванні та проведенні експериментів, обробці експериментальних даних та апробації отриманих наукових результатів на наукових конференціях. Автором було вперше розроблено та відпрацьовано на експериментальному обладнанні методику вимірювання динамічної похибки стабілізації яку було впроваджено у виробництво, проведено експериментальні дослідження по визначенню смуги пропускання електромеханічних гіротахometrів, електромагнітних та електромеханічних постійних привідних двигунів, обґрунтовано необхідність переходу від «залежного» до «незалежного» принципу схемо-технічної побудови стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки з використанням у контурі управління стабілізатора приладу спостереження за ціллю з стабілізованим полем зору, розроблені блок схеми, структурно-функціональні схеми побудови такого стабілізатора. Його технічні характеристики наведені у порівнянні з характеристиками сучасного цифрового стабілізатора, який розроблено на твердотільних гіротахometrах. Обґрунтовано запропоновані методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Розроблено методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації на підставі розроблених математичних моделей, проведено математичне моделювання методу усунення відводів у режимі функціонування стабілізатора з підвищеною точністю. Автором запропоновано нові методики по вимірюванню механічних параметрів каналів наведення, що спрощують відомі методики.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та одержали позитивну оцінку

на наступних науково-технічних конференціях та семінарах: XIV Міжнародна науково-практична конференція «Наукова думка інформаційного віку 2018», Польща, Пшемишль; Всеукраїнська науково-практична on-line конференція «Технічні науки на сучасному етапі» (присвячена Дню науки), Україна, Житомир, 2018; XII Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси 2019», Україна, Київ; I Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси» Україна, Черкаси, 2019; Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення», (випуск 40), Україна, Тернопіль, 2019; Науково практична конференція «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій», Україна, Ужгород, 2019; Міжнародна науково-практична конференція «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien», Австрія, Відень, 2019; VII Міжнародна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», Україна, Київ, 2019.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, із них 6 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті у інших виданнях, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на 208 сторінках основного друкованого тексту. Повний обсяг дисертаційної роботи 222 сторінки друкованого тексту, містить 114 рисунків, 17 таблиць, 5 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, можливість та доцільність використання запропонованих методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Сформульовано мету, завдання, наукову новизну та практичне значення отриманих і впроваджених результатів. Визначено структуру та обсяг дисертаційної роботи. Представлені дані про публікації і апробацію результатів досліджень, наведено дані про особистий внесок здобувача, показано зв'язок роботи з науковими програмами і проектами.

**У першому розділі** проаналізовано літературні джерела, мережа Інтернет у сфері існуючих приладових комплексів та методів вимірювання похибок стабілізації. Наведено основні принципи класифікації стабілізаторів

в залежності від принципу, за яким побудовані стабілізатори (рис. 1). Розглянуто принцип дії сучасних цифрових приладових систем по кожному з каналів управління окремо. Визначено схему різновидів приладових систем та основні конструкційні елементи.



Рис. 1. Класифікація приладових систем вимірювання механічних параметрів та стабілізації

Наведено основні показники якості стабілізаторів. Розглянуто існуючі методи вимірювання похибок приладових систем вимірювання механічних параметрів та стабілізації за допомогою метода кінофотографування (рис. 2, 3) на нормалізованій трасі в польових умовах, що потребує виконання великого обсягу ручних операцій. Наведено метод вимірювання похибки стабілізації за допомогою приладу ПС, який під'єднується до електричних ланцюгів стабілізатора та не потребує використання кінофотографування і зменшує кількість ручних операцій по визначенню похибки стабілізації.

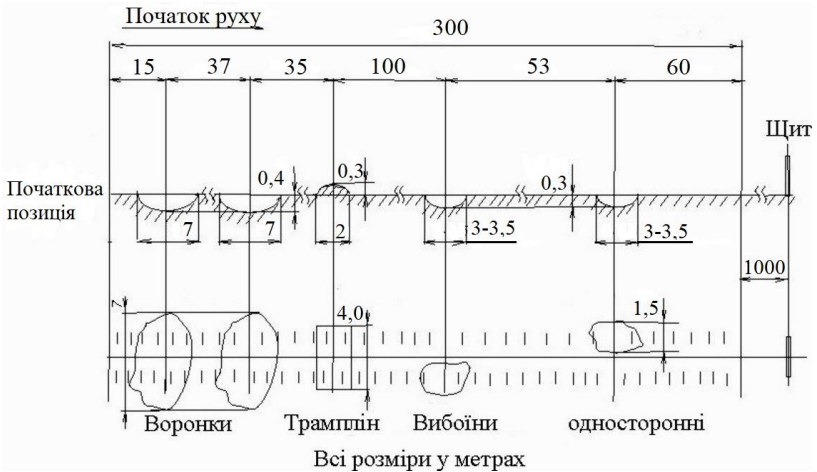


Рис. 2. Типова траса для визначення середньої похибки стабілізації

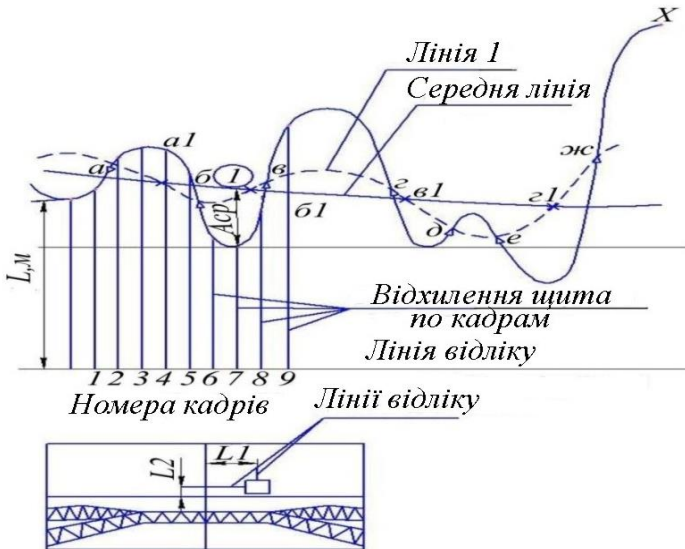


Рис. 3. Приклад обробки кінограми похибки стабілізації

*У другому розділі* розглянуто методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів стабілізації. Обґрунтовано застосування нових твердотільних гіроскопів (рис. 4) замість електромеханічних гіротахometrів, наведено основні технічні характеристики цих типів датчиків кутової швидкості. (табл. 1): Проведено роботи з математичного моделювання з метою вивчення

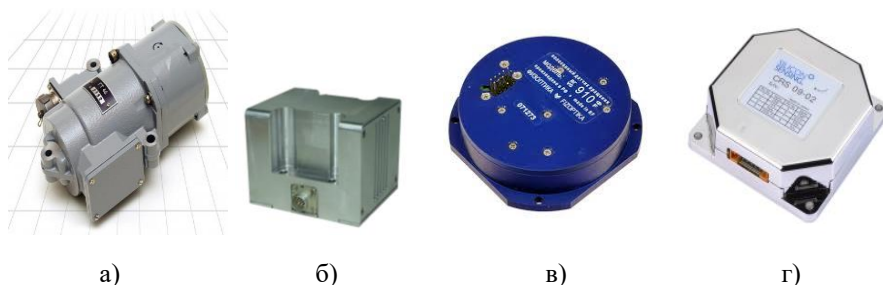


Рис. 4. Датчики кутової швидкості: а) – електромеханічний гіротахometr ГТ46; б) – Коріолісовий вібраційний гіроскоп KBG26; в) оптико-волоконний гіроскоп ВГ910Ф; г) мікромеханічний гіроскоп (MEMS) CRS03

можливості покращення характеристик точності приладового комплексу стабілізатор в частині збільшення смуги пропускання до 100 Гц та зменшення частоти інформаційного обміну до 1000 Гц.

Таблиця 1

Таблиця порівняльних характеристик датчиків кутової швидкості

№	Технічний параметр	ГТ46	KBG	MEMS CRS03	ВГ910Ф
1	Смуга пропускання	30 Гц	100 Гц	100 Гц	(400/-) Гц
2	Час готовності	120 с	< 1 с	< 0,1 с	-/0,2с
3	Діапазон швидкостей	$\pm 50$ °/с	$\pm 200$ °/с, $\pm 400$ °/с	$\pm 75$ °/с	$\pm 370$ °/с
4	Поріг чутливості	0,015 °/с	–	–	–
5	Масштабний коефіцієнт	0,17 В-с/град	0,04 1/(град сек)	15 мВ/(град сек)	5,5/7,5 мВ/(град сек)
6	Дрейф нуля	–	< 5 град/час	–	< 4 град/час
7	Шум	–	0,003 град/час	0,05 град/сек/ $\sqrt{\text{Гц}}$	–
8	Діапазон температур	$-40 \div +70$ °С	$(-40 \div +75)$ °С	$(-40 \div +85)$ °С	$(-40 \div +70)$ °С
9	Напруга живлення	~3ф, 36В 400Гц (0,4) А	(15 $\div$ 30) В, 2,5 Вт	–	+ 5 В (20 °С)
10	Стійкість до ударів	100 g (0,5-1) мс	–	500g	1/150 мс/g
11	Середнє напрацювання на відмову	1000 ч	> 500000 ч	–	60000 ч
12	Вихідний сигнал	аналоговий	RS-422, RS-485	–	аналоговий
13	Маса	2,3 кг	2,6 кг	30 г	$\approx 120$ г

Розглянуто можливість підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації за рахунок зміни моделі побудови стабілізатора. Запропоновано перехід від «залежної» системи стабілізації до «незалежної» за рахунок введення до складу контурів управління стабілізатора приладу з стабілізованим полем зору. Наведено розроблені методи удосконалення вимірювання механічних параметрів, що впливають на функціонування стабілізаторів. Розроблено метод електронної виставки датчика кутової швидкості, що враховує похибки його виставки та усуває взаємний вплив каналів без застосування трудомістких ручних операцій;

**У третьому розділі** наведено результати, які отримані на підставі математичного моделювання - математичні моделі основних компонентів та каналів управління приладової системи стабілізації (моделі основних вузлів та блоків, що входять до складу приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації: пульта керування, гіротахметра ГТ46, датчика положення, блоку управління та ін.). Отримано математичні моделі вертикального та горизонтального каналів з редуктором і двигуном (рис. 5). Математичним моделюванням проведено дослідження щодо доцільності введення до режиму «УПР» функціонування стабілізатора з підвищеною точністю підрежиму «УПР-1», в якому відсутні відведення горизонтального та вертикального каналів. Достовірність отриманих результатів підтверджено результатами експериментального відпрацювання.

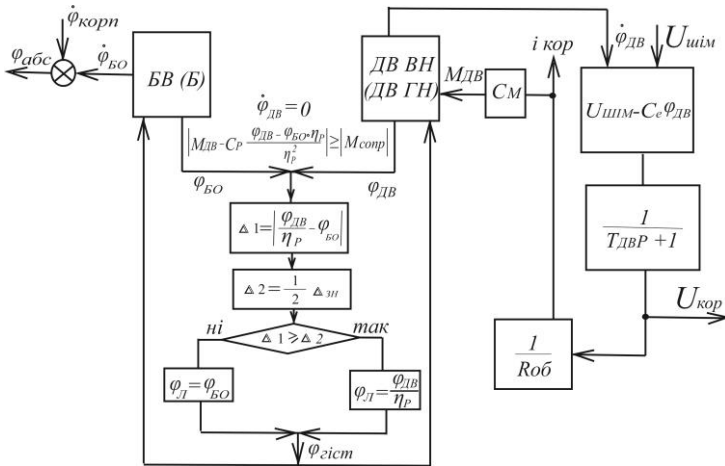


Рис. 5. Блок-схема математичної моделі вертикального (горизонтального) каналів наведення

Для порівняння похибок стабілізації проведено моделювання вертикального каналу стабілізатора з введенням в математичну модель стабілізатора моделі Коріолісового вібраційного гіроскопу у режимах, коли смуга пропускання КВГ приймалась на рівні 100 Гц, а дискретність обчислень приймалась на рівні 1,7 мс та 1,0 мс у різних режимах (Рис. 6).

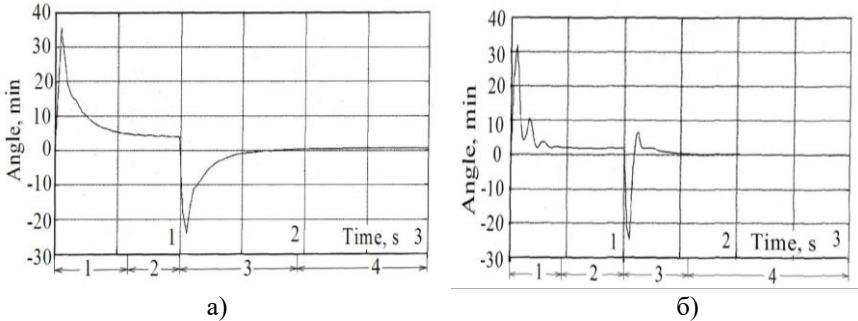


Рис. 6. Зміна кутового положення БО при русі виробу по пересіченій місцевості: а) дискретність 1,7 мс, смуга пропускання ДКШ 100 Гц; б) дискретність 1,0 мс, смуга пропускання ДКШ 100 Гц

У *четвертому розділі* наведено відомості про практичні розробки та результати експериментальних досліджень стабілізаторів. Запропоновано методи і засоби проведення вимірювань при експериментальних дослідженнях; підтверджено достовірність основних технічних характеристик приладової системи. Наведено результати моделювання основних режимів роботи із цифровими контурами управління приводами горизонтального і вертикального каналів наведення. Проведено експериментальні роботи по визначенню електромагнітних та електромеханічних характеристик привідних двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20 (рис. 7, 8).

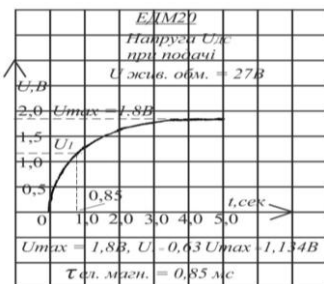


Рис. 7. Напряга  $U_{дс}$  ЕДМ20 при подачі  $U_{жив. обм.} = 27 В$

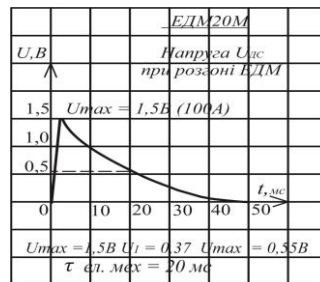


Рис. 8. Напряга  $U_{дс}$  при розгоні двигуна ЕДМ20М

Досліджено зміну моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності стабілізації. Запропоновано змінити модель побудови стабілізатора за рахунок відмови від «залежного» принципу стабілізації, де вертикальний та горизонтальний канали наведення та прилад спостереження за місцевістю пов'язані між собою, на «незалежний», де ці складові не пов'язані між собою. Для реалізації цього принципу побудови до складу стабілізатора вводиться прилад із стабілізованим полем зору. За результатами математичного моделювання проведено розрахунки методу оцінки динамічної похибки стабілізації, за основу якого прийнята точність відпрацювання стабілізатором синусоїдального сигналу  $A=2,5^\circ \sin \omega t$ , що подається до контуру управління стабілізатором. Розглянуто три точки подачі синусоїдального сигналу до блоку керування стабілізатором. Математичним моделюванням визначено точку подачі, де значення похибки стабілізації має оптимальне значення. Проведено експериментальні дослідження та дослідження за допомогою математичного моделювання по визначенню смуги пропускання електромеханічних гіротахometrів (рис. 9, 10)

за формулами:  $T = (17229 - 16165) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04256 \text{ с}$ ;  $f = \frac{1}{T} = 23,4962 \text{ Гц}$ ;

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 147,6312 \text{ рад/сек}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{41}{46} = 44,21914;$$

$$q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 154,1114; \quad \zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,28693.$$

$$W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,003724p + 4,21047 \cdot 10^{-5} \cdot p^2};$$

Передаточна функція гіротахometrа:  $W_1(p) = \frac{11,04}{4,21 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003724 p + 1}$ ;

де  $U$  – вихідна напруга гіротахometrа [В];  $\omega$  – вимірювана кутова швидкість

[рад/с];  $K_{ГТ} = \frac{H \cdot K_{ДК}}{C} = 11,04 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$  – статичний коефіцієнт передачі;

$T_0 = \sqrt{\frac{I_n}{C}} = 0,00673 \text{ с}$  – постійна часу;  $\zeta$  – відносний коефіцієнт

демпфірування;  $H = 0,359 \text{ Нм} \cdot \text{с}$  – кінетичний момент;  $C = 7,45 \text{ Нм/рад}$  – жорсткість торсіону;  $K_{ДК} = 229,2 \text{ В/рад}$  – крутість вихідної характеристики датчика кута;  $I_n = 3,38 \cdot 10^{-4} \text{ Нм} \cdot \text{с}^2$  – момент інерції підвісу.

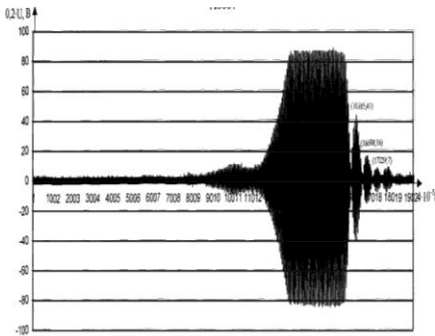


Рис. 9. Осцилограма перехідних процесів гіротахметра ГТ46

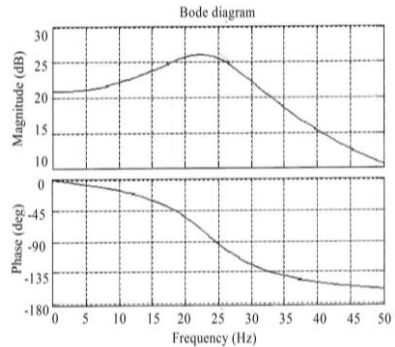


Рис. 10. Амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики ГТ46

Досліджено зміну моделі побудови приладової системи з метою підвищення точності стабілізації. За результатами математичного моделювання проведено розрахунки методу оцінки динамічної похибки стабілізації.

У *п'ятому розділі* наведено результати розробки методу вимірювання динамічної похибки стабілізації, що проводиться без випробувань у польових умовах. Розроблено метод виміру динамічної похибки стабілізації замість відомої методики визначення середньої похибки стабілізації, яка була дуже трудомістка та проводилась в польових умовах на типовій трасі методом кінофотографування на кіноплівку. Метод виміру середньої похибки стабілізації, а також динамічної похибки, фактично є методом виміру кутових відхилень блоку горизонтального та вертикального каналу під дією зовнішніх механічних навантажень, які діють на канали стабілізатора. Відпрацювання динамічної похибки проводилось на стенді, який пройшов метрологічну експертизу та атестований для проведення налаштування та випробувань –

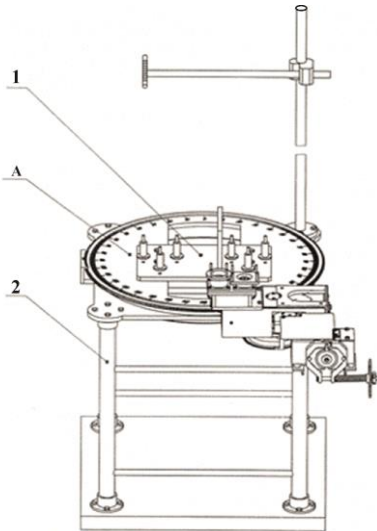


Рис.11 Атестований стенд для проведення випробувань

СТМ02 (рис. 11). Додаткові випробування по відпрацюванню динамічної похибки були проведені на

учбовому комплексу УК675, що за своїми механічними характеристиками відповідає реальному виробу.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Визначити точку подачі синусоїдального сигналу до контурів управління приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;

2. Визначити значення основних параметрів синусоїдального сигналу  $A=2,5^{\circ}\sin\omega t$  щодо механічних характеристик стенду СТМ02;

3. Визначити параметри для проведення випробування подачі сигналу  $A=2,5^{\circ}\sin\omega t$  у складі технологічного стенду. Визначити достатність обчислювальних можливостей блоку керування та пульта керування без введення до робочого місця перевірки ЕОМ.

Метод виміру динамічної похибки стабілізації є методикою виміру кутових відхилень блоку озброєння по горизонтальному та вертикальному каналу під час відпрацювання синусоїдального сигналу  $A = 2,5^{\circ}\sin\omega t$ , який подається на вхід стабілізатора і імітує рух машини по нормалізованій трасі. У процесі вимірювання динамічної похибки стабілізації, стабілізатор за заданим алгоритмом вираховує похибку та видає її значення на світловому табло пульта управління стабілізатора. Це дозволяє проводити виміри динамічної похибки на кожному стабілізаторі в умовах складального цеху на розробленому стенді СТМ02, що імітує вертикальний або горизонтальний канали наведення.

Для визначення динамічної похибки у програму алгоритмічного забезпечення введено підпрограму, по якій виконується:

1) оцінка крутизни характеристики вихідного сигналу гіротахометра за формулою:  $K\omega = 1,7 \text{ В}/\omega$ , де  $\omega = \Delta\phi / \Delta t$ ;

2) видача через 30 с на суматор додаткового сигналу  $U_{\omega v} = U_{\text{мгн(вн)}}\cos(\omega t + \pi/2)$ , де  $U_{\text{мгн(вн)}} = 1,7 \text{ В}$ ,  $\omega = 5,02 \times 1/\text{с}$  ( $12,55 \times 1/\text{с}$ ;  $39 \times 1/\text{с}$ );

3) обчислення кута відхилення осі каналу за вихідним сигналом додаткового інтегратора ( $A\omega z$ ).

Результати відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки представлені графічними рисунками (рис. 12, 13) для каналів вертикального та горизонтального наведення у залежності від апаратури на якій проводилось дослідження: СТМ02 або УК675.

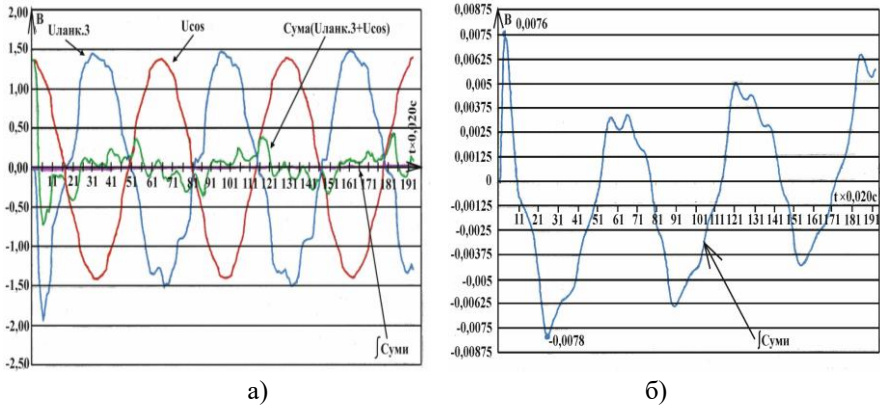


Рис. 12. Відпрацювання СВУ-500-4Ц на УК675 канал ВН : а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу Інтеграл суми.

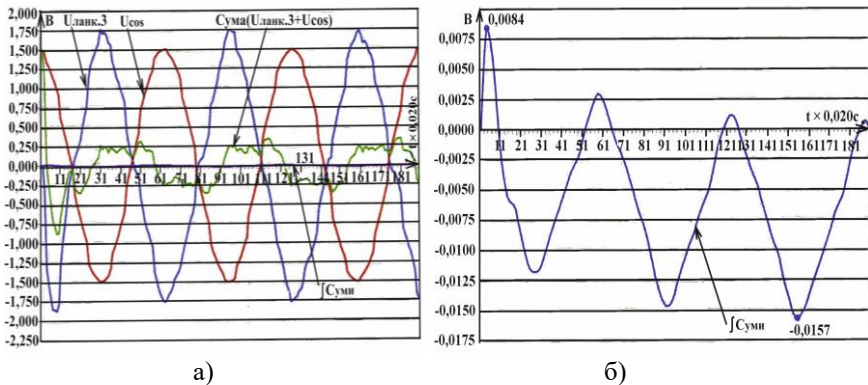


Рис. 13. Відпрацювання СВУ-500-4Ц на СТМ02 канал ВН: а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу Інтеграл суми

За результатами виконаних робіт отримано наступні результати:

1. На підставі робіт по математичному моделюванню та експериментальному відпрацюванню розроблено методи вимірювання динамічної похибки приладової системи вимірювання механічних величин та стабілізації;

2. Значення динамічної похибки стабілізації, що отримано у результаті експериментального відпрацювання, не перевищує величини, наведеної у технічних вимогах на стабілізатор 2Е52 ( $\leq 2$ т.д.);

3. За позитивними результатами проведеного дослідження метод вимірювання динамічної похибки стабілізації введено до технологічного процесу виготовлення приладових систем вимірювання механічних параметрів та стабілізації.

## ВИСНОВКИ

Викладені у дисертаційній роботі дослідження дозволили вирішити актуальну і складну науково-технічну задачу, що має важливе значення – підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів (кута виставлення датчиків кутової швидкості, жорсткості, люфтів, моментів опору обертанню каналів наведення стабілізатора та інших.) та стабілізації в екстремальних умовах роботи (широкий діапазон зовнішніх вібраційних і температурних збурень).

Отримано наступні нові результати:

1. Запропоновано методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;

2. Розроблено математичні моделі основних компонентів та каналів управління приладової системи, що дозволило провести моделювання окремих режимів роботи;

3. Розроблено та підтверджено математичним моделюванням шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів шляхом:

- застосування твердотільних гіроскопів із смугою пропускання не менше 100 Гц замість традиційних електромеханічних гіротахометрів,
- підвищення частоти інформаційного обміну з 400 Гц до 1000 Гц,
- зміни моделі побудови стабілізатора – заміна «залежної» стабілізації на «незалежну» стабілізацію з використанням у контурі управління приладу із стабілізованим полем зору;

4. Підтверджено математичним моделюванням правильність запропонованого методу усунення відводів вертикального та горизонтального каналів наведення у режимі функціонування стабілізатора з підвищеною точністю (режим «УПР»);

5. Визначено функціональну модель цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації підвищеної точності з використанням нових чутливих елементів та приладу спостереження за об'єктами із стабілізованим полем зору;

6. Розроблено метод електронної виставки датчика кутової швидкості, що враховує похибки його виставки та усуває взаємний вплив каналів без застосування трудомістких ручних операцій;

7. Розроблено та впроваджено у виробництво метод вимірювання похибки цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, що дозволяє:

– проводити вимірювання на етапах налаштування, пред’явницьких та приймально-здавальних випробувань приладової системи стабілізації без виконання трудомістких робіт,

– підвищити якість перевірок одного з основних технічних параметрів приладової системи – точності стабілізації.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:*

1. Bezvesilna O. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers/O. Bezvesilna, O. Petrenko, V. Halytskyi, M. Pchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system, Kharkiv. – 2020. – №1/9(103). – PP. 39–45. *Здобувачем запропоновано методику визначення динамічної похибки цифрових стабілізаторів озброєння.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз: Scopus, CrossRef, Index Copernicus, DOAJ, SIS та ін.

2. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопа/О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». – Луцький національний технічний університет, Луцьк. – 2019. – №14. – С.103–108. *Здобувачем надано основні параметри н'єзодатчиків та проведено розрахунок співвідношення між напругами на виході від напруги, яка подається на вхід н'єзодатчиків.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar та ін.

3. Безвесільна О.М.. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором /О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. Технічні науки – Хмельницький. – 2019. – №4(275). – С.169–175. *Здобувачем побудовано Simulink-модель КВГ, який працює як датчик кута.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Index Copernicus, Google Scholar та ін.

4. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки/О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, С.О. Нечай // Вісник інженерної академії України. – 2017. – №4. – С. 89–92. *Здобувачем проведено аналіз результатів математичного*

*моделювання та опис результатів дослідження.*

5. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко//Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – Хмельницький національний університет, Хмельницький. – 2019. – №3(273). – С.158-163.

*Здобувачем проведено оцінку впливу полоси пропускання та дискретності обчислювальних операцій виробів ГТ-46, КВГ, МЕМС та ВОГ на точності характеристики системи стабілізації.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Index Copernicus, Google Scholar) та ін.

6. Безвесільна О.М. Вибір робочого діапазону кутів тахометра для виробів легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Херсонського національного технічного університету, Херсон. – 2019. – №2(69). – С. 21–25. *Здобувачем проведено аналіз вихідних характеристик та визначено робочий діапазон кутів тахометра.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar, eLibrary та ін.

*Інші наукові видання:*

7. Безвесільна О.М. Оцінка впливу конструкції кронштейну для установки приладів ГТ46, ГТ46-01 на їх вихідні сигнали/О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко//Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – №7 (71). – С. 1–5. *Здобувачем проведено аналіз та опис результатів дослідження.*

8. Безвесільна О.М. Дослідження можливості підвищення рівномірності вихідної характеристики тахометра/ О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко// Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – № (72). – С. 149–152. *Здобувачем проведено аналіз результатів та опис результатів дослідження.*

9. Безвесільна О.М. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів/О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко//Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – № 9(73). – С. 219–226. *Здобувачем проведено аналіз результатів математичного моделювання та опис результатів дослідження.*

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

10. Безвесільна О.М. Підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки/О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В Ільченко, Ю.В. Киричук //XIV Міжнародна науково-практична конференція «Наукова думка інформаційного віку 2018», Польща, Пшемисьль. – 07–15.03.2018. – С. 3–8. *Здобувачем запропоновано шляхи підвищення точності*

*стабілізаторів озброєння.*

11. О.М. Безвесільна. Призначення та основні характеристики стабілізатора /О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко //Всеукраїнська науково-практична online конференція «Технічні науки на сучасному етапі» (присвячена Дню науки), Україна, Житомир. – 16 – 18.05.2018. – 107,108. *Здобувачем наведено основні технічні характеристики та призначення стабілізаторів озброєння.*

12. Безвесільна О.М. Усунення взаємовпливу каналів вертикального та горизонтального наведення в виробках легкої броньованої техніки/ О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко// XII Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси 2019» Україна, Київ. – 21–22 травня 2019. – С. 262–264. *Здобувачем запропоновано методику усунення взаємовпливу каналів введенням додаткових налаштувальних коефіцієнтів, що дозволяє уникнути трудомістких ручних операцій.*

13. Безвесільна О.М. Заміна електроприводів наведення у БМП-1 на електропривод СВУ-500-10Р/О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко// I Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси» Україна, Черкаси. – 29-31 травня 2019. – С. 92–94. *Здобувачем запропоновано замінити аналоговий електропривод, який було розроблено у 80-х роках минулого сторіччя, на сучасний цифровий СВУ-500-10Р.*

14. Безвесільна О.М. Випробування енкодера для використання у гіроскопічних приладах/ О.М. Безвесільна О.В. Петренко, М.В. Ільченко// Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 40), Україна, Тернопіль. – 09.07.2019. – С. 767–769. *Здобувачем запропоновано у гіроскопічних датчиках кутової швидкості використовувати сучасні цифрові датчики кута – енкодери, замість аналогових датчиків кута.*

15. Безвесільна О.М. Розширення відмов стабілізаторів/О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко//Науково практична конференція «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій» Україна, Ужгород. – 28–29 червня 2019. – С. 44–49. *Здобувачем запропоновано за рахунок доробки програмного забезпечення розширити кількість параметрів стабілізатора, за якими проводиться діагностичні перевірки правильності функціонування.*

16. Петренко О.В. Автоматичне налаштування стабілізаторів/О.В. Петренко, М.В. Ільченко// Міжнародна науково-практична конференція «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». Частина 3. Австрія, Відень. – 23 серпня 2019. – С. 44–46. *Здобувачем запропоновано за рахунок доробки програмного забезпечення розробити додаткову підпрограму, яка у автоматичному режимі буде самостійно, без втручання*

*оператора, проводити налаштування стабілізатора.*

17. Петренко О.В. Модернізація та продовження строку служби комплексу приладів управління/О.В. Петренко, М.В. Ільченко// VII Міжнародна конференція «Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», Україна, Київ. – 9 – 10 жовтня 2019. – С. 570 – 572.

*Здобувачем запропоновано методику продовження строку служби приладів управління.*

## АНОТАЦІЯ

**Ільченко М.В. Методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена науковому вирішенню важливої наукової задачі, що полягає у визначенні методів і засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів і стабілізації, поліпшення основних характеристик стабілізаторів (підвищення точності, швидкодії, швидкостей наведення, зменшення похибок стабілізації), підвищення точності вимірювання механічних величин (кута установки датчиків кутової швидкості, жорсткості, люфтів, моментів опору повороту каналів наведення стабілізатора і ін.) шляхом використання запропонованих нових прецизійних методів і засобів.

**Ключові слова:** приладовий комплекс, механічна величина, чутливий елемент, система стабілізації.

## АННОТАЦИЯ

**Ильченко Н.В. Методы и способы повышения точностных характеристик приборной системы измерения механических параметров и стабилизации. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения механических величин. – Национальный технический университет Украины «Киевский

политехнический институт имени Игора Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2020.

Диссертация посвящена научному решению важной научной задачи, заключающейся в определении методов и средств повышения точностных характеристик приборной системы измерения механических параметров и стабилизации, улучшения основных характеристик стабилизаторов (повышение точности, быстродействия, скоростей наведения, уменьшения погрешностей стабилизации), повышения точности измерения механических величин (угла установки датчиков угловой скорости, жесткости, люфтов, моментов сопротивления повороту каналов наведения стабилизатора и др.) путем использования предложенных новых прецизионных методов и средств.

**Ключевые слова:** приборный комплекс, механическая величина, чувствительный элемент, система стабилизации.

#### ABSTRACT

**Ichenko M.V. Methods and means of improving the precision characteristics of an instrument system for measuring mechanical parameters and stabilization. – Manuscript.**

Thesis for the Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.11.01 - instruments and methods for measuring mechanical quantities. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The research presented in the dissertation allowed to solve a topical and complex scientific and technical problem, which is important - improving the accuracy of the instrument system for measuring mechanical parameters (angle of sensors of angular velocity, stiffness, backlash, torque resistance and other). stabilization in extreme operating conditions (a wide range of external vibration and temperature perturbations).

The following new results were obtained.

1. New methods and means of increasing the accuracy characteristics of the instrument system for measuring mechanical parameters and stabilization have been developed.

The comparative analysis, using mathematical modeling methods, confirmed the feasibility of using solid speed gyrotachometers as angular velocity sensors, due to higher bandwidth and increased frequency of information exchange, which in turn reduces errors and improves the characteristics of stabilizers.

2. Development of mathematical models of the main components and control channels of the instrument stabilization system was carried out, which allowed modeling of separate modes of operation of the stabilizer.

3. The ways of increase of accuracy of digital system of measurement of mechanical parameters and stabilization by: mathematical modeling and experimental working off are defined and confirmed by:

- use of solid gyro tachometers with a bandwidth of at least 100 Hz instead of traditional electromechanical gyro tachometers,

- increasing the frequency of information exchange from 400 Hz to 1000 Hz,

- changes in the model of construction of the stabilizer - replacement of "dependent" stabilization by "independent" stabilization using in the control circuit of the device with a stabilized field of view.

4. Developed and confirmed by the method of mathematical modeling the correctness of the proposed method of eliminating the taps of the vertical and horizontal guidance channels that are in the mode of operation with high accuracy (mode "UPR").

5. The functional model of the digital system of measurement of mechanical parameters and stabilization of the increased accuracy with use of new sensitive elements and the device of supervision over the purpose with the stabilized field of vision is defined. The proposed model of stabilizer construction will increase the accuracy of stabilization and reduce the requirements for measuring the dynamic stabilization error of 2 etc. up to 0.5 etc.

6. Developed methods for measuring mechanical parameters that affect the functioning of the stabilizer:

- electronic exhibition of angular velocity sensors, which takes into account the errors of their exhibition, and eliminates the interaction of the horizontal channel on the vertical channel and vice versa without the use of time-consuming manual operations;

- method of measuring the moments of resistance to rotation, which is performed by measuring the current consumption of the tower and the armament unit and comparing them with the limit values for each of the channels;

- method of measuring the stiffness of vertical and horizontal guidance channels;

- method of measuring the backlash of the drives on the motor control branches.

7. Developed and implemented in production a method of measuring the dynamic stabilization error, which is determined by the results of testing the stabilizer sinusoidal signal  $A = 2.5^\circ \sin \omega t$ , which allows:

- to carry out measurements at the stages of adjustment, bearer and acceptance tests of the instrument stabilization system without performing time-consuming tests in the conditions of the landfill;

- to improve the quality of inspections of one of the main technical parameters of the instrument system - the accuracy of stabilization.

The developed method does not require additional refinement of the material part of the stabilizer and is implemented by changing the software and algorithms.

**Key words:** instrument system, mechanical quantity, sensitive element, stabilization system.