

Розробка та впровадження методики вимірювання динамічної похибки стабілізації стабілізаторів озброєння

О. М. Безвесільна, О. В. Петренко, В. А. Галицький, М. В. Ільченко

У статті наведено варіанти перевірки серединної похибки стабілізатора озброєння 2Е36 в умовах типової траси методом кінофотографування за допомогою кінокамери з подальшою обробкою кіноплівки і виконання всіх операцій в ручному режимі. Наведено методику вимірювання серединної похибки цифрових стабілізаторів озброєння СВУ-500. Для забезпечення можливості визначення похибок стабілізації кожного з комплектів стабілізатора на підприємстві-виробнику і в умовах головного виробу замовника, без застосування типової траси, була розроблена і впроваджена у виробництво нова методика вимірювання динамічної похибки стабілізації. Дана розробка проводилася з застосуванням методів математичного моделювання, що дозволило визначити точку подачі синусоїдального сигналу в контур управління стабілізатора. Для експериментального підтвердження отриманих результатів моделювання були проведені випробування комплекту стабілізатора на технологічному стенді і на реальній навчальній башті, що додатково дозволило уточнити параметри синусоїдального сигналу. Для проведення таких випробувань була розроблена спеціальна програма алгоритмічного забезпечення, яка була встановлена в додаток до основної програми на час проведення випробувань у блок управління стабілізатора. Проведені подальші випробування підтвердили правильність результатів математичного моделювання, що дозволило ввести перевірки одного з основних параметрів стабілізації динамічної помилки стабілізації до складу приймально-здавальних випробувань кожного з комплектів стабілізатора.

Ключові слова: стабілізатор, гіротахометр, вібраційний гіроскоп, серединна похибка стабілізації, динамічна похибка стабілізації

1. Вступ

Основою для практичного визначення похибки стабілізації стабілізаторів легкої броньованої техніки була методика визначення серединної похибки аналогових двохплощинних стабілізаторів 2Е36, яка була розроблена в 80-х роках минулого сторіччя для виробу БМП2. Згідно методики перевірки, похибка стабілізації стабілізатора не повинна була перевищувати ± 1 т. д. (1 тисячна дистанції = 3,6 кут. хв.) [2] у кожній із площин наведення: горизонтальній (ГН) або вертикальній (ВН). За цією методикою перевірка проводилася у складі виробу замовника на типовій трасі [3] при періодичних випробуваннях на 2-х стабілізаторах серійного виготовлення раз на рік.

З початку створення аналогових СВУ-500 та цифрових СВУ-500-3Ц стабілізаторів перевірка похибки стабілізації проводилась за методикою та в строки аналогічні стабілізаторам 2Е36. Інших перевірок точності стабілізації не було.

З іншої сторони, необхідно врахувати, що сучасні мобільні об'єкти рухаються зі значними швидкостями, на них діють відчутні перевантаження та неконтрольовані механічні збурення. Звичайно і вимоги до вимірювання точності, засобів вимірювання, контролю основних технічних параметрів стабілізаторів є особливо актуальними для підвищення обороноздатності держави.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [1] наведені матеріали по вимірюванню серединної похибки стабілізації аналогових стабілізаторів 2Е36 та стабілізаторів, що мають аналогічну схемо-технічну побудову методом кінофотографування. Показано, що процес вимірювання серединної похибки стабілізації за методикою кінофотографування проводиться тільки у складі основного виробу [2], в умовах типової траси. Дана методика обробки результатів доволі трудомістка, рутинна та займає багато часу на обчислення похибки в ручному режимі.

Зрозуміло, що методика кінофотографування на час її розробки, а це середина 80-х років минулого сторіччя, була прогресивна та проводилась за допомогою кінокамери, що закріплювалась на блоку озброєння. Кінокамера фіксувала переміщення марки прицілу по каналах горизонтального та вертикального наведення при русі виробу по типовій трасі.

До недоліків цієї методики можна віднести те, що випробування проводились лише на двох комплектах стабілізатора раз у рік під час проведення типових випробувань. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, що пов'язані з трудомісткістю випробувань. Для зменшення трудомісткості, як варіант вимірювання серединної похибки, було припустимо застосування приладу вимірювання серединної похибки стабілізації (Прилад ПС) з комплекту стабілізатора 2Е26М [3]. Прилад ПС – це електронний вимірювальний пристрій, що призначений для визначення величини серединної похибки та проценту часу нестабілізованого стану виробу стабілізатора 2Е26М у площинах ВН і ГН.

Застосування цього приладу значно полегшило вимірювання серединної похибки.

Подолання труднощів вимірювання похибки стабілізації знайшло свою реалізацію у стабілізаторі 2Е52 [4], що був розроблений з новими технічними характеристиками. В технічній документації на стабілізатор 2Е52 були встановлені вимоги до перевірки серединної та динамічної похибки [5] (у складі головного виробу) стабілізації, яка не повинна перевищувати 2 т.д. (за даними 1988 року) при відпрацюванні синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$.

Необхідно зауважити, що стабілізатори 2Е36 та 2Е52 мають різні схемо-технічні принципи побудови. Стабілізатор 2Е36 побудовано на принципі «силової» стабілізації, що передбачає:

– по-перше, оптичні прилади візування цілі «жорстко» [6] зв'язані з блоком озброєння,

– по-друге, наведення блоку озброєння та башти виконується безпосередньо за допомогою пультів стабілізатора оператора чи командира. При такому принципі побудови, наведення з пультів оператора (командира) башти або блоку озброєння, які мають великі маси та моменти інерції, призводить до суттєвих похибок.

У стабілізаторі 2Е52 [6] блок озброєння та прилад візування цілі виконані за принципом «незалежної» стабілізації, а саме, блок озброєння не має жорсткого зв'язку з приладом візування цілі.

Недоліками методики перевірки динамічної похибки у стабілізаторах 2Е36 та 2Е52 є те, що випробування проводяться на технологічних баштах, що є дуже витратним.

Огляд технічної літератури [7] підтверджує висновки, що структура та необхідні параметри стабілізатора визначаються в кінцевому підсумку заданою точністю роботи. При цьому, критерії оцінки можуть бути різними, але у вимогах щодо точності головна увага приділяється максимальній похибці стабілізації [8]. У більшості випадків визначальним є значення кута стабілізації: максимальне, середнє або середнє квадратичне.

Таким чином, різні загально-доступні видання [1–10] дають тільки поверхневе уявлення про факти контролю динамічної похибки стабілізації лише у стабілізаторах, що побудовані за принципом «незалежної» стабілізації.

До не вирішених питань можна віднести, по-перше, неможливість перевірки динамічної похибки стабілізації на стабілізаторах, що побудовані за принципом «жорсткої» стабілізації, по-друге, відсутність визначення технічних вимог та методики вимірювання динамічної похибки.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка та впровадження методики вимірювання динамічної похибки стабілізації стабілізаторів – одного з основних технічних параметрів. Дане вимірювання буде проводитись на етапі виготовлення стабілізаторів на підприємстві, що займається їх виготовленням та в головному виробі замовника без застосування випробувань у польових умовах.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити точку подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора;
- визначити значення основних параметрів синусоїдального сигналу $A=2,5^{\circ}\sin\omega t$ щодо механічних характеристик стенду СТМ02 та комплексу УК675 (технологічна учбова башта БМП2 на підставці);
- визначити методику подачі сигналу $A=2,5^{\circ}\sin\omega t$ у складі технологічного стенду СТМ02 та комплексу УК675;
- визначити достатність обчислювальних можливостей блоку керування та пульта керування без введення до робочого місця перевірки персонального комп'ютера.

4. Основна частина методики визначення динамічної похибки стабілізації

Для застосування технічних вимог по визначенню динамічної похибки стабілізації у цифрових стабілізаторах СВУ-500 необхідно було розробити технічні вимоги та методику оцінки вказаної похибки стабілізації.

Для виконання цього завдання були проведені аналітичні та експериментальні дослідження щодо визначення:

- 1) місця подачі синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ до стабілізатора;
- 2) параметрів синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ стосовно механічних характеристик стенду СТМ02 (рис. 1, а) та технологічної башти УК675 (рис. 1, б);

Рисунок не повинен разривать список

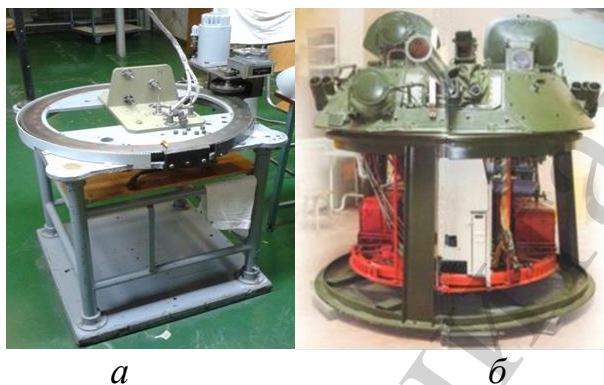


Рис. 1. Обладнання для проведення випробувань: а – стенд СТМ02; б – технологічна башта УК675

- 3) методики подачі сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ у складі технологічного стенду СТМ02 та комплексу УК675;

- 4) методики обчислення динамічної похибки стабілізації;

- 5) достатніх обчислювальних потужностей блоку управління або пульта управління без введення до робочого місця перевірки персонального комп'ютера.

4. 1. Визначення точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора

Основним завданням дослідження було досягнення наступних вимог: по-перше, точка подачі сигналу обирається таким чином, щоб дія цього сигналу поширювалась на всі складові контуру управління стабілізатора. По-друге, сигнал в точці контролю, який містить інформацію про динамічну похибку стабілізації, не повинен впливати на дію синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$, що задається. По-третє, динамічна похибка стабілізації повинна мати мінімальне значення в точці контролю.

Визначено три точки подачі синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ до контурів управління стабілізатором та досліджено за допомогою математичного моделювання [11, 12] величину динамічної похибки стабілізації в кожній з визначених точок:

Точка 1: подача синусоїдального сигналу в блок управління в точку «збивки» (після інтегратора) і визначення суми поточного значення амплітуди вихо-

ду інтегратора, та синусоїдального сигналу що задається, з урахуванням фазового запізнювання.

Точка 2: подача синусоїдального сигналу в блок управління в точку «збивки» (після інтегратора) і визначення різниці максимальних значень амплітуд сигналу після інтегратора, та сигналу, що задається.

Точка 3: подача синусоїдального сигналу в блок управління в точку після оцифровки виходу датчика кутової швидкості з наступним інтегруванням сумарного сигналу виходу ДКШ та сигналу, що задається для одержання похибки в значеннях кута відхилення блоку озброєння.

Математичне моделювання проводилось на цифрових стабілізаторах СВУ-500 з використанням електромеханічних гіротахometrів (СВУ-500-4Ц) та сучасних Коріолісових вібраційних гіроскопах [13–16] СВУ-500-7Ц. За результатами робіт визначено, що найбільш близьке значення динамічної похибки до заявленої у технічній документації на 2Е52 (≤ 2 т. д.) буде у випадку її визначення при подачі синусоїдального сигналу в точку після виходу датчика кутової швидкості.

В ході дослідження отримані наступні результати:

1) Значення динамічної похибки в точці «збивки» з урахуванням фазового запізнювання (точка 1) завжди перевищували 2 т. д;

2) Найменше значення динамічної похибки (0,015 т. д.) отримано при визначенні її за різницями амплітуд сигналів у точці «збивки» (точка 2) при частоті обчислення блоку управління 400Гц для ГТ46 при використанні в якості моделі коливальної ланки 20Гц $\zeta=0,3$. Ця ланка вносить запізнення до управління. Саме в цьому випадку похибка становила мінімальне значення, а отже, математична модель с ГТ46 є механічно послаблюючою ланкою, яка знижує діючі механічні збурення, тобто діє, як амортизатор.

Для математичної моделі КВГ значення динамічної похибки (точка 2) на частоті обчислення 1000 Гц дорівнює 1 т.д.

3) Значення динамічної похибки при подачі сигналу в блок управління в точку після оцифровки виходу датчика кутової швидкості ГТ46 та частоті обчислення 400 Гц блоку управління дорівнює 1,15 т.д. (точка 3).

Для математичної моделі КВГ значення динамічної похибки стабілізації становило 1,5 т.д. при частоті обчислення 1000 Гц та 1.15 т.д при частоті обчислення 400 Гц.

Таким чином, за результатами робіт визначено, що найменше значення динамічної похибки (0,015 т.д.) до заявленої у технічній документації на 2Е52 (≤ 2 т. д.) було досягнуто при подачі синусоїдального сигналу в точку після виходу датчика кутової швидкості (точка 2).

4. 2. Визначення значень основних параметрів синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ щодо механічних характеристик стенду СТМ02 та комплексу УК675

За результатами моделювання були проведені експериментальні роботи по відпрацюванню визначення динамічної похибки стабілізаторів СВУ500-4Ц у складі технологічного стенду СТМ02 та технологічної башти УК675.

Динамічна похибка стабілізаторів озброєння φ_{max} визначалась як максимальне значення функції, отриманої інтеграцією значень сталої, під дією збурення та сумарної кутової швидкості (похибки відпрацювання збурюючої кутової швидкості) руху платформи стенду СТМ02 або блоку озброєнь виробу УК 675 (ω_{Σ}).

4. 3. 1. Задання збурюючої кутової швидкості ω_3

1. Для задання збурюючої кутової швидкості ω_3 досліджено два варіанта виконання: варіант розробки нового програмного алгоритмічного забезпечення (ПАЗ) СВУ-500-4Ц та варіант доробки діючого (ПАЗ). Прийнято варіант доробки діючого ПАЗ введенням до нього додаткової технологічної програми.

В ході експерименту було розроблено та встановлено у блок управління БУ1022-04 та пульт управління ПУ03-05 технологічну програму алгоритмічного забезпечення ПА351 в додаток до основної програми. Ця програма дозволяла проводити дослідження у ручному режимі на час визначення динамічної похибки вертикального ДВН або горизонтального ДГН каналів. При цьому формувалась на виході ланки 4 ВН (ГН) (перша ланка після аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) у тракті проходження сигналів ГТ46) формувалась функція $U_{\omega_3} = U_{MBH(ГН)} \cos \omega t$, під дією якої проходили коливання УК675 або платформи СТМ02 частотою 0,8 Гц, амплітудою $2,5^\circ$ за 3,75 с (3 періоди).

При проведенні випробувань досліджено вплив окремих складових функції $U_{\omega_3} = U_{MBH(ГН)} \cos \omega t$.

Для визначення параметрів кутової швидкості (ω) було розглянуто три варіанти: $\omega = 5,02 \cdot \frac{1}{c}$; $\omega = 12,55 \cdot \frac{1}{c}$; $\omega = 25,1 \cdot \frac{1}{c}$, що були досліджені по кожній швидкості окремо. За результатами проведених робіт обрано значення кутової швидкості $\omega = 5,02 \times \frac{1}{c}$.

Час дії (t) кутової швидкості збурення визначено виходячи з частоти коливань 0,8 Гц. При цьому кількість періодів коливань повинно дорівнювати трьом та на час їх дії самовідведення блоку озброєння і башт повинно бути мінімальним, тобто таким, що не впливає на динамічну похибку стабілізації.

Значення U_M підбиралось експериментально по переміщенню променю лазера в межах мішені та складали: для УК 675 – $U_{MBH}=1,39$ В, $U_{MГН}=1,46$ В; для СТМ 02 – $U_{MГН}=1,5$ В $U_{MBH}=1,5$ В, $U_{MГН}=1,7$ В.

На рис. 2 наведено схему робочого місця для перевірки динамічної похибки стабілізатора СВУ-500-4Ц.

В ході випробувань коливання башти УК675 або платформи СТМ02 проходили під дією функції $U_M \cos 5,02t$ з частотою 0,8 Гц, амплітудою $2,5^\circ$ за 3,75 с (3 періоди).

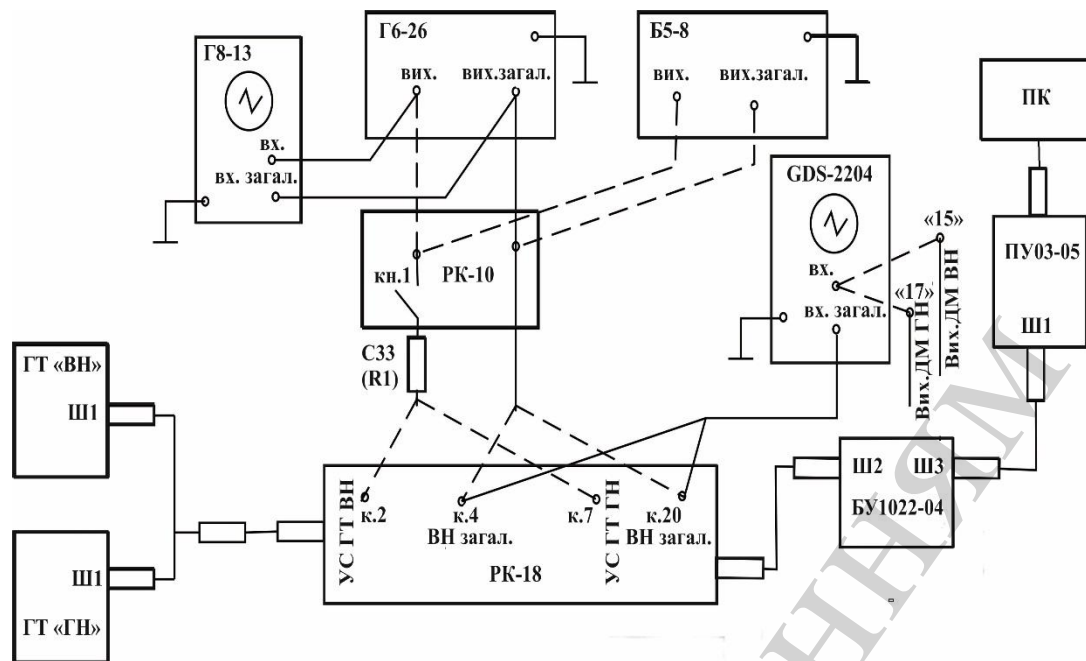


Рис. 2. Схема робочого місця для перевірки динамічної похибки стабілізатора СВУ-500-4Ц: С8-13 – осцилограф; Г6-26 – генератор сигналів; Б5-8 – блок живлення; РК-10 – технологічна коробка; GDS-2204 – осцилограф; ГТ-ВН, ГТ-ГН – датчики кутової швидкості (ДКШ); РК-18 – розподільча коробка; БУ1022-04 – блок управління стабілізатора; ПУ03-05 – пульт управління стабілізатора; ПК – персональний комп'ютер

2. Експериментально розглянуто два варіанти фіксації сигналів сумарної швидкості ω_{Σ} :

– варіант накопичення масиву значень на виходах демодуляторів відповідних каналів після АЦП (вхід ланки 4) блоку керування з подальшим переносом інформації на персональний комп'ютер після зупинки обертання стенду або башти;

– другий варіант (визначений, як найбільш спрощений та раціональний) - фіксація та передача накопиченого масиву значень на виходах демодуляторів відповідних каналів після АЦП (вхід ланки 4) на персональний комп'ютер, що підключений до ПУ03-05, та побудова на комп'ютері графіків функцій $U_{\omega_{\Sigma}}$ та

$$\int_{t=0}^{t=3,75c} U_{\omega_{\Sigma}} dt \text{ без зупинки обертання стенду або башти}$$

Ланки проходження сигналу від датчиків кутової швидкості ГТ-ВН та ГТ-ГН, розподільчу коробку РК18, блок управління БУ1022-04, пульт управління ПУ03-05 до персонального комп'ютера ПК можна відстежити на рис.2.

3. В ході експерименту розрахунок динамічних похибок φ_{max} виконувався відповідно до визначення в п.4.3:

$$\int_{t=0}^{t=3,75c} U_{\omega_{\Sigma BH(ГН)}} dt = \int_{t=0}^{t=3,75c} K_{\omega} n \omega_{\Sigma BH(ГН)} dt = K_{\omega} \varphi(t), \quad (1)$$

де φ – кут відхилення осі, що досліджується, від заданого напрямку; K_{ω} – крутість характеристики тракту проходження сигналів ДКШ.

Обчислення динамічної похибки здійснювалось з урахуванням максимального значення, яке дорівнює $K_{\omega BH(\Gamma H)} \cdot \varphi(t)_{\max BH(\Gamma H)}$ з графіку функції

$\int_{t=0}^{t=3,75c} U_{\omega \Sigma BH(\Gamma H)} dt$ за формулою:

$$\varphi_{\max BH(\Gamma H)} = \frac{\varphi(t)_{BH(\Gamma H)}}{K_{\omega BH(\Gamma H)}} \times \frac{60}{3,6} [\text{Т.Д.}] \quad (2)$$

До формули додатково введено коефіцієнт $\frac{60}{3,6}$, що дозволило отримати значення похибки стабілізації у розмірності т.д.

4. Дослідженням встановлено, що для визначення значення крутості K_{ω} у складі стабілізатора СВУ-500-4Ц (рис. 1) необхідно було подавати від джерела постійної напруги С8-13 на к. 2 відносно к. 4 (к.7 відносно к. 20) коробки РК18 (рис. 2) стрибок постійної напруги рівнем $U_{MB(\Gamma H)}$ та фіксувати час $t_{PBH(\Gamma H)}$ повороту на кут $\alpha_{BH(\Gamma H)}: \alpha_{BH}$ (від нижнього до верхнього упорів); $\alpha_{\Gamma H}$ (відлік по азимутальному приладу УК675).

Під час експерименту було додатково доопрацьовано програму ПА3 351 в частині видачі програмного кидка напруги рівнем $U_{MB(\Gamma H)}$ на час 3,75с та фіксації кута повороту платформи стенду СТМ02 або башти УК675. При цьому, програма ПА3 проводила обчислення крутості за формулою (3).

$$K_{\omega BH(\Gamma H)} = \frac{U_{MB(\Gamma H)}}{\omega_{BH(\Gamma H)}}, \quad (3)$$

де

$$\omega_{BH(\Gamma H)} = \frac{\alpha_{BH(\Gamma H)}}{t_{PBH(\Gamma H)}}.$$

Результати експериментального відпрацювання динамічної похибки стабілізатора наведені в табл. 1.

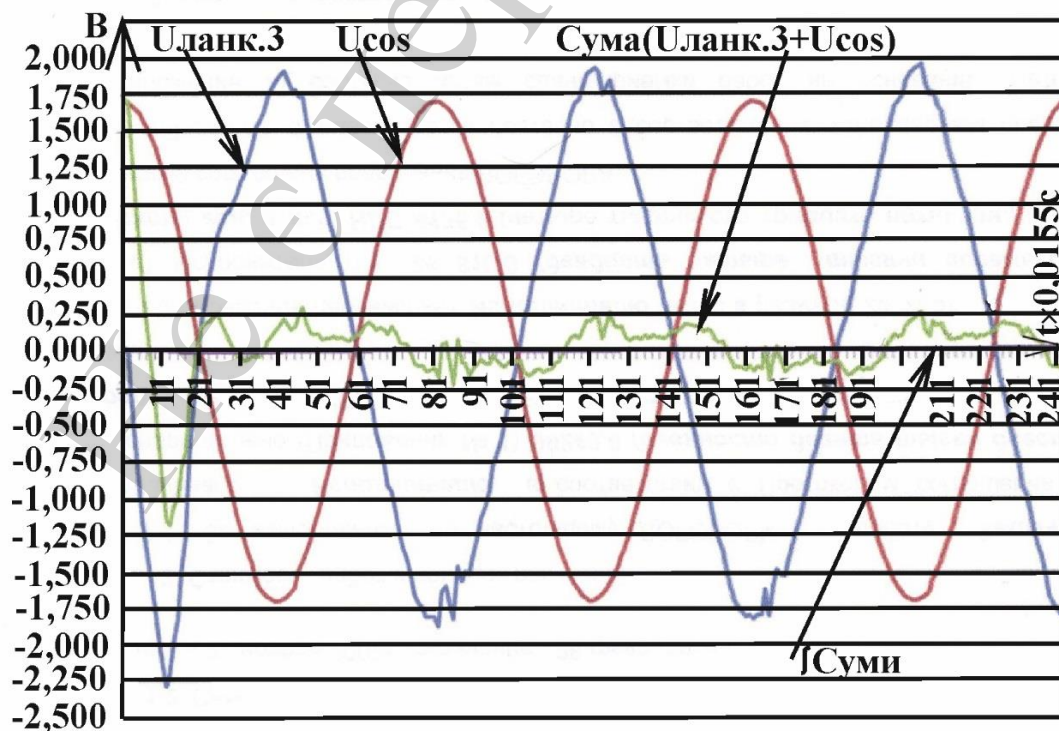
Дослідженням встановлено, що визначення крутості вихідної характеристики датчиків кутової швидкості необхідно для більш точного розрахунку динамічної похибки стабілізації та повинно буде проводитись на кожному із комплектів стабілізатора тому, що крутість кожного конкретного датчика кутової швидкості може змінюватись у заданих межах.

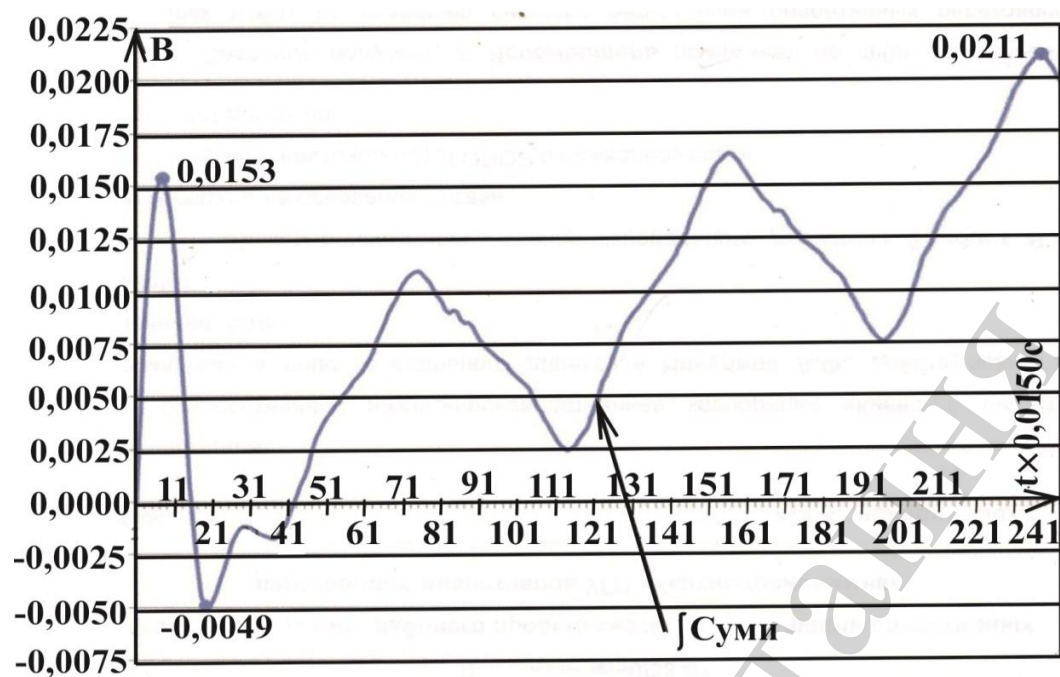
Таблиця 1

Зведена таблиця результатів експериментальних випробувань динамічної похибки стабілізації

Виріб	Рівень стрибка U_M , В	Час виміру t_p , с	Кут повороту α , град	$\Omega = \frac{\alpha}{t_p}$, °/с	$K_\omega = \frac{U_M}{\omega}$, Вс/°	Макс. значення інтеграла $\varphi_{\max}$, Вс	Динамічна по-милка $\frac{\varphi_{\max} \cdot 60}{K_\omega \cdot 3,6}$, т.д.	№ рис.
Канал ВН								
СВУ-500-4Ц на СТМ02	1,5	3,75	41,6	11,09	0,134	0,0157	1,95	4, а 4, б
СВУ-500-4Ц (УК675)	1,39	8,06	80	9,92	0,14	0,0076	0,93	6, а 6, б
Канал ГН								
СВУ-500-4Ц на СТМ 02	1,7	3,75	43,9	11,7	0,145	0,021	2,4	3, а 3, б
СВУ-500-4Ц на УК675	1,46	6,59	60	9,1	0,160	0,0185	1,93	5, а 5, б

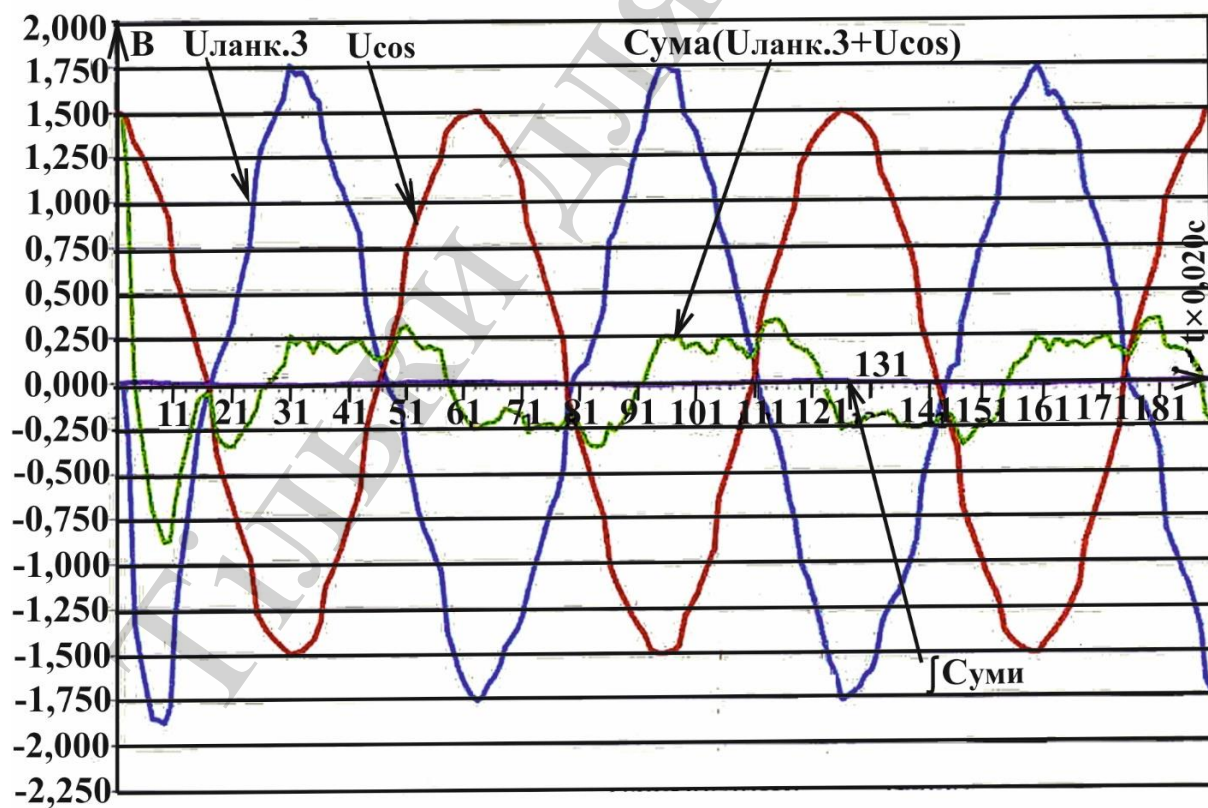
Результати досліджень по відпрацюванню динамічної похибки стабілізації наведені у табл. 1 та на рис. 3–6.



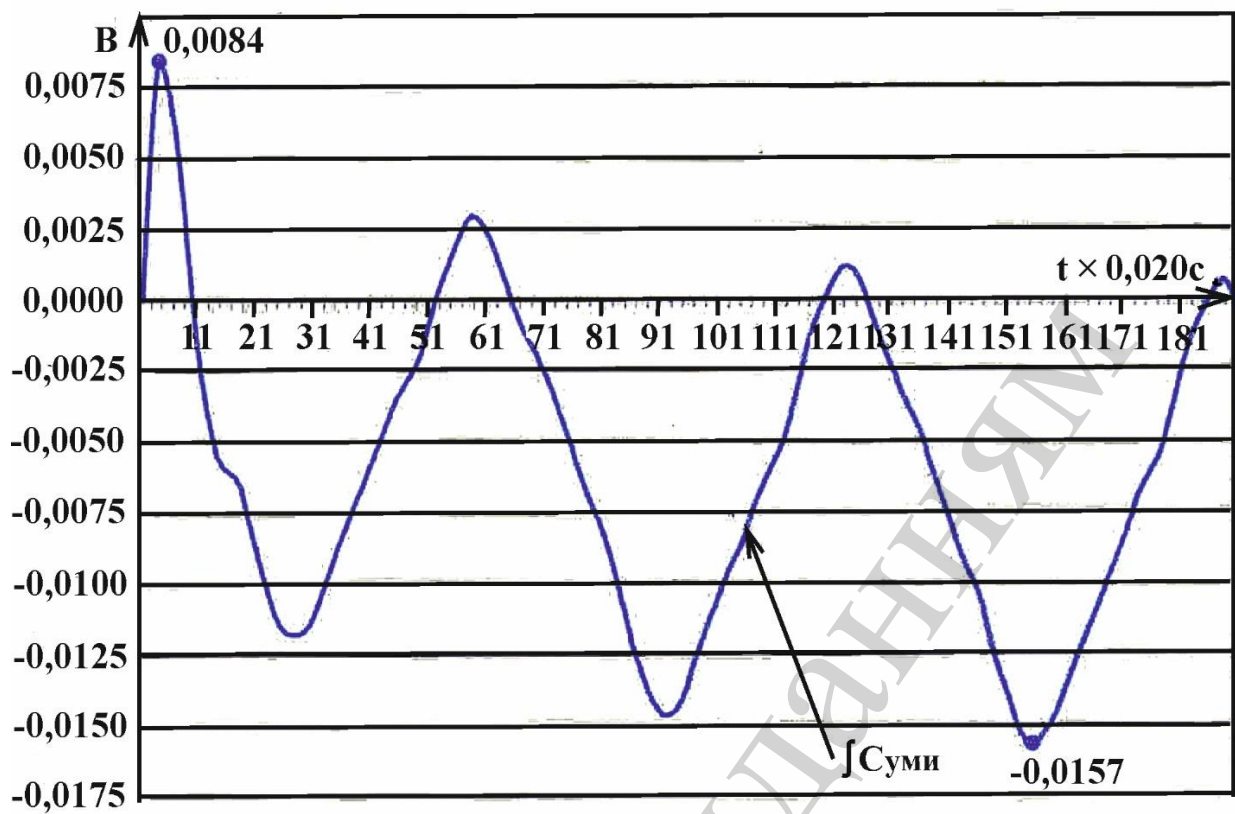


б

Рис. 3. СВУ-500-4Ц на STM02 Канал ГН: а – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б – збільшений графік кривої $\int \text{Суми}$

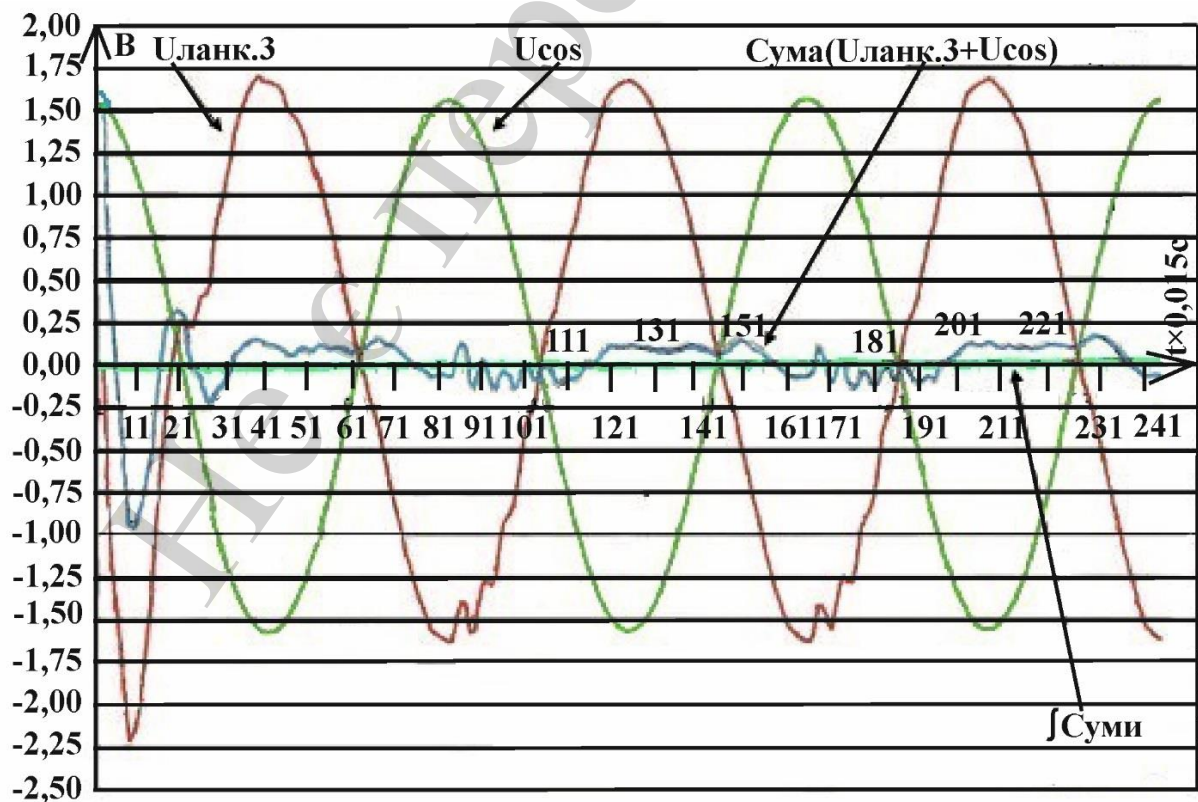


а

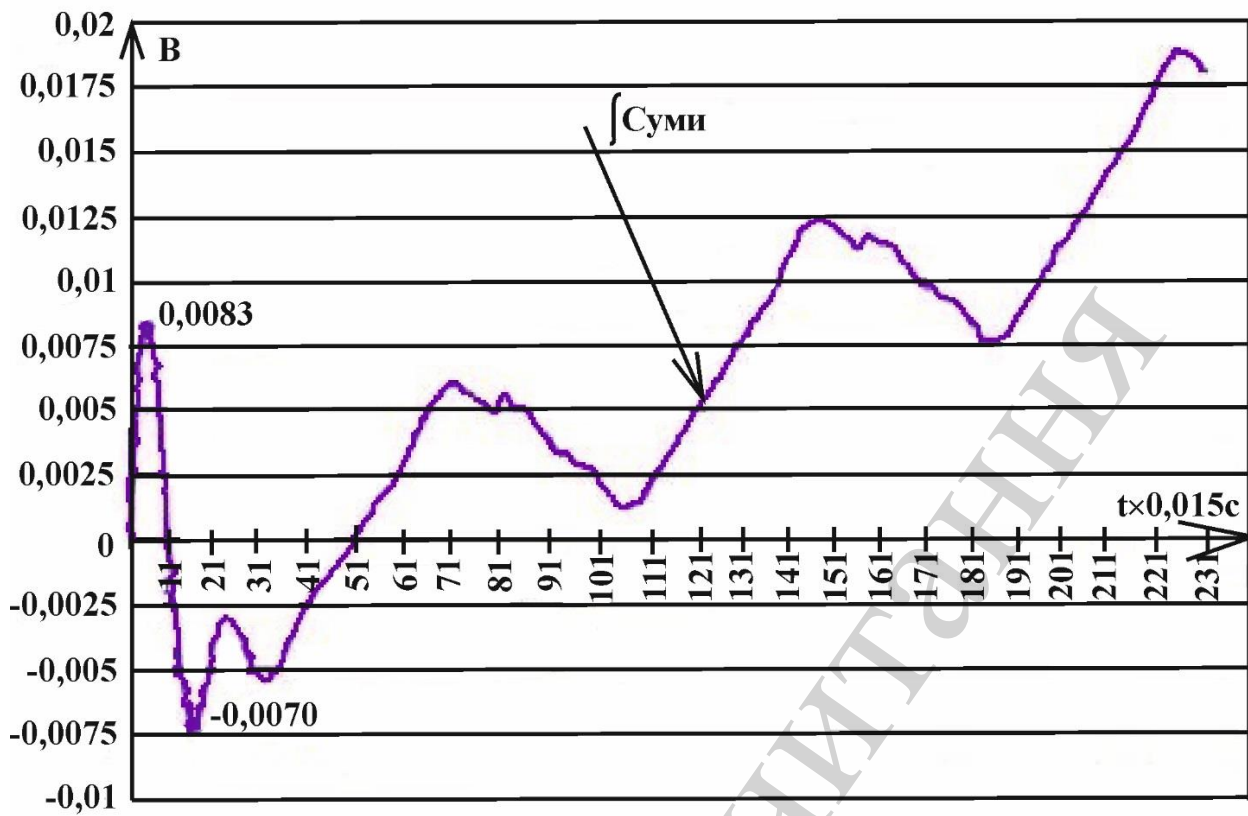


б

Рис. 4. СВУ-500-4Ц на СТМ02 канал ВН : а – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б – збільшений графік сигналу $\int \text{Суми}$

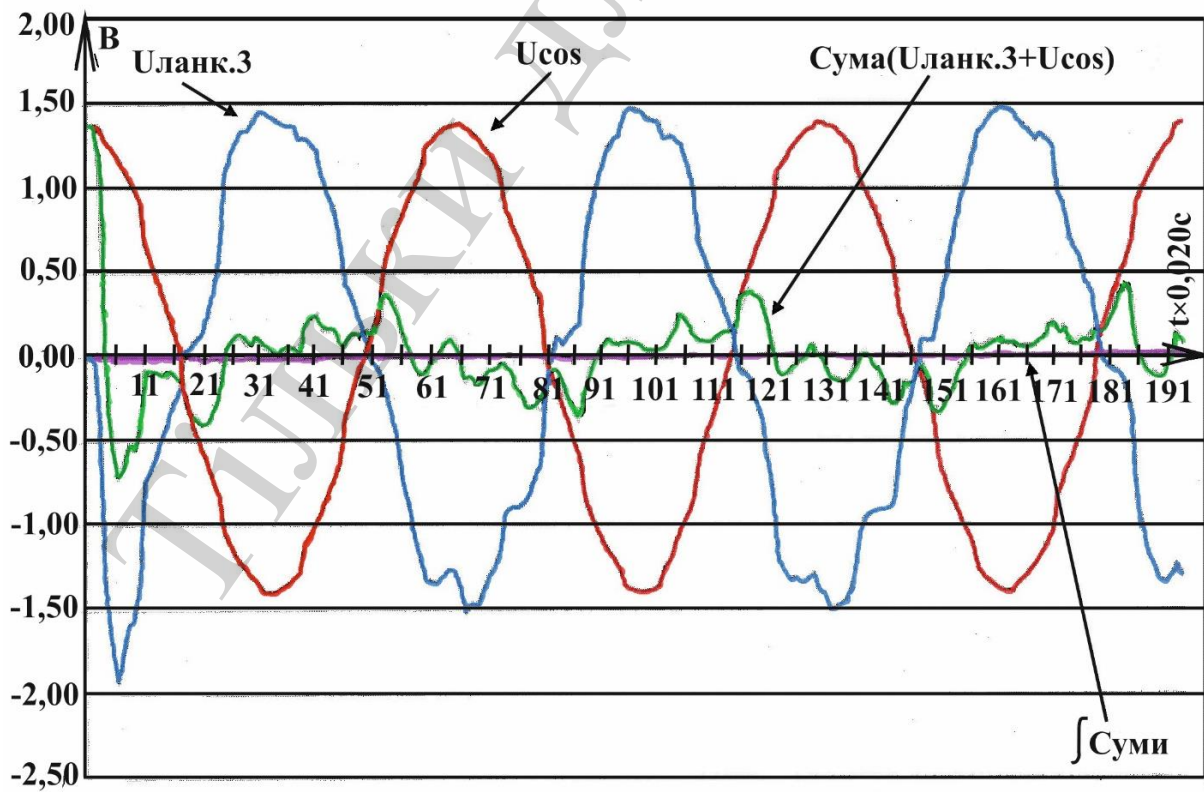


а

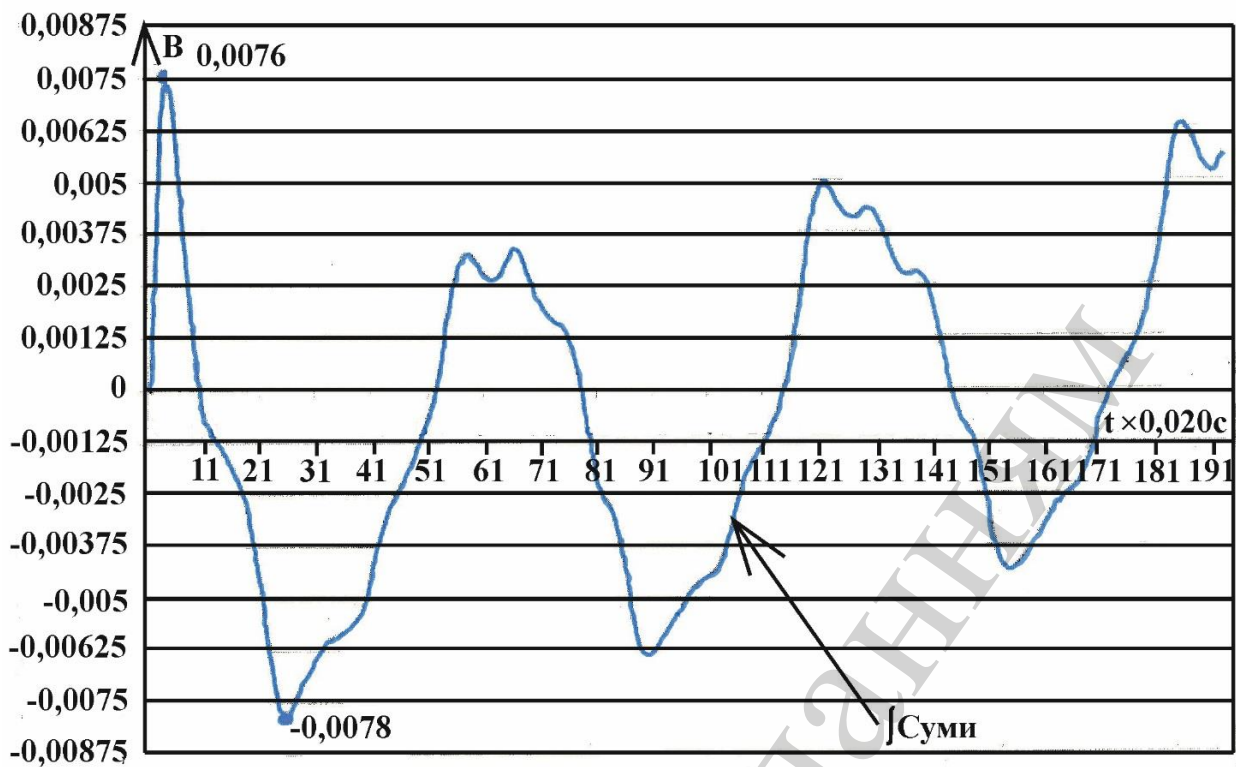


б

Рис. 5. СВУ-500-4Ц на УК675 канал ГН: а – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б – збільшений графік сигналу $\int \text{Суми}$



а



б

Рис. 6. СВУ-500-4Ц на УК675 канал ВН : а – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б – збільшений графік сигналу $\int \text{Суми}$

Таким чином, результати досліджень, що представлені на графіках (рис. 3–6) наочно демонструють, зміну у часі основних сигналів стабілізатора $U_{\text{ЛАНК.3}}, U_{\text{cos}}, \text{Сума}(U_{\text{ЛАНК.3}} + U_{\text{cos}}), \int \text{Суми}$, по обчисленню яких вираховувалась динамічна похибка стабілізації. Для більшої наочності графік $\int \text{суми}$ наведено у збільшеному масштабі.

5. Обговорення результатів дослідження щодо визначення методики вимірювання динамічної похибки стабілізації

Розроблено методику вимірювання динамічної похибки стабілізації для стабілізаторів озброєння СВУ-500, що побудовані на принципі «жорсткої» стабілізації на відміну від стабілізаторів з «незалежною» стабілізацією 2Е52. Для вирішення цієї задачі за основу для виконання робіт було взято вимоги до стабілізатора 2Е52 в частині виду синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ та технічних вимог щодо значення динамічної похибки стабілізації (≤ 2 т.д.).

Для розробки методики проведено аналітичні, дослідницькі та експериментальні роботи, а також роботи з математичного моделювання і розробки додаткового програмного забезпечення.

При розробці власної методики визначення динамічної похибки стабілізації були вирішені задачі по:

- визначенню точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатором;
- визначенню значень основних параметрів синусоїдального сигналу щодо механічних характеристик стенду СТМ02 та комплексу УК675;
- заданню збурюючої кутової швидкості ω_z та фіксація сигналів сумарної швидкості ω_Σ ;
- визначенню крутості K_ω датчиків кутової швидкості на апаратурі для проведення випробувань;
- визначенню розрахунку динамічної похибки.

Отриманні результати щодо розробки та впровадження методики вимірювання динамічної похибки стабілізаторів озброєння СВУ-500, свідчать (табл. 1, рис. 3–6) про те, що досліджена та запропонована методика дозволяє проводити вимірювання динамічної похибки стабілізаторів у межах (≤ 2 т. д.).

За позитивними результатами досліджень, що отримані під час розробки та вимірювання динамічної похибки стабілізаторів, методику впроваджено до технологічного процесу виготовлення стабілізаторів. В свою чергу, це дозволяє стверджувати, що мету роботи досягнуто.

Таким чином, в ході дослідження було встановлено, що для визначення точки подачі синусоїдального сигналу до контуру управління стабілізатора ефективним виявилось застосування математичного моделювання. Точка подачі сигналу обрана відповідно до мінімального значення динамічної похибки (0,015 т. д.) (точка 2).

Відмінною особливістю розробки було створення підпрограми ПА351 в додаток до основної програми математичного забезпечення. Данна програма на час досліджень працювала у ручному режимі, що значно спростило виконання експериментальних робіт та дало можливість визначати та корегувати окремі коефіцієнти функції $U_M \cos 5,02t$.

Запропонована методика вимірювання динамічної похибки стабілізації стабілізаторів має такі властивості, що вона може бути в подальшому використана для інших стабілізаторів озброєння з різними механічними параметрами бойових модулів. При цьому, адаптацію її необхідно буде проводити корегуванням окремих коефіцієнтів, що наведені у функції $U_M \cos 5,02t$ та формулах (1)–(3).

Завдяки цьому, дану методику слід вважати перспективною.

Зазначаємо, що ця методика була відпрацьована на технологічному стенді СТМ02 та на комплексі УК675, який за своїми механічними характеристиками має невеликі відмінності від інших бойових модулів.

Обмеження розробленої методики вимірювання динамічної похибки визначаються у тому, що дана методика розроблена для варіанта «жорсткого» принципу стабілізації і зменшити похибку до значення $\varphi_{max} \leq (0,5)$ т.д. не має резерву. Для підвищення точності стабілізації та зменшення значень динамічної похибки стабілізації до значень $\varphi_{max} \leq (0,5)$ т.д., необхідно застосування у контурах управління стабілізатором варіанта «незалежної» стабілізації. Інших обмежень щодо впровадження даної методики в частині умов її застосування не має.

Розвиток даного дослідження полягає у подальшому застосуванні його в апаратурі замовника, яка має реальні механічні навантаження.

6. Висновки

1. Запропонований метод пошуку точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатору за допомогою математичного моделювання дозволив вирішити поставлене завдання. Отримані результати повністю погоджуються з результатами вимог до вимірювання динамічної похибки (≤ 2 т.д.) стабілізатора 2Е52. Показано, що серед трьох розглянутих точок подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатору визначено точку з найменшим значенням похибки стабілізації (0,015 т. д.). Це точка, де динамічна похибка визначалась за різницею амплітуд сигналів після інтегратора та сигналу, що задається у точці «збивки» (точка 2).

2. Застосування методики експериментального відпрацювання є ефективним для визначення значень основних параметрів синусоїдального сигналу щодо механічних характеристик стенду СТМ02 та учбового комплексу УК675. Відмінною особливістю цієї методики є те, що відпрацювання проводиться на обладнанні, яке за своїми механічними характеристиками імітує механічні навантаження реальної башти. При цьому частота подачі сигналу залишилась незмінною та прийнята 0,8 Гц, що відповідає вимогам стабілізатора 2Е52. Характерно, що значення інших коефіцієнтів функції $U_M \cos 5,02t$ було визначено, виходячи з механічних параметрів башти (U_M), а інших – виходячи з відсутності впливу самовідводу башти (t, ω).

3. Запропонована методика подачі сигналів до контурів управління стабілізатором та послідовність її виконання: задання збурюючої кутової швидкості ω_z , фіксація сигналів сумарної швидкості ω_Σ , визначення значення крутості K_ω , розрахунок динамічних похибок була розроблена та запрограмована до блоку управління та пульта управління стабілізатором.

Відмінною особливістю даної методики подачі сигналу у складі технологічного стенду СТМ02 та комплексу УК675 є те, що вона була запрограмована у вигляді додатку ПА351 до основної програми математичного забезпечення стабілізатора. Програма ПА351 включила в себе всі намічені етапи виконання робіт. Характерно, що програма на час досліджень працювала у ручному режимі, що значно спростило виконання експериментальних робіт та дала можливість корегування окремих коефіцієнтів.

4. Застосування для проведення досліджень додаткової програми алгоритмічного забезпечення ПА351 зайняло 0,2 кб обсягу пам'яті обчислювача блоку управління. В той час, коли основна програма займає 4 кб пам'яті при загальному обсягу пам'яті обчислювача 8 кб.

Особливо важливо зазначити, що немає необхідності використовувати додатково комп'ютер на робочому місці перевірки стабілізатора.

Література

1. Боевая машина пехоты БМП-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1 (1988). Москва: Военное издательство, 250.
2. Кудрявцев, А. М., Уласевич, О. К., Жеглов, В. Н., Гумилев, В. Ю. (2013). Стабилизаторы вооружения 2Э36: устройство и обслуживание. Рязань, 145. URL: <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYAVTSEV-GUMELEV-SV-2E36.pdf>
3. Стабилизатор 2Э26М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Альбом рисунков (1985). Москва: Воениздат, 84.
4. БМП-3. Техническое описание боевой машины пехоты (1988). Москва: Воениздат, 55. URL: https://eknigi.org/voennaja_istorija/181170-bmp-3-tehnicheskoe-opisanie-boevoy-mashiny-pehoty.html
5. Березин, С. М., Конончук, В. П., Луньков, А. П., Никонов, А. И. (1991). Комплекс вооружения БМП-3. Вестник бронетанковой техники, 5.
6. Степанченко, И. В., Сальников, С. С., Матвеев, И. А., Богданова, Л. А., Власов, Е. В., Ширяев, Г. С., Попов, В. В. (2009). Пат. № RU2360208C2. Комплекс вооружения боевой машины и стабилизатор вооружения. № 2007124064/02; заявл. 10.01.2009; опубл. 27.06.2009, Бюл. № 18. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/50/95/ed/33b95b367d15c7/RU2360208C2.pdf>
7. Лепешинский, И. Ю., Варлаков, П. М., Захаров, Д. Н., Чикирев, О. И. (2010). Автоматические системы управления вооружением. Омск, 200.
8. Безвесільна, О. М., Цірук, В. Г., Квасніков, В. П., Чепюк, Л. О. (2014). Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації. Вісник інженерної академії України, 2, 155–159.
9. Бесекерский, В. А., Попов, Е. П. (2003). Теория систем автоматического управления. Санкт-Петербург, 752.
10. Орнатский, П. П. (1983). Теоретические основы информационно-измерительной техники. Киев, 455.
11. Simulation and Model-Based Design. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
12. Васильев, В. В., Симак, Л. А., Рыбникова, А. М. (2008). Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK. Киев: Национальный авиационный университет, 91.
13. Liu, J., Shen, Q., Qin, W. (2015). Signal Processing Technique for Combining Numerous MEMS Gyroscopes Based on Dynamic Conditional Correlation. Micromachines, 6 (6), 684–698. doi: <https://doi.org/10.3390/mi6060684>
14. Ting, T. O., Man, K. L., Lei, C.-U., Lu, C. (2014). State-of-Charge for Battery Management System via Kalman Filter. Engineering Letters, 22 (2), 75–82.
15. Ji, X. (2015). Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/120954>
16. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros (2004). doi: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2004.95744>