УДК 621.317

DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771412021269258

О. М. Безвесільна[1], *д.т.н., професор*, **Киричук Ю.В.**[2], *д.т.н., доцент*,
С. С. Котляр[3], *к.т.н., асистент*, **М. В. Ільченко**[4], *к.т.н.*,
В. А. Галицький[5], *к.т.н.*

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОХИБОК СТАБІЛІЗАЦІЇ

Ua

У даній статті проведено аналітичний огляд літератури щодо методів вимірювання похибки стабілізації та обґрунтовано актуальність подальших досліджень і розробок у галузі шляхів підвищення точності вимірювань похибки стабілізації СС.

Сьогодні метод визначення срединної похибки СС значно змінився і має ряд переваг порівняно з відомим методом: потребує значно менше часу та використання ручної праці; має цифрову форму обробки інформації у числовому та графічному вигляді; не потребує необхідності встановлювати кінокамеру (її замінив оптико-електронний модуль, інформація з якого надходить на вхід відеомонітора, до якого приєднується через пристрій погодження *Pinnacle Movie Box Plus USB*, за допомогою якого відео зображення передається для запису на ноутбук). Після виконання випробувань інформація за спеціально розробленою програмою автоматично бробляється на комп'ютері, який за підсумками обчислення видає більш точне (порівняно із відомим методом) значення срединної похибки стабілізації по каналам горизонтального

[1] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[3] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[4] *ПАТ «НВО «Київський завод автоматики»*
[5] *ПАТ «НВО «Київський завод автоматики»*

та вертикального наведення.

En

In this article, an analytical review of the literature on methods for measuring the stabilization error of stabilization systems (SS) is carried out. The relevance of further research and development in the field of ways to improve the accuracy of measurements of the stabilization error of the SS is substantiated.

The modern method for determining the median error of the SS has distinctive features and has a number of advantages: it requires much less time and the use of manual labor; performed in digital form of information processing in numerical and graphical form; does not require the need to install a movie camera (it was replaced by an optoelectronic module, information from which is fed to the input of a video monitor, to which it is connected via the Pinnacle Movie Box Plus USB matching device, through which the video image is transmitted for recording to a laptop). After performing the research, information according to a specially developed program is automatically processed on a computer, which, based on the results of calculations, gives a more accurate (compared to the new method) value of the median stabilization error along the horizontal and vertical guidance channels.

The model of construction of the line of domestic SS corresponds to the principle of "dependent stabilization" rigid connection of vertical and horizontal channels of the stabilizer with the device of supervision over objects.

Вступ

Сучасний стан вітчизняного виробництва автоматизованих приладових систем стабілізації (СС) характеризується значним підвищенням вимог до точності вимірювань механічних параметрів СС (зокрема, срединної похибки стабілізації) при експлуатації у складних умовах. Забезпечення підвищення точності вимірювань похибки стабілізації СС сприяє удосконаленню СС легкої броньованої техніки (ЛБТ) та є найважливішою проблемою сучасності, вирішення якої забезпечує безпеку України [1 - 14].

Однак, аналітичний огляд літератури щодо методів вимірювання похибки стабілізації СС визначається лише декількома технічними документами, в яких надано дещо застарілі методики перевірок похибки стабілізації. Ці методики та відповідні прилади для контролю були розроблені у середині 60-80 років. Нажаль, у спеціальній технічній літературі [1, 2] немає навіть опису сучасної більш досконалої методики вимірювання похибки стабілізації. Технічні вимоги визначені, але сучасна методика не наведена.

Постановка задачі

Мета даного дослідження – провести аналітичний огляд літератури щодо методів вимірювання похибки стабілізації та обґрунтувати актуальність подальших досліджень і розробок у галузі шляхів підвищення точності вимірювань похибки стабілізації СС.

Викладення основного матеріалу дослідження

Одна із відомих класичних методик, за якою визначалась срединна похибка стабілізації цілої лінійки аналогових стабілізаторів 2*Е*36-1 [1, 2] у польових умовах на нормалізованій трасі (рис. 1), базувалась на методі кінографування за допомогою кіноапарата із об'єктивом, що мав фокусну відстань не менш 300 мм. У полі зору кіноапарата знаходяться вертикальна й горизонтальна риски щита мішені, що перетинаються у центрі кадра. Швидкість кінозйомки знаходиться у межах 8-16 кадрів/с та підтримується у процесі кінографування постійною [1, 2].

Кінографування виконується по білому щиті, що має у центрі чорне перехрестя. Щит встановлювався на відстані 1300 м від початкової позиції кінозйомки (рис. 1).

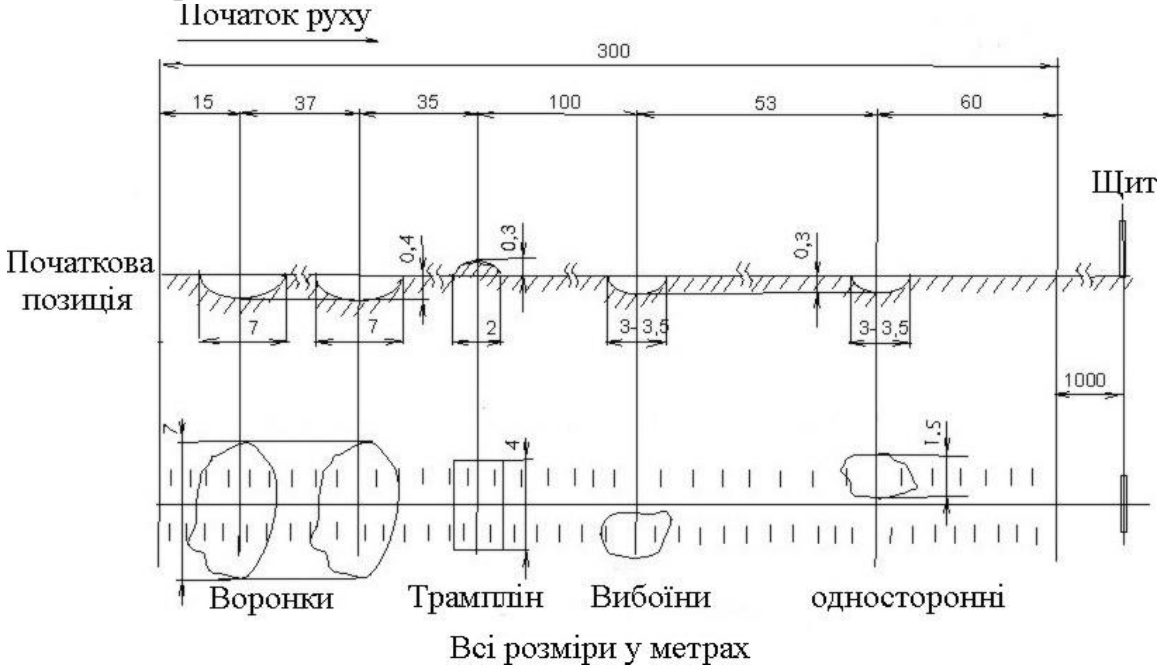

Рис. 1. Типова траса для визначення срединної похибки стабілізації [1, 2]

У разі суміщення марки прицілу із перехрестям віддаленого щита у центрі поля кіноапарата перебував щит.

Під час кінографування водій повинен був вести виріб по трасі прямо зі швидкістю від 25 км/год до 30 км/год, по можливості не користуючись механізмами повороту, рухаючись по трасі на одній передачі, у разі подолання перешкод дотримуватись всіх правил водіння (вчасно зменшувати газ тощо).

У процесі кінографування оператору користуватися пультом керування заборонялось. Швидкість руху виробу по трасі визначалась за формулою:

$$V = 1080/t, \qquad (1)$$

де V – швидкість руху виробу км/час;

t – час руху по трасі відстанню 300 м, с.

Для визначення серединної помилки проводились 3 заїзди.

Після прояву кіноплівки за допомогою дешифратора на міліметровий папір наносились крапки, відповідні до положення блоку озброєння у просторі.

Методи побудови й обробки кривих точності стабілізації були однакові для площин вертикального наведення (ВН) і горизонтального наведення (ГН). Обробку кривих точності стабілізації виконували із метою визначення серединного значення амплітуди коливань блоку озброєння під час руху виробу по нормалізованій трасі.

На екрані дешифратора по кожному кадру визначалась відстань l_1 (l_2) (рис. 2) у мм між рисками кіноапарата й відліковими лініями на щиті, видимими на зображенні щита (для ВН – між горизонтальними, для ГН - між вертикальними).

У випадку, коли перехрестя щита не було видно, відлік можна було робити від одного з кутів щита. Помножуючи вимір відстані на коефіцієнт збільшення M (1) та послідовно відкладаючи отримані величини на міліметровий папір від лінії відліку, отримували ряд точок, з'єднуючи які, одержували криву точності стабілізації під час руху виробу по нормалізованій трасі (рис. 2).

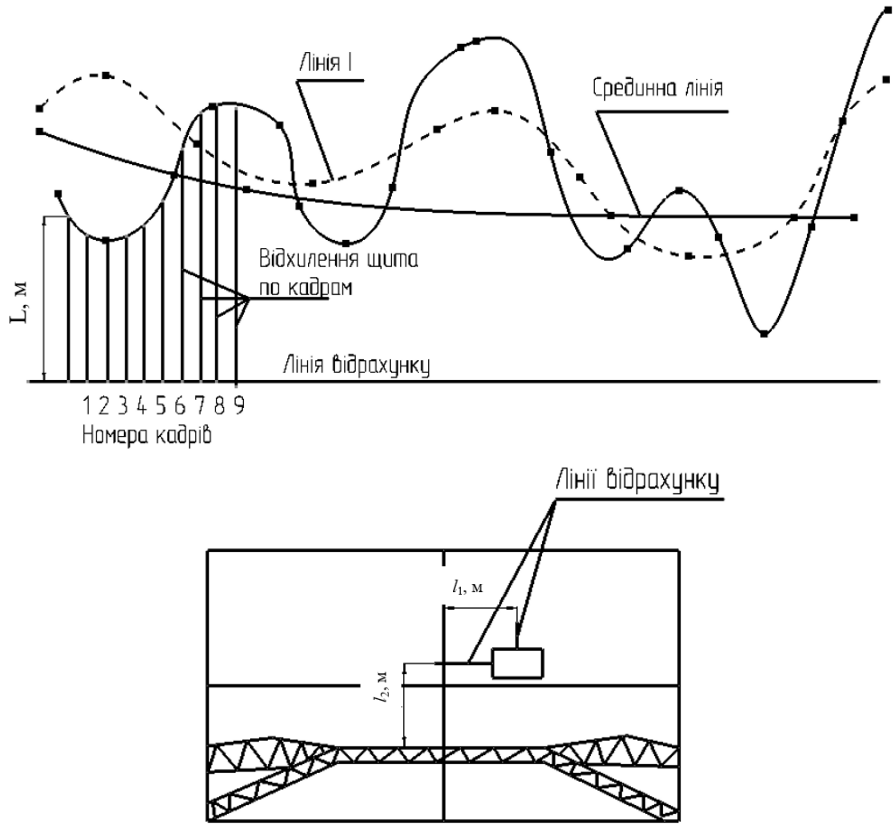

Рис. 2. Приклад обробки кінограми

Обробка кожної кривої точності починалась із проведення середньої лінії. Для цього ділянки кривої між двома найближчими максимальними відхиленнями ділились навпіл та отримані точки, позначені δ, з'єднувались плавною лінією *I*.

Ділянки лінії I між двома найближчими максимальними відхиленнями також ділились навпіл і отримані крапки, позначені *x*, з'єднувались плавною лінією, яка із достатньою точністю і є срединною лінією для коливань блоку, похибка якого вимірюється.

Відхилення кривої точності від середньої лінії заносили по кожному кадру у мм із урахуванням знаку. Для визначення срединного значення точності необхідно було зробити перерахування отриманих відхилень у т. д. (т.д. - тисячна дистанції, одиниця виміру плоских кутів в ЛБТ, що дорівнює одній тисячній дистанції дальності до мети).

Перерахування виконувалось за формулою:

$$\theta = \left(1000 \cdot A_{cp}\right) \Big/ F \cdot k \cdot M, \qquad (2)$$

де θ – амплітуда похибки, т. д.;

F – фокусна відстань об'єктива кіноапарата, мм;

k – кратність збільшення об'єктива дешифратора;

M – коефіцієнт збільшення, уведений для зручності побудови кривої точності, для ВН M=20, для ГН M=10;

A_{cp} – відхилення кривої точності по кожному кадру щодо середньої лінії, мм.

Отримані значення групувалися по величинах помилок (наприклад, від 0,1 до 0,2). Будувався графік розподілу (рис. 3), на якому із точки 50% наносилась горизонтальна пряма.

Ця пряма проводилась до перетинання із кривої розподілу. По точці перетинання на осі абсцис визначалось значення похибки у т. д.

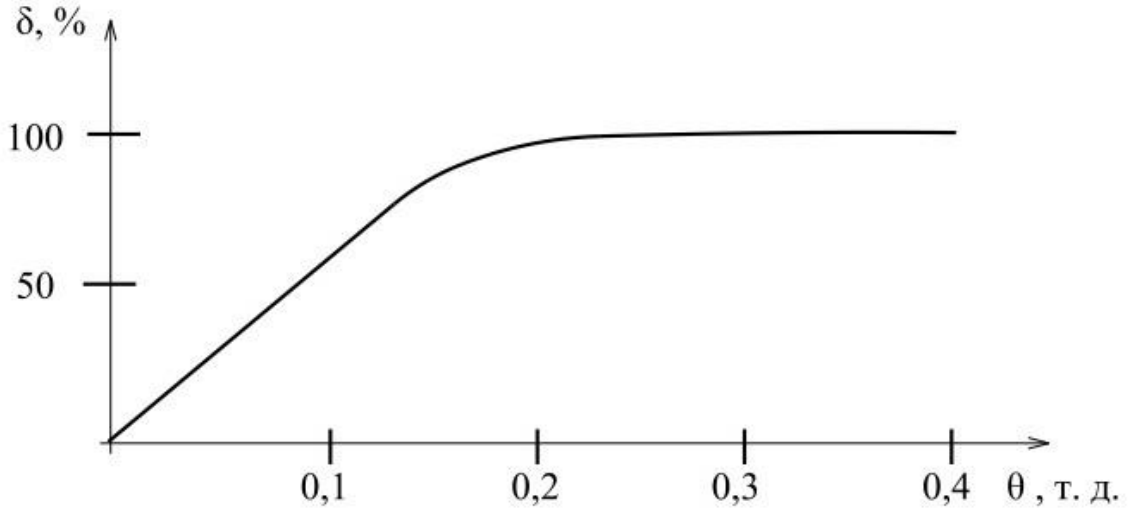

Рис. 3. Крива розподілу

За срединне значення помилки приймалось середнє арифметичне значення по трьом заїздам.

Як ми бачимо із викладеного вище матеріалу, відома методика вимірювань срединної похибки стабілізації мала цілий ряд недоліків [1, 2]: була досить праце містка, потребувала досить великого часу, проводилась тільки на періодичних випробуваннях стабілізатора (на двох серійних стабілізаторах у рік), потребувала наявності нормалізованої траси і додаткової спеціальної кіноапаратури, кіноплівки та проведення не кваліфікованих рутинних робіт щодо визначення координат відхилень по кожному кадру кіноплівки, побудови графіків середньої лінії, кривої розподілу, по якій визначається значення срединної похибки стабілізації.

Сьогодні метод визначення срединної похибки СС значно змінився і має ряд переваг: потребує значно менше часу та використання ручної праці; має цифрову форму обробки інформації у числовому та графічному вигляді; не потребує необхідності встановлювати кінокамеру (її замінив оптико-електронний модуль, інформація з якого надходить на вхід відеомонітора, до якого приєднується через пристрій погодження *Pinnacle Movie Box Plus USB*, за допомогою якого відео зображення передається для запису на ноутбук). Після виконання випробувань інформація за спеціально розробленою програмою автоматично обробляється на комп'ютері, який за підсумками обчислення видає більш точне (порівняно із наведеною вище відомою методикою) значення срединної похибки стабілізації по каналам горизонтального та вертикального наведення.

У технічній документації на стабілізатор 2*Е*36-1, окрім наведеної вище методики перевірки срединної похибки, були дозвільні посилання на використання у перевірках приладу ПБ2.768.038 (прилад ПС).

Прилад ПС під'єднується через технологічні кабелі до роз'єму Ш4-КПА блоку управління стабілізатора 2*Е*36-1.

Прилад ПС є електронним вимірювальним пристроєм, що призначений для визначення величини срединної помилки й відсотка часу нестабілізованого стану виробу 2*Е*26М по каналах ГН і ВН.

Наведена методика роботи з приладом ПС вказує на те, що срединна помилка E – величина, ймовірність якої не перевищує по абсолютній величині 0,5.

За допомогою приладу ПС для кожного із трьох порогів α_1, відповідних установленим рівням помилок, визначається різниця часу Δt між часом, протягом якого помилка була менше встановленого рівня, і часом, протягом якого помилка була більше встановленого рівня, i – знак різниці.

Точка перетинання отриманої кривої із віссю абсцис дає срединне значення помилки E.

Для визначення не стабілізованого стану обирається поріг, величина якого відповідає 4E, та вимірюється час, протягом якого помилка перевищувала цей поріг.

Схема електрична функціональна приладу ПС

Функціональна електрична схема приладу ПС [9] (рис. 4) складається із його функціональних частин: підсилювачів ВН та ГН; фазочутливих випрямлячів ВН та ГН; компенсаторів ВН і ГН; джерел опорної напруги ВН та ГН; компараторів ВН 1, 2, 3, 4 та ГН 5, 6, 7, 8; схем знаку ВН 1, 2, 3 та ГН 4, 5, 6; реверсивних лічильників ВН 1, 2, 3 та ГН 4, 5, 6; лічильників 4*E* ВН та ГН; схем комутації ВН та ГН; дешифраторів ВН та ГН; схем керування; лічильника загального часу; блоку живлення.

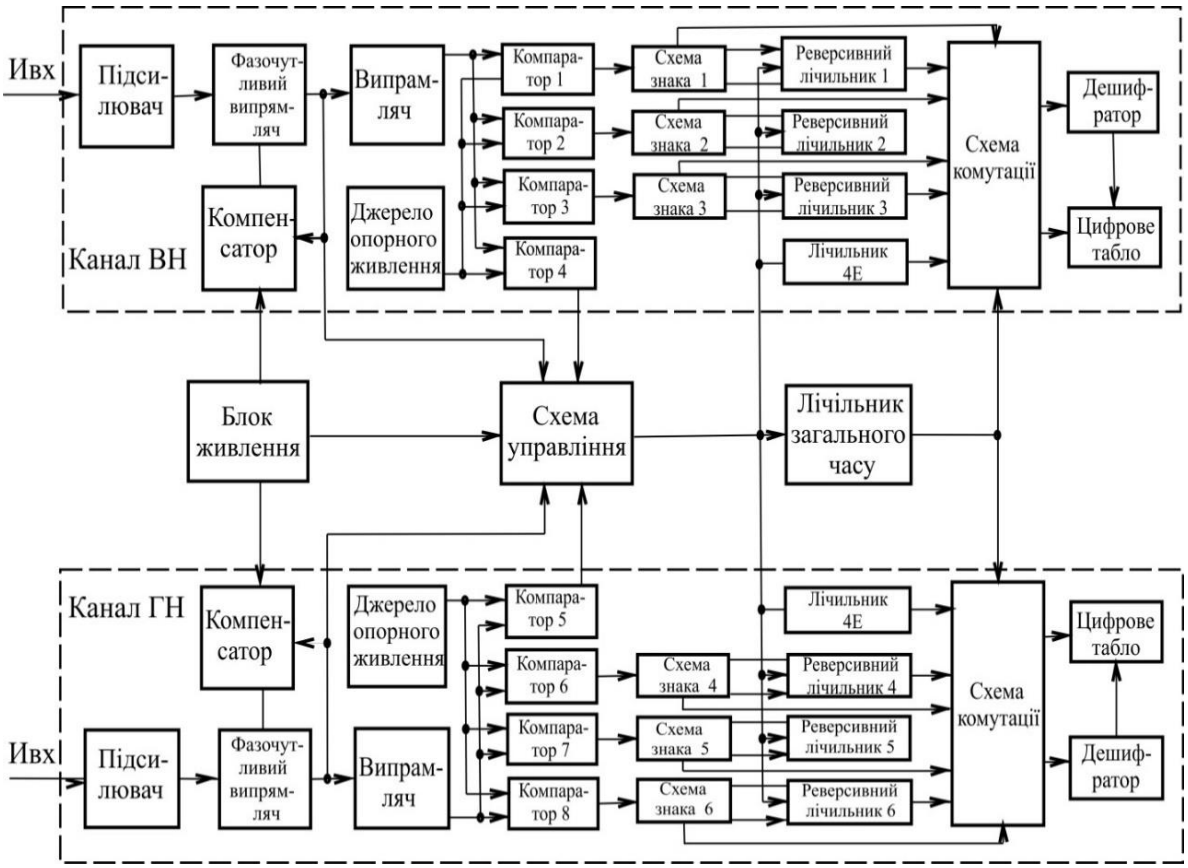

Рис. 4. Схема електрична функціональна приладу ПС

Сигнал помилки у вигляді змінного струму частотою 400 Гц надходить на вхід підсилювача й підсилюється до необхідної величини.

За допомогою ФЧВ виділяється огинаюча крива цього сигналу, полярність якого залежить від співвідношення фаз вхідного й опорного сигналів.

Автоматичну компенсацію напруги, пропорційну статичній помилці, забезпечує компенсатор, який є підсилювачем постійного струму, охоплений ємнісним зворотним зв’язком. Постійна часу компенсатора встановлена на два порядки більше середньої частоти сигналу помилки.

Симетрична щодо нуля змінна напруга надходить на випрямляч, який перетворює її в однополярну напругу. Вихід випрямляча з’єднано із першими входами компараторів 1, 2, 3 та 4 (5, 6, 7 і 8), на інші входи яких

подаються опорні напруги, пропорційні встановленим рівням помилок. Залежно від сигналу помилки й опорної напруги компаратори 1, 2, 3 (6, 7, 8) разом із реверсивними лічильниками 1, 2, 3 (6, 7, 8) виробляють сигнали «додавання» або «вирахування». Якщо сигнал помилки менше опорної напруги, то компаратор виробляє сигнал «додавання», а якщо ні, то – сигнал вирахування. Компаратор 4 (5) формує сигнал, коли помилка перевищує у чотири рази серединне значення. Схеми знаку 1, 2, 3 (4, 5, 6), разом із реверсивними лічильниками 1, 2, 3 (4, 5, 6), призначені для підрахунку різниці між кількістю імпульсів генератора, які надходять на лічильники, коли помилка була менше встановленої, та кількістю імпульсів, коли помилка була більше встановленої, а також для визначення знаку різниці.

Режим «додавання» або «вирахування» реверсивних лічильників визначається станом відповідного компаратора та знаку схеми. Усі лічильники складаються із трьох декад. Якщо сигнал помилки більше рівня 4*E*, то сигнал з компаратором 4(5) надходить на схему керування, яка здійснює подачу імпульсів на лічильник 4*E* та забороняє проходження імпульсів на реверсивні лічильники 1, 2, 3 та (4, 5, 6). Якщо ж сигнал помилки менше рівня 4*E*, то імпульси генератора проходять на реверсивні лічильники 1, 2, 3 (4, 5, 6) та не проходять на лічильник 4*E*.

Схема керування формує рахункові імпульси тільки під час виміру.

По закінченню виміру за допомогою схеми комутації, дешифратори видають інформацію про кількість імпульсів. Знак висвічується на табло.

Для перевірки похибки спочатку проводять перевірку та налаштування приладу ПС, який приєднано до стабілізатора, а потім виконують три заїзди по нормалізованій трасі. Прилад ПС вмикається для вимірів та вимикається оператором виробу відповідно з початком та закінченням траси.

По закінченню кожного із заїздів перемикач «ОПРОС» встановлюється в положення 1, 2, 3, 4 та ОВ. У кожному із положень знімаються показники табло та вносяться у табл. 1.

Зона, у якій знаходиться значення срединної похибки, визначається за знаками безпосередньо після кожного заїзду. Зміна знаку із «–» на «+» для двох рівнів дає цю зону.

Наприклад: Показання цифрового табло для ВН: (–a1), (–a2), (a3).

Срединна похибка знаходиться у зоні між рівнями 0,2 – 0,4 т. д.

Визначення срединної похибки та часу нестабілізованого стану

Необхідно відкласти по осі абсцис рівні похибок 0,1, 0,2, 0,4 т. д. для каналу ВН та 0,15, 0,3, 0,6 т.д. для каналу ГН, а на осі ординат – відповідні цим рівням покази цифрового табло зі знаком. Отримані точки необхідно з’єднати плавною кривою. Точка перетину цієї кривої з віссю абсцис дає значення серединної похибки *E* (рис. 5).

Процент часу нестабілізованого стану А визначається за формулами:

$$A_{ВН} = (\alpha_4 / \alpha_5) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{А}_{\text{ГН}} = (\alpha_4/\alpha_5) \times 100\%. A_{ГН} = (\alpha_4 / \alpha_5) \times 100\%. \quad (4)$$

За даними трьох вимірів визначають середнє значення серединної похибки та середнє значення процента часу нестабілізованого положення (для 2*Е*36-1 по осі абсцис відкладають рівні похибок 0,25; 0,5; 1,0 тощо).

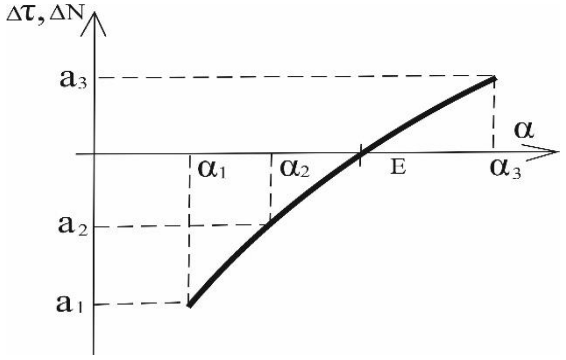

Рис. 5. Крива похибки стабілізації

***Таблиця* 1.**

Результати випробувань

Рівні похибок, т.д.		**Положення перемикача «ОПРОС»**	**Знак**		**Показання цифрового таб-ло**	
ВН	**ГН**		**ВН**	**ГН**	**ВН**	**ГН**
0,1	0,15	1			a_1	$в_1$
0,2	0,3	z			a_2	$в_2$
0,4	0,6	3			a_3	$в_3$
1,6	2,4	4			a_4	$в_4$
ОВ		ОВ			a_5	

Висновки

Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів показав, що для подальшого підвищення точності вимірювань похибки стабілізації та швидкодії резервів не має. У той же час, вимоги до точності визначення механічних величин стабілізаторів (зокрема, серединної похибки стабілізації), стали значно вищими;

Модель побудови лінійки вітчизняних СС відповідає принципу «залежної стабілізації» – жорсткого зв’язку вертикального та горизонтального каналів стабілізатора з приладом спостереження за об’єктами;

Оцінка точності СС проводилась за методикою визначення срединної похибки на двох комплектах стабілізаторів на нормалізованій трасі у виробі замовника;

Висвітлено переваги нового сучасного методу визначення срединної похибки СС порівняно із відомим методом: він потребує значно менше часу та використання ручної праці; має цифрову форму обробки інформації у числовому та графічному вигляді; не потребує необхідності встановлювати кінокамеру (її замінив оптико-електронний модуль, інформація з якого надходить на вхід відеомонітора, до якого приєднується через пристрій погодження *Pinnacle Movie Box Plus USB*, за допомогою якого відео зображення передається для запису на ноутбук). Тим самим обґрунтовано актуальність подальших досліджень і розробок у галузі шляхів підвищення точності вимірювань похибки стабілізації СС.

Список використаної літератури

1. *Лепешинский И. Ю*. Автоматические системы управления вооружением / И. Ю. Лепешинский, П. М. Варлаков, Д. Н. Захаров, О. И. Чикирев // Учебное пособие. – Омск. – 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://mslstaryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.
2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Боевая машина пехоты БМП-2. Часть. 1. – 2007. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://armyman/info/books/id-44.html
3. *Безвесільна О. М.* Наукові, технологічні, організаційні та впроваджувальні основи створення нового комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин / О. М. Безвесільна, В. Г. Цірук // Монографія. – НПО «Пріоритети», Київ з грифом ЖДТУ. – 2015. – С. 176.
4. *Bezvesilna O. M.* The analytical review of existing instrumental stabilizing complexes / Bezvesilna Olena, Tsiruk Victor, Chepuk Larina // Технологічні комплекси, Луцьк. – 2018, № 1(15). С. 15-26. (*Copernicus*).
5. *Bezvesilna O. M.* Methods and Ways of Piezoelectric Accelerometers Fastening on the Objects of Research / O. M. Bezvesilna, I. Korobiichuk, M. Kachniarz, M. Koshovyj, V. Kvasnikove // ACTA PHYSICA POLONICA V. 133(18) N 4 p. 1112-1115 (Scopus).
6. *Tkachuk A.* Scientific and theoretical development of stabilization systems for gravimetric systems and modern sensing elements for measuring gravitational acceleration / A. Tkachuk, O. Bezvesilna // Scientific developmentand achievements. – 2018. – Vol. 5. – P. 115-129. London, UK, (*Web of Science*).
7. *Безвесільна О. М.* Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором / О. М. Безвесільна, М. В. Петренко, М. В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. Тех-

нічні науки — Хмельницький, 2019. — № 4(275). — С. 169–175. Index Copernicus, Google Scholar**.**

8. *Безвесільна О. М.* Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів / О. М. Безвесільна, М. В. Петренко, М. В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки — Хмельницький національний ніверситет, Хмельницький, 2019. — № 3(273). — С. 158-163. Index Copernicus, Google Scholar.
9. *Безвесільна О. М.* Трикоординатний гравіметр з виставленням осей чутливості на основі цифрових відео зображень / О. М. Безвесільна, Ю. О. Подчашинський, Ю. О. Шавурський, С. О. Нечай // ICRIS 2019: The 2 nd International Conference on Robotics and Intelligent System Warsaw, Poland, February 23-25, 2019, p. 89-93. (Scopus). DOI: 10.1145/3313950.3314187 ISBN: 978-1-4503-6092-0 https://www.researchgate.net/publication/332852196_Three-coordinate_gravimeter_with_exhibition_of_axis_sensitivity_based_on_digital_videoimages
10. *Bezvesilna O. M.* Devising and Introducing a Procedure for Measuring a dynamic Stabilization error in Weapon stabilizers // О. М. Безвесільна, О. Петренко, В. Галицький, М. Ільченко // Східно-Європейський журнал передових технологій , Харьков, №1/9(103),2020, с. 39-45 Scopus, CrossRef, Index Copernicus, DOAJ, SIS та ін. (Scopus).
11. *Korobiichuk I.* Numerical Modeling of Dynamic Disturbances Acting on the Sensitive Elements of an Instrument Navigation System / Igor Korobiichuk, Olena Bezvesilna, Yuriy Podchashinskiy Katarzyna, Rzeplińska-Rykała // Advances in Intelligent Systems and Computing Springer Nature is making SARS-CoV-2 research free. Conference on AUTOMATION 2020. P. 279-288, 2020 (Scopus).
12. *Tkachuk A*. Information and measurement system of weapon stabilization parameters based on precision piezoelectric sensitive element / Andrii Tkachuk, Olena Bezvesilna, Aleksandr Dodrzhanskyi, Anna Ostapchuk, Mykola Horodyskyi // E3S Web of Conferences Volume 166 (2020) The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020) **Kryvyi Rih, Ukraine, May 20-22, 2020** (Scopus). DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016605005 PDF (1012 KB) NASA ADS Abstract Service
13. *Безвесільна О. М.* Математичні моделі основних вузлів та блоків автоматизованого приладового комплексу стабілізації / О. М. Безвесільна, М. В. Ільченко, В. Д. Самойлов // Електронне моделювання. Видавництво НАНУ, Vol 43, № 5 (2021). (Google Scholar, Index Copernicus).p. 108-121.

14. *Bezvesilna O.* Development of the model of the intelligent instrument system for measuring the parameters of the stress-strain state / Olena Bezvesilna, Lyudmyla Kuzmych, Volodymer Kvasnicov // 2nd International Workshop on Computational & Information Technologies for Control & Modeling (CITCM 2021) co-located with V International scientific-practical conference on Modeling, Control and Information Technology (MCIT 2021). Rivne 5.11.21 Scopus.