

BEZVESILNA YLENA, KYRYCHUK YURIY, TOLOCHKO TETIANA

INCREASING THE ACCURACY OF THE STABILIZATION COMPLEX

Monograph



2023

SWorld

Germany



Bezvesilna Ylena, Kyrychuk Yuriy, Tolochko Tetiana

Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Толочко Т.О.

**INCREASING THE ACCURACY OF THE
STABILIZATION COMPLEX**

*ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КОМПЛЕКСУ
СТАБІЛІЗАЦІЇ*

*In internationalen wissenschaftlich-geometrischen Datenbanken enthalten
Included in International scientometric databases*

MONOGRAPH

МОНОГРАФІЯ

*ScientificWorld-Net Aktiav
Karlsruhe 2023*

Authors:

Bezvesilna Ylena, Kyrychuk Yuriy, Tolochko Tetiana

Increasing the accuracy of the stabilization complex: monograph.
Karlsruhe, 2023. 188 p.

Підвищення точності комплексу стабілізації: монографія.
Карлсруе, 2023. 188 с.

The monograph presents a scientific study in which an important scientific and technical problem is solved, which consists in determining the methods and means of improving the accuracy characteristics of the instrument system for measuring mechanical parameters and stabilization, improving the main characteristics of stabilizers, improving methods of measuring mechanical quantities that affect the functioning of stabilizers (angle of installation of sensors of angular speed, stiffness, backlash, moments of resistance to rotation of the stabilizer guidance channels, etc.) in extreme operating conditions (a wide range of external vibration and temperature disturbances) by using the proposed new precision methods and means. The monograph contains relevant programs and algorithms. It is intended for master's students, postgraduate students, doctoral students, teachers of higher educational institutions and specialists of scientific divisions and institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine and other scientific organizations.

У монографії викладено наукове дослідження, в якому вирішено важливу науково-технічну проблему, що полягає у визначенні методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, покращення основних характеристик стабілізаторів, удосконалення методів вимірювання механічних величин, що впливають на функціонування стабілізаторів (кута установки датчиків кутової швидкості, жорсткості, люфтів, моментів опору повороту каналів наведення стабілізатора та ін.) в екстремальних умовах роботи (широкий діапазон зовнішніх вібраційних і температурних збурень) шляхом використання запропонованих нових прецизійних методів та засобів. Монографія містить відповідні програми та алгоритми.

Призначена для магістрантів, аспірантів, докторантів, викладачів вищих навчальних закладів та спеціалістів наукових підрозділів і установ НАН України та інших наукових організацій.

ISBN 978-3-949059-98-8

DOI: 10.30890/978-3-949059-98-8.2023

Published by:

ScientificWorld-NetAkhatAV

Lußstr. 13

76227 Karlsruhe, Germany

e-mail: editor@promonograph.org

site: <https://de.promonograph.org>

Copyright © Scientific texts, Authors, 2023

Copyright © Drawing up & Design. ScientificWorld-NetAkhatAV, 2023



ABOUT THE AUTHORS / ПРО АВТОРІВ

1. *Bezvesilna Ylena*, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-6951-1242

Безвесільна Олена Миколаївна, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

2. *Kyrychuk Yuriy*, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-8638-6060

Киричук Юрій Володимирович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

3. *Tolochko Tetiana*, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-2346-0419

Толочко Тетяна Олексіївна, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"



Content

List of notations and abbreviations 10

Preface 14

CHAPTER 1

ANALYTICAL REVIEW OF THE LITERATURE IN THE FIELD OF WAYS TO INCREASE THE ACCURACY OF STABILIZATION AND METHODS OF MEASURING THE DYNAMIC ERROR OF STABILIZATION

1.1. Analytical review of the literature in the field of existing stabilization device complexes 23

1.2. Classification and construction of stabilizers..... 25

1.3. The principle of operation of the stabilizer 29

1.4. Main quality indicators of the stabilizer 33

1.5. Analytical review of the literature in the field of stabilization error measurement methods 35

 1.5.1. *Electrical functional scheme of the stabilization device*..... 40

 1.5.2. *Determination of the average error and the time of the unstable state*..... 43

Conclusions to chapter 1 44

Reference list for chapter 1 44

CHAPTER 2

METHODS AND MEANS OF INCREASING THE ACCURACY OF THE STABILIZATION COMPLEX

2.1. Application of solid-state gyroscopes instead of electromechanical gyrotachometers GT46..... 47

2.2. Increasing bandwidth and frequency of information exchange 55

2.3. Increasing the speed due to the improvement of the technical characteristics of the instrument composition of the stabilizer..... 57

2.4. Application of a new stabilizer construction model 60

2.5. Improvement of methods of measuring mechanical parameters affecting the functioning of stabilizer 71

 2.5.1. *Development of a method for measuring moments of product rotation resistance*..... 71

 2.5.2. *Development of a method for eliminating the mutual influence of angular velocity sensors of vertical and horizontal guidance channels*..... 72

 2.5.3. *Development of a method of measuring stabilizer stiffness*..... 74

Conclusions to chapter 2 77

Reference list for chapter 2 78



CHAPTER 3

MATHEMATICAL MODELS OF THE MAIN COMPONENTS AND CONTROL CHANNELS OF THE STABILIZER

3.1. Mathematical models of the main nodes and blocks of the stabilizer	81
3.2. Mathematical models of the horizontal and vertical channels of the stabilizer	94
3.3. Analog and digital mathematical models of horizontal and vertical channels	103
3.4. The use of mathematical models of the stabilizer when simulating control modes	107
3.5. Increasing the accuracy parameters of the stabilizer in the mode of operation of the module with increased accuracy	107
3.5.1. <i>Derived data for mathematical modeling of the introduction of the mode of operation of the module without the influence of taps..</i>	108
3.5.2. <i>Simulation results</i>	113
3.5.3. <i>The results of the experimental development of the stabilization instrument complex</i>	118
Conclusions to chapter 3	121
Reference list for chapter 3	122

CHAPTER 4

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INSTRUMENT COMPLEX OF STABILIZATION

4.1. Experimental studies of engines by evaluation electromagnetic and electromechanical time constants	124
4.1.1. <i>The scope of research on engines according to the electromagnetic assessment time constant</i>	124
4.1.2. <i>The volume of research on engines according to the electromechanical assessment constant time</i>	125
4.1.3. <i>The results of research on engines based on the estimation of the electromagnetic time constant</i>	126
4.1.4. <i>The results of engine research by evaluation electromechanical time constant</i>	128
4.2. Experimental determination of bandwidth gyrotachometer	129
4.3. Study of the change of the stabilizer construction model with the purpose increasing accuracy	137
4.3.1. <i>The results of research on the introduction of new angular speed sensors</i>	140
4.3.2. <i>The results of studies on the influence of bandwidth</i>	143
4.3.3. <i>Modeling the change in discreteness of signal calculation control from the Coriolis vibration gyroscope</i>	145
4.4. Selection of the method of dynamic stabilization error estimation	148
4.4.1. <i>Simulation results</i>	153
Conclusions to chapter 4	156
Reference list for chapter 4	157



CHAPTER 5

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF MEASURING DYNAMIC STABILIZATION ERROR

5.1. Analysis of literary data and formulation of problem..... 160

5.2. The purpose and objectives of the study of the development and implementation of the method of measuring the dynamic error of stabilization 163

5.3. The main part of the method for determining the dynamic stabilization error 163

5.3.1. *Initial requirements*..... 163

5.3.2. *Determination of the point of input of a sinusoidal signal to the control circuits of the stabilizer*..... 164

5.3.3. *Determination of the values of the main parameters of the signal $A=2.5^{\circ}\sin\omega t$ regarding the mechanical characteristics of the stand and complex*..... 165

5.3.3.1. *Setting the disturbing angular velocity*..... 165

5.3.3.2. *Fixation of total speed signals* 167

5.3.3.3. *Calculation of dynamic errors*..... 167

5.3.3.4. *Determination of steepness value* 167

5.3.3.5. *The results of tests on working out the dynamic stabilization error* 169

Conclusions to chapter 5 175

Reference list for chapter 5 175

Conclusions 178

References 180



Зміст

Перелік умовних позначень і скорочень	10
---	----

Передмова	14
-----------------	----

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ У ГАЛУЗІ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ

1.1. Аналітичний огляд літератури у галузі існуючих приладових комплексів стабілізації	23
1.2. Класифікація та побудова стабілізаторів.....	25
1.3. Принцип дії стабілізатора	29
1.4. Основні показники якості стабілізатора	33
1.5. Аналітичний огляд літератури у галузі методів вимірювання похибок стабілізації	35
1.5.1. Схема електрична функціональна приладу стабілізації.....	40
1.5.2. Визначення середньої похибки та часу нестабілізованого стану	43
Висновки до розділу 1	44
Список літератури до розділу 1	44

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КОМПЛЕКСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ

2.1. Застосування твердотільних гіроскопів замість електромеханічних гіротахометрів ГТ46.....	47
2.2. Підвищення смуги пропускання та частоти інформаційного обміну	55
2.3. Підвищення швидкодії за рахунок покращення технічних характеристик приладового складу стабілізатора	57
2.4. Застосування нової моделі побудови стабілізатора	60
2.5. Удосконалення методів вимірювання механічних параметрів, що впливають на функціонування стабілізатора.....	71
2.5.1. Розробка методу вимірювання моментів опору обертання виробу.....	71
2.5.2. Розробка методу усунення взаємовпливу датчиків кутової швидкості каналів вертикального та горизонтального наведення	72
2.5.3. Розробка методу вимірювання жорсткості стабілізатора	74
Висновки до розділу 2	77
Список літератури до розділу 2	78



РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ТА КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ СТАБІЛІЗАТОРА

3.1. Математичні моделі основних вузлів та блоків стабілізатора	81
3.2. Математичні моделі горизонтального та вертикального каналів стабілізатора.....	94
3.3. Аналогові та цифрові математичні моделі горизонтального і вертикального каналів	103
3.4. Використання математичних моделей стабілізатора при моделюванні режимів управління.....	107
3.5. Підвищення точнісних параметрів стабілізатора в режимі функціонування модуля з підвищеною точністю.....	107
3.5.1. Похідні данні для проведення математичного моделювання по введенню режиму функціонування модуля без впливу відводів.....	108
3.5.2. Результати моделювання	113
3.5.3. Результати експериментального відпрацювання приладового комплексу стабілізації.....	118
Висновки до розділу 3	121
Список літератури до розділу 3	122

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИЛАДОВОГО КОМПЛЕКСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ

4.1. Експериментальні дослідження двигунів за оцінкою електромагнітної та електромеханічної постійних часу.....	124
4.1.1. Обсяг досліджень двигунів за оцінкою електромагнітної постійної часу.....	124
4.1.2. Обсяг досліджень двигунів за оцінкою електромеханічної постійної часу.....	125
4.1.3. Результати досліджень двигунів за оцінкою електромагнітної постійної часу.....	126
4.1.4. Результати досліджень двигунів за оцінкою електромеханічної постійної часу.....	128
4.2. Експериментальне визначення смуги пропускання гіротахометра..	129
4.3. Дослідження зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності.....	137
4.3.1. Результати досліджень щодо впровадження нових датчиків кутової швидкості	140
4.3.2. Результати досліджень впливу смуги пропускання.....	143
4.3.3. Моделювання зміни дискретності обчислення сигналів керування з коріолісового вібраційного гіроскопа.....	145
4.4. Вибір методу оцінки динамічної похибки стабілізації	148
4.4.1. Результати моделювання	153
Висновки до розділу 4	156
Список літератури до розділу 4	157



РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ

5.1. Аналіз літературних даних та постановка задачі.....	160
5.2. Мета та завдання дослідження розробки та впровадження методу вимірювання динамічної похибки стабілізації	163
5.3. Основна частина методу визначення динамічної похибки стабілізації.....	163
5.3.1. Початкові вимоги	163
5.3.2. Визначення точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора.....	164
5.3.3. Визначення значень основних параметрів сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ щодо механічних характеристик стенду та комплексу.....	165
5.3.3.1. Задання збурюючої кутової швидкості.....	165
5.3.3.2. Фіксація сигналів сумарної швидкості.....	167
5.3.3.3. Розрахунок динамічних похибок.....	167
5.3.3.4. Визначення значення крутості.....	167
5.3.3.5. Результати випробувань щодо відпрацювання динамічної похибки стабілізації.....	169
Висновки до розділу 5	175
Список літератури до розділу 5	175
Висновки	178
Література	180



List of notations and abbreviations / Перелік умовних позначень і скорочень

БКД	–	блок керування двигуном
БУ	–	блок управління
БО	–	блок наведення вертикального каналу
Б	–	блок наведення горизонтального каналу
ВН	–	вертикальне наведення
ВОГ	–	волоконно-оптичний гіроскоп
ГН	–	горизонтальне наведення
ГТ	–	гіротахометр
«ГТ»	–	режим роботи стабілізатора на ручній гільці управління
ДК (ДУ)	–	датчик кута
ДКШ	–	датчик кутової швидкості
ДН	–	датчик напруги
ДП	–	датчик положення
ДС	–	датчик струму
ЕДМ	–	електродвигун
ЕМ	–	електромагнітна муфта
І	–	інтегратор
ІС	–	інтегратор струму
КВГ	–	коріолісовий вібраційний гіроскоп
КП	–	ключовий пристрій
КПА	–	контрольно-перевірочна апаратура
КС	–	комплекс стабілізації
ЛК	–	ланка корекції
МЕМС	–	мікромеханічний твердотільний гіроскоп
МК	–	масштабний коефіцієнт



МП	–	мікропроцесор
МПБ	–	механізм повороту горизонтального каналу
МПО	–	механізм підйому вертикального каналу
ОЕМ	–	оптико-електронний модуль
ОЕМ-СД	–	оптико-електронний модуль з стабілізованим дзеркалом
ОЕМ-СПЗ	–	оптико-електронний модуль з стабілізованим полем зору
ОКП	–	обертовий контактний пристрій
ОТ	–	обертовий трансформатор
«АВТ»	–	режим наведення з швидкостями до 6 °/с
«ПАВ»	–	режим наведення з підвищеними швидкостями
ПАЗ	–	програмно-алгоритмічне забезпечення
ПАЦ	–	пристрій аналого - цифровий
ПГР	–	пристрій гальванічної розв'язки
ПК	–	приладовий комплекс
ПН	–	підсилювач напруги
ПП	–	підсилювач потужності
ППр	–	прилад приведення
ППС	–	підсилювач підсумовувач
ПС	–	прилад стабілізації
ПСД (ПСЗ)	–	прилад з стабілізованим дзеркалом (полем зору)
ПУ-К(О)	–	пульти управління стабілізатором
ПЦВ	–	прилад обзору місцевості
РКС	–	режим контролю струму
Виріб	–	рухомий об'єкт
СЛВ	–	стабілізована лінія візування поля зору
СУВ	–	система управління виробом
СН	–	система навігації
СП	–	статичний перетворювач



СС	–	система стабілізації
СТМ02	–	атестований стенд для проведення випробувань
СЧНВ	–	середній час напрацювання на відмову
УК675	–	учбовий комплекс УК675
«УПР»	–	режим функціонування модуля з підвищеною точністю
«УПР-1»	–	режим функціонування модуля без впливу відводів
ФВЧ	–	фільтр високих частот
ФЖ	–	фільтр живлення
ФНЧ	–	фільтр низьких частот
ФЧВ	–	фазочутливий випрямляч (демодулятор)
ЦАП	–	цифро-аналоговий перетворювач
ЧЕ	–	чутливий елемент
ШИМ	–	широтно -імпульсний модулятор
1 т.д.	–	1 тисячна дистанції = 3,6 кут. хв. = 10 ⁻³ рад
RS422, RS485	–	цифрові інтерфейсні лінії зв'язку
Р.Ч.	–	технологічного реле часу
СВУ-500-4Ц	–	цифровий стабілізатор з гіротахометрами ГТ46
СВУ-500-7Ц	–	цифровий стабілізатор з гіроскопами КВГ
$K_{ГТ}$	–	статичний коефіцієнт передачі
H	–	кінетичний момент
ζ	–	відносний коефіцієнт демпфірування
q	–	кутова частота вільних коливань
λ	–	частота загасаючих коливань
γ	–	коефіцієнт затухання перехідного процесу
G_{BH}	–	жорсткість каналу вертикального наведення
$G_{ГН}$	–	жорсткість каналу горизонтального наведення
θ	–	амплітуда середньої похибки стабілізації
F	–	фокусна відстань об'єктиву кіноапарата



A_{cp}	–	відхилення кривої точності по кожному кадру щодо середньої лінії
k	–	кратність збільшення об'єктива дешифратора
n	–	кількість відхилень від середньої лінії по інтервалам
Σni	–	сумарна кількість відхилень від середньої лінії по інтервалам
$A_{ГН}$	–	процент часу нестабілізованого стану каналу ГН
$A_{ВН}$	–	процент часу нестабілізованого стану каналу ВН
Δ_n	–	різниця показань індикатора в розподілах шкали
$M_{Г}$	–	гіроскопічний момент гіротахометра
M_{α}	–	момент, що враховує вплив гістерезису
$M_{Д}$	–	момент дебалансу гіротахометра
C_{T}	–	жорсткість торсіону гіротахометра
I_n	–	момент інерції підвісу гіротахометра
$T_{я}$	–	постійна часу якоря двигуна
C_{M}	–	постійна моменту навантаження на вал двигуна



Preface / Передмова

Сучасний стан вітчизняного виробництва приладових комплексів стабілізації характеризується значним підвищенням вимог до точності, швидкодії, вимірюванню механічних параметрів (кута виставлення ДКШ, жорсткості, люфтів, моментів опору обертанню та інших) при експлуатації у складних умовах. В умовах сучасного стану України роботи по підвищенню безпеки держави є надзвичайно актуальними. Одна з таких актуальних задач – задача підвищення точності вітчизняних приладових комплексів стабілізації.

Стан вітчизняного виробництва приладових комплексів стабілізації характеризується стрімким переходом:

- від застарілої елементної бази з використанням транзисторів, резисторів, діодів - на нову перспективну цифрову мікропроцесорну з використанням перепрограмованих мікропроцесорів;

- від аналогових ліній зв'язку, що зазнають вплив дії завад, - на цифрові завадостійкі лінії зв'язку;

- від оптичних засобів спостереження за об'єктами на місцевості - на оптико-електронні з виводом відеозображення на сучасні монітори;

- від світлодіодної інформації - на інформацію, що відображається на цифрових дисплеях;

- від електромеханічних чутливих сенсорів первинної інформації - на твердотільні чутливі сенсори і та ін.

Науково-технічний прогрес у галузі удосконалення компонентів елементної бази та розвитку цифрової техніки приніс суттєві зміни у схемо-технічні рішення побудови стабілізаторів, покращення їх тактико-технічних характеристик. Розроблені та впроваджені нові цифрові стабілізатори значно полегшують роботу операторів (навідників), але й вони не завжди можуть ефективно виконувати поставлені перед ними завдання.

Перспективні розробки, дослідження та впровадження нових



удосконалених приладових комплексів стабілізації є запорукою збереження і зростання науково-виробничого потенціалу України. Тому, є актуальною науково-технічною проблемою.

Науково-технічний прогрес у галузі приладових комплексів стабілізації потребує удосконалення компонентів, елементної бази системи керування, використання сучасних кутомірних засобів для покращення тактико-технічних характеристик стабілізаторів (точності стабілізації, швидкодії).

Розв'язання даної складної науково-технічної проблеми вимагає застосування нової більш досконалого приладового комплексу стабілізації з застосуванням нової елементної бази і використанням нових твердотільних прецизійних чутливих елементів мікромеханічних гіроскопів (МЕМС), Коріолісових вібраційних гіроскопів (КВГ) та волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ).

Забезпечення підвищення точності приладового комплексу стабілізації є найважливішою проблемою сучасності, вирішення якої забезпечує безпеку України.

Актуальність монографії

Надзвичайно актуальні роботи, які присвячені підвищенню безпеки держави. Актуальними науково-технічними питаннями, що вирішується у монографії, є дослідження методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладового комплексу стабілізації (кута виставлення ДКШ, жорсткості, люфтів, моментів опору обертанню та інших). Тому тема монографії «Підвищення точності комплексу стабілізації» є актуальною.

Метою дослідження є вирішення важливої наукової задачі, що полягає у визначенні методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладового комплексу стабілізації, покращення основних характеристик стабілізаторів (підвищення точності вимірювання механічних величин) в екстремальних умовах роботи (широкий діапазон зовнішніх вібраційних і температурних збурень) шляхом використання запропонованих нових прецизійних методів та засобів.



Основні задачі:

- провести аналітичний огляд літератури та обґрунтувати актуальність досліджень та розробок у галузі шляхів підвищення точності та методів і засобів вимірювання похибки стабілізації;

- надати опис роботи сучасних стабілізаторів. Провести теоретичний аналіз приладового складу в частині шляхів підвищення точності та швидкодії окремих приладів;

- розробити математичні моделі основних компонентів вузлів, блоків та каналів управління стабілізатора. Навести математичні моделі основних складових вузлів, блоків та каналів управління;

- провести розрахунково – моделюючі роботи на основі розробленої математичної моделі стабілізатора з визначення методів підвищення точності та динамічних характеристик стабілізаторів;

- провести експериментальні дослідження щодо визначених шляхів підвищення точності стабілізації;

- дослідити основні технічні характеристики нових перспективних твердотільних чутливих елементів;

- розробити нову модель побудови стабілізатора підвищеної точності.

- розробити метод вимірювання динамічної похибки стабілізації.

Об'єкт досліджень монографії - процес вимірювання механічних величин приладового комплексу стабілізації шляхом використання запропонованих методів та засобів.

Предмет досліджень: - методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладового комплексу стабілізації.

Методи дослідження:

- аналіз науково-технічної літератури, патентних баз даних та в 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 блоків, вузлів стабілізатора та основних режимів його роботи (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 методу виміру кутових відхилень стабілізованого горизонтального та вертикального каналів від заданого напрямку (розділ 4,5);

- експериментальні дослідження результатів аналітичних розрахунків та результатів математичного моделювання (розділ 4);

- статистична обробка даних експериментальних досліджень (визначення параметрів руху РО на інтервалі часу) (розділи 2,4);

Галузь використання

Основні результати монографії «Підвищення точності комплексу стабілізації» використовуються при модернізації дійсних та при розробці нових стабілізаторів.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розроблено нові методи та засоби підвищення точності приладового комплексу стабілізації;

2. Проведено розробку математичних моделей основних компонентів та каналів управління приладового комплексу стабілізації;

3. Визначено 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 отриманих результатів

1. Запропоновано методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладового комплексу стабілізації;
2. Розроблено математичні моделі основних компонентів та каналів управління приладової системи, що дозволило провести моделювання окремих режимів роботи стабілізатора;
3. Розроблено та підтверджено математичним моделюванням шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів шляхом:
 - заміни електромеханічних гіротахометрів на твердотільні гіротахометри із смугою пропускання не менше 100 Гц,
 - підвищення частоти інформаційного обміну 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 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 методи 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.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів

Достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій підтверджено вибором апробованих методів досліджень, цифровим моделюванням на ЕОМ, збігом результатів експериментів з відомими експериментальними даними інших досліджень, відповідністю отриманих теоретичних та експериментальних результатів.

Структура та обсяг монографії

Монографія складається із переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг монографії 195 сторінка друкованого тексту, містить 115 рисунків, 17 таблиць. Список використаних джерел по розділах становить: розділ 1 – 15 джерел, розділ 2 – 16 джерел, розділ 3 – 17 джерел, розділ 4 – 22 джерел, розділ 5 – 16 джерел. Всього використано 74 літературних джерел.

У вступі проаналізовано літературні джерела у сфері існуючих приладових комплексів стабілізації, обґрунтовано актуальність досліджень, можливість та доцільність використання запропонованих методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладового комплексу стабілізації. Сформульовано мету, завдання, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено основні наукові та практичні результати, які отримано у монографії. Визначено структуру та обсяг монографії. Наведено



принцип дії сучасних цифрових приладових систем. Розглянуто існуючі методики вимірювання похибок комплексів стабілізації.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела у сфері існуючих приладових комплексів стабілізації. Наведено відомості щодо призначення та побудови стабілізаторів. Визначено схему різновидів стабілізаторів та основні конструктивні елементи стабілізаторів. Визначено основні показники якості стабілізаторів. Наведено результати аналізу можливих шляхів підвищення точнісних характеристик. Наведено аналітичний огляд вимірювання похибок стабілізації.

У другому розділі розглянуто методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладового комплексу стабілізації. Обґрунтовано застосування нових твердотільних гіротахометрів замість електромеханічних гіротахометрів. Проведено роботи з математичного моделювання з метою вивчення можливості покращення характеристик точності приладового комплексу стабілізатора шляхом збільшення смуги пропускання до 100 Гц та зменшення частоти інформаційного обміну до 1000 Гц. Проведено розрахунки за допомогою математичного моделювання щодо усунення відводів вертикального та горизонтального каналів у режимі функціонування стабілізатора з підвищеною точністю. Розглянуто можливість підвищення точнісних характеристик приладового комплексу стабілізації за рахунок зміни моделі побудови стабілізатора. Запропоновано перейти від «залежної» системи до «незалежної» за рахунок введення до складу контурів управління стабілізатора приладу з стабілізованим полем зору.

У третьому розділі наведено розроблені математичні моделі основних вузлів та блоків, що входять до складу стабілізатора: пульта керування, гіротахометра ГТ46, датчика положення, блоку управління та ін. Отримано математичні моделі каналів вертикального та горизонтального наведення з редуктором і двигуном. Отримано математичні моделі аналогового і цифрового тракту управління каналів горизонтального та вертикального наведення. Наведено результати математичного моделювання окремих режимів управління



вертикального та горизонтального каналу. Розроблено математичні моделі, які, використовуються при моделюванні режимів управління стабілізатора, а також у дослідженні зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення його точності.

У четвертому розділі монографії наведено відомості про практичні розробки та результати експериментальних досліджень стабілізатора. Запропоновано методи і засоби проведення вимірювань при експериментальних дослідженнях; підтверджено достовірність основних технічних характеристик приладової системи стабілізації. Наведено результати моделювання основних режимів роботи стабілізатора з цифровими контурами управління приводами горизонтального і вертикального наведення. Проведено експериментальні роботи щодо визначення характеристик приводних двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20. Проведено експериментальні дослідження та дослідження за допомогою математичного моделювання щодо визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахometrів ГТ46. Досліджено зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності стабілізатора. За результатами математичного моделювання проведено розрахунки методу оцінки динамічної похибки стабілізації.

У п'ятому розділі наведено новий метод вимірювання динамічної похибки стабілізації. За матеріалами математичного моделювання визначено: точку подачі синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ до контуру управління стабілізатором, параметри синусоїдального сигналу та наведено метод і результати експериментального відпрацювання на атестованому стенді СТМ02 та навчальному комплексі УК675. Результатами проведених робіт підтверджено значення динамічної похибки стабілізації ≤ 2 т.д.

У висновках сформульовано основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, які представлені у монографії.

Ключові слова: стабілізатор, механічні параметри, система стабілізації, динамічна похибка стабілізації



Анотація.

У монографії викладено наукове дослідження, в якому вирішено важливу науково-технічну задачу, що полягає у визначенні методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, покращення основних характеристик стабілізаторів, удосконалення методів вимірювання механічних величин, що впливають на функціонування стабілізаторів (кута установки датчиків кутової швидкості, жорсткості, люфтів, моментів опору повороту каналів наведення стабілізатора і ін.) в екстремальних умовах роботи (широкий діапазон зовнішніх вібраційних і температурних збурень) шляхом використання запропонованих нових прецизійних методів та засобів. Монографія містить відповідні програми та алгоритми.

Призначена для магістрантів, аспірантів, докторантів, викладачів вищих навчальних закладів та спеціалістів наукових підрозділів і установ НАН України та інших наукових організацій.

Табл.: 17, іл.: 114, бібліогр.: 74 назв.



CHAPTER 1 / РОЗДІЛ 1
ANALYTICAL REVIEW OF THE LITERATURE
IN THE FIELD OF WAYS TO INCREASE THE ACCURACY OF
STABILIZATION AND METHODS OF MEASURING THE
DYNAMIC ERROR OF STABILIZATION

*АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ У ГАЛУЗІ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ
ТОЧНОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ
ПОХИБКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ*

Мета даного розділу провести аналітичний огляд літератури у галузі шляхів підвищення точності стабілізації та методів вимірювання динамічної похибки стабілізації.

Аналіз літературних джерел з даної тематики обмежується лише загальними технічними характеристиками окремих типів стабілізаторів, не розкриваючи у достатньому вигляді принципів їх побудови, функціонування, шляхів підвищення точності стабілізації та методик вимірювання похибок стабілізації.

1.1. Аналітичний огляд літератури у галузі існуючих приладових комплексів стабілізації

Характерною рисою розвитку сучасної техніки є покращення технічних характеристик всіх приладових комплексів, які входять до складу системи управління виробом, у тому числі і стабілізаторів.

Цей процес обумовлений переходом на цифрову елементну базу, використанням нових сенсорів інформації, нових оптико-електронних приладів обзору місцевості та розробкою нових схемо-технічних рішень побудови техніки, що, в свою чергу, підвищує рівень швидкодії техніки її маневреність за рахунок більшого рівня автоматизації управління.

З іншого боку, вимоги до точності, швидкодії систем управління та стабілізації постійно підвищуються, що потребує їх удосконалення.

При цьому необхідно враховувати, що сучасні рухомі об'єкти мають



значно більші швидкості, на них діють значно більші перевантаження та неконтрольовані механічні збурення (удари, вібрації) таблиця 1.1 [1].

Таблиця 1.1 - Середні параметри коливань корпусу танків при русі по середнє-пересіченій місцевості зі швидкістю до 20 км/год

Види коливань	Кутові коливання		
	Амплітуда	Швидкість	Частота, Гц
Продольні	2,5°	8,25 °/с	1,1 Гц
Горизонтальні	1,2°	1,6 °/с	0,6 Гц
Поперечні	1,8°	6.3 °/с	0,8 Гц

Тому, вимоги до точності засобів та методів вимірювання визначених вище механічних величин стабілізаторів стали значно вищими.

Науково-технічний прогрес у галузі приладових комплексів стабілізації потребує удосконалення компонентів, елементної бази системи керування, використання сучасних цифрових приладів вимірювання кутових швидкостей для покращення тактико-технічних характеристик стабілізаторів, які мають прийти на заміну аналоговим приладам.

Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів [2] показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів немає. Тому вимоги до точності засобів та методів вимірювання визначених вище механічних величин стабілізаторів стали значно вищими.

Досягнення високої точності таких комплексів стало можливим завдяки високій якості сучасних елементів гіроскопічної техніки і значного розвитку теорії гіроскопічних пристроїв, що розроблені Криловим А.Н., Булгаковим Б.А., Ішлінським О.Ю, Ройтенбергом Я.М., Рівкіним С.С., Павловим В.А., Поповим Є.Г, Лур'є А.І., Солодовниковим В.В. та ін. Теорія лінійних і нелінійних систем наведення була розроблена Солодовниковим В.В., Чемодановим Б.К., Лакотой Н.А. Теорія цифрових слідкуючих приводів



розроблена Бесекерським В.А., Федоровим С.М. Теорія гіроскопічних систем стабілізації розроблена Павловським М.А., Пельпором Д.З., Одинцовим А.О., Самотокіним Б.Б., Бубликом Г.Ф., Безвесільною О.М., Збруцьким О.В., Рижковим Л.М., Бондарем П.М., Ривкіним С.С., Ройтенбергом Я.Н., Фабрикантом Е.А., Сайдовим П.І. Теорія оптимальних систем керування – Беллманом Р., Полянським В.Г. Граммером Р., Гостьовим В.І., Єськовим Д.І. та ін. [1,2].

Однак, у літературі недостатньо робіт, присвячених стабілізаторам, в яких було б вирішено задачі підвищення точності, швидкодії; зміни моделі побудови стабілізаторів з метою підвищення точності; вимірюванню однієї з точнісних характеристик стабілізатора – динамічної похибки стабілізації; усуненню самовідводів каналів, що виникають за рахунок некомпенсованих нульових сигналів датчика кутової швидкості (ДКШ); удосконаленню методу вимірювання механічних параметрів, які впливають на точнісні характеристики стабілізатора.

Рішення зазначених задач становить предмет дослідження даної монографії роботи.

1.2. Класифікація та побудова стабілізаторів

У багатьох наукових виданнях та учбових посібниках наводяться окремі напрямки принципів побудови та класифікації стабілізаторів [1,3]. Для правильного розуміння принципів побудови наведемо основні принципи їх класифікації (рисунок 1.1):

- 1) *за об'єктом стабілізації* – це об'єкт, положення якого стабілізується:
 - стабілізатори головних приладів,
 - стабілізатори додаткових приладів,
 - стабілізатори спеціальних приладів;



Рисунок 1.1 - Класифікація стабілізаторів

2) за кількістю площин стабілізації:

- одноплоскостні (стабілізатори тільки в одній, як правило, вертикальній площині),
- двоплоскостні (стабілізатори у двох, вертикальній та горизонтальній, площинах),
- триплоскостні (стабілізатори у вертикальній, горизонтальній площинах та по куту крену);

3) за видом вимірюваної координати:

- позиційні (стабілізатори такого типу запам'ятовують задане положення (позицію) та вимірюють кутове відхилення горизонтального та вертикального каналів від заданого положення гіроскопічними датчиками кута);

4) за функцією гіроскопа:

- силові (з стабілізуючим моментом достатнім для стабілізації об'єкта),
- індикаторні (з гіроскопічним приладом, що виконує функцію індикатора відхилення),
- швидкісні (стабілізатори такого типу вимірюють тільки абсолютну кутову швидкість переміщення об'єкта, який стабілізується, за допомогою



гіроскопічних датчиків абсолютної кутової швидкості - гіротахometrів);

5) по типу виконавчого приводу:

– електромашинні (з стабілізуючим моментом, що створює електричний двигун),

– гідравлічні (використовують стабілізуючий момент, що створює гідропривід);

б) по типу регулювання:

– по відхиленню,

– по збуренню,

– комбіновані;

7) по типу схеми - технічного виконання:

– аналогові (виконані на транзисторах, резисторах, діодах),

– цифрові (виконані на цифрових мікропроцесорах з можливістю проведення перепрограмування без апаратного доопрацювання апаратури),

– комбіновані (в яких присутні цифрові та аналогові елементи схем).

Крім того, є ще окремий тип – стабілізатори поля зору, які поділяються на стабілізатори з:

– спільною стабілізацією (або «залежною»), в яких блок, що стабілізується жорстко чи через кінематику пов'язано, з приладом спостереження за місцевістю,

– автономною стабілізацією (або «незалежною»), в яких до складу системи управління виробом (СУВ) вводиться прилад з стабілізованим полем зору (СПЗ) або стабілізованою лінією візування (СЛВ).

Стабілізатори, в тому числі і стабілізатори СВУ-500, як об'єкти автоматичного регулювання [4], побудовані за класичною схемою, що включає в себе об'єкт регулювання та регулятор (рисунок 1.2).

Виходячи зі схеми рисунок 1.2, розглянемо, як основні елементи цієї схеми знайшли своє відображення у структурній схемі цифрової приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації на рисунку 1.3.



Рисунок 1.2 - Функціональна схема каналу стабілізатора

Сигнал $U_{\text{сигн.}}$ – сигнал з сенсорів інформації для приладового комплексу стабілізації. Це сигнал з датчиків кутової швидкості по каналу вертикального наведення ДКШ-ВН (ГТ46) та з ДКШ-ГН (ГТ46-01) по каналу горизонтального наведення.

Сигнал $U_{\text{упр.}}$ – сигнал управління з обчислювача стабілізатора. Це сигнал з блоку управління БУ1022-04 (рисунок 1.3), що надходить на блоки керування двигуном БКД14-02 ГН (ВН);

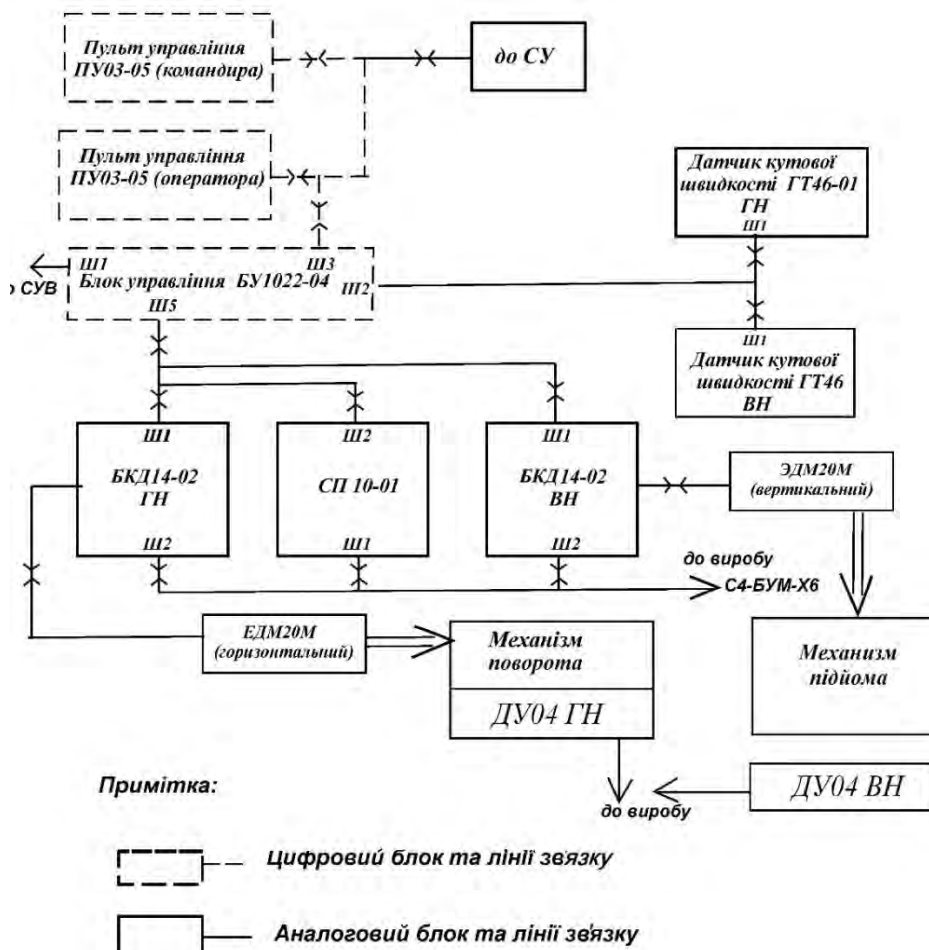


Рисунок 1.3 - Структурна схема цифрового комплексу стабілізації



Сигнал $Z_{вих}$. – сигнал на вході двигуна. Це сигнал, що надходить з БКД14-02 на двигуни ЕДМ20М ГН(ВН).

Сигнал $M_{дв}$. – механічний обертаючий момент, що передається з валу двигуна на механічний привід – механізм повороту (механізм підйому) для усунення розузгодження між заданим положенням та поточним положенням об'єкта стабілізації.

Сигнал $U_{ос}$. – сигнал зворотного зв'язку по струму або напрузі. У стабілізаторі (рисунок 1.3) одночасно використовуються обидва сигнали по струму та напрузі.

На підставі наведеного вище, робимо висновок, що *регулятор* – це комплекс приладів, датчиків та механізмів, що працює за заданою програмою та автоматично компенсує механічні впливи на об'єкт регулювання. *Об'єкти регулювання* – це механізми (блок наведення по каналу ВН та блок наведення по каналу ГН), в яких постійно регулюються вихідні характеристики $Z_{вих}$.

1.3. Принцип дії стабілізатора

Стабілізатор складається з двох незалежних один від одного каналів горизонтального та вертикального наведення [5,6]. Для зручності розглянуто роботу сукупності приладів і функціональних вузлів, що забезпечують стабілізацію й наведення у вертикальній та горизонтальній площинах, роздільно та поіменовано їх «привід ВН» та «привід ГН», відповідно.

Привід ВН (рисунок 1.4). Основними елементами (рисунок 1.4), що забезпечують роботу привода ВН, є: датчик кутової швидкості ДКШ-ВН, пульти керування командира ПУ К та оператора ПУ О, блок керування двигуном вертикального каналу БКД ВН, до складу якого входять підсилювач потужності ПП, датчики струму ДС та напруги ДН; механізм підйому МПД із електродвигуном ЕДМ-ВН, блок управління БУ, до складу якого входить фазочутливий випрямляч ФЧВ1, а також цифрові пристрої: інтегратор І,



підсумовуючі підсилювачі ППС1-ППС3, підсилювач вихідного сигналу ПН і широтно-імпульсний модулятор ШІМ.

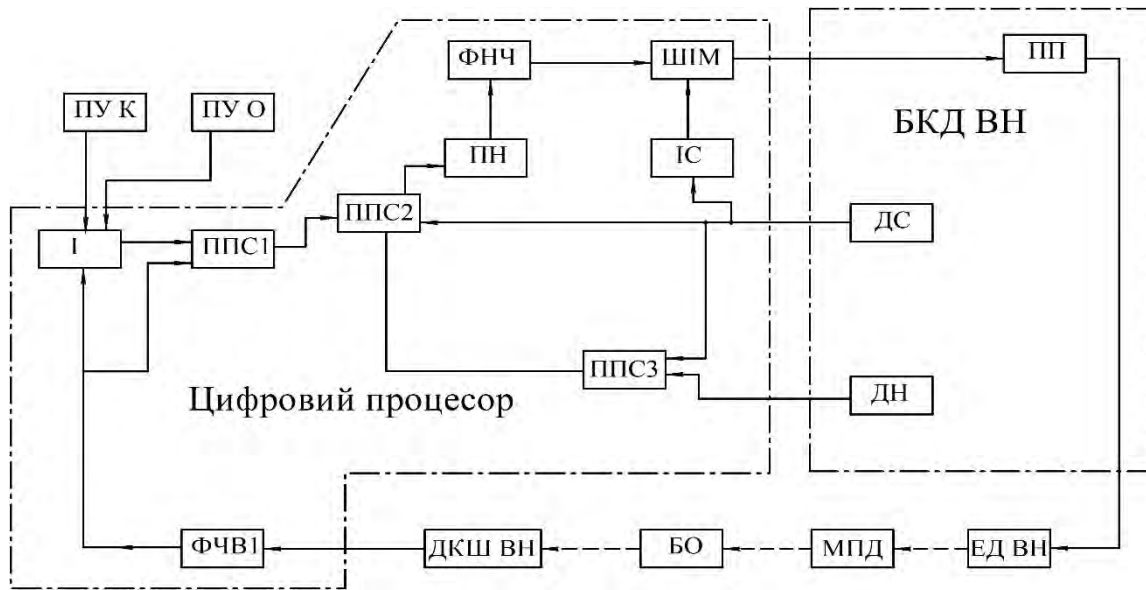


Рисунок 1.4 - Функціональна схема приводу ВН:

БКД ВН – блок керування двигуном каналу вертикального наведення, ПУ К, ПУ О – пульти управління командира та оператора, І – інтегратор, ІС – інтегратор струму, ПП – підсилювач потужності, ШІМ – широтно-імпульсний модулятор, ДС – датчик струму, ДН – датчик напруги, ПН – підсилювач напруги, ДКШ ВН – датчик кутової швидкості вертикального каналу, ППС1, ППС2, ППС3 – підсилювачі підсумовуючі, ФЧВ1 – фільтр високих частот, ФНЧ – фільтр низьких частот, БО – блок стабілізації вертикального каналу, МПД – механізм підйому, ЕД ВН – електродвигун вертикального наведення

При русі виробу вісь чутливості вертикального каналу разом з корпусом відхиляється від вихідного положення.

Разом із віссю чутливості вертикального каналу відхиляється ДКШ-ВН, який установлений у вертикальній площині стабілізації, ДКШ-ВН виробляє сигнал, який пропорційний величині швидкості та відповідний (по фазі) напрямку відхилення вісі чутливості у вертикальній площині. Сигнал із ДКШ-ВН надходить на вхід інтегратора.

Інтегратор виробляє сигнал, який пропорційний інтегралу швидкості, що



відповідає величині кута відхилення БО від вихідного положення (помилка стабілізації).

Сигнал з виходу інтегратора по підсилювально-перетворювальному тракту надходить на вхід модулятора широтно-імпульсного (ШІМ), який перетворює цей цифровий сигнал у сигнал імпульсної напруги з шириною імпульсу, що пропорційній величині напруги на вході модулятора.

Імпульсний сигнал з модулятора підсилюється у підсилювачі потужності ПП та надходить на обмотку якоря ЕДМ ВН.

ЕДМ-ВН через редуктор механізму підйому МПД та зубчастий сектор повертає вісь чутливості вертикального каналу у бік, протилежний відхиленню корпусу виробу, утримуючи його у заданому напрямку з похибкою, що обумовлена величиною похибки стабілізації.

Для одержання необхідних динамічних характеристик привода ВН (мінімальної похибки стабілізації та якості перехідного процесу) використовуються сигнали зворотного зв'язку щодо швидкості зміни похибки стабілізації, сигнали датчика струму й датчика напруги.

Сигнал ПУ(О) або ПУ(К) надходить на вхід інтегратора й підсумовується із сигналом ДКШ ВН. З виходу інтегратора сигнал надходить на підсилювально-перетворювальний тракт, де підсумовується із сигналами датчика струму й датчика напруги, після посилення й перетворення надходить на ЕДМ ВН. ЕДМ ВН через редуктор механізму підйому повертає вісь чутливості вертикального каналу у заданому напрямку зі швидкістю, що відповідна до знаку й величини сигналу ПУ.

Тому, що ДКШ-ВН вимірює тільки кутову швидкість відхилень БО і корпусу виробу в площині ВН, то лінійні переміщення виробу по вертикалі, а відповідно й БО щодо об'єкту спостереження, а також переміщення самого об'єкту необхідно компенсувати наведенням БО на цей об'єкт від ПУ.

Основні елементи (рисунок 1.5), що забезпечують роботу привода ГН аналогічні по своєму функціональному призначенню елементам привода ВН.

Основними елементами (рисунок 1.5), що забезпечують роботу привода



ГН є: ДКШ-ГН; пульти управління ПУ-О або ПУ-К; керуючий двигуном підсилювач БКД-ГН, до складу якого входить підсилювач потужності ПП та датчик струму ДС; механізм повороту МПВ із електродвигуном ЕД-ГН; блок управління БУ, який містить цифрові: інтегратор І, інтегратор струму ІС, підсилювач підсумовуючий ППС1, підсилювач напруги ПН та широтно-імпульсний модулятор ШІМ.

Принцип дії привода ГН при стабілізації й наведенні аналогічний принципу дії привода ВН.



Рисунок 1.5 - Функціональна схема приводу ГН:

БУ – блок управління, БКД ГН – блок керування двигуном каналу горизонтального наведення, ПУ-К, ПУ-О – пульти управління командира та оператора, І – інтегратор, ІС – інтегратор струму, ПП – підсилювач потужності, ШІМ – широтно-імпульсний модулятор, ДС – датчик струму, ПН – підсилювач напруги, ЦВ – прилад обзору місцевості, ДКШ ГН – датчик кутової швидкості каналу ГН, ППС1 – підсилювач підсумовувач, Б – блок стабілізації горизонтального каналу, МПВ – механізм повороту, ЕД-ГН – електродвигун горизонтального наведення

На відміну від привода ВН, сигнал зворотного зв'язку по швидкості зміни похибки стабілізації привода ГН формується відповідно до сигналів зворотного



зв'язку по струму й абсолютної кутової швидкості.

ДКШ-ГН вимірює тільки кутову швидкість переміщення стабілізованої осі у горизонтальному каналі і тому лінійні переміщення виробу в горизонтальній площині, необхідно компенсувати наведенням стабілізованої осі горизонтального каналу у заданому напрямку.

1.4. Основні показники якості стабілізатора

Для підвищення якості стабілізації до стабілізаторів висуваються технічні вимоги щодо функціонування в режимах стабілізації та наведення, серед яких найбільш важливі [7–12]:

- стійкість;
- точність стабілізації блоку озброєння;
- якість стабілізації;
- швидкість наведення;
- час готовності;
- час безперервної роботи;
- надійність функціонування;
- характер та час перехідних процесів при гальмуванні при відпрацюванні

великих кутів наведення.

1) Стійкість стабілізатора, як системи автоматичного регулювання, це така система, в якій перехідні процеси, що викликані дією механічних збурень на вертикальний та горизонтальний канал наведення протягом часу прагнуть зменшитися до нуля, а не призводити до коливань з наростаючою амплітудою, що можуть викликати автоколивання або призвести до монотонного збільшення похибки стабілізації.

2) Точність стабілізації є одним із головних показників кожного стабілізатора та оцінюється практично за допомогою середньої похибки стабілізації, яка повинна бути < 1 т.д. (1 тисячна дальності = 3,6 кут. хв.) [13–



15] по кожному з каналів вертикального (ВН) та горизонтального наведення (ГН), що визначається, як середнє значення абсолютних кутових відхилень стабілізованого блоку озброєнь від напрямку на ціль.

3) Якість стабілізації – один з показників, який знаходиться у прямій залежності від точності стабілізації. Чим вище точність стабілізації, тим менше відхилення від заданого напрямку вертикального та горизонтального каналів та тим вища якість стабілізації стабілізаторів. Якість стабілізації визначається жорсткістю стабілізатора та демпфуванням стабілізатора (кількість перебігів).

4) Швидкість наведення або стеження об'єкта, що стабілізується за ціллю, є ще одним показником якості стабілізатора в режимах наведення:

– точна наводка вертикального та горизонтального каналів повинна виконуватись в діапазоні швидкостей наведення від 0,07 °/с до 5-6 °/с [1];

– залежність кута повороту пульта управління у всьому діапазоні повинна бути близькою до лінійної (або лінійна) з градієнтом зміни кутової швидкості 0,002 рад/сек/град [1], що необхідно для безперервного та точного наведення каналів ВН та ГН у разі необхідності;

– виконавчі двигуни привода механізмів повороту та підйому повинні забезпечувати наведення з максимальними швидкостями та перекид каналів ВН та ГН за командою оператора з одного напрямку на іншу з кутовими швидкостями > 35–40 °/с.

5) Час готовності стабілізатора до роботи не повинен перевищувати часу, за який частота обертання гіротахometrів набере необхідні для проявлення в повній мірі гіроскопічних ефектів, що складає для електромеханічних гіротахometrів 1,5–2 хв, а для твердотільних гіротахometrів не більше на завершення перехідних процесів в апаратурі стабілізатора від 5 до 11с;

6) Надійність функціонування визначається тим:

– яка модель побудови прийнята за основу при конструюванні окремих електричних схем, вузлів, блоків, приладів;

– надійністю тих електро-радіо-виробів (ЕРВ), які використанні при розробці електронних схем стабілізатора;



– методами діагностування та самоконтролю роботи окремих вузлів, блоків, приладів та стабілізатора в цілому на відмову.

7) Час безперервної роботи визначається, виходячи з вимог технічного завдання на розробку стабілізатора та з ресурсу безперервної роботи кожного електро-радіо виробу (ЕРВ), які використані в електричних схемах. Для аналогових стабілізаторів час безперервної роботи повинен бути не менше 6 год з наступною перервою на 1 год. При виконанні особливих задач час включення не обмежений.

У кожному з відомих стабілізаторів, починаючи з 2Е36 і до сучасних, вказані вище вимоги реалізовані в різній мірі. В сучасних цифрових стабілізаторах ці технічні характеристики покращені.

1.5. Аналітичний огляд літератури у галузі методів вимірювання похибок стабілізації

Аналітичний огляд літератури в області методів вимірювання похибки стабілізації визначається декількома технічними документами, в яких надано методики перевірок похибки стабілізації. Ці методики та прилади для контролю були розроблені в середині 60-80 років. Нажаль, навіть у спеціальній технічній літературі немає опису методики вимірювання динамічної похибки стабілізації. Технічні вимоги визначені, але методика не наведена.

Одна з відомих класичних методик, за якою визначалась середня похибка стабілізації цілої лінійки аналогових стабілізаторів 2Е36-1 [9] у польових умовах на нормалізованій трасі (рисунок 1.6), базувалась на методі кінографування за допомогою кіноапарата з об'єктивом, що мав фокусну відстань не менш

300 мм. У полі зору кіноапарата повинні бути вертикальна й горизонтальна риски щита мішені, що перетинаються в центрі кадра. Швидкість кінозйомки повинна бути в межах 8-16 кадрів/с та підтримуватися в процесі кінографування постійною [1].



Кінографування виконувалось по білому щиті, що мав у центрі чорне перехрестя. Щит встановлювався на відстані 1300 м від початкової позиції кінозйомки (рисунок 1.6).

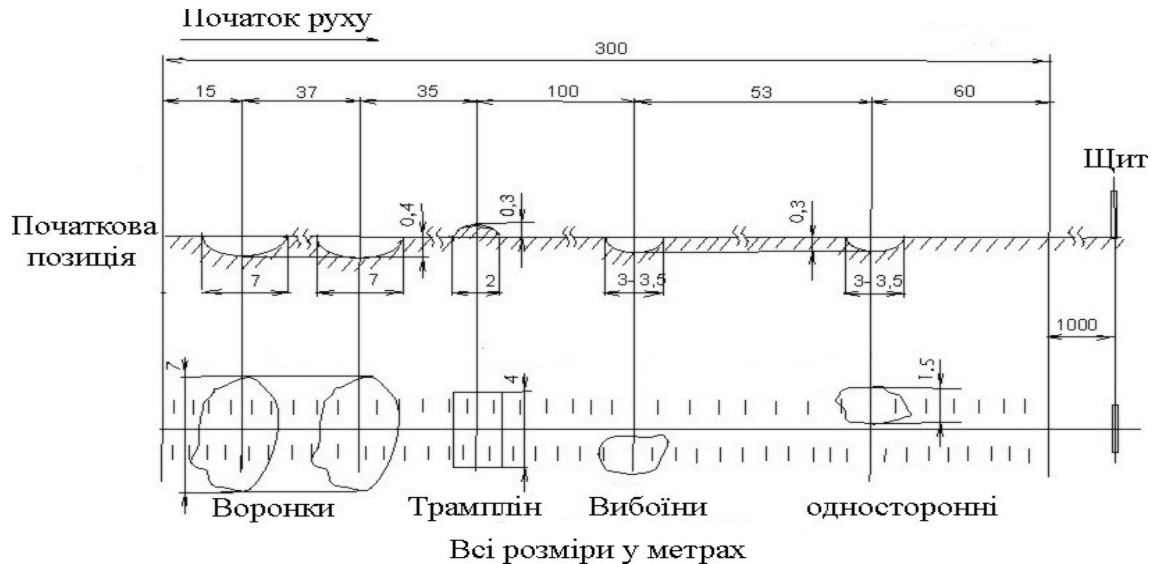


Рисунок 1.6 - Типова траса для визначення середньої похибки стабілізації

При суміщенні марки прицілу з 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, долаючи трасу на одній передачі, при подоланні перешкод дотримуватись всіх правил водіння (вчасно зменшувати газ та т.д.).

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

$$V = 1080/t, \quad (1.1)$$

де V – швидкість руху виробу км/час; t – час руху по трасі відстанню 300 м, с.

Для визначення середньої 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 ВН і ГН. Обробку кривих точності стабілізації виконували з метою



визначення середнього значення амплітуди коливань блоку озброєння при русі виробу по нормалізованій трасі.

На екрані дешифратора по кожному кадру визначалась відстань l_1 (12) (рисунок 1.7) 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 (формула 1.2) та послідовно відкладаючи отримані величини на міліметровий папір від лінії відліку (одночасно заносились ці цифри в таблицю 1.1 у графу 1), отримувались ряд точок, з'єднуючи які, одержували криву точності стабілізації при русі виробу по нормалізованій трасі (рисунок 1.2).

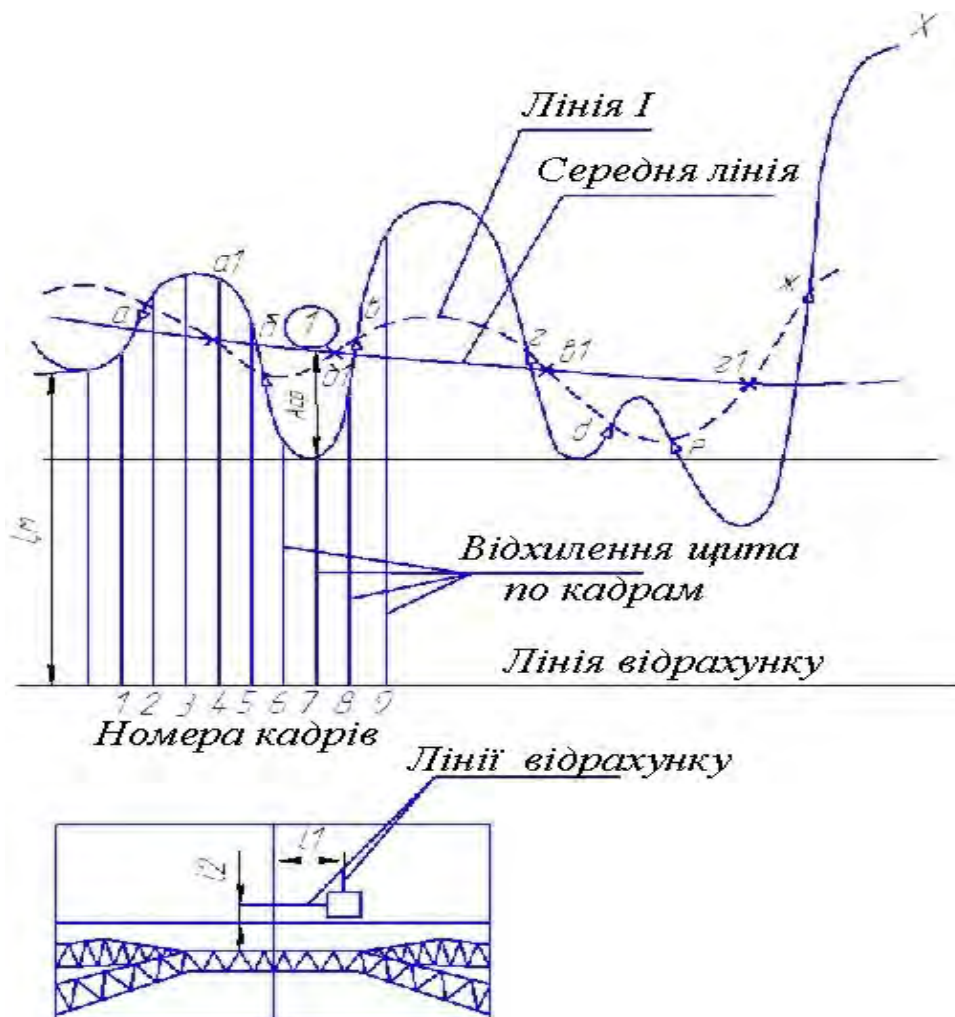


Рисунок 1.7 - Приклад обробки кінограми



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 з достатньою точністю і є середньою лінією для коливань блоку похибка якого вимірюється.

Потім визначались і заносились у таблицю 1.2 (графу 2) відхилення кривої точності від середньої лінії по кожному кадру в мм із урахуванням знаку. Для визначення середнього значення точності необхідно було зробити перерахування отриманих відхилень у т. д. і заповнити графу 3 і 4 таблиці 1.1.

Таблиця 1.2 - Результати випробувань по визначенню середньої похибки стабілізації

Відстань між рисками кіноапарата та підрахунковими лініями, видимими на зображенні щита, мм $L \cdot m$	Відхилення кривої точності від середньої лінії по кожному кадру, мм A_{cp}	Кількість відхилень від середньої лінії по інтервалам, шт. n			Примітка
		ділення в тисячних відстані (т. д.)	Кіл.	% від Σn	
		Від 0 до 0,1 Від 0,1 до 0,2 Від 1,5 до 3,0 Понад 3,0			
		Σn_i		100%	

Перерахування виконувалось за формулою:

$$\theta = (1000 \cdot A_{cp}) / F \cdot k \cdot M, \quad (1.2)$$

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 (рисунок 1.8), на якому із точки 50% наносилась горизонтальна пряма.

Ця пряма проходила до перетинання з кривою розподілу. По точці перетинання на осі абсцис визначалось значення похибки в т. д.

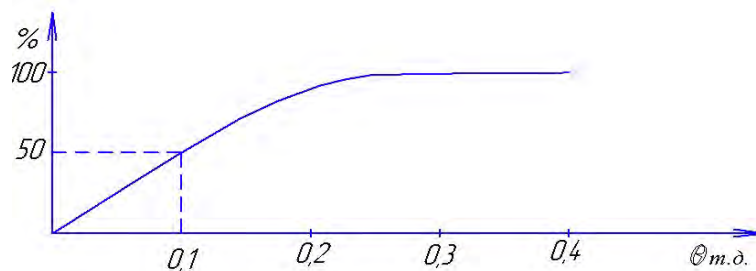


Рисунок 1.8 - Крива розподілу

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

Як ми бачимо з викладеного вище матеріалу, методика виміру середньої похибки стабілізації, була досить трудомістка, проводилась тільки на періодичних випробуваннях стабілізатора (на двох серійних стабілізаторах в рік) потребувала наявності нормалізованої траси, додаткової спеціальної кіноапаратури, кіноплівки та проведення не кваліфікованих рутинних робіт щодо визначення координат відхилень по кожному кадру кіноплівки, побудові графіків середньої лінії, кривої розподілу, по якій визначається значення середньої похибки стабілізації.

Цей метод визначення середньої похибки застосовується і зараз для перевірок похибок цифрових стабілізаторів, але вона дещо змінилась в позитивну сторону, враховуючи те, що не має необхідності встановлювати кінокамеру. Її замінив оптико-електронний модуль, інформація з якого надходить на вхід відеомонітора, до якого приєднується через пристрій



погодження Pinnacle MovieBoxPlus USB, за допомогою якого відео зображення передається для запису на ноутбук. Після виконання випробувань інформація за спеціально розробленою програмою обробляється на комп'ютері, який за підсумками обчислення видає значення середньої похибки стабілізації по каналам горизонтального та вертикального наведення.

У технічній документації на стабілізатор 2E36-1, окрім наведеної вище методики перевірки середньої похибки, були дозвільні посилання на використання в перевірках приладу ПБ2.768.038 (Прилад ПС).

Прилад ПС під'єднується через технологічні кабелі до роз'єму Ш4-КПА блоку управління стабілізатора 2E36-1.

Прилад ПС є електронним вимірювальним пристроєм, що призначений для визначення величини середньої помилки й відсотка часу нестабілізованого стану виробу 2E26M по каналах ГН і ВН.

Наведена методика роботи з приладом ПС вказує на те, що середина помилка E – така величина, що її ймовірність не перевершує 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 його, і знак різниці. За отриманими результатами на графіку наносяться три крапки, які з'єднуються плавною лінією (рисунок 1.10).

Точка перетину отриманої кривої з віссю абсцис дає середнє значення помилки E .

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

1.5.1. Схема електрична функціональна приладу стабілізації

Функціональна електрична схема приладу ПС [9] (рисунок 1.9) складається з 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 4Е ВН та ГН; схем комутації ВН та ГН; дешифраторів ВН та ГН; схем керування; лічильника загального часу; блоку живлення.

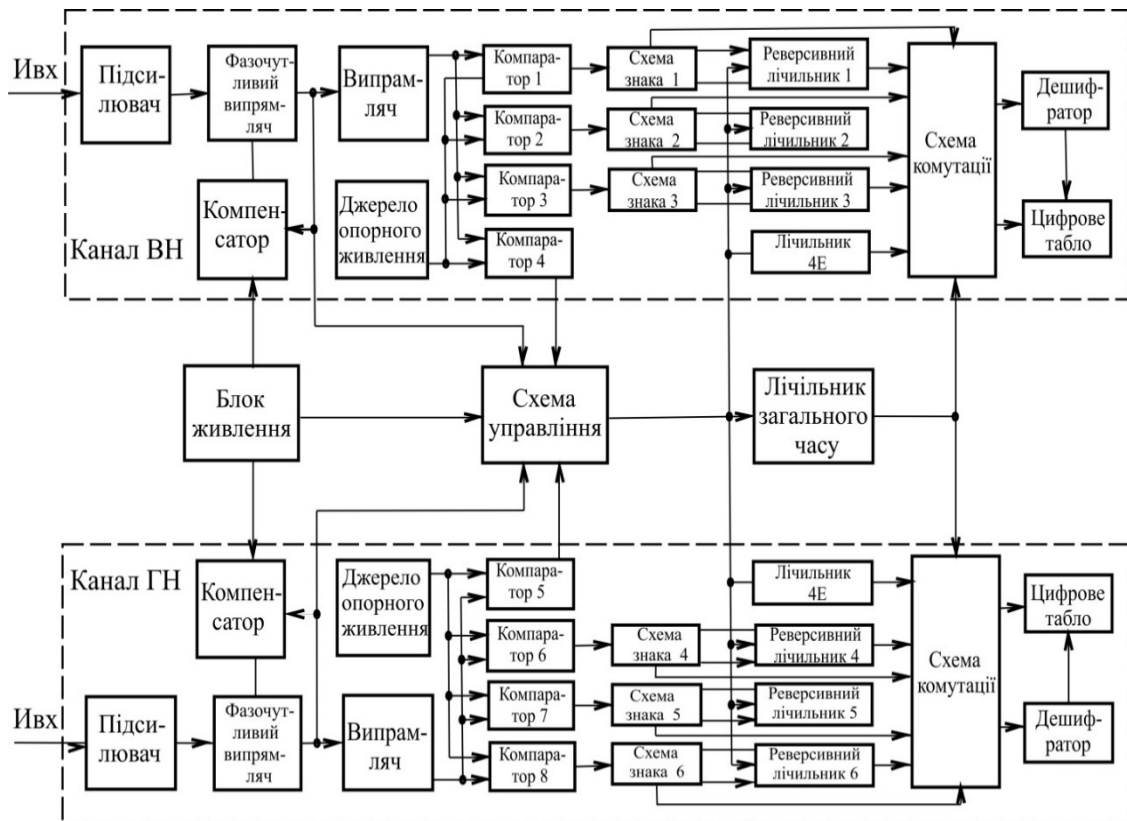


Рисунок 1.9 - Схема електрична функціональна приладу ПС

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.

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 в чотири рази середнє значення. Схеми знаку 1,2,3 (4,5,6), разом з 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 $4E$, то сигнал з компаратором 4(5) надходить на схему керування, яка здійснює подачу імпульсів на лічильник $4E$ та забороняє проходження імпульсів на реверсивні лічильники 1,2,3 та (4,5,6). Якщо ж сигнал помилки менше рівня $4E$, то імпульси генератора проходять на реверсивні лічильники 1,2,3 (4,5,6) та не проходять на лічильник $4E$.

Схема керування формує рахункові імпульси тільки під час виміру.

По закінченню виміру за допомогою схеми комутації, дешифратори видають інформацію про кількість імпульсів та знак висвічуються 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 з заїздів перемикач «ОПРОС» встановлюється в положення 1, 2, 3, 4 та ОВ. В кожному із положень знімаються покази табло та вносяться у таблицю 1.3.

Зона, в якій знаходиться значення середньої похибки, визначається за знаками безпосередньо після кожного заїзду. Зміна знаку з «-» на «+» для двох рівнів дає цю зону.

Наприклад. Показання цифрового табло для ВН: (- a_1), (- a_2), (a_3).

Середина похибки знаходиться у зоні між рівнями 0,2 – 0,4 т. д.



Таблиця 1.3 - Результати випробувань

Рівні похибок, т.д.		Положення перемикача «ОПРОС»	Знак		Показання цифрового табло	
ВН	ГН		ВН	ГН	ВН	ГН
0,1	0,15	1			a ₁	В ₁
0,2	0,3	2			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	

1.5.2. Визначення середньої 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 середньої похибки Е (рисунок 1.10).

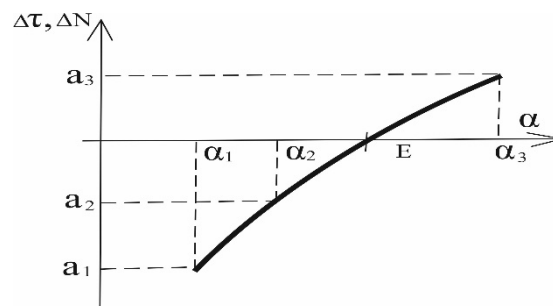


Рисунок 1.10 - Крива похибки стабілізації

Процент часу нестабілізованого стану А визначається за формулами:

$$A_{ВН} = a_4/a_5 \times 100\% \quad (1.3)$$

$$A_{ГН} = a_4/a_5 \times 100\% \quad (1.4)$$

За даними трьох вимірів визначаємо середнє значення середньої похибки та середнє значення процента часу нестабілізованого положення (для 2Е36-1 по осі абсцис відкладаємо рівні похибок 0,25, 0,5, 1,0 тоді.).



Висновки до розділу 1

1. Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів немає; вимоги до точності засобів та методів вимірювання, механічних величин стабілізаторів, стали значно вищими;

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

3. Оцінка точності стабілізаторів проводиться за методикою визначення середньої похибки на двох комплектах стабілізаторів на нормалізованій трасі у виробі замовника. Перевірка точності стабілізації на підприємстві-виробнику не проводиться;

4. Вимірювання динамічної похибки проводиться лише на стабілізаторах, які мають «незалежну стабілізацію»

5. Актуальною задачею, що потребує вирішення у даній монографії, є: запропонувати методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи стабілізації.

Список літератури до розділу 1

- 1 Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев [Електроний ресурс] // Учебное пособие. – Омск. – 2010.
- 2 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.
- 3 Безвесільна О.М. Оптимізація, ідентифікація, алгоритмічна обробка параметрів чутливих елементів стабілізатора легкої броньованої техніки /. О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, С.П. Маляров, Л.О. Чепюк // Монографія. –



- Житомир: ЖДТУ. – 2015. – С. 217.
- 4 Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння. / О.М. Безвесільна, В.П. Квасніков, В.Г. Цірук, В.В. Чиковані. // Монографія. – НПО «Пріоритети», Київ: ЖДТУ. – 2014. – С.176.
 - 5 Безвесільна О.М. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Ю.О. Подчашинський // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – С.201.
 - 6 Безвесільна О.М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – С.174.
 - 7 Цірук В.Г. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасніков, Л.О. Чепюк // Вісник Інженерної академії України. – № 2, 2014р. – С. 155 – 159.
 - 8 Цірук В.Г. 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.
 - 9 Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Боевая машина пехоты БМП-2. Часть. 1. [Електроний ресурс] /– 1987. – Retrieved fromt <http://armyman/info/books/id-44.html>.
 - 10 Безвесільна О.М. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин: підручник / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, Г.С. Тимчик // – Житомир: ЖДТУ. – 2011. – С.876.
 - 11 Безвесільна О.М. Особливості цільових задач, що вирішуються рухомими об'єктами та їх вплив на склад комплексів орієнтації і навігації / О.М. Безвесільна // Міжнародний науковий журнал «Технологічні комплекси» – № 1(7), 2013р. – С. 51 – 53.
 - 12 Левин И. Я. Справочник конструктора точных приборов./ Левин И. Я. // Москва, Оборонгиз. – 1962. – С.727.



- 13 Цірук В.Г. Компенсація похибок датчиків первинної інформації / В.Г. Цірук // VII Міжнародна науково-технічна конференція "Гіротехнології, навігація керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки", 23,24 квітня 2009 р.: Збірка доповідей. Ч1/К.: НТУУ "КПІ".– 2009.- С.36–42.
- 14 Бабаев А.А. Стабилизация оптических приборов / А.А. Бабаев // Л.:Машиностроение. – 1975. – С.158.
- 15 Безвесільна О.М. Принципи побудови системи для вимірювання механічних величин на основі двомірної інформації / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський // Вісник Інженерної академії України. – №3,1974, 2009. – С.52-55.



CHAPTER 2 / РОЗДІЛ 2
METHODS AND MEANS OF INCREASING
THE ACCURACY OF THE STABILIZATION COMPLEX
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КОМПЛЕКСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ

Метою даного розділу є запропонувати методи та засоби підвищення точності приладового комплексу стабілізації.

Факторами, що забезпечують підвищення швидкодії та точності стабілізації є заміна електромеханічних гіротахometrів, підвищення швидкості обробки інформації у цифровому обчислювачі блоку управління, підвищення швидкодії всіх складових частин виконавчого тракту – підсилювача потужності та електродвигуна.

2.1. Застосування твердотільних гіроскопів замість електромеханічних гіротахometrів ГТ46

Аналіз динамічних характеристик, приладового складу, структури та блоків відомих аналогових та цифрових стабілізаторів [2,3], побудованих на базі електромеханічних гіротахometrів ГТ46 та електродвигунів ЕДМ20, показує, що точність стабілізації при швидкодіючих неконтрольованих збуреннях (стрільба, рух виробу по пересіченій місцевості) не може бути значно підвищена за наявності в електромеханічних гіротахometrів значного часу перебігу перехідних процесів, відповідно та низької смуги пропускання частот.

Крім обмеження по точності стабілізації, що визначають ГТ46 та ЕДМ20, такт роботи обчислювача цифрового блоку управління складає 400 Гц та прийнятий у зв'язку з наявністю у складі стабілізатора блоку живлення для ГТ46, що також є стримуючим фактором для підвищення точності. Так, при тривалості зовнішніх збуджуючих ударів 5 мс, при дискретності роботи обчислювача 2,5 мс, реакція стабілізатора на усунення дії збуджуючих моментів може запізнюватись на 2,5 мс – тобто рівно на половину часу



збуджуючого удару, що призводить до додаткової похибки.

Підвищення швидкодії електромеханічних гіротахometrів неможливе при збереженні його принципу роботи - компенсація гіроскопічного моменту пружністю торсіону. Запропонований варіант модернізації гіротахometrа за рахунок підвищення жорсткості торсіону та зменшення кута розвороту гіровузла повинен був збільшити смугу пропускання на 40%. Істотне підвищення смуги пропускання можливе лише при застосуванні гіротахometrів компенсаційного типу, в яких компенсація гіроскопічного моменту виконується спеціальним електричним датчиком моменту – електричною пружиною.

Швидкодія характеризується смугою пропускання частот, часом швидкодії електродвигунів та підсилювачів, моментом навантажень на електроприводи, а також дискретністю за часом цифрового обчислювача інформації.

Проведений аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів не має.

Факторами, що забезпечують підвищення швидкодії та точності стабілізації є заміна електромеханічних гіротахometrів, підвищення швидкості обробки інформації у цифровому обчислювачі блоку управління, підвищення швидкодії всіх складових частин виконавчого тракту – підсилювача потужності та електродвигуна.

Враховуючи наведене вище, можна сказати, що для підвищення точності необхідно реалізувати наступні технічні рішення.

1. Застосувати більш точні датчики кутової швидкості зі смугою пропускання частот 100Гц та вище (чим вище, тим скоріше реакція на збуджуючі впливи);

2. Збільшити частоту роботи обчислювача до ≈ 1000 Гц.

Результати математичного моделювання показують, що при збільшенні частоти до 2 кГц динамічна похибка стабілізації зменшується у 2 рази по зрівнянню з частотою 400 Гц, що мають сучасні стабілізатори;

3. Застосувати електродвигуни з меншими, по зрівнянню з застосованими



двигунами, електромагнітними та електромеханічними постійними і збільшеними пусковими та номінальними моментами. Доцільно підвищити номінальний момент до (2,6-3) Нм, а потужність до (800-1000) Вт;

4. Усунути вплив нульових сигналів ДКШ, що призводять до самовідведення вертикального та горизонтального каналів при функціонуванні стабілізатора в режимі підвищеної точності. (режим «УПР»);

5. Змінити модель побудови стабілізатора з сумісної стабілізації, коли вертикальний та горизонтальний стабілізовані канали «жорстко» поєднанні з приладом спостереження за місцевістю, або «залежної» стабілізації на автономну або «незалежну» стабілізацію, де ці прилади не мають «жорсткого» поєднання.

Для реалізації незалежної стабілізації необхідно включення до складу стабілізатора та СУВ спеціального приладу з стабілізованим полем зору (СПЗ) або стабілізованою лінією візування поля зору (СЛВ);

6. Розробити метод вимірювання динамічної похибки стабілізації, що дозволить проводити вимірювання одного з головних технічних параметрів - точності стабілізації без проведення додаткових польових випробувань.

Розглянемо всі визначені вище шляхи зміни моделі побудови стабілізатора, що можуть призвести до покращення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних величин та стабілізації.

Використання як чутливих елементів електромеханічних гіротахometrів, на сьогодні, у багатьох випадках виправдано у зв'язку з низьким рівнем шумів, гарними динамічними характеристиками, задовільними характеристиками по точності, напрацьованими технологічними процесами виготовлення. Але механічні гіротахometrи мають ряд недоліків: час готовності до роботи визначається часом розгону гіротахometrа, низька смуга частот, вихідні сигнали видаються в аналоговому вигляді, незадовільна стійкість до механічних ударних факторів, необхідність додаткового перетворювача енергії для живлення гіромоторів.

Один з визначених шляхів підвищення точності приладового комплексу



стабілізації є заміна традиційних електромеханічних гіроскопічних приладів, які мають вихідну аналогову інформацію, на твердотільні гіротахеометри (кориолісові вібраційні гіроскопи /КВГ/, волоконно-оптичні гіроскопи /ВОГ/, MEMS) з цифровою вихідною інформацією та значно розширеною смугою пропускання. Крім підвищеної швидкодії, вони мають наступні переваги перед електромеханічними: ресурс роботи у 15–20 разів вищий тому, що вони не мають обертаючих частин, які обмежують ресурс роботи.

Технічні характеристики сенсорів кутової швидкості за даними джерел наведені у відповідних таблицях (ГТ46 таблиця 2.1 [4,5], КВГ таблиця 2.2 [6,7], ВОГ ВГ910Ф таблиця 2.4 [8], MEMS G20-75-100 таблиця 2.3 [9-13]).

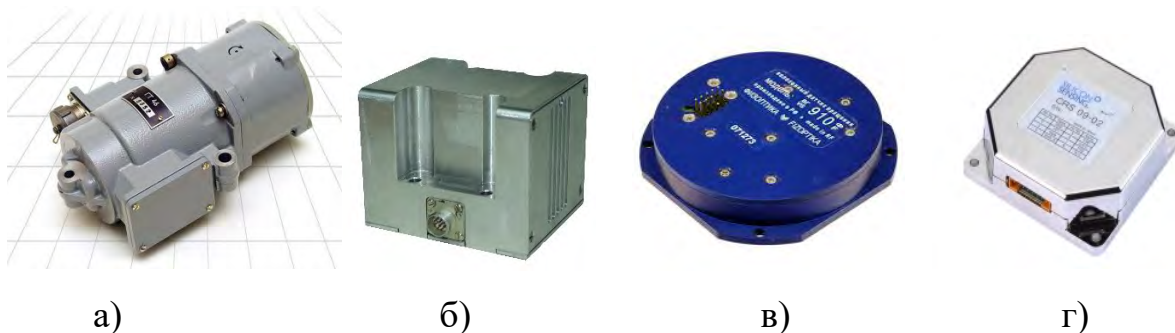


Рисунок 2.1 - Датчики кутової швидкості

а) – електромеханічний гіроскоп ГТ46; б) – кориолісовий вібраційний гіроскоп КВГ26; в) – оптико-волоконний гіроскоп ВГ910Ф; г) – мікромеханічний гіроскоп (MEMS) CRS03

Так, КВГ відрізняються від традиційних електромеханічних гіроскопів підвищеною надійністю та довговічністю (таблиця 2.2) тому, що вони не мають обертаючих частин, широку смугу пропускання та стійкість до механічних впливів.

Оцінка середнього часу напрацювання на відмову (СЧНВ) проводилась за даними випробувань багатьох КВГ (таблиця 2.5) з урахуванням коефіцієнта Е навколишнього середовища у відповідності з стандартами США MIL-HDBK-217FNotice2 [4].



Таблиця 2.1 - Технічні характеристики ГТ46

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 50
2	Смуга частот	Гц	30
3	Поріг чутливості	град/с	0,015
4	Масштабний коефіцієнт (МК)	В·с/град	0,17
5	Асиметрія вихідної характеристики	%	10
6	Величина сигналу на нерухомій основі	мВ	100
7	Зона застою	мВ	20
8	Перехресна чутливість	мВ·с/град	1
9	Декремент загасання	–	0,7
10	Власна частота	Гц	$20 \div 25$
11	Живлення від джерела 3-фазного струму	В/Гц	36/400
12	Струм споживання	А	0,4
13	Час готовності	с	120
14	Час безперервної роботи	год	6
15	Ресурс	год	500
16	Габаритні розміри	мм	190×124× 86
17	Маса	кг	2,5

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики КВГ

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	$\pm 200, \pm 400$
2	Смуга частот	Гц	не менше 100
3	Масштабний коефіцієнт (МК)	1/(град/с)*	0,04
	Нормальні умови +25 °С		



Продовження Таблиці 2.2

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
4	Лінійність МК	%	≤0,04
5	Повторюваність МК від вкл. до вкл	%	≤0,03
6	Повторюваність зміщення нуля	град/год	5
8	Шум (1σ)	град/год	0,003
	Температурний діапазон від (-40 до+75)°C		
9	Повторюваність зміщення нуля	град/год	5
10	Стабільність зміщення нуля	град/год	<5
11	Випадковий шум (1σ)	град/год	0,01
12	Температурна стабільність МК (включаючи гістерезис та градієнт температур, 1	%	0,2
	Умови експлуатації		
13	Робочий температурний діапазон	°C	-40 ÷ +75
14	Середнє напрацювання на відмову (СНВ)	ч	> 500000
	Параметри живлення		
15	Напруга живлення	В	+(15 ÷ 30)
16	Споживаєма потужність	Вт	<2,5
17	Інтерфейс	RS-422, RS-485	
18	Габарити: 1. чутливий елемент (ЧЕ) + Ел. Блок 2. єдина конструкція	1. ЧЕ: Ø40×h27мм Ел. Блок 50×50×25 2. 72×62×58мм	
19	Маса:	1. 200гр. 2. 400 гр.	
20	* Вихідний код /МК = град/с		



Таблиця 2.3 - Технічні характеристики МЕМС G20-075-100

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 75
2	Смуга частот	Гц	100
3	Коефіцієнт передачі	мВ/(град/с)	15
4	Випадковий шум	град/с/Гц	0,05
5	Точність виставки	мрад	± 17,5
6	Час готовності	с	н/д
7	Стійкість до ударів	g	500
8	Температурний діапазон	°С	-40 ÷ +85
9	Маса	г	30
10	Живлення	В	н/д

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики ВОГ910Ф

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення мін/макс
1	Масштабний коефіцієнт (МК), (+20°С)	мВ/(град/с)	5,5/7,5
2	Стабільність МК, СКВ при постійній температурі, 1 СКВ	%	-/0,2
4	Температурний коефіцієнт МК	% / * °С	0/0,1
5	Зсув нуля	мВ	-/0,4
6	Стабільність зсуву нуля при постійній температурі, 1 СКВ	град/год	-/4
7	Температурний коефіцієнт зсуву нуля	мкВ/ °С	-/3
8	Діапазон швидкостей, що вимірюються	°/с	370
9	Спектральна платність шумової складової вихідного сигналу	мкВ/Гц	-/6
10	Час готовності	с	-/0,2



Продовження Таблиці 2.4

№	Параметри		Одиниці виміру	Значення
11	Струм живлення +5В (20 °С)		мА	-/190
12	Смуга частот по рівню 0,7		кГц	0,4/-
13	Швидкість порту (по умовчання)		кБод	-
14	Маса (приблизно)		г	120
15	Габарити (без фланців та роз'єму) 82,3×82,3×20		мм	82,3×82,3 ×20
16	Температура робоча		°С	-40 ÷ +70
17	Температура гранична (2 години)		°С	-55 ÷ +85
18	Температура робоча		°С	-40 ÷ +70
19	Температура гранична (2 години)		°С	-55 ÷ +85
20	Вібрація, СКВ		g /Гц	12/20...20 00
21	Удари		мс/g	1/150
22	Прискорення		g	5
23	Параметри надійності	Середнє напрацювання на відмову	год	60000
		Термін служби (прогноз)	років	15

Таблиця 2.5 - Дані по середньому часу напрацювання на відмову КВГ

Умови довкілля по застосуванню	СЧНВ*Дов. імовірність 99% годин (років)	СЧНВ*Дов. імовірність 99,9% годин (років)
Наземні рухливі об'єкти, E=4,0	408042 (46)	271929 (31)
Морські об'єкти в приміщенні, E=4,0	408042 (46)	271929 (31)
Літаки з екіпажем, грузом, винищувачі, E=5,0	326434(37)	217543 (24)



2.2. Підвищення смуги пропускання та частоти інформаційного обміну

Для підтвердження смуги пропускання електромеханічних гіротахometrів ГТ46 були проведені експериментальні дослідження, результати яких наведено у розділі 4 п. 4.2. Результати досліджень показали, що смуга пропускання гіротахometrів ГТ46 знаходиться у діапазоні (32,2 – 35,9) Гц. Ці результати експериментальних досліджень підтверджують данні наведені в таблиці 2.1, та ті данні, що наводяться у різних технічних джерелах інформації стосовно того, що смуга пропускання ГТ46 дорівнює – 30 Гц.

Із всіх технічних характеристик нових твердотільних ДКШ оберемо найбільш привабливі тим, що вони мають найбільші значення у порівнянні з ГТ46 (це смуга пропускання частот, дискретність обміну інформацією) та зможуть покращити показники точності та швидкодії стабілізатора.

Оцінка впливу смуги пропускання ГТ46 (30 Гц), MEMS (100 Гц) та ВОГ ВГ910Ф (400 Гц) та дискретності обчислення інформаційного обміну 1,7 мс (600 Гц) та 1,0 мс (1000 Гц) була проведена методами математичного моделювання. Для виконання цих обчислень було необхідно: визначити математичні моделі ДКШ, задіяні при моделюванні; визначити, які зовнішні збудження є типовими для даного класу об'єктів та будуть при цьому задіяні при моделюванні; провести роботи по моделюванню параметрів стабілізатора для кожного ДКШ з оцінкою зміни точнісних характеристик стабілізатора, провести обов'язкове дослідження впливу смуги пропускання та дискретності обчислення на параметри стабілізатора.

При моделюванні використовувались математичні моделі гіроскопічних вимірювачів швидкості ГТ46, КВГ, MEMS G20-075-100, які представлені на рисунку 2.2.

В основу аналізу результатів моделювання було покладено оцінку динамічної похибки стабілізатора та його реакцію на імпульсний вплив.

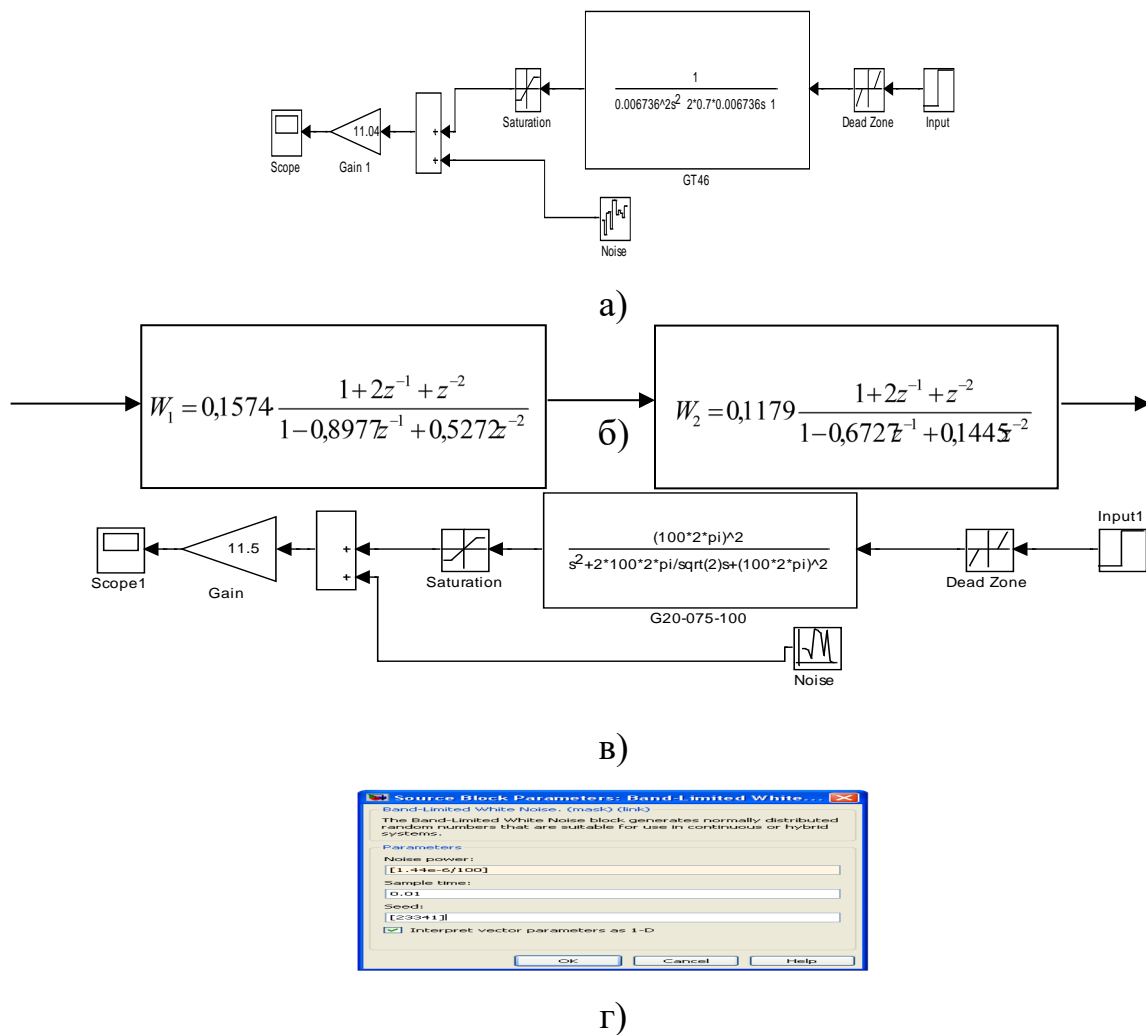


Рисунок 2.2 - Математичні моделі ДКШ:

a – GT46, б – КВГ, в – MEMC G20-075-100, г – Band-limited White Noise

Оцінка динамічної погрішності стабілізатора проводилася на підставі дослідження реакції на гармонійний сигнал, що подавалася на вхід ДКШ (рисунок 2.3). Амплітуда та частота змінення сигналу, що відповідає коливанням корпусу виробу з амплітудою $2,5^\circ$ та частотою 0,8 Гц аналогічно методам випробувань 2E52.

Параметри імпульсних впливів приймалися у відповідності з даними, отриманими з ДП «ХКБМ», при проведенні випробувань стабілізатора на зовнішні ударні навантаження – тривалість імпульсу 5,0 мс з амплітудою 0,5 рад/с, що відповідає вихідному сигналу GT46 на рівні 6В.

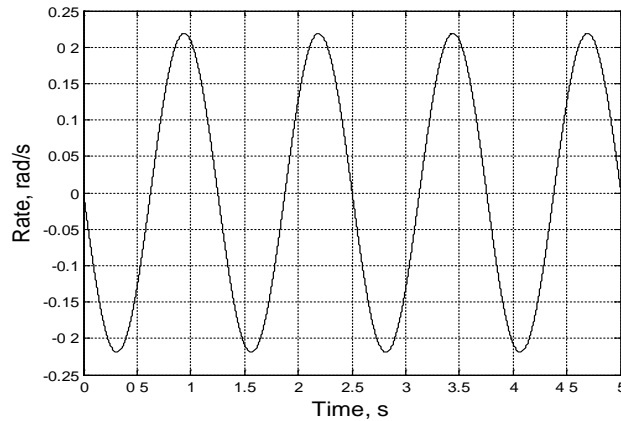


Рисунок 2.3 - Гармонійний вплив, що задається на вході ДКШ

Проведений порівняльний аналіз із застосуванням методів математичного моделювання підтвердив доцільність застосування в якості сенсорів кутової швидкості твердотільних гіротахometrів за рахунок більш високої смуги пропускання та підвищеної частоти інформаційного обміну, що у свою чергу призводить до зменшення похибок та покращення характеристик стабілізаторів.

За результатами досліджень зроблено позитивні висновки про те, що застосування у схемі стабілізаторів твердотільних ДКШ дозволяє отримати підвищення точнісних характеристик за умови, що буде забезпечено дискретність обчислення сигналу управління на рівні не більш 1000 Гц (1,0 мс) та полосу пропускання не менше 100 Гц.

2.3. Підвищення швидкодії за рахунок покращення технічних характеристик приладового складу стабілізатора

Для оцінки постійних часу електродвигунів, що використовуються у стабілізаторах проведено експериментальні дослідження двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20. Результати проведених робіт наведені окремим поданням в розділі 4 п. 4.1.

Для підвищення швидкодії необхідно використовувати електродвигуни з меншими по зрівнянню з застосованими двигунами електромагнітними та



електромеханічними постійними та збільшеними пусковими та номінальними моментами. Доцільно підвищити номінальний момент до (2,6-3) Нм, а потужність до (800-1000) Вт. Порівняльні технічні характеристики електродвигунів наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Порівняльні характеристики електродвигунів

Параметри двигуна	ЕДМ03	ЕДМ20	ЕДМ20М	ЕДМ14	ЕДМ600	БДПТ
Напруга живлення	23 В	23 В	23 В	23 В	23 В	-
Напруга зрушення у режимі холостого ходу, В	2,0	-	-	-	0,7	-
Постійна е.р.с, Вс/рад	0,052	0,053	-	0,056	0,069	-
Опір обмотки, Ом	0,22	0,125	0,125	0,45	0,07	0,067
Постійна часу якоря, с	$0,32 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	-	-	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$
Момент інерції якоря, кгмс ²	$3,15 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	-	-
Момент опору, Нм	1,3	1,3	1,3	0,57	1,9	2,0
Постійна моменту навантаження на валу, Нм/А	0,052	0,054	-	0,056	0,069	-
Пусковий момент, Нм	9,33	7,5	7,48	-	13,6	-
Потужність, Вт	470	400	432	180	650	800
Частота обертання, об/хв	3500	3000	3000	3000	3700	4000
Пусковий струм, А	130	180	131	60	240	270
Номінальний струм, А	31	-	25,7	-	23,7	-
Електромеханічна постійна часу, с	$9,31 \cdot 10^{-3}$	$26 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Електромагнітна постійна часу, с	$0,32 \cdot 10^{-3}$	-	$0,26 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Перегрів у номінальному режимі °С	113	-	133	-	104	-



Експериментальні дослідження виявили можливість зменшити індуктивність дроселів в LC-фільтрах підсилювачів потужності зі збереженням припустимого рівня пульсацій, створюваних силовими мостовими комутаторами, що працюють у режимі ШІМ на активно-індуктивне навантаження обмоток якорів електродвигунів.

У результаті цих досліджень постійну часу підсилювачів потужності зменшено до 0,3 мс у порівнянні з 8 мс. Ці доопрацювання введено у блоках БКД, що виробляються серійно, а також у блоці БКД, що працює з двигуном підвищеної потужності ЕДМ600.

Застосування безколекторних двигунів постійного струму [14,15] має ряд переваг над звичайними колекторними двигунами:

- більше строк служби ніж колекторних;
- висока швидкодія та динаміка, точність позиціювання;
- вищий ККД;
- швидкий набір максимальної швидкості обертання;
- більша потужність;
- не потребує додаткового охолодження;
- відсутнє іскріння;
- широкий діапазон змінювання частоти обертання;
- безконтактність та відсутність вузлів, що потребують технічного обслуговування;
- збільшений термін служби, висока надійність і підвищений ресурс роботи за рахунок відсутності електричних контактів, що ковзаються.
- низький перегрів електродвигуна, при роботі в режимах з можливими перевантаженнями
- більш низький рівень електромагнітних шумів.

У той же час слід відмітити і ряд недоліків безколекторних двигунів постійного струму:

- висока собівартість;



- не можливість їх використання без драйвера;
- проблемний ремонт, особливо при виконанні перемотки двигуна.

У таблиці 2.6 у графі БДПТ наведено технічні характеристики БДПТ, яким повинен відповідати двигун, що входить до складу стабілізатора.

2.4. Застосування нової моделі побудови стабілізатора

Технічне завдання на розробку першого українського стабілізатора передбачало створення стабілізатора, який за своєю моделлю побудови відповідав стабілізатору БМП-2. Враховуючи це, передбачалося, що стабілізатор СВУ-500 повинен був замінити стабілізатори 2ЕЗ6-1 (2ЕЗ6-4) які були, застосовані в БМП-2. Тому, у стабілізаторах СВУ-500, як і в їхніх прототипах 2ЕЗ6-1(4), було застосовано модель їх побудови з застосуванням принципу «силової» стабілізації.

Цей принцип стабілізації полягає в тому, що марка приладу обзору місцевості «жорстко» пов'язана з приводами вертикального та горизонтального каналів наведення, а наведення марки виконується з пультів управління стабілізатором, при цьому, необхідно повертати всю апаратуру по каналам ГН та ВН разом з корпусом, у якому вони розташовані та мають великі моменти інерції.

Це позначається як на точності наведення оператором від пультів, так і на точності стабілізації. Так, середня похибка стабілізації БМП-2 при русі машини по нормалізованій трасі не повинна перевищувати для каналу ГН та ВН – ≤ 1 т. д. [16,17].

Середня помилка стабілізації цифрового стабілізатора у складі головного виробу, яка була перевірена при проведенні Державних випробувань виробу, показала, що помилка по каналу ГН $\approx 0,42$ т. д., а по каналу ВН $\approx 0,98$ т. д., що відповідає вимогам технічного завдання. При цьому необхідно відзначити, що моменти інерції приводів наведення перевищують аналогічні параметри



БМП-2.

З викладеного вище можна зробити висновок, що підвищення точності стабілізації (зменшення середньої помилки стабілізації до величини не більш 0,5 т. д.) у стабілізаторах, які побудовані за принципом «силової» стабілізації має значні конструктивні труднощі.

Таким чином, шляхом для підвищення точності стабілізатора є відмова від традиційної схеми так званої «силової» стабілізації. Для зменшення похибок стабілізації та підвищення точності до складу системи управління апаратурою виробу пропонується ввести оптико-електронний прилад обзору місцевості з стабілізованим полем зору (ОЕМ-ПСЗ), який буде передавати інформацію по інтерфейсних лініях зв'язку у вигляді цифрового коду на монітор оператора. В такому випадку, оператор буде виконувати наведення поля зору приладу ОЕМ-ПСЗ, що має масу та моменти інерції в десятки разів менші у порівнянні з корпусом, в якому розміщена апаратура наведення каналів ВН та ГН. Управління у цих машинах апаратурою наведення каналів ВН та ГН буде виконуватись по сигналами датчиків кутів, які знаходяться у приладі ПСЗ.

Така модель побудови має направлену дію на зниження амплітуд та кутових швидкостей коливань поля зору приладу обзору місцевості – стабілізація поля зору або «незалежна» стабілізація. Практично всі вироби (окрім БМП-3) були побудовані за моделлю «залежної» стабілізації поля зору приладу обзору місцевості, тобто ця модель передбачає «жорсткий» зв'язок поля зору приладу обзору місцевості, з приводами вертикального та горизонтального каналів наведення, що значно покращує умови спостереження за місцевістю через таке «жорстке» поєднання. Такий позитивний ефект від «жорсткого» поєднання призводить до великих похибок стабілізатора – коливань поля зору приладу обзору місцевості разом з приводами вертикального та горизонтального каналів наведення, у межах середньої похибки стабілізації відносно напрямку на об'єкт, за яким проводиться спостереження.

Побудова гіростабілізатора конструктивно може виконуватися на



треступневих або двоступневих гіроскопах. Зовнішня рамка гіроскопа розміщується на одному або двох підшипниках, забезпечуючи обертання головного дзеркала приладу в горизонтальній площині (за курсом) на кут $n \times 360^\circ$ градусів.

У такий спосіб для системи стабілізації виділяються дві складові: це система навігації (СН) і система стабілізації (СС). Приладовий склад такої системи стабілізації наведений на рисунку 2.4.

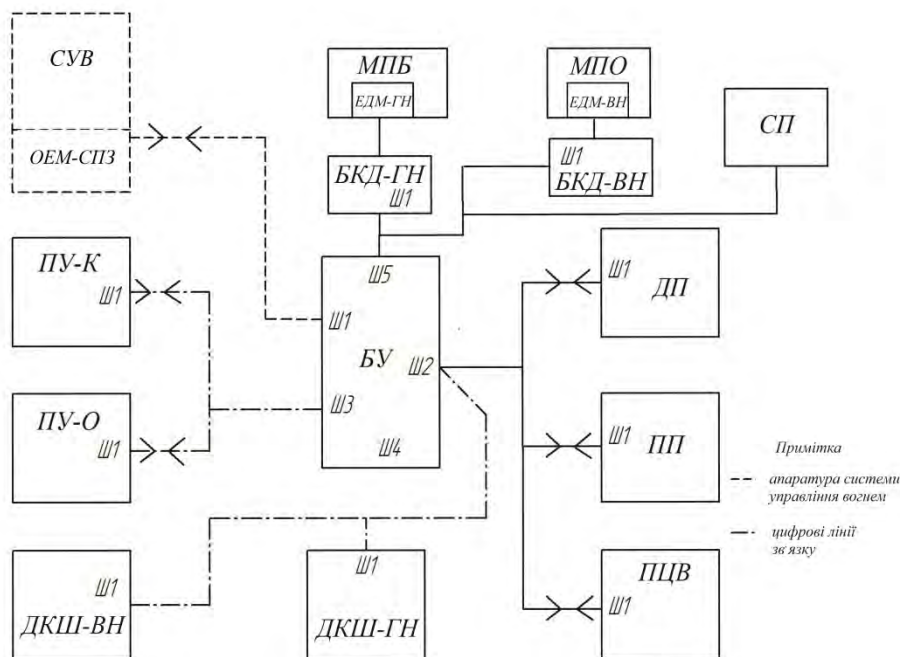


Рисунок 2.4 - Блок схема приладового складу стабілізатора з використанням оптико-електронного модуля з стабілізованим полем зору

На Рисунок 2.4 наведені позначення: СУВ – система управління виробом; ОЕМ-СПЗ – оптико-електронний модуль з стабілізованим полем зору; ПУ-К та ПУ-О – пульти управління стабілізатором; ДКШ-ВН, ДКШ-ГН датчики кутової швидкості по каналу ВН та ГН відповідно; БКД-ВН, БКД-ГН блоки керування двигунами по каналам ВН і ГН відповідно; БУ- блок управління стабілізатором, ПП – прилад приведення каналу ГН; ДП – датчик положення по каналу ВН, МПБ – механізм повороту горизонтального каналу; МПО – механізм підйому вертикального каналу; СП – статичний перетворювач (при необхідності), ПЦВ – прилад обзору місцевості



На рисунках 2.5 а) та б) наведено структурно-функціональні схеми привода ГН та привода ВН стабілізатора відповідно.

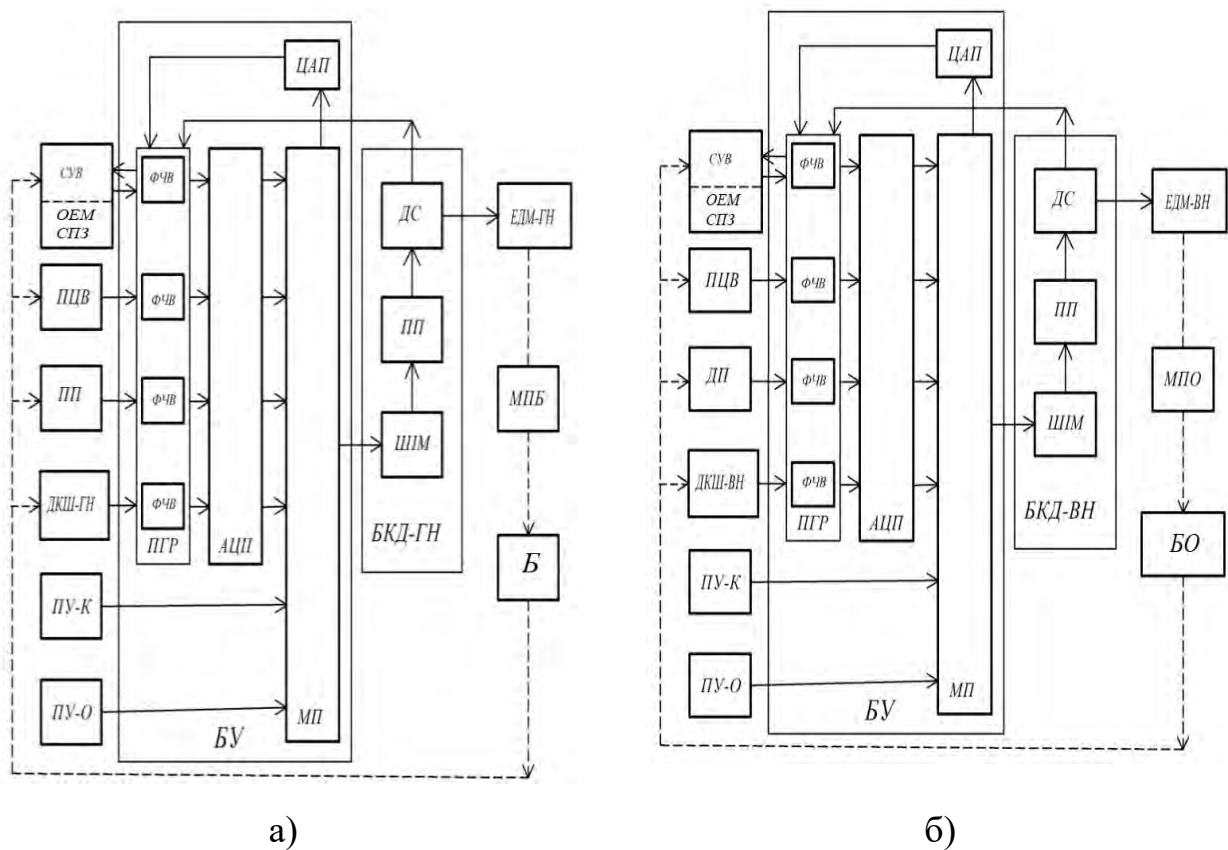


Рисунок 2.5 - Структурні схеми приводів наведення стабілізатора:

а) приводу ГН

б) приводу ВН

де: Б – блок наведення горизонтального каналу, БО – блок наведення горизонтального каналу; СУВ – система управління виробом, ОЕМ-СПЗ – оптико-електронний прилад з стабілізованим полем зору, ПП – прилад приведення, ДКШ-ГН(ВН) – датчики кутової швидкості по каналам ГН та ВН; ПУ-К(О) – пульти управління стабілізатора; ПГР – пристрій гальванічної розв'язки, ФЧВ – фазочутливий випрямляч, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, МП – мікропроцесор, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, ДС – датчик струму, ПП – підсилювач потужності, ПЦВ – прилад приведення на обраний об'єкт на місцевості, ШИМ – широтно-імпульсний модулятор, БКД-ГН(ВН) – блок керування двигунами по каналам ВН та ГН, ЕДМ-ГН(ВН) – двигуни по каналам ГН та ВН, МПБ – механізм повороту горизонтального каналу, МПО – механізм підйому вертикального каналу



Введення OEM-СПЗ до СУВ приводить до змін у блоці управління стабілізатора. У зв'язку з необхідністю перетворення (демодуляції й оцифрування) сигналів датчиків кута приладу OEM-СПЗ (при необхідності) по каналах ГН і ВН до блоку управління введено пристрої гальванічної розв'язки, що будуть оцифровувати ці сигнали з подальшою їх обробкою в обчислювачі мікропроцесора (МП).

Режим наведення з використанням сигналів OEM-ПСЗ (рисунок 2.6) забезпечується зсувом лінії візування приладу за сигналами пульта оператора, які подаються на датчики моменту по осях зовнішньої й внутрішньої рамки гіроскопа OEM-ПСЗ. Під впливом цих моментів відбувається зсув гіроскопа OEM-ПСЗ у вертикальній і горизонтальній площині. Зсув гіроскопа OEM-ПСЗ приводить до зсуву вихідної осі (розвороту головного дзеркала) приладу.

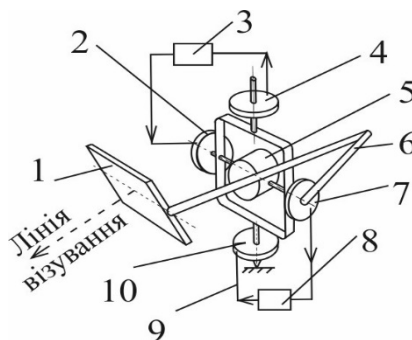


Рисунок 2.6 - Прилад із стабілізованим полем зору:

*1 – стабілізоване дзеркало; 2,10 – датчики моменту; 3,8 – підсилювачі сигналу;
4,7 – датчики кута; 5 – гіроскоп; 6 – шарнір*

Враховуючи обмеження швидкості зсуву лінії візування приладу в межах 20°/с наведення, з використанням приладу у складі СУВ, забезпечується в режимах «АВТ» та «УПР». Наведення у режимах «ПАВ» та «ЦВ» забезпечується за сигналами датчиків кутової швидкості ДКШ-ГН, ДКШ-ВН.

Аналогічно, перетворенням сигналу ДКШ-ГН та ДКШ-ВН (при використанні електромеханічних гіротахometrів) у ПГР блоку управління, перетворюються сигнали ПП, ДП, ПЦВ.

У БУ сигнал OEM-ПСЗ у цифровому вигляді підсумовується у



вертикальному каналі із сигналами ДП у підсумовуючому підсилювачі. Сумарний сигнал (помилка стабілізації) подається на інтегратор компенсації статичної помилки. Для одержання необхідних характеристик привода ВН (помилка стабілізації та часу перехідного процесу) використовується сигнал зворотного зв'язку по швидкості зміни помилки стабілізації, яка одержується диференціюванням сигналу, помилки стабілізації диференціатором, а так само, сигнал місцевого зворотного зв'язку по струму навантаження електродвигуна, сформований датчиком струму підсилювача БКД-ВН, диференціальним підсилювачем, підсилювачем датчика струму. Усі ці сигнали підсумовуються на суматорі підсилювача на виході БУ.

Модель побудови формування керуючих сигналів по каналу ГН збігається з моделлю побудови каналу ВН, тільки зсув осі візування приладу з ОЕМ-ПСЗ оцінюється з використанням сигналів приладу ПП.

Для зменшення похибок стабілізації та підвищення точності до складу системи управління виробом пропонується ввести оптико-електронний прилад обзору місцевості з стабілізованим полем зору (ПСЗ), який буде передавати інформацію по інтерфейсних лініях зв'язку у вигляді цифрового коду на монітор оператора. В такому випадку оператор буде виконувати наведення поля зору приладу ПСЗ, що має масу та моменти інерції в десятки разів менші у порівнянні з приводами вертикального та горизонтального каналів. Управління приводами вертикального та горизонтального каналів в цих виробках буде виконуватись за сигналами датчиків кутів, які знаходяться у приладі з ПСЗ.

Така модель побудови має направлену дію на зниження амплітуд та кутових швидкостей коливань поля зору приладу обзору місцевості – стабілізація поля зору або «незалежна» стабілізація. В стабілізаторах з «незалежною» стабілізацією інформація про збіг розузгодження між положенням стабілізованого поля зору приладу ПСЗ та апаратурою наведення горизонтального та вертикального каналу буде відображатись на екранах монітора оператора системи управління виробом.

Срединна похибка сучасних стабілізаторів 2Е52, що мають у своєму складі



прилад з стабілізованим дзеркалом, не перевищує 0,4 т.д. [18].

Розглянемо функціонування приводу ВН режимі «ПАВ» за структурно-функціональною схемою стабілізатору з використанням OEM-СПЗ (рисунок 2.7). Основними елементами, що забезпечують роботу приводу ВН, є: ДКШ-ВН, пульт управління ПУ-О (ПУ-К), блок управління, до якого входять основні складові частини: ланка 2 (фазочутливий випрямляч), ланка 3-1 (інтегратор I-ВН), ланки 1-1 – 1-6 (ключові пристрої), ланка 5 (інтегратор компенсації статичної похибки), ланка 6 (підсилювач сигналу), ланка 7 (диференціатор), ланка 4-1 та 4-2 (підсумовуючі підсилювачі (ППК-ВН)), ланка 8 (підсилювач коригуючий), ланка 9 (коригуючий пристрій), ланка 12 (диференціальний підсилювач сигналу датчика струму), ланка 11 (нелінійна ланка з зоною нечутливості), ланка 10 (пристрій обмеження), підсилювач потужності БКД-ВН, датчик струму ДС, електродвигун ЕДМ-ВН; МПО – механізм підйому вертикального каналу, Б – блок наведення вертикального каналу.

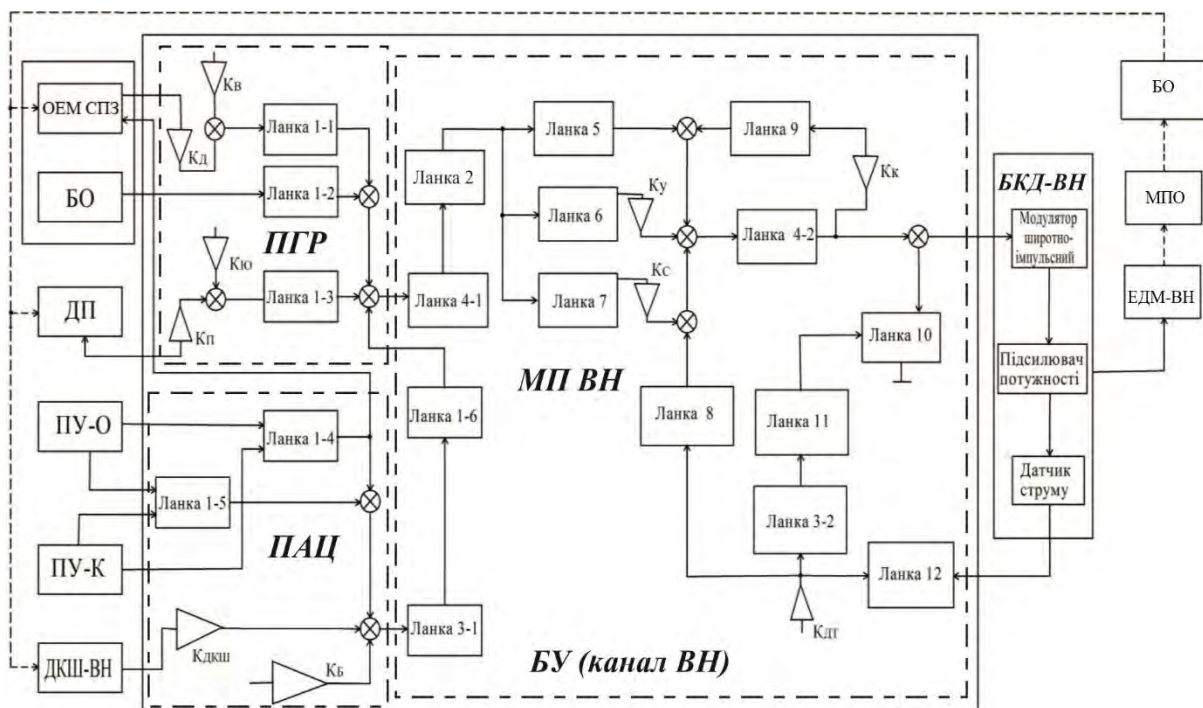


Рисунок 2.7 - Схема структурно-функціональна каналу ВН стабілізатору з використанням OEM-СПЗ

Принцип дії приводу ВН у режимі ПАВ заснований на тому, що при русі



виробу разом з корпусом під дією зовнішніх сил відхиляються всі складові конструкції виробу від вихідного положення, захоплюючи за собою приводи наведення по каналах ГН та ВН.

Разом із корпусом виробу відхиляються приводи каналів ВН і ГН та відхиляється ДКШ-ВН, що установлений у приводі ВН. ДКШ-ВН виробляє сигнал, пропорційний величині швидкості й відповідний (за фазою) напрямку відхилення каналу ВН у вертикальній площині. Сигнал із ДКШ-ВН, який пропорційний швидкості відхилення приводу ВН у вертикальній площині та відповідний (по фазі) напрямку відхилення приводу ВН у площині ВН, проходить через ланку з коефіцієнтом налаштування ДКШ, ланку 2-1 (фазочутливий випрямляч) та надходить на вхід ланки 3-1 (інтегратор). Інтегратор виробляє сигнал, пропорційний інтегралу швидкості, що відповідає величині кута відхилення корпусу від вихідного положення (*похибка стабілізації*). Сигнал з ланки 3-1 через ланку 1-3, ланку 4-1 (підсилювач підсумовуючий), ланку 2-2 (фазочутливий випрямляч), ланку 6 (підсилювач сигналу), коефіцієнт налаштування K_y , ланку 4-2 (підсилювач підсумовуючий) надходить на вхід широтно-імпульсного модулятора (ШІМ) блоку БКД-ВН, який підсилює його по потужності та потрапляє на обмотку якоря двигуна ЕДМ-ВН.

ЕДМ-ВН через механізм підйому МПО та зубчастий сектор повертає привод ВН у бік, протилежний відхиленню корпусу виробу, утримуючи його у заданому напрямку на об'єкт спостереження з похибкою у межах величини похибки стабілізації.

Для одержання необхідних динамічних характеристик привода ВН (мінімальної похибки стабілізації та якості перехідного процесу) використовується:

- сигнал зворотного зв'язку за швидкістю зміни похибки стабілізації, який отримується диференціюванням сигналу похибки стабілізації диференціатором (ланка 7);
- сигнал місцевого зворотного зв'язку по струму ЕДМ-ВН, сформований



датчиком струму, ланкою 12 (диференціальним підсилювачем сигналу датчика струму), коефіцієнтом налаштування ДС, ланкою 8 (коригуючим підсилювачем);

– сигнал зворотного зв'язку по похибці стабілізації, що формується ланкою 9 (коригуючий пристрій) БУ.

Сигнали зворотного зв'язку по струму виконавчого двигуна, зворотного зв'язку по похибці та швидкості зміни похибки стабілізації сумуються на вході ланки 4-2 (підсумовуючого підсилювача) БУ.

Сумарний сигнал з виходу ланки 4-2 надходить на вхід БКД-ВН. Наведення апаратури виробу у вертикальній площині виконується за допомогою пультів ПУ-О (ПУ-К), сигнал з яких, через ланку 1-5 (ключовий пристрій), надходить на вхід ланки 3-1 (інтегратор І-ВН) та підсумовується з сигналом ДКШ-ВН. З виходу ланки 3-1 сигнал, що пропорційний сумі сигналів ДКШ та ПУ-К або ПУ-О, надходить на ланку (підсилювача підсумовуючого) і далі на блок БКД-ВН, ЕДМ-ВН.

Розглянемо функціонування приводу ВН в режимах «АВТ» та «УПР», де основними елементами, що забезпечують роботу у цьому режимі є: обертовий трансформатор (ОТ) датчика положення ДП, який механічно зв'язаний з віссю обертання БО, пульти управління ПУ-О та ПУ-К, та блок управління БУ, у складі: ланки 4-1 (підсумовуючий підсилювач), ланки 2 (фазочутливий випрямляч), ланки 6 (підсилювач сигналу), ланки 7 (диференціатор), ланки 5 (інтегратор компенсації статичної похибки), ланки 4-2 (підсумовуючий підсилювач), ланки 12 (диференціальний підсилювач), $K_{ДС}$ коефіцієнт налаштування датчика струму, ланка 8 (коригуючий підсилювач), ланка 3-2 (інтегратор датчика струму), ланка 11 (нелінійна ланка з зоною нечутливості), ланка 10 (пристрій обмеження), БКД-ВН, ЕМД-ВН, механізм підйому МПО.

Основою принципу дії стабілізатора в режимах «АВТ» та «УПР» є те, що привод ВН виконує стеження за стабілізованою лінією спостереження ОЕМ-ПСЗ. При цьому сигнал з ОЕМ-ПСЗ, пропорційний кутовому відхиленню ОЕМ-ПСЗ від стабілізованого положення, та сигнал з ОТ приладу ДП пропорційний



кутовому положенню апаратури виробу, надходять в БУ на вхід ланки 4-1 (підсилювач сумуючий) та подаються на ланку 2-2 (фазочутливий випрямляч). Сигнал на виході ланки 2-2 пропорційний сигналу розузгодження датчика ДП, тобто *похибці стабілізації*.

Сигнал з виходу ланки 2-2 через ланку 6, коефіцієнт налаштування K_y , надходить на вхід ланки 4-2 та далі на вхід БКД-ВН, Сигнал з БКД-ВН надходить на ЕДМ-ВН, який через механізм підйому діє на апаратуру в сторону зменшення розузгодження ОТ датчика ДП та підтримує БО у напрямку на об'єкт спостереження.

Для отримання необхідних характеристик приводу ВН у режимах «АВТ» та «УПР» (похибки стабілізації та часу перехідного процесу) використовуються:

– сигнал зворотного зв'язку по струму аналогічно роботі приводу у режимі «ПАВ»;

– сигнал зворотного зв'язку по швидкості змінювання похибки стабілізації.

Наведення апаратури у вертикальній площині виконується за допомогою пультів ПУ-О або ПУ-К, сигнали з яких через ланку 1-4 (ключовий пристрій) передаються на ОЕМ-СД, що забезпечує наведення лінії візування на об'єкт спостереження.

Функціонування приводу ГН у режимі ПАВ (рисунок 2.8) забезпечує приладовий склад аналогічний приладовому складу приводу ВН з тією відмінністю, що як ДКШ використовується прилад ДКШ-ГН, замість приладу приведення ДП використовується датчик приведення ПП, підсилювач потужності БКД-ГН, виконавчий електродвигун ЕДМ-ГН та механізм повороту МПБ.

Позиційне та функціональне позначення окремих ланок каналів ВН та ГН на рисунках 2.7 та 2.8 збережено, за винятком позиційних позначень ланок 1-1...1-6 (ключові пристрої), ланка 3-1 (інтегратор), ланка 3-2 (інтегратор сигналу датчика струму), ланки 4-1, 4-2 (підсилювачі підсумовувачі), ланка 5 (інтегратор компенсації статичної похибки), ланка 6 (підсилювач сигналу),

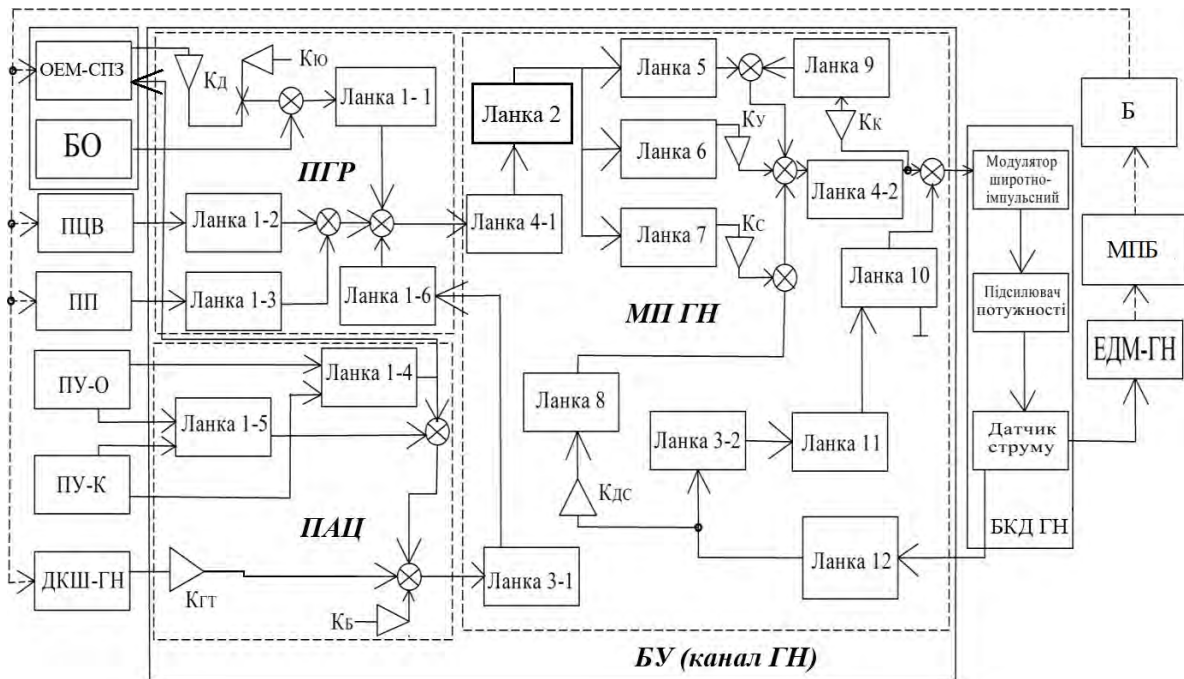


Рисунок 2.8 - Схема структурно-функціональна каналу ГН стабілізатору з використанням OEM-СПЗ

ланка 7 (диференціатор), ланка 8 (підсилювач коригуючий), ланка 9 (коригуючий пристрій), ланка 10 (пристрій обмеження), ланка 11 (нелінійна ланка), ланка 12 (диференціальний підсилювач сигналу датчика струму).

Принцип дії приводу ГН при стабілізації та наведенні у режимі «ПАВ» подібний принципу дії приводу ВН у режимі «ПАВ», тільки при цьому ДКШ-ГН виробляє сигнал пропорційний швидкості відхилення блоку горизонтального наведення у площині ГН, за яким привід ГН за допомогою двигуна ЕДМ-ГН через поворотний механізм обертає апаратуру виробу в сторону зменшення похибки стабілізації та утримує апаратуру у напрямку на об'єкт спостереження.

Функціонування приводу ГН у режимах «АВТ» та «УПР» засновано подібно приводу ВН на сигналах з гіроскопічного датчика кута горизонтального каналу, що входить до складу OEM-ПСЗ. Сигнал зворотного зв'язку по швидкості зміни похибки стабілізації, що отримується диференціюванням сигналу похибки, та сигнал зворотного зв'язку по струму забезпечують отримання необхідних характеристик ГН у режимі «АВТ» та «УПР».



2.5. Удосконалення методів вимірювання механічних параметрів, що впливають на функціонування стабілізатора

З впровадженням цифрових стабілізаторів змінювались методи їх перевірок у процесі виготовлення та випробувань, але методи контролю механічних параметрів виробу, до яких входили ці стабілізатори залишались такими, як і для аналогових стабілізаторів. Відомі методи контролю механічних характеристик виробів, до яких встановлюються стабілізатори, доволі трудомісткі, потребують додаткового оснащення, вимірювальних засобів. До цих параметрів відносяться моменти опору обертанню, точність встановлення ДКШ, моменти невривноваженості, люфти, жорсткість, з якою налаштовано стабілізатор. Невідповідність цих параметрів технічним вимогам призводить до труднощів при налаштуванні стабілізатора або призводить до погіршення технічних характеристик стабілізатора та, як правило, до недостатньої точності стабілізації при виконанні поставлених завдань.

Запропоновано нові методи контролю механічних характеристик виробу, які розглянемо у порівнянні з тими методами, що використовувались раніш.

2.5.1. Розробка методу вимірювання моментів опору обертання виробу

До механічних величин, що суттєво впливають на точнісні параметри та функціонування приладової системи стабілізації відноситься опір моменту обертанню горизонтального каналу наведення (не більш 40 кгсм) та вертикального каналу наведення (не більше 30 кгсм).

Відома методика вимірювання моментів опору обертанню ($M_{опор}$ (кгсм)) для БМП-2 [16,17] полягала у тому, що вимірювання проводилось двома членами екіпажу динамометром, який закріплювали на кінці ствола виробу ($L \approx 1,5$ м), до якого прикладалось зусилля від руки та фіксувалось його максимальне значення $P_{опор}$, при якому горизонтальний чи вертикальний канали плавно без ривків переміщувались у всьому діапазоні кутів наведення: $n \times 360^\circ$ для каналу ГН та від мінус 3° до 74° для каналу ВН. Максимальне значення



моменту опору обертанню визначалось за формулою:

$$M_{\text{опор}} \text{ (кгсм)} = L \text{ (м)} \times P_{\text{опор}} \text{ (кгс)}, \quad (2.2)$$

Перевірки за допомогою цієї відомої методики потребували участі двох членів екіпажу, були трудомісткі, потребували додаткового оснащення (спеціальних технологічних настилів) для виконання робіт та виконувались у ручному режимі.

Для виключення з перевірок моменту опору обертанню ручних операцій та додаткового оснащення було розроблено новий метод. Для виконання цих вимірів було відкориговане програмно-алгоритмічне забезпечення (ПАЗ) шляхом введення окремої технологічної програми виміру струмів (режим контролю струмів або РКС) споживання для кожного з каналів ВН та ГН.

При виконанні перевірки оператор за допомогою ручок пульта управління стабілізатора задає плавне наведення у всьому діапазоні наведення відповідного каналу ВН або ГН та контролює за даними цифрового табло пульта управління значення струму споживання. При контролі струму споживання оператор фіксує його максимальне значення, яке має не перевищувати певних значень, що відповідають максимальному моменту опору обертання відповідного горизонтального або вертикального каналу.

За такою методикою пропонується також перевіряти неврівноваженості башти при нахилах корпусу виробу по курсу та крену.

Як видно з описаної вище відомої методики, що виконувалась у ручному режимі з застосуванням динамометра, у новій запропонованій методиці необхідність додаткових технологічних настилів, динамометрів відсутня; ці роботи успішно виконує один оператор без виконання математичних розрахунків.

2.5.2. Розробка методу усунення взаємовпливу датчиків кутової швидкості каналу ВН на канал ГН

Для виставки датчиків кутової швидкості (ДКШ) відносно площин стабілізації додаткові вимоги не пред'являються, але обов'язковою є операція по усуненню взаємного впливу каналів ВН та ГН один на одного.



Роботи по усуненню взаємного впливу каналів є чисто механічними операціями. Для виконання їх у відомій методиці необхідно було увімкнути стабілізатор, навести марку приладу спостереження за місцевістю на віддалену точку (предмет), зафіксувати значення вертикального кута на екрані монітора. Потім, за допомогою ручок пульта управління стабілізатора, на максимальній швидкості 35 %/сек повернути привід горизонтального каналу на кут 360°, навести марку приладу спостереження за місцевістю по каналу горизонтального наведення на обрану раніше точку (предмет). По екрану монітора визначити вертикальний кут відхилення марки приладу спостереження за місцевістю. Відхилення марки приладу спостереження за місцевістю не повинне перевищувати 25 т.д. Якщо переміщення марки більше зазначеного вгору, то необхідно встановити шайбу (набір шайб) під верхню установочну поверхню ДКШ-ВН, якщо вниз, то - під нижню установочну поверхню ДКШ-ВН, у такий спосіб усунувши це переміщення. Необхідну товщину шайби (набору шайб) визначали за формулою:

$$S_{BH} = 0,02 \times \Delta \quad (\text{мм}), \quad (2.3)$$

де S_{BH} – товщина шайби (набору шайб), що необхідно встановити під ДКШ-ВН, мм; Δ – переміщення виробу у площині ВН по екрану монітора, т.д.

Аналогічно у відомій методиці проводились роботи по усуненню взаємовпливу каналу ВН на канал ГН. Тільки при цьому фіксувалось відхилення каналу ГН від похідної точки при наведенні вертикального каналу з максимальною швидкістю від нижнього до верхнього обмежувачів руху. Якщо воно більше 3 т.д. вліво, то – установкою шайб між кронштейном і верхньою настановною поверхнею ДКШ-ГН, а якщо величина переміщення приводу горизонтального каналу більше 3 т.д. вправо, то – домогтись зменшення взаємовпливу установкою шайб між кронштейном та нижньою настановною поверхнею ДКШ-ГН. Необхідну товщину шайби (набору шайб) визначали за формулою:

$$S_{GH} = 0,07 \times \Delta \quad (\text{мм}), \quad (2.4)$$



де $S_{ГН}$ – товщина шайби (набору шайб), що необхідно встановити під ДКШ-ГН, мм; Δ – переміщення виробу в площині ГН по екрану монітора, т.д.

У новій запропонованій методиці для виключення всіх цих ручних операцій відкориговане ПАЗ цифрового блоку управління введенням до режиму налаштувань додаткової програми для усунення взаємовпливу каналів за допомогою коригувальних коефіцієнтів. Ці коригувальні коефіцієнти, у залежності від каналу та напрямку відхилення марки приладу спостереження за місцевістю вводяться оператором на цифровому дисплеї пульта керування, які надходять до обчислювача блоку управління стабілізатором та зменшують взаємний вплив до нульових або до допустимих значень [16].

Таким чином, як перевагу наведеної нової методики налаштувань перед відомою методикою, зазначимо повну відсутність механічних операцій, що виконувались за допомогою гайкових ключів та технологічних шайб.

2.5.3. Розробка методу вимірювання жорсткості стабілізатора

У відомій методиці вимірювання жорсткості приводів ВН та ГН – одного з трьох параметрів, що разом з несправністю наведення та кількістю перебігів при гальмуванні визначає точнісні характеристики стабілізатора, проводять два члени екіпажу за допомогою динамометра і слюсарного індикатора. Операція вимірювання жорсткості кожного з каналів виконується окремо та є громіздкою механічною роботою, результатом якої є вимірювання кута відхилення стабілізованої каналів ГН та ВН при прикладанні до них нормованого зусилля. Покажем це.

У відомій методиці для перевірки жорсткості приводу ВН (рисунок 2.9) було необхідно виконати наступні операції:

– установити стійку з індикатором на башту так, щоб щуп індикатора торкався стабілізованої осі (один з елементів конструкції) на відстані 323 мм від осі обертання БО;

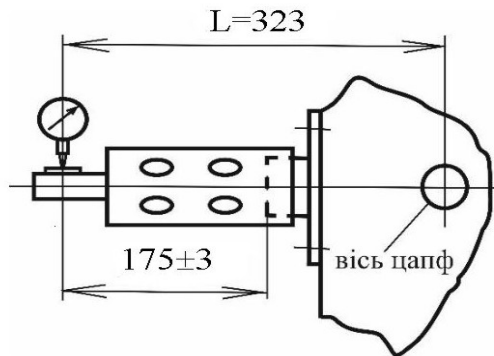


Рисунок 2.9 - Схема встановлення індикатора при вимірюванні жорсткості каналу ВН

– прикласти зусилля не менше 20 кг у бік, протилежний виміру жорсткості, до хомута з гачком, який установлений на елемент конструкції на відстані $2,0 \pm 0,02$ м від осі обертання БО, та зменшити його до нуля вручну короткочасно і плавно;

– прикласти зусилля 15 кг у бік виміру жорсткості (подолання моменту опору обертання) до хомута через динамометр, а потім плавно збільшити його до 20 кг;

– зафіксувати різницю показань індикатора Δ_n за розподілами шкали слюсарного індикатора при цих зусиллях.

Жорсткість привода ВН ($G_{ВН} \geq 17$ кгм/т.д.) визначають за формулою:

$$G_{ВН} = \frac{3,23}{\Delta_n} \quad (\text{кгм/т.д.}) \quad (2.5)$$

де Δ_n - різниця показань індикатора в розподілах шкали (1 розподіл дорівнює 0,01 мм), повинна бути не менше 19 розподілів.

За аналогічною відомою методикою проводилось вимірювання жорсткості каналу ГН (рисунок 2.9) з тією різницею, що стійка з закріпленим індикатором встановлюється на шасі виробу так, щоб щуп індикатора торкався кронштейна прожектора на відстані 900 мм від осі обертання башти.

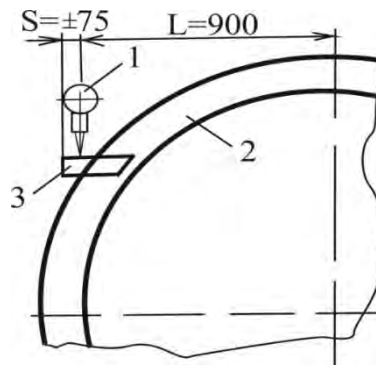


Рисунок 2.10 - Схема встановлення індикатора при вимірюванні жорсткості каналу ГН

Жорсткість привода ГН ($G_{ГН} \geq 40$ кгм/т.д.) визначали за формулою:

$$G_{ГН} = \frac{25}{\Delta_n} \quad (\text{кгм/т.д.}) \quad (2.6)$$

де Δ_n - різниця показань індикатора у розподілах шкали (1 розподіл дорівнює 0,01 мм) повинна бути не менше 63 розподілів.

У новому запропонованому методі зменшено трудомісткі ручні операції при вимірюванні жорсткості до мінімуму. У цьому методі виключено з перевірок технологічну стійку з індикатором та необхідність проведення математичних розрахунків за формулами (16,17).

Для цього на відстані 10 метрів від осі обертання Б та БО встановлюється щит перевірки, на якому закріплена тарировочна таблиця перевірки, що має шкалу розподілу у тисячних відстані (1см = 1 т.д.).

При проведенні випробувань жорсткості вертикального або горизонтального каналу відлік відхилення осі візування від початкового положення визначаємо за кількості розподілів по тарировочній таблиці. Для отримання необхідної жорсткості приводу виміряне значення має не перевищувати встановлених значень.

Замість щита перевірки допускається використовувати значення кутових відхилень осі кожного з каналів по екрану монітора оператора, якщо точність відтворення кутів відхилення відповідає нормативним документам.

За наведеною вище методикою передбачено проводити вимірювання



люфтів на моторних або ручних гілках каналів горизонтального та вертикального наведення стабілізатора.

Висновки до розділу 2

1. Проведений порівняльний аналіз із застосуванням методів математичного моделювання підтвердив доцільність застосування як сенсорів кутової швидкості твердотільних гіротахometrів, за рахунок більш високої смуги пропускання та підвищеної частоти інформаційного обміну, що в свою чергу призводить до зменшення похибок та покращення характеристик стабілізаторів;

2. З метою вивчення можливості заміни електромеханічних гіротахometrів ГТ46 на твердотільні гіротахometrи та покращення характеристик точності стабілізатора, було проведено моделювання з використанням датчика кутової швидкості (ДКШ) ГТ46. Проведено оцінку впливу смуги пропускання та дискретності обчислювальних операцій гіротахometrа ГТ46, ДКШ G20-075-100 зі смугою пропускання 100 Гц та ВОГ ВГ910Ф зі смугою пропускання 450 Гц;

3. Порівняння похибок стабілізації у вертикальному каналі при дискретності обчислень 1,7 мс і 1,0 мс показало, що при тривалості обчислень 1,0 мс стала похибка при розгоні і русі виробу з постійною кутовою швидкістю, у порівнянні з результатами при дискретності 1,7 мс, у два рази менша, а після дії імпульсних впливів БО при дискретності 1,0 мс повертається у вихідне положення з похибкою, яка не перевищує 0,1 кут. хв.;

4. Встановлено, що частота формування вихідних сигналів ДКШ має бути не менш 1000 Гц і смуга пропускання - не менш 100 Гц;

5. Запропоновано метод зміни моделі побудови стабілізатора з застосуванням у контурі управління стабілізатором приладу з стабілізованим дзеркалом, який дозволяє перейти від «жорсткої» (залежної) стабілізації до незалежної стабілізації, що призводить до зменшення похибки стабілізації.



6. Отримано суттєве покращення точнісних характеристик стабілізатора шляхом заміни електромеханічних гіротахометрів на твердотільні та зменшення часу інформаційного обміну. Точність такого стабілізатора повинна досягти значень динамічної похибки стабілізації сучасного стабілізатора 2E52 ($\leq 0,4$ т.д.) [12];

7. Запропоновано нові більш удосконалені методи вимірювання механічних параметрів модулів, що впливають на функціонування стабілізатора з безпосередньою участю приладового комплексу стабілізації. У порівнянні з відомою методикою по перевірці, у новому методі, що використовує всі переваги цифрової техніки, зведено до мінімуму використання ручних трудомістких операцій, технологічного вимірювального інструменту, додаткового оснащення для виконання цих робіт та мінімізовано кількість обслуговуючого персоналу, необхідного для виконання робіт.

Список літератури до розділу 2

1. Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением [Електроний ресурс] / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев // Учебное пособие. – Омск. – 2010. Retrieved from <http://mslstaryussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773>.
2. Безвесільна О.М. Підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки// О.М. Безвесільна, В.Г. Цирук, М.В. Ільченко, Ю.В. Киричук // XIV Міжнародна науково-практична конференція «Наукова думка інформаційного віку 2018» Польща, Пшемишль. – 07–15.03.2018. – С. 3–8.
3. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння. /Безвесільна О.М. В.П. Квасніков, В.Г. Цирук, В.В. Чиковані // Монографія. – НПО «Пріоритети». – Київ, ЖДТУ.– 2014. – С. 176.
4. Безвесільна О.М. Математична модель та технічні характеристики



- гіротахметра ГТ46 / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, Д.С. Козюков // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція «Технічні науки на сучасному етапі» (присвячена Дню науки). – Житомир. – 19.05.2018. – С. 92-93.
5. КВГ, ЦКВГ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://zelaz.ru/koriolisovyy-vibracionnyy-giroskop-kvg-ckvg.htm>.
 6. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (2004), IEEE std.1431™, 69.
 7. G20 to axis MEMS rate gyro. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.gladiatortechnologies.com>.
 8. Сущенко О.А. Обзор современного состояния микроэлектромеханических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О.А. Сущенко, С.В. Карасев // *Електроніка та системи управління*. – №1(27), 2011. – С. 103-108.
 9. 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.
 10. Liu, J. Signal Processing Technique for Combining Numerous MEMS Gyroscopes Based on Dynamic Conditional Correlation [Text] / J. Liu, Q. Shen, W. Qin // *Micromachines*. – 2015. – Vol. 6, Issue 6. – P. 684–689. doi: 10.3390/mi6060684.
 11. Ji, X. Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array [Text] / X. Ji // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6. doi: 1.
 12. Юферов Ф.М. Электрические двигатели автоматических устройств. / Ф.М. Юферов // «Высшая школа». – М. –1976. – С.416.
 13. Электрические машины автоматических устройств / М.М Кацман // Инфа-М. – М. – 2002. – С.264.
 14. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БМП-2. Часть. 1. [Электронный ресурс] М. – 1987. – Режим доступа:



<http://armyman/info/books/id-44.html>.

15. Кудрявцев А.М.. Электрооборудование бронетанковой техники. Стабилизаторы вооружения 2Э36: устройство и обслуживание [Электронный ресурс] / А.М. Кудрявцев, О.К. Уласевич, В.Н. Жеглов, В.Ю. Гумилев // Учебное пособие. Рязань. – 2013г. – С. 144. Режим доступа: <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.
16. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1 и 2. БМП-3. [Электронный ресурс] – Воениздат. МО М – 1998. – Режим доступа: <https://mil.in.ua/forum/viewtopic.php?t=893>.



CHAPTER 3 / РОЗДІЛ 3 MATHEMATICAL MODELS OF THE MAIN COMPONENTS AND CONTROL CHANNELS OF THE STABILIZER

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ТА КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ СТАБІЛІЗАТОРА

Мета даного розділу надати відомості про розроблені математичні моделі основних компонентів та каналів управління стабілізатора [1,2].

При створенні математичної моделі було розроблено:

- математичні моделі кожного приладу та вузла, що входять до складу стабілізатора;
- математичні моделі блоку вертикального наведення (БО) та блоку горизонтального наведення (Б) з редукторами та двигунами;
- математичні моделі аналогового та цифрового трактів стабілізатора для вертикального та горизонтального каналів.

На підставі створених математичних моделей по каналам вертикального та горизонтального наведення та стабілізації було промодельовано всі режими роботи стабілізатора з урахуванням змінювання вхідних сигналів та регульованих параметрів у діапазонах, що передбачені конструкторською документацією на стабілізатор.

3.1. Математичні моделі основних вузлів та блоків стабілізатора

При моделюванні вирішувались наступні задачі:

- моделювання похибок відпрацювання кутової швидкості режимів наведення і стабілізації та дослідження процесів відпрацювання малих швидкостей при заданні їх з пульта управління;
- відпрацювання кутового положення стабілізатора при дії одиночних, багатократних збурень та збурень у вигляді гармонічного сигналу, який відповідає кутовому профілю типової траси;
- перевірка можливості забезпечення заданих вимог за умови обраного



інтервалу дискретності (2,5 мс) та округлення значущих цифр у передавальних функціях основних ланок дискретних блоків управління до трьох значущих цифр;

- перевірка налаштувальних коефіцієнтів щодо можливостей налаштування каналів управління, та ін.

Для створення моделей та моделювання використовувалась обчислювальна система MATLAB. Стосовно нелінійних моделей, то з цією метою використовувався пакет Simulink. Використання цього пакету дозволило урахувати люфт приводу, що є важливим джерелом внутрішніх збурень системи управління взагалі.

Математична модель стабілізатора – це сукупність математичних моделей основних пристроїв, які входять до його складу [3-5]. Модель враховує динаміку процесів у пристроях та у часі. Фактично моделлю [6,7] є система диференційних рівнянь, які забезпечують необхідну точність для вирішення поставленої задачі. Модель реалізована по замкнутій схемі. Вихідні сигнали моделі двигуна [8-10], що передаються через на редуктор блоку наведення, надходять на входи вимірювальних пристроїв – гіротахометра (абсолютна кутова швидкість, яка є сумою вихідної кутової швидкості та переносної кутової швидкості); тахогенератора (кутова швидкість блоку БО); датчика положення (кут блоку БО). Вихідні сигнали на пульт задаються користувачем. До математичної моделі входить також датчик струму, який є сукупністю коригуючих ланок, що покращують якість перехідного процесу сигналу, що передається [11-13].

Пульт управління призначений для формування керуючого впливу, що компенсує сигнал абсолютної кутової швидкості, яка надходить на гіротахометр [14,15]. Вхідним сигналом для пульта управління є кут повороту, що задається оператором. До складу математичної моделі каналу керування входить і ланка, що виконує функції послаблення.

Залежність сигналу пульта управління від вхідного кута повороту має наступний вигляд:



$$U = f(y) = U_0 \frac{1 - \cos\left(\frac{2a_0 \times i \times y}{\varphi_0}\right)}{(1 - \cos a_0)}, \quad (3.1)$$

де, U – вихідна напруга, що знімається з потенціометрів горизонтального або вертикального каналів; U_0 – напруга потенціометрів відносно середньої точки, $U_0 = \pm(15 \pm 1,5)B$; γ – поточний кут повороту корпусу, що задається за допомогою ручок потенціометра, при цьому, його максимальне номінальне значення становить $30,6^\circ$; $\varphi_0 = 330^\circ$ – кут робочої зони; $a_0 = 41^\circ 15'$ – аргумент тригонометричної функції; $i = 5$ передатне відношення.

Максимальне значення вихідної напруги становить 12,96 В.

Робота математичної моделі пульта керування відображена на рисунку 3.1 та Рисунок 3.2, при цьому, як впливи, що задають, використовуються сигнали синусоїдального й східчастого вигляду.

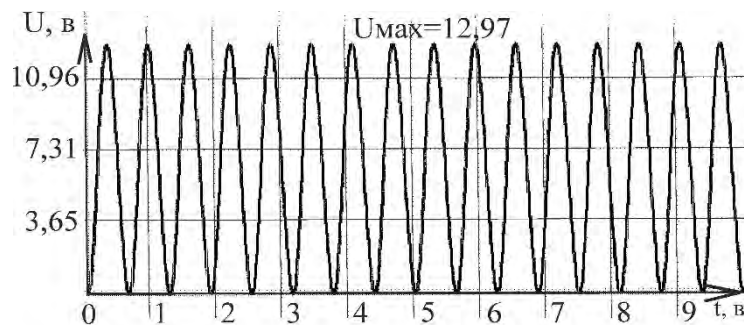


Рисунок 3.1 - Відпрацювання пультом управління впливу синусоїдальної форми, що задається

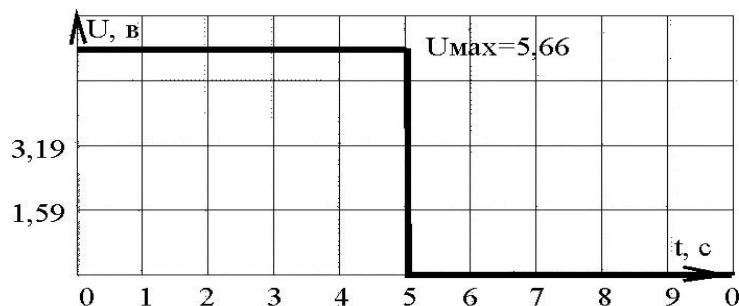


Рисунок 3.2 - Відпрацювання пультом управління впливу ступінчатої форми, що задається



Вигляд залежності вихідної напруги пульта від поточного кута повороту (характеристика пульта керування) відображено на рисунку 3.1. Значення вихідного пульта керування подано на рисунку 3.3.

Коефіцієнт ослаблення по каналу пульта управління, визначений за результатами лабораторних випробувань, орієнтовно становить 0,15.

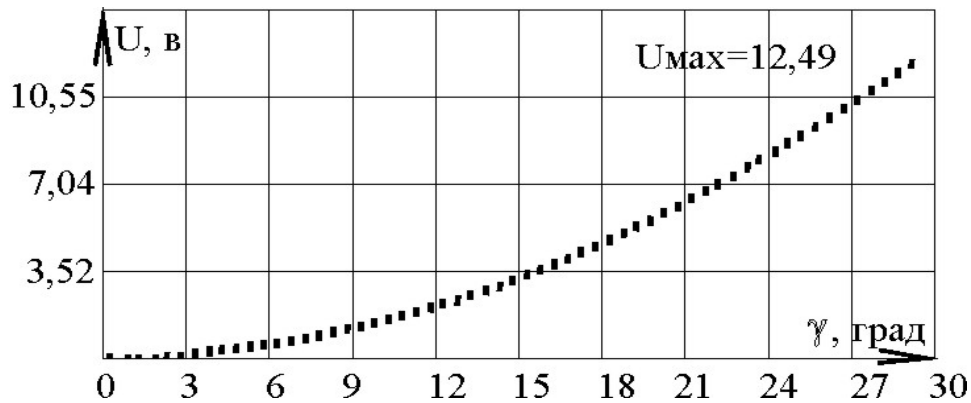


Рисунок 3.3 - Характеристика пульта управління

Гіротахометр призначений для виміру сигналу абсолютної кутової швидкості, яка є сумою вихідної кутової швидкості блоку БО й переносної кутової швидкості.

До складу математичного опису каналу гіротахометра [5,6] входять математичні моделі власне гіротахометра, демодулятора, ланки, що виконує функції ослаблення сигналу й Г-подібного фільтра, що є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійної часу, розрахованої на підставі параметрів електричної схеми системи стабілізації.

Управління руху гіротахометра щодо вихідної координати α вихідної напруги U відображується в наступній формулі [16]:

$$\begin{cases} I_n \ddot{\alpha} + 2V\sqrt{I_n C_T} \dot{\alpha} + M_\alpha = M_\Gamma - \dot{M}'_\Gamma + M_{TP} + M_D - \omega_S I_n \\ U = K_d \alpha + U_0 \end{cases} \quad (3.2)$$

де, $V - (0,25 \dots 0,7)$ – коефіцієнт демпфірування; $C_T - (7,4 \dots 7,5)$ Нм/рад – жорсткість торсіону; $I_n - 3,376 \times 10^{-4}$ Нмс² (кгм²) – момент інерції підвісу;

$M_\Gamma - S\omega_\xi \cos\alpha$ – гіроскопічний момент; $S - 0,359$ Нмс (кгм²/с) – кінетичний момент при номінальній напрузі 36 В та частоті 395 Гц; ω_ξ – вимірювана кутова



швидкість; $M'_r - S\omega_\xi \text{Cos}\alpha$ – гіроскопічний момент, обумовлений дією кутової швидкості, нормальної до вимірюваної; ω_3 – кутова швидкість, нормальна до вимірюваної кутової швидкості ω_ξ ; $M_{TP} = -M_T \sin\dot{\alpha}$ – момент тертя, по величині, що не перевищує 2×10^{-6} Нм; $M_d = \zeta W$ – момент дебалансу; $\xi \leq 2 \times 10^{-5} \text{ Нс}^2$ – зсув, обумовлений дебалансом; W , м/с – лінійне прискорення, що викликає дебаланс; $\dot{\omega}_s$, рад/с – кутове прискорення щодо поздовжньої осі приладу; K_d – 3,9 В/град – вихідна характеристика індукційного датчика кута; $U_0 < 70$ мВ – нульовий сигнал датчика кута; M_α – момент, що враховує вплив гістерезису торсіону.

Особливістю моделі гіротахометра є облік нелінійності гістерезисного типу, внесеної торсіоном.

Розглянемо вираз для визначення моменту, що враховує вплив гістерезису торсіону. Позначимо кут α , при якому похідна $\dot{\alpha}$ змінює знак, символом α_0 .

При цьому можливі два варіанти:

1) похідна $\dot{\alpha}$ стає менше нуля ($\dot{\alpha} < 0$), тобто кут α починає зменшуватися.

При цьому, залежно від діапазону зміни кута α , момент M_α визначається в такий спосіб [16]:

$$\begin{cases} M_\alpha = C_T \alpha_0 & \text{при} & \alpha_0 - K_r \times \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_0; \\ M_\alpha = C_T \alpha & \text{при} & \alpha < \alpha_0 & (1 - K_r); \end{cases} \quad (3.3)$$

2) похідна $\dot{\alpha}$ стає більше нуля ($\dot{\alpha} > 0$), тобто кут α починає збільшуватися. При цьому, залежно від діапазону зміни кута α , момент M_α визначається у такий спосіб:

$$\begin{cases} M_\alpha = C_T \alpha_0 & \text{при} & \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_0 + K_r \alpha_0; \\ M_\alpha = C_T \alpha & \text{при} & \alpha > \alpha_0 & (1 + K_r); \end{cases} \quad (3.4)$$

Коефіцієнт K_r характеризує величину гістерезису. Його значення можуть коливатися в діапазоні $0,0015 \leq K_r \leq 0,0075$.

Вихідні напруги гіротахометра, що отримані при однаковому постійному впливі, який задається, та при граничних значеннях коефіцієнта демпфірування представлені на рисунку 3.4 та Рисунок 3.5.

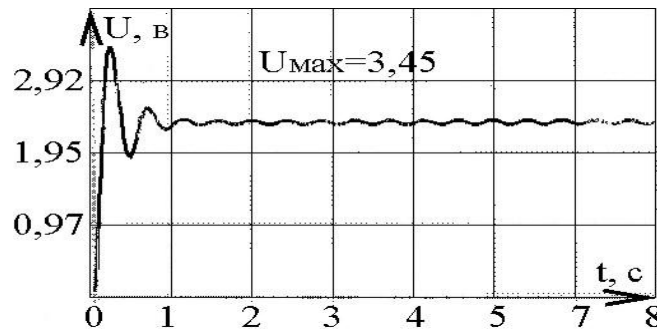


Рисунок 3.4 - Вихідний сигнал гіротахометра при впливі, що задається ($\omega=12,5$ °/с) та коефіцієнті демпфірування 0,25

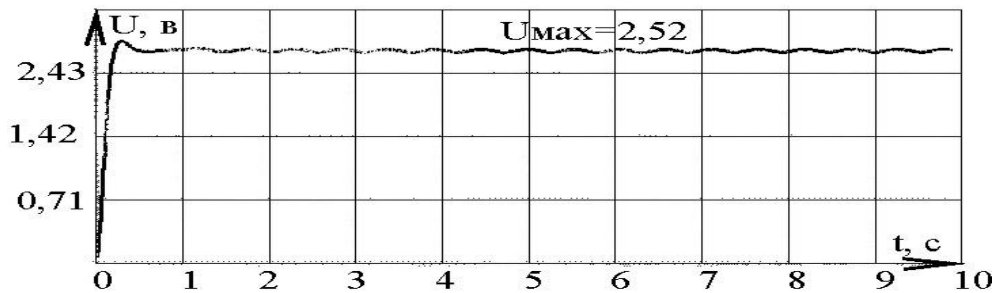


Рисунок 3.5 - Вихідний сигнал гіротахометра при впливі, що постійно задається ($\omega=12,5$ °/с) та коефіцієнті демпфірування 0,7

Реакція моделі гіротахометра на вплив, що постійно задається без врахування гістерезису відображена на рис 3.6. Облік впливу гістерезису з параметром $K_r=0,0075$ при тому впливі, що задається, характеризується Рисунок 3.7. При цьому, частота коливань, обумовлених гістерезисом, становить 25 Гц.

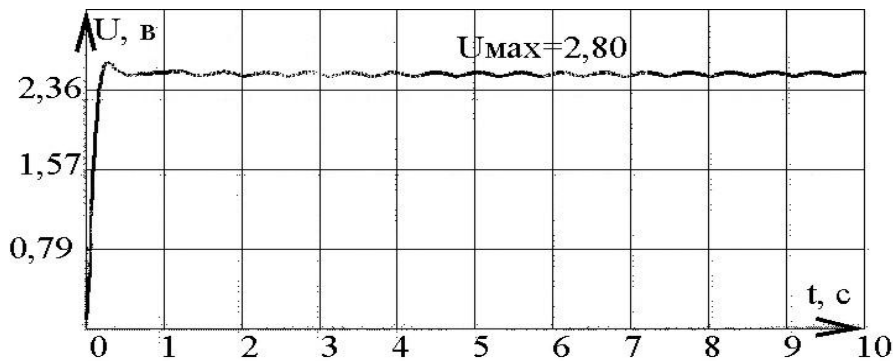


Рисунок 3.6 - Вихідний сигнал гіротахометра без врахування впливу гістерезису ($\omega=12,5$ °/с, коефіцієнт демпфування 0,5)

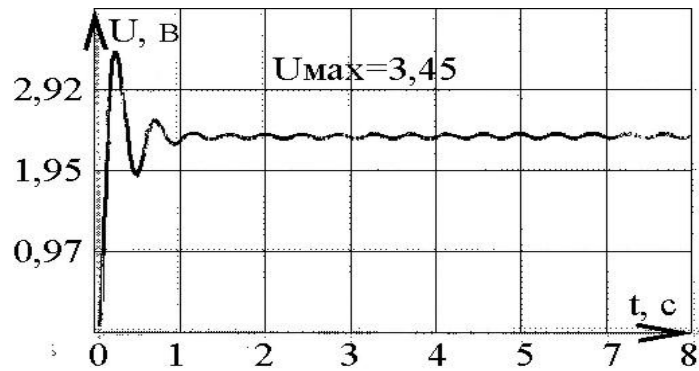


Рисунок 3.7 - Вихідний сигнал гіротахометра з врахуванням впливу гістерезису ($\omega=12,5$ °/с, коефіцієнт демпфування 0,5)

Далі в моделі каналу гіротахометра враховується наявність порогового пристрою, що забезпечує обмеження рівня вихідного сигналу гіротахометра до 12 В, та напруга зсуву, яка підсумовується з вихідним сигналом гіротахометра.

З метою максимального наближення до реальних схемо-технічних рішень у модель каналу гіротахометра включена модель однополуперіодного демодулятора, блок-схема якої представлена на рисунку 3.8.

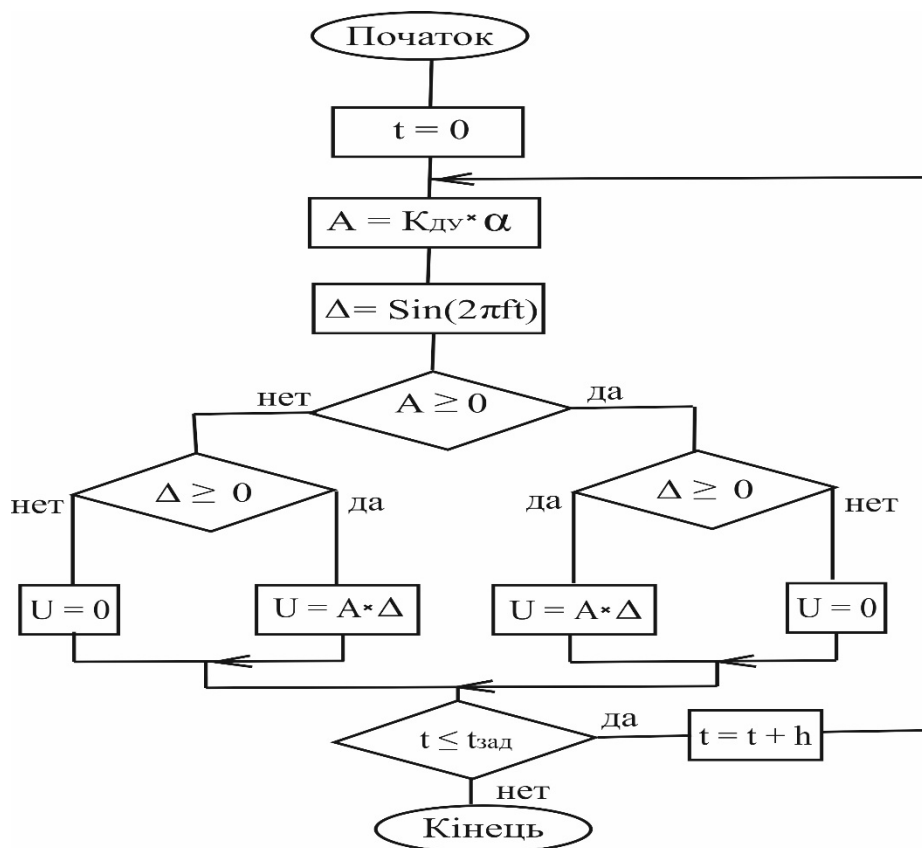


Рисунок 3.8 - Блок схема однополуперіодного демодулятора



Результати роботи моделі демодулятора при постійному впливі, що задається, представлені на рисунку 3.9, 3.10.

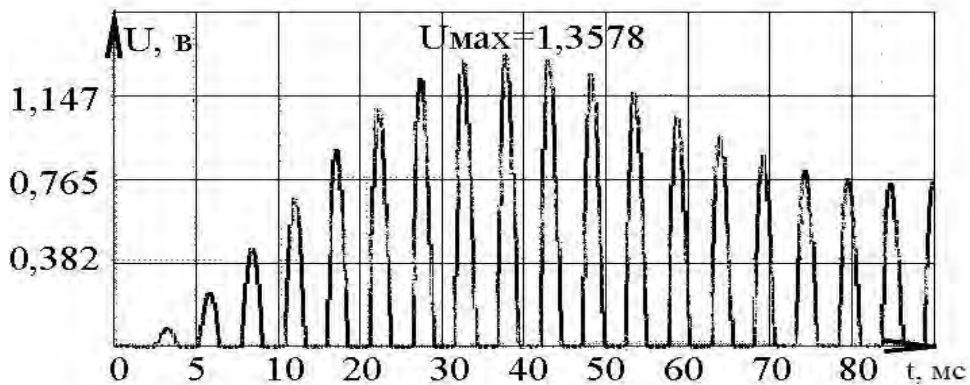


Рисунок 3.9 - Вихідний сигнал однополуперіодного демодулятора при постійному впливі, що задається $\omega = 5 \text{ }^\circ/\text{с}$

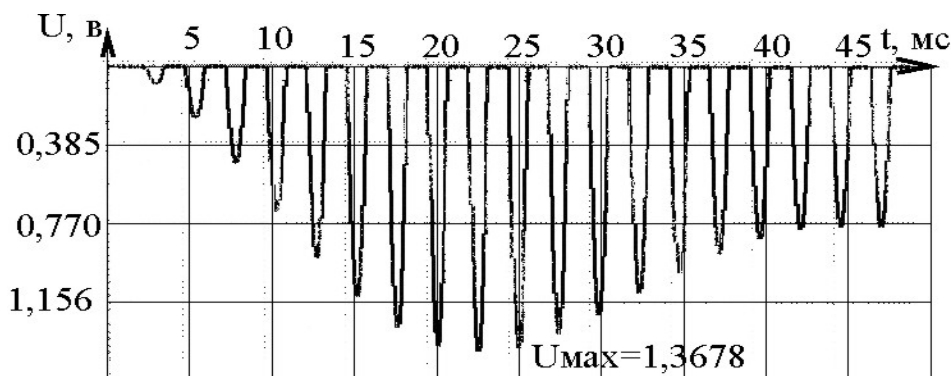


Рисунок 3.10 - Вихідний сигнал однополуперіодного демодулятора при постійному впливі, що задається $\omega = 5 \text{ }^\circ/\text{с}$

Попереднє значення коефіцієнта ослаблення по каналу гіротахметра прийняте рівним 0,7 і буде уточнюватись на етапі ідентифікації моделі за результатами лабораторних випробувань.

Далі в модель гіротахметра вводиться Г-подібний фільтр, який є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійної часу, що визначена за параметрами електричної схеми:

$$T = RC = 10^3 \times 0,15 \times 10^{-6} = 0,00015 \text{ с.} \quad (3.5)$$

До особливостей Г-подібного фільтра відноситься формування передніх і



задніх фронтів моделюючих коливань із різними постійними часу. При цьому, для переднього фронту постійна часу приймається розрахунковою, а для заднього фронту – розрахункове значення трохи збільшується для того, щоб забезпечити вповільнене зменшення амплітуди сформованого сигналу. Порівняльна характеристика моделюючих коливань при однакових і різних постійних часу ілюструється Рисунок 3.11 та Рисунок 3.12.

Вихідні сигнали керуючих впливів, що сформовані в каналах пульта управління та гіротахометра, підсумовуються з коефіцієнтами 1 і 0,42, відповідно, й надходять на інтегратор, постійна часу якого становить:

$$T = R \times (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) = 10 \times 10^3 \times 44 \times 10^{-6} = 0,44 \text{ с} \quad (3.6)$$

Вихідний сигнал інтегратора після обмеження за рівнем 9 В надходить на вхід суматора для формування керуючого впливу.

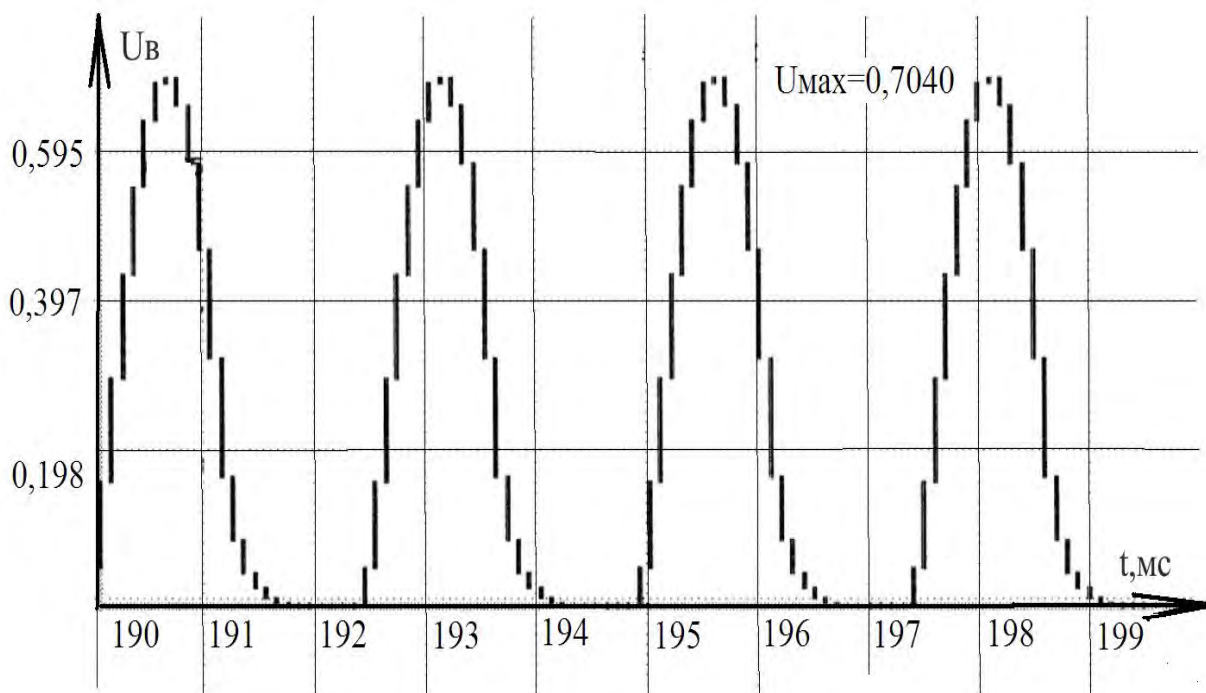


Рисунок 3.11 - Вихідний сигнал у ланці гіротахометра при постійному впливі, що задається $\omega = 5 \text{ }^\circ/\text{с}$ та однакових постійних часу Г-подібного фільтру

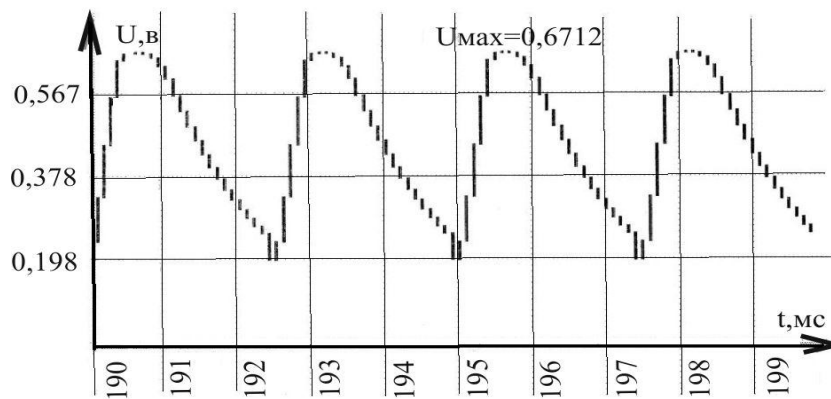


Рисунок 3.12 - Вихідний сигнал в ланці гіротахометра при постійному впливі, що задається $\omega=5$ °/с та різних постійних часу Г-подібного фільтру

Вхідним сигналом для моделі датчика положення є кут, що, утворюється при поворотах блоку БО. Сигнал датчика положення описується виразом: $U_{ДП} = \sin \varphi_{БО}$ де, $U_{ДП} = 20$ В, $\varphi_{БО}$ – кут блоку БО.

Далі при проходженні по каналу сигнал послабляється з коефіцієнтом ослаблення 0,17 і надходить на Г-подібний фільтр, який є аперіодичною ланкою постійною часу:

$$T = RC = 10 \times 10^3 \times 10^{-6} = 0,01 \text{ с.} \quad (3.7)$$

Вхідний канал сигналу датчика положення надходить на суматор для формування керуючого впливу.

У суматорі здійснюється формування закону керування залежно від режиму роботи системи стабілізації. У загальному випадку керуючий вплив може формуватися за сигналом, що надходить від інтегратора та сигналу, який сформований в ланцюзі каналу датчика струму. У деяких режимах замість сигналу інтегратора використовується сигнал датчика положення. Як прохідні коефіцієнти підсилення для перерахованих сигналів обираються задані в технічному завданні значення (21,5; 11; 0,6 і 2,7, відповідно). Остаточний добір коефіцієнтів підсилення є однією з основних завдань моделювання системи стабілізації.

Вихідний сигнал суматора обмежується рівнем 9 В, демодулюється (робота двополуперіодного демодулятора ілюструються Рисунок 3.13) та



надходить на підсилювач напруги, який є аперіодичною ланкою з коефіцієнтом підсилення (27,6) В та постійної часу, розрахункове значення якої становить:

$$T = RC = 2,2 \times 10^{-3} = 0,0022 \text{ с} \quad (3.8)$$

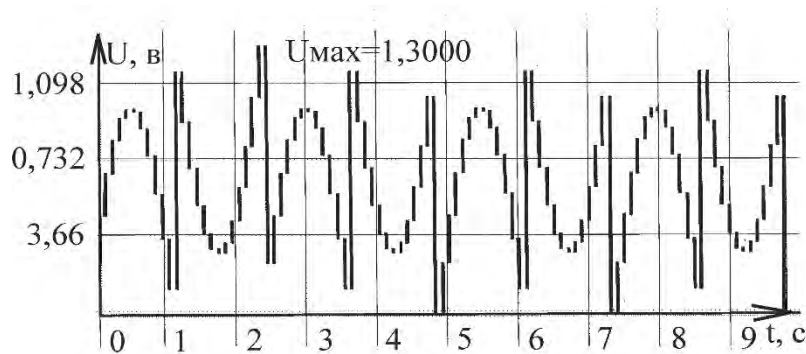


Рисунок 3.13 - Вихідний сигнал двополуперіодного демодулятора при постійному впливі збудження $U = 1 \text{ В}$, що задається

Необхідно відзначити, що через відмінності лабораторних випробувань, за якими проводиться ідентифікація параметрів моделі, від умов експлуатації, як постійна часу приймається значення $T = 0,01 \text{ с}$. Вихідний сигнал підсилювача напруги без обліку й з урахуванням демодулятора представлений на рисунках 3.14, 3.15, відповідно.

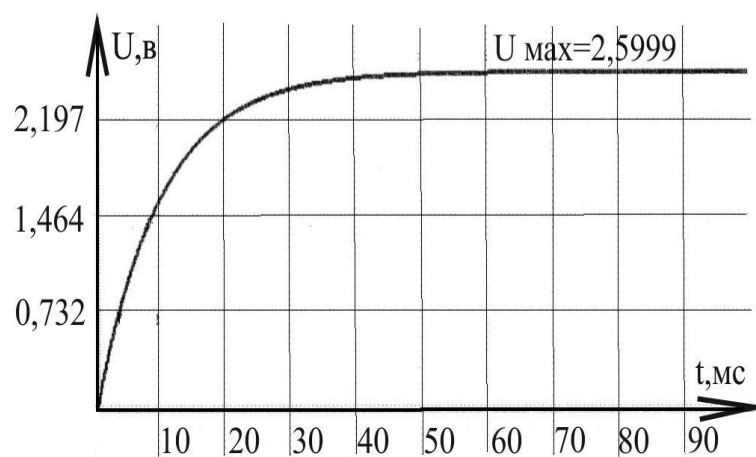


Рисунок 3.14 - Вихідний сигнал підсилювача без врахування демодулятора при постійному впливі збудження $U = 0,1 \text{ В}$, що задається

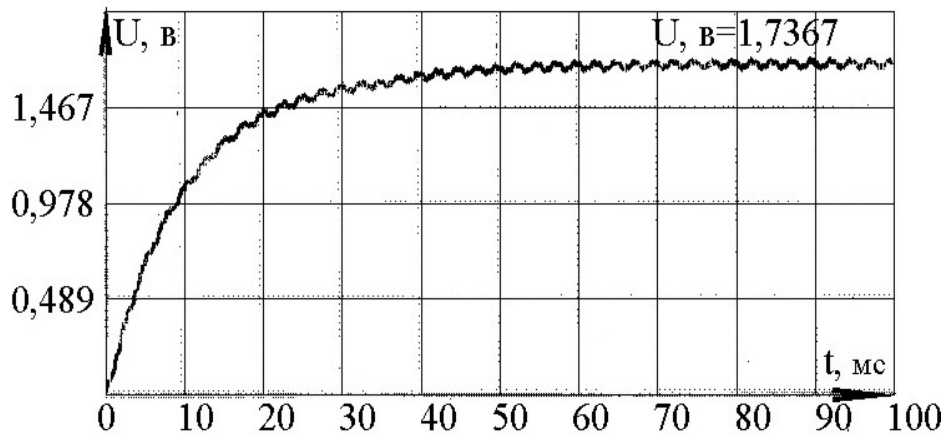


Рисунок 3.15 - Вихідний сигнал підсилювача з врахуванням демодулятора при постійному впливі збудження $U = 0,1$ В, що задається

Перед тим, як потрапити на вхід моделі широтно-імпульсного модулятора, вихідний сигнал підсилювача напруги зазнає наступних операцій:

- 1) інвертування (необхідність виконання цієї операції була встановлена при перевірці відповідності фазування моделі реальній системі стабілізації);
- 2) обмеженню вихідної напруги за рівнем 6 В;
- 3) формуванню зони нечутливості вихідної напруги 0,1 В;
- 4) обнуленню вихідної напруги при досягненні певних значень кута, сформованого блоком озброєння, (характеристики зазначених нелінійностей представлені на рисунку 3.16).

Модель широтно-імпульсного модулятора реалізує формування послідовності імпульсів, амплітуда й тривалість яких визначається на підставі наступних співвідношень:

$$U_{\text{ШИМ}} = (27 - 1 - 0,04 \times |I|) \text{sign} U_{\text{ВХ}}, \quad (3.9)$$

де, $U_{\text{ВХ}}$ – вхідна напруга; I – струм якоря двигуна.

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{оп}}} \cdot \tau, \quad (3.10)$$

де, $U_{\text{ВХ}}$ – вхідна напруга; $U_{\text{оп}}$ – опорна напруга широтно-імпульсного модулятора, що дорівнює 6 В; τ – тактова частота широтно-імпульсного модулятора, що дорівнює 2,5 мс.

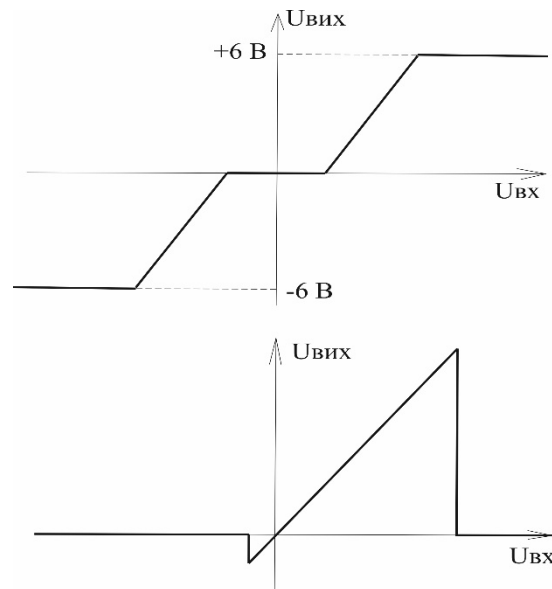


Рисунок 3.16 - Нелінійні ланки ланцюга підсилювача напруги

При створенні широтно-імпульсного модулятора враховувалося те, що розрахункова тривалість формованого імпульсу не може перевищувати його заданої тактової частоти.

Результати роботи моделі широтно-імпульсного модулятора представлено на рисунку 3.17.

Формування струму якоря двигуна описується наступною формулою:

$$I = \frac{U_{\text{ШИМ}} - C_e \dot{\varphi}_{\text{ДВ}}}{R_{\text{об}}}, \quad (3.11)$$

де, $U_{\text{ШИМ}}$ – вихідна напруга широтно-імпульсного модулятора; C_e – постійна е.р.с.; $R_{\text{об}}$ – опір обмотки якоря; $\dot{\varphi}_{\text{ДВ}}$ – кутова швидкість двигуна (сигнал, що забезпечує зворотний зв'язок).

Отримане значення струму якоря двигуна надходить на широтно-імпульсний модулятор, а також на коригувальну ланку, яка є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійної часу, що дорівнює 0,01 с.

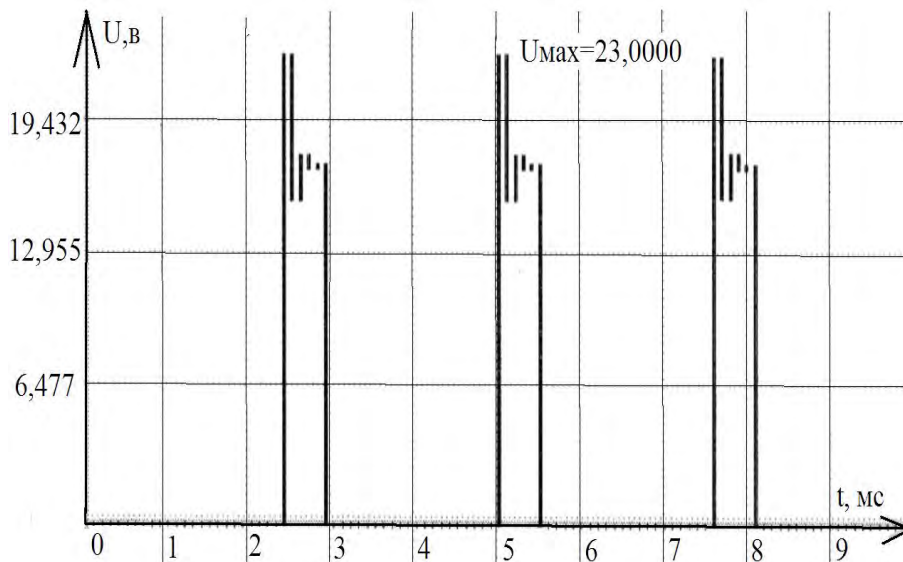


Рисунок 3.17 - Вихідний сигнал широтно-імпульсного модулятора при постійному впливі $U = 1,5$ В, що задається

Відкоригований струм якоря двигуна надходить безпосередньо на модель двигуна, а також у канал датчика струму. Каналом датчика струму є послідовність наступних ланок:

- 1) ланки посилення ($K = 0,11$);
- 2) аперіодичної ланки з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійної часу, що дорівнює $T = 0,003$;
- 3) аперіодичної ланки з коефіцієнтом підсилення $K = 0,1$ та постійної часу $T = 0,001$;
- 4) форсуючої ланки з постійної часу $T = 0,02$;
- 5) нелінійної ланки, яка є обмеженням за рівнем 9 В.

Сформований вихідний сигнал струму надходить на суматор для формування сумарного керуючого впливу.

3.2. Математичні моделі горизонтального та вертикального каналів стабілізатора

Структурно-функціональна схема та електрична схема побудови стабілізатора виконані таким чином, що стабілізатор практично складається з



двох незалежних каналів за винятком однієї команди, яка формується у горизонтальному каналі та є обов'язковою для виконання у вертикальному каналі.

Тому, за деяким припущенням, математична модель стабілізатора може бути представлена у вигляді двох незалежних математичних моделей:

- математичної моделі вертикального каналу наведення;
- математичної моделі горизонтального каналу наведення.

Математичні моделі вертикального та горизонтального каналів розроблялись з урахуванням ряду особливостей, а саме:

однакових для двох каналів:

1) Передача обертання від двигунів на БО та Б виконується через редуктори, математичні моделі яких побудовані з обов'язковою наявністю люфтів;

2) Струм в якірних обмотках двигунів (сигнал зворотного зв'язку по струму – вихідні сигнали моделі двигуна) використовується для формування законів управління разом з інформацією про абсолютну кутову швидкість;

3) Управління двигунами приводів ВН та ГН виконується за допомогою імпульсів з широтно-імпульсних модуляторів;

різних для двох каналів:

1) В математичній моделі тільки вертикального каналу враховується пружна ланка за рахунок пружини, що зменшує неврівноваженість каналу;

2) В математичній моделі враховується напруга в якірній обмотці двигуна тільки вертикального каналу (сигнал зворотного зв'язку по напрузі – вихідний сигнал двигуна) в горизонтальному каналі цей сигнал не обчислюється;

3) Кут розвороту горизонтального каналу вимірюється приладом приведення (прилад ПП), сигнал з якого враховується у математичній моделі горизонтального каналу;

4) Кут розвороту вертикального каналу вимірюється датчиком положення (прилад ДП), сигнал з якого враховується у математичній моделі вертикального каналу;



5) Абсолютна кутова швидкість вертикального каналу визначається швидкістю переносного кутового руху корпусу та відносного кутового руху вертикального каналу;

6) Абсолютна кутова швидкість горизонтального каналу визначається швидкістю переносного кутового руху корпусу та відносного кутового руху горизонтального каналу.

На підставі наведених особливостей і математичні моделі каналів наведення стабілізатора можуть містити такі відмінності.

Математичні моделі вертикального та горизонтального каналів відрізняються одна від одної лише деякими складовими та чисельними значеннями, що знаходять відображення у передавальних коефіцієнтах окремих обчислювальних ланок.

По цьому, у роботі наведемо опис математичної моделі вертикального каналу, як найбільш функціонального, а потім розглянемо особливості математичної моделі горизонтального каналу.

Математична модель модуля (рис 3.18) є сукупністю наступних пристроїв: горизонтального (вертикального) каналів, блоку управління та двигуна вертикального наведення (двигуна горизонтального наведення) [7,8].

Математична модель двигуна [5] складається з двох складових - блоку перетворювача, який містить вузол формування струму двигуна з урахуванням постійної часу двигуна, та блоку, що відтворює механічну частину двигуна. Вхідний параметр для двигуна – широтно-імпульсна напруга $U_{ШИМ}$, що сформована в блоці управління, та містить інформацію про кутову швидкість двигуна $\dot{\varphi}_{ABC}$, яку необхідно розвинути для створення противо-е.р.с.

Вихідні параметри блоку перетворювача:

– горизонтального або вертикального каналів струм якоря двигуна, який формує управляючий момент двигуна та потрапляє на формування зворотного зв'язку по струму;

– напруга на обмотці двигуна, що використовується для формування зворотного зв'язку по напрузі та визначає рівень струму в обмотці двигуна.

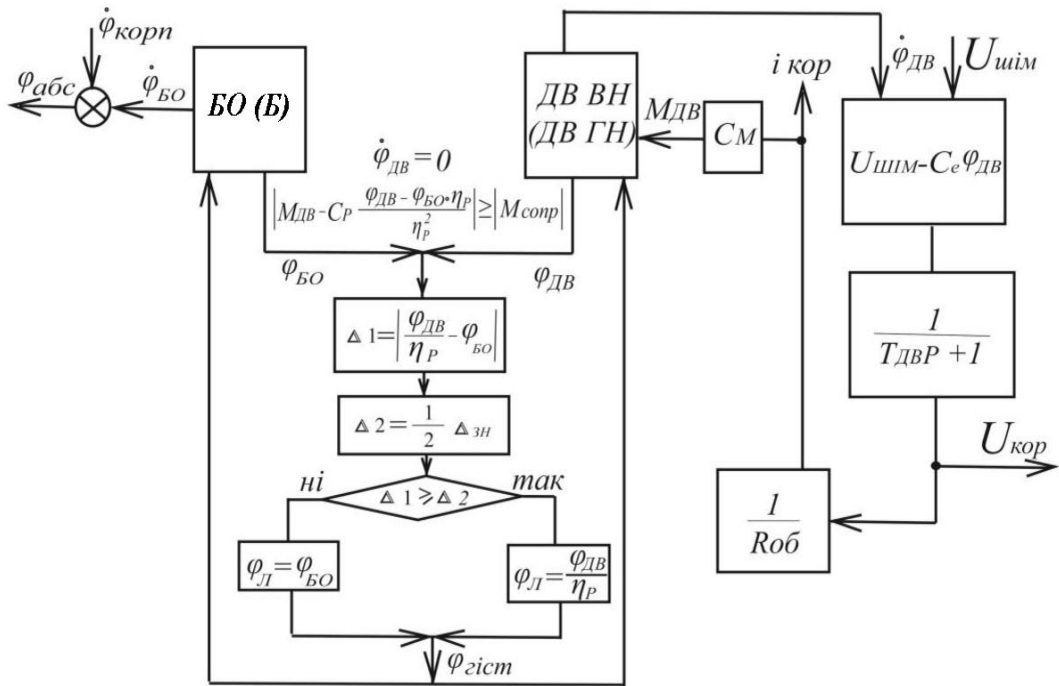


Рисунок 3.18 - Блок-схема математичної моделі модуля (горизонтального або вертикального каналів)

$$U_{об} = U_{шим} - C_{ерс} \dot{\varphi}_{дв} \cdot \quad (3.12)$$

Постійна часу двигуна враховується проходженням сигналу $U_{об}$ через аперіодичну ланку з одиничним коефіцієнтом посилення $\frac{1}{T_{я}p + 1}$, після чого напруга $U_{об}$ набуває виразу:

$$T_{я}pU_{кор} + U_{кор} = U_{об} \cdot \quad (3.13)$$

де, $T_{я} = 0,0015 \text{ с}$ – постійна часу якоря двигуна; $U_{кор}$ – вихідний сигнал аперіодичної ланки.

Подальший шлях сигналу – $U_{корп}$ проходить через ланку зворотного зв'язку по напрузі, ланку $1/R_{об}$, ланку зворотного зв'язку по струму ($I_{кор}$) ланку, що містить постійну моменту навантаження на вал двигуна C_M .

В остаточному підсумку маємо вигляд управляючого моменту двигуна:

$$M_{дв} = C_M i_{кор} \cdot$$

Механічну частину моделі двигуна (рисунок 3.18) описує диференціальне рівняння:



$$J_{дв} \ddot{\varphi}_{дв} + M_{сопр} s \lg \dot{\varphi}_{дв} = M_{дв} - C_p \frac{\varphi_{гст} - \varphi_{бо} n_p}{n_p^2} \quad (3.14)$$

де, $M_{дв}$ – момент управління двигуном; $M_{сопр}$ – момент опору обертанню башти;

C_p – жорсткість редуктора; n_p – передавальне число редуктора;

$J_{дв}$ – момент інерції ротора двигуна; $\varphi_{дв}$ – кут повороту ротора двигуна;

$\varphi_{гст}$ – кут повороту ротора двигуна з урахування нелінійності гістерезисного типу, зумовленої наявністю люфту двигуна; $\varphi_{бо}$ – кут повороту вертикального каналу (об'єкта управління).

З Рисунок 3.18 видно, що вхідними параметрами моделі механічної частини двигуна є момент управління двигуном – $M_{дв}$, кут повороту блоку вертикального наведення – $\varphi_{бо}$ та кут повороту ротора двигуна, що пропущений через нелінійну ланку гістерезисного типу, – $\varphi_{гст}$, за допомогою яких формується момент навантаження на валу двигуна. Вихідний параметр моделі – кут повороту валу двигуна. Для врахування у моделі двигуна нелінійності гістерезисного типу кут повороту ротора двигуна проходить через нелінійну ланку (рисунок 3.18), де на виході одержується сигнал $\varphi_{гст}$, в якому також враховується дія моменту невірноваженості $M_{нр}$.

До особливостей математичної моделі механічної частини двигуна відносяться:

1) Врахування нелінійності, що викликана люфтом привода, для чого кут повороту двигуна $\varphi_{дв}$ (вихідний сигнал математичної моделі двигуна) пропускається через нелінійну ланку. Блок схема формування кута повороту двигуна $\varphi_{дв}$ з врахуванням люфту наведена на рисунку 3.18;

2) Взаємозв'язок механічної частини двигуна та об'єкта управління пропускається через редуктор. Цей взаємозв'язок забезпечується введенням у диференційне рівняння кута повороту вертикального (горизонтального) каналу;

3) З метою встановлення адекватності моделі реальній роботі двигуна



вводиться обнуління прискорення обертання двигуна при його нульовій швидкості та виконання визначених співвідношень між моментами, що діють на двигун. Ці умови наведені на рисунку 3.17 та мають вигляд:

$$\left| M_{ДВ} - C_p \frac{\varphi_{Л} - \varphi_{БО} n_p}{n_p^2} \right| \leq |M_{СОПР}|, \quad \dot{\varphi}_{ДВ} = 0 \quad (3.15)$$

Вихідним параметром моделі вертикального каналу (рисунок 3.18) є кутова швидкість повороту $-\dot{\varphi}_{БО}$, яка є горизонтальною складовою відносної швидкості модуля. При цьому, в ній враховується ще жорсткість пружного балансувального вузла, що врівноважує блок вертикального наведення у межах допустимих значень.

Вхідними величинами моделей є кут повороту двигуна з урахуванням дії люфту приводу і кут повороту пружини А. При цьому, необхідно враховувати дію моменту невривноваженості. Вихідною величиною моделі є кутова швидкість вертикального каналу наведення.

Абсолютна кутова швидкість модуля $\dot{\varphi}_{АВС}$ визначається шляхом складання кутової швидкості вертикального каналу наведення $\dot{\varphi}_{БО}$ (відносної швидкості) та кутової швидкості корпусу модуля $\dot{\varphi}_{КОРП}$:

$$\dot{\varphi}_{АВС} = \dot{\varphi}_{БО} + \dot{\varphi}_{КОРП} \quad (3.16)$$

Отриманий сигнал абсолютної швидкості $\dot{\varphi}_{АВС}$ є вхідний сигнал для гіротахометра, що входить до складу системи стабілізації вертикального каналу.

Математична модель гіротахометра ГТ46 описується наступною передатною функцією [16]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{\omega_{и}(p)} = \frac{k_{ГТ}}{T_0^2 p^2 + 2\zeta T_0 p + 1}, \quad (3.17)$$

де, $U(p)$ – вихідна напруга; $\omega_{и}(p)$ – вимірювана кутова швидкість; $k_{ГТ}$ – статичний коефіцієнт передачі (11,04 Вс/рад); ζ – відносний коефіцієнт демпфірування (0,5 – 0,75); T_0 – постійна часу (0,006736 с).

Математична модель динаміки горизонтального каналу описується



аналогічним співвідношенням за винятком схемо-технічних особливостей горизонтального каналу: відсутність в контурі керування сигналу зворотного сигналу по напрузі та відсутністю в горизонтальному каналі пружного балансувального вузла, що використовується для врівноваженості блоку озброєння [9,10].

$$J_B \ddot{\varphi}_B + M_{TP} \text{sign} \dot{\varphi}_B - M_{HP} \text{sign} \varphi_B + C_p \varphi_B = C_p \varphi_{ДВ} / n_p - M_{HP} \quad (3.18)$$

де, M_{TP} – момент тертя; M_{HP} – момент неврівноваженості; J_B – момент інерції, башти; φ_B – кут повороту блоку горизонтального наведення.

Вхідними величинами моделі є кут повороту двигуна – φ_B . При цьому необхідно враховувати дію моменту неврівноваженості – M_{HP} . Вихідною величиною моделі є кутова швидкість блоку вертикального наведення – $\dot{\varphi}_{BO}$, яка є горизонтальною складовою відносної швидкості модуля.

В таблицях 3.1-3.3 наведені чисельні значення параметрів, що використовувались при розрахунках.

Таблиця 3.1 - Чисельні значення параметрів блоку вертикального наведення

Параметри блоку вертикального наведення		
M_{TP}	Момент тертя, Нм	≤ 200
M_{HP}	Момент неврівноваженості, Нм	≤ 33
J_{BO}	Момент інерції, Нмс ²	270
K_{PP}	Жорсткість пружини, Нм/кут.град.	5,1

Таблиця 3.2 - Чисельні значення параметри корпусу горизонтального наведення

Параметри корпусу горизонтального наведення		
M_{TPB}	Момент тертя, Нм	≤ 400
M_{HPB}	Момент неврівноваженості, Нм	≤ 250
J_B	Момент інерції, Нмс ²	887



Таблиця 3.3 - Чисельні значення параметрів двигунів

Параметри двигуна		ГН (ЕДМ20)	ВН (ЕДМ14)
$C_{ерс}$	Постійна е.р.с., Вc/рад	0,053	0,056
$R_{ОБ}$	Опір обмотки, Ом	0,1 + 0,05	0,46
$T_{Я}$	Постійна часу якоря, с	0,0015	0,0015
$J_{ДВ}$	Момент інерції ротора двигуна, Нмс ²	0,0003	0,47e ⁻⁴
$M_{ОПОР}$	Момент опору, Нм	(0,075-0,09)	(0,075-0,09)
C_M	Постійна моменту навантаження на валу,	0,053	0,056
C_p	Жорсткість редуктора, Нм/рад	25 · 104	25 · 104
n_p	Передавальне число редуктора	520	490

На підставі аналізу моделей побудови аналогових стабілізаторів та на підставі матеріалів, що викладені вище, були отримані обчислювальні схеми математичних моделей блоку вертикального наведення і блоку горизонтального наведення, що відображають взаємозв'язок моделей всіх вхідних пристроїв для аналогового і цифрового варіантів (рисунок 3.18-3.21).

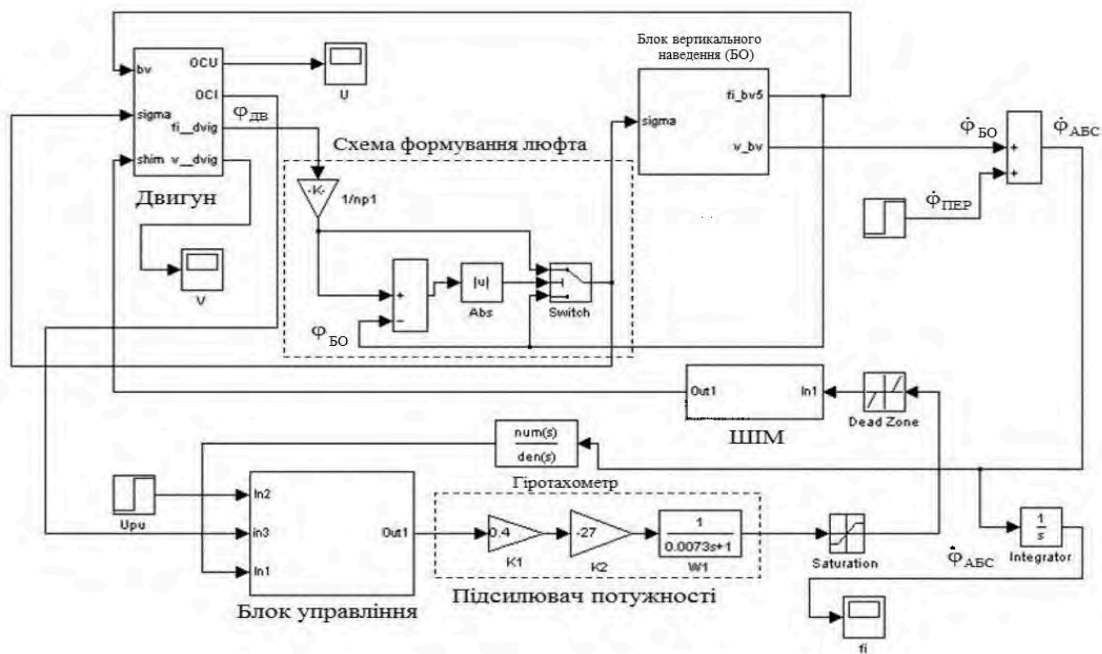


Рисунок 3.18 - Обчислювальна схема моделі блока вертикального наведення та двигуна з системою формування люфту - аналоговий варіант

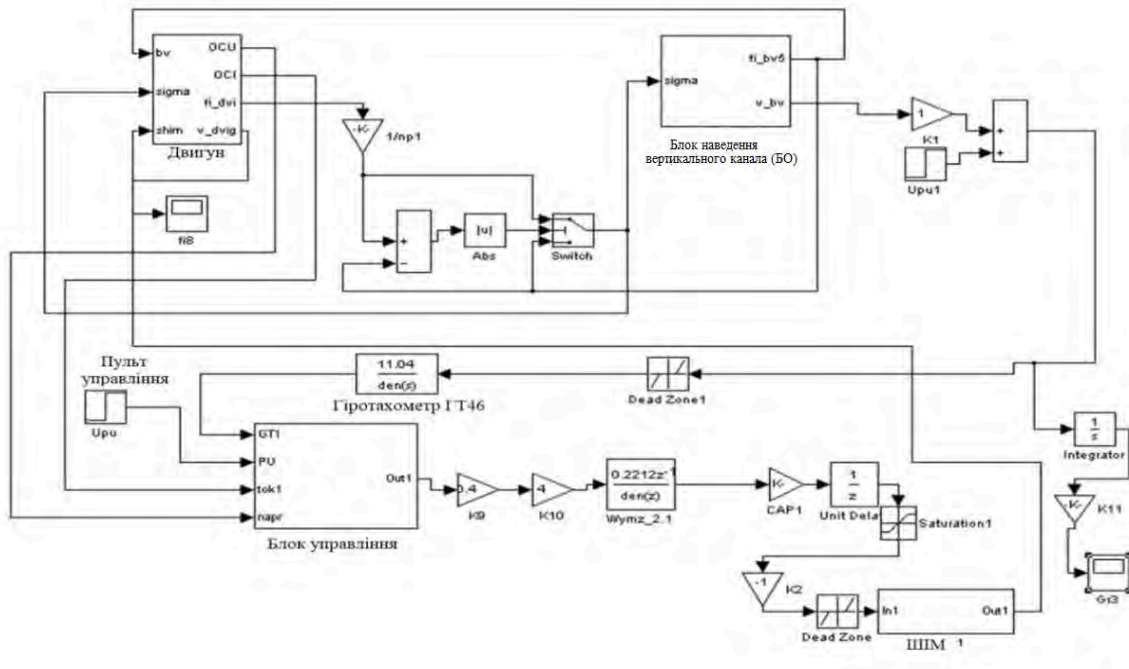


Рисунок 3.19 - Обчислювальна схема моделі блоку вертикального наведення та двигуна з системою формування люфту - цифровий варіант

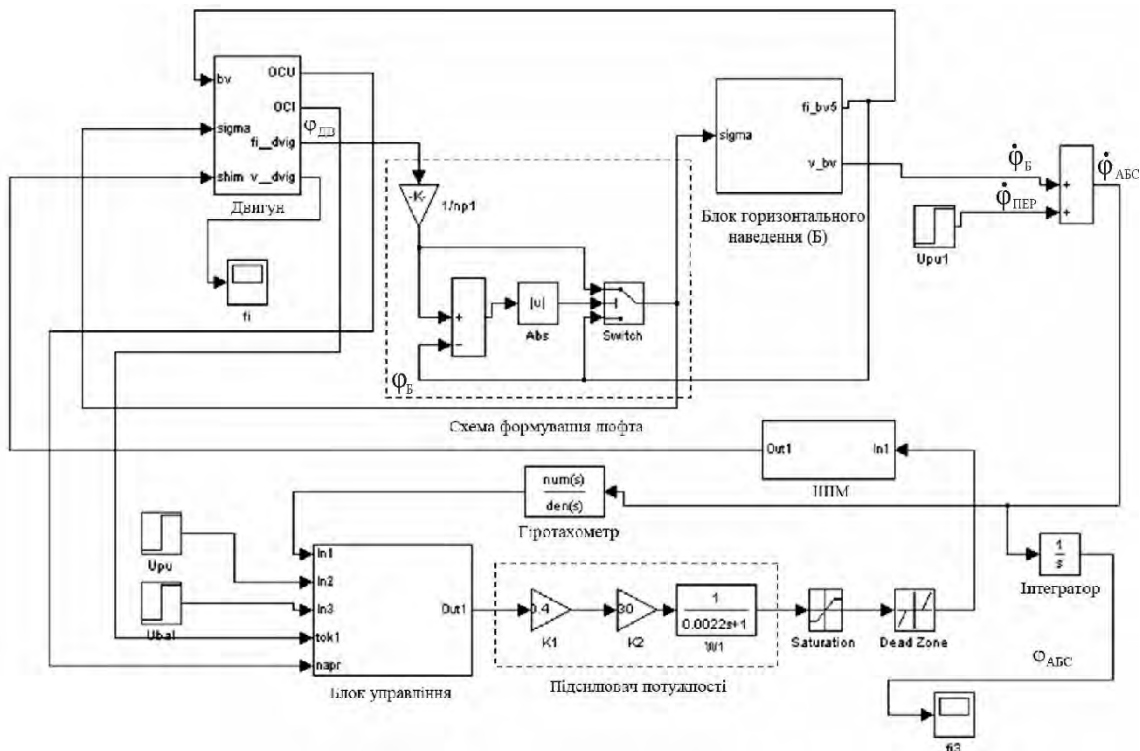


Рисунок 3.20 - Обчислювальна схема моделі блоку горизонтального наведення та двигуна з системою формування люфту - аналоговий варіант

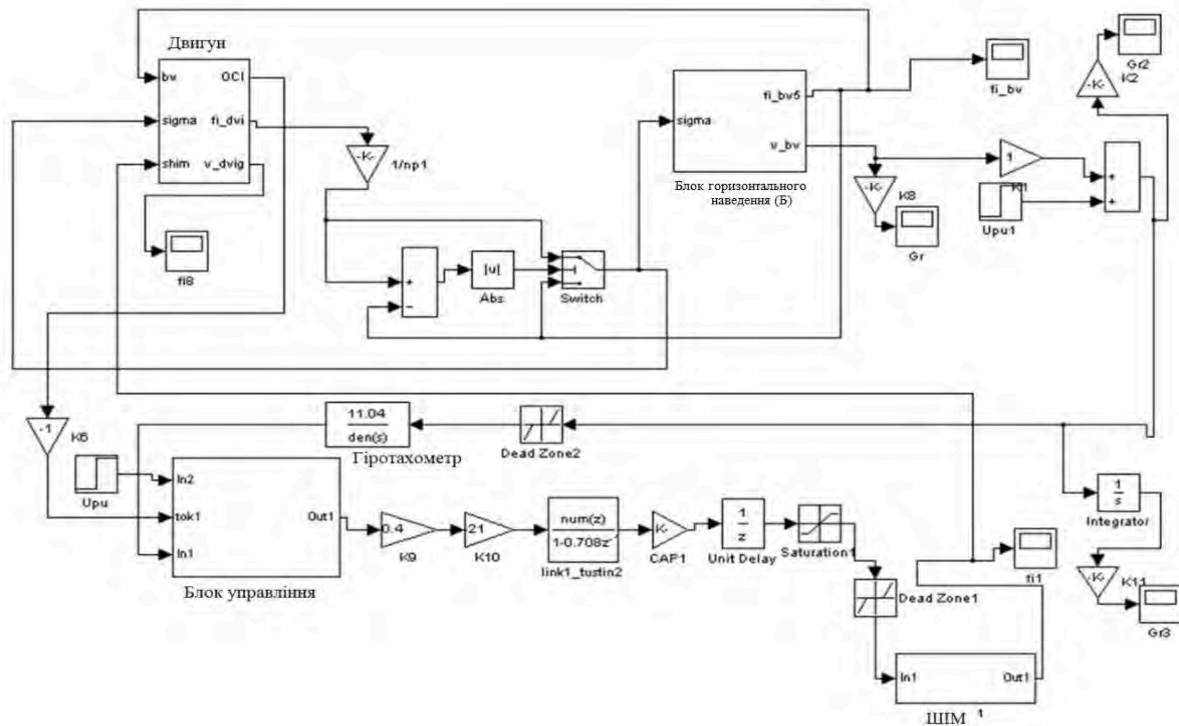


Рисунок 3.21 - Обчислювальна схема моделі блоку горизонтального наведення та двигуна з системою формування люфту - цифровий варіант

3.3. Аналогові та цифрові математичні моделі горизонтального і вертикального каналів

Розроблені математичні моделі каналів горизонтального та вертикального наведення для аналогового варіанту виконання мають багато спільного у схемній побудові та в той же час мають окремі ланки, які притаманні тільки одному з цих каналів [11].

Спільними ланками їх побудови є те, що тракти управління мають по чотири основних складових, які надходять на суматори:

- перша складова формується на підставі суми сигналів гіротахометра та сигналу з пульта керування, які надходять на інтегратор;
- друга та третя складові формуються на підставі сумарного сигналу гіротахометра та сигналу зворотного зв'язку по струму для каналу ГН, а для каналу ВН до третьої складової ще додається сигнал зворотного зв'язку по



напрузі;

- четверта складова по каналу ГН визначається сигналом зворотного зв'язку по струму, а в каналі ВН визначається сигналами зворотних зав'язків по струму та напрузі;

Для забезпечення можливості підвищення якості процесів управління передбачено:

- налаштувальні коефіцієнти K_y (підсилення тракту управління), ГТ (підсилення тракту по сигналу гіротахметра), ДС (підсилення тракту по сигналу датчика струму), ТГ (віртуальний коефіцієнт підсилення по каналу тахметра (тільки для каналу ВН));

- проходження на різних етапах сигналів управління по ланцюгам математичних моделей в каналах передбачені фільтри низьких або високих частот, а також пристрої, що обмежують рівні сигналів.

Переходи від аналогової до цифрової форми обчислення виконуються за допомогою Z-перетворення (дискретність перетворення 2,5 мс) відповідних передаточних функцій програмними методами. При цьому, використовувався пакет Control Tool Box системи MATLAB, а саме: функція `c2d` з такими методами дискретизації, як затримка нульового порядку на вході (`zoh`), і білінійна апроксимація (`tustin`). Методи дискретизації обиралися, виходячи з умови забезпечення збігу логарифмічних амплітудно-частотних характеристик передавальних функцій. Ці функції побудовані за електричними схемами відповідних ланок блоку управління в системі WorkBench, передавальних функцій цих же ланок, які отримані як аналітичними методами і побудованими в системі MATLAB, так і експериментальним шляхом.

Обчислювальні схеми горизонтального каналу наведені на рисунку 3.22 - аналогового, на рисунку 3.23 – цифрового, відповідно.

Обчислювальні схеми горизонтального каналу наведені: аналогового - на рисунку 3.24, цифрового – на 3.25, відповідно.

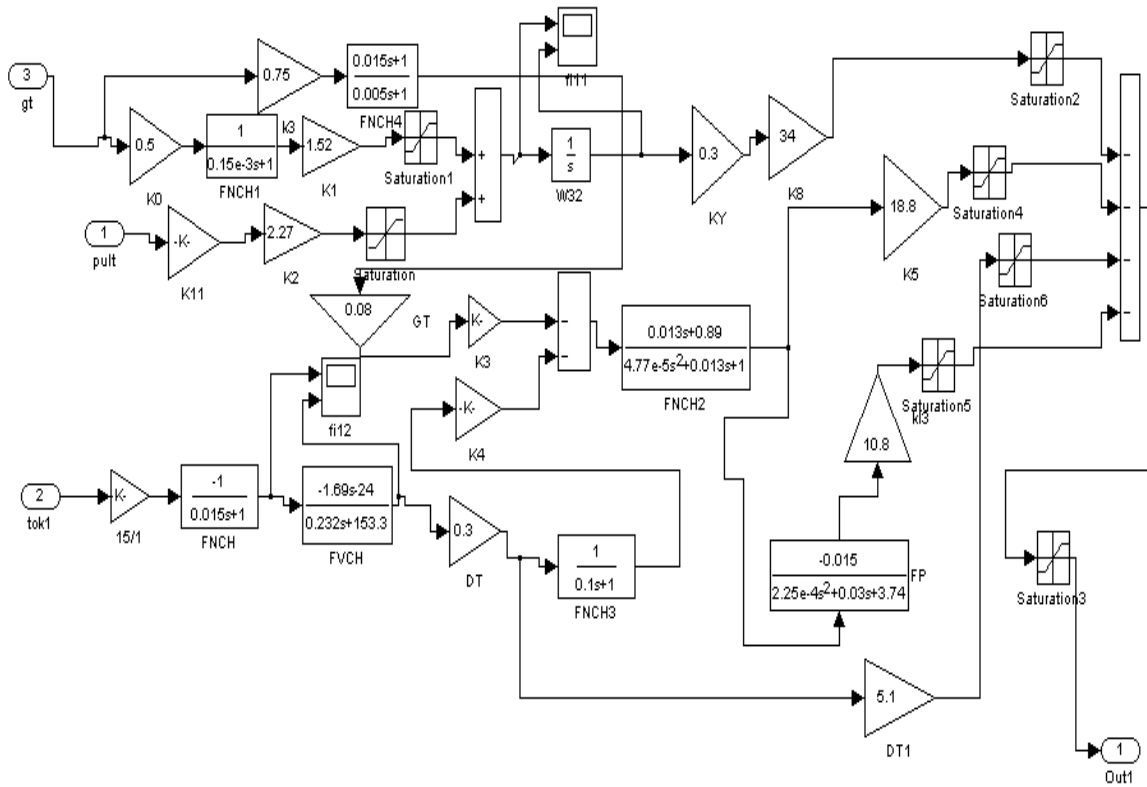


Рисунок 3.22 - Обчислювальна схема аналогового каналу ГН блока управління стабілізатором

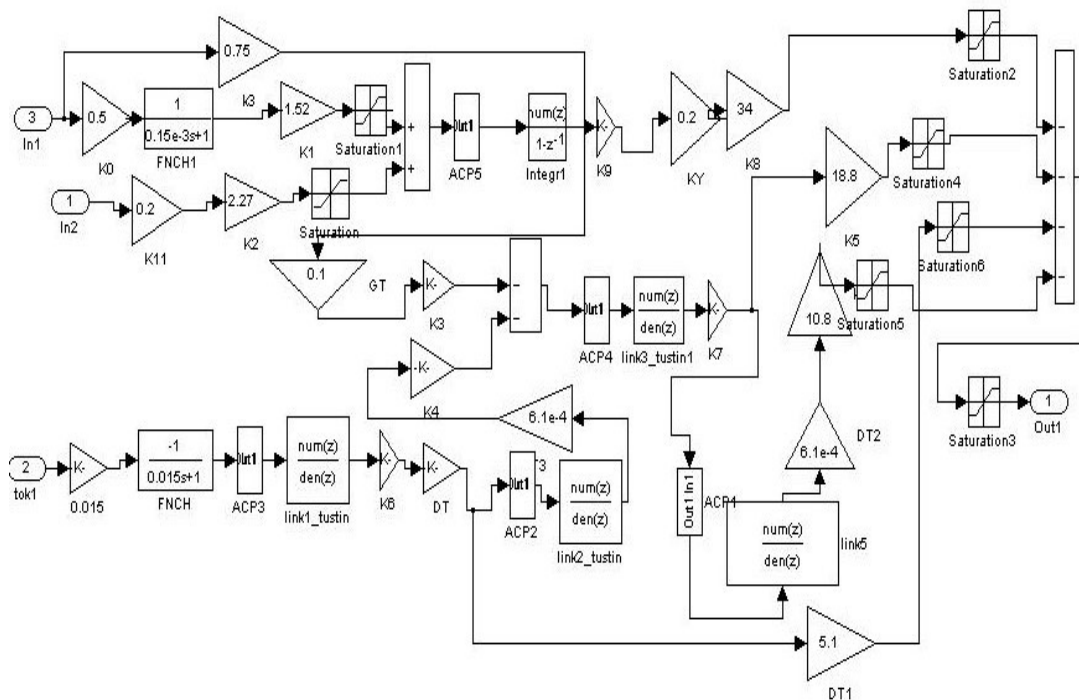


Рисунок 3.23 - Обчислювальна схема цифрового каналу ГН блока управління стабілізатором

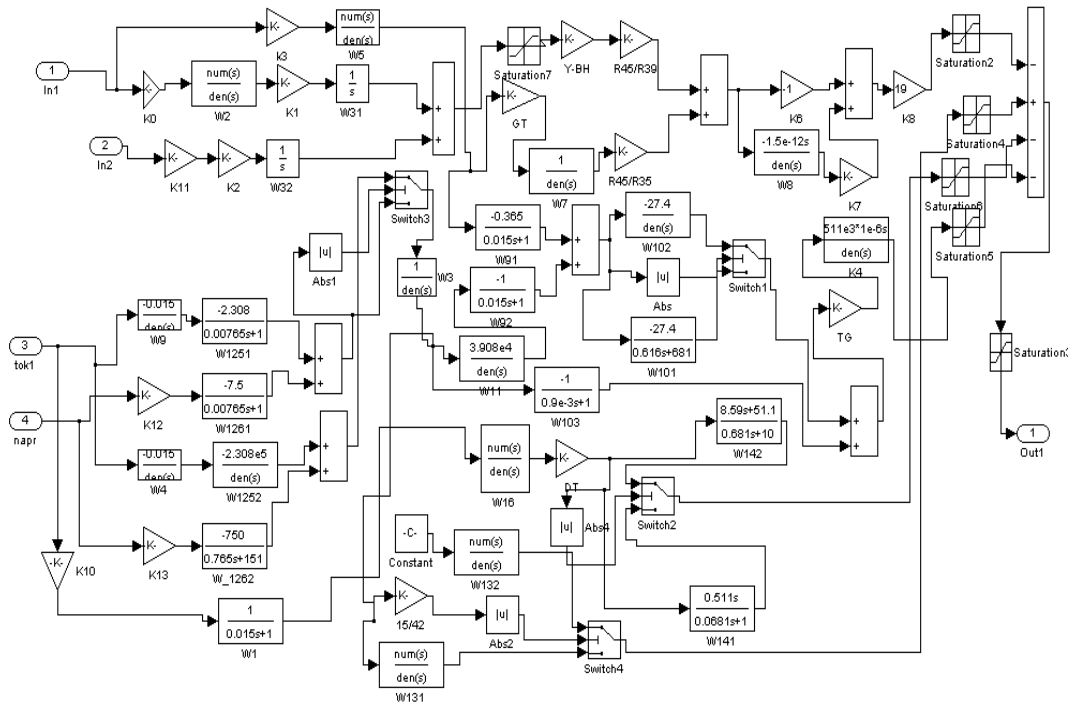


Рисунок 3.24 - Обчислювальна схема аналогового каналу ВН блока управління стабілізатором

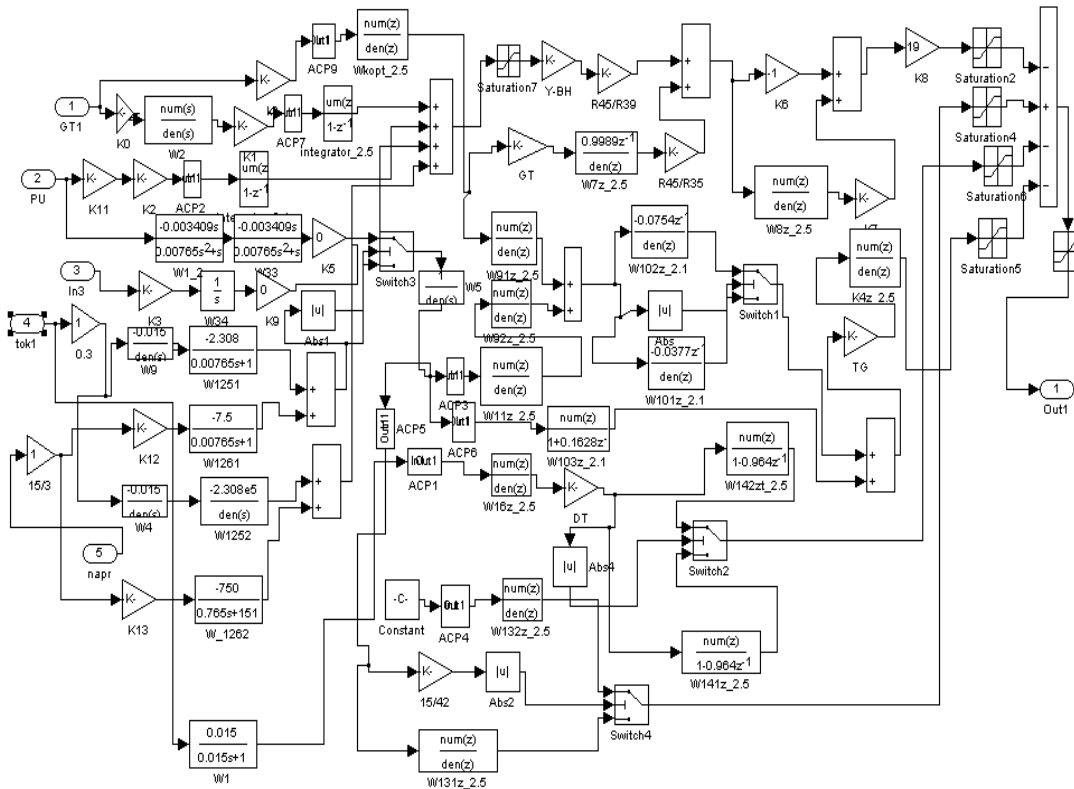


Рисунок 3.25 - Обчислювальна схема цифрового каналу ВН блока управління стабілізатором



3.4. Використання математичних моделей стабілізатора при моделюванні режимів управління

Розроблені моделі математичного моделювання були використані при моделюванні режимів управління стабілізатора в режимах:

– «АВТ» – наведення горизонтального та вертикального каналів з швидкостями ≤ 6 °/с та «ПАВ» – наведення горизонтального та вертикального каналів з швидкостями ≥ 35 °/с;

– «ПЕРЕКИД» – перемикання з швидкості наведення ≤ 6 °/с на швидкість наведення ≥ 35 °/с;

– «ЦВ» – перекид блоку горизонтального каналу наведення у визначеному напрямку на обраний об'єкт з швидкістю ≥ 35 °/с;

– «УПР» – режим функціонування стабілізатора з підвищеною точністю з швидкістю наведення $\leq 0,02$ °/с;

– «ВУ», «НУ» – функціонування стабілізатора на верхньому та нижньому обмежувачах руху;

– «ВНИЗ» та «ВВЕРХ» – обминання заборонених для виконання повороту зон;

– «ГАБАРИТ» – приведення каналів горизонтального (Б) та вертикального наведення (БО) у габарити виробу;

Правильність моделювання режимів управління була підтверджена на перших зразках стабілізатора, які були виготовлені відповідно до конструкторської документації та пройшли всі види випробувань.

3.5. Підвищення точнісних параметрів стабілізатора в режимі функціонування модуля з підвищеною точністю

Метою підвищення точнісних параметрів стабілізатора є усунення впливу відводів Б та БО на час функціонування стабілізатора в режимі «УПР».

Для виконання поставленого завдання запропоновано на цей час



управління приладовим комплексом стабілізації проводити в режимі «УПР-1» по тракту, в якому не має сигналу відведення, що виникає в результаті не повністю скомпенсованого залишкового нульового сигналу гіротахметра (ДКШ) [12].

Роботи щодо доцільності та обґрунтування введення режиму «УПР-1» проведено за допомогою математичного моделювання та експериментального відпрацювання отриманих результатів на атестованому технологічному стенді СТМ02 та навчальному комплексі УК675.

3.5.1. Похідні данні для проведення математичного моделювання по введенню режиму функціонування модуля без впливу відводів

Для виконання досліджень по введенню режиму «УПР-1» використовувалась математична модель, що описує та моделює роботу цифрового приладового комплексу вимірювання механічних величин та стабілізації по горизонтальному каналу в режимі «УПР».

Загальна схема математичної моделі наведена на рисунку 3.26. У ній позначені наступні елементи:

Subsystem1 – блок, що описує кінематику руху Б відносно інерціального простору;

Gyrofachometer – блок, що описує математичну модель гіротахметра;

BU – блок, що описує алгоритми роботи блоку керування;

Dvigatel+Bashnya – блок, що описує математичну модель двигуна механізму повороту, самого механізму повороту та башти.

Zveno 3, zveno 7, zveno 17 – є аналогово-цифровими перетворювачами.

Кінематика руху Б в інерціальному просторі реалізується в блоці *Subsystem1*.

Алгоритми цього блоку є переходами від системи координат корпусу в інерціальному просторі до системи координат Б в інерціальному просторі [13]. На вході цього блоку подаються три кути положення корпусу відносно інерціального простору, відносні кути Б та механізму повороту відносно корпусу. Обчислення трьох кутів положення Б реалізується за допомогою

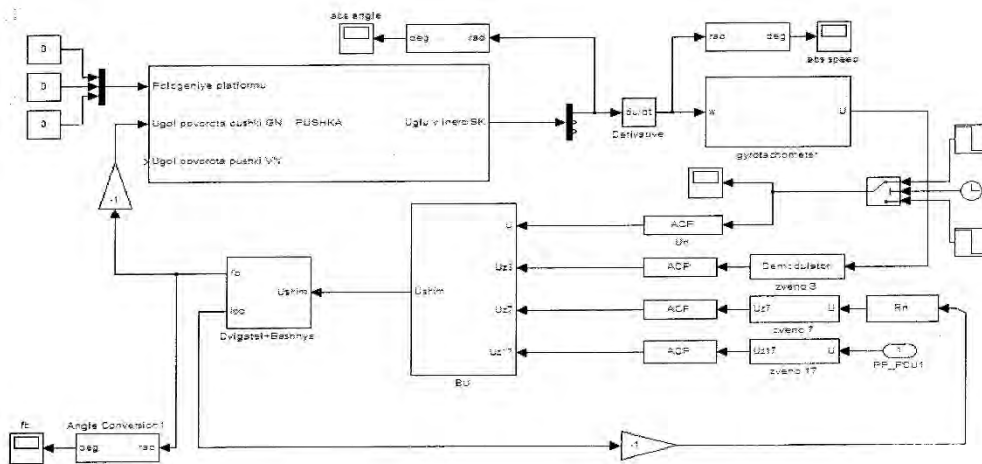


Рисунок 3.26 - Математична модель горизонтального каналу в режимі «УПР»

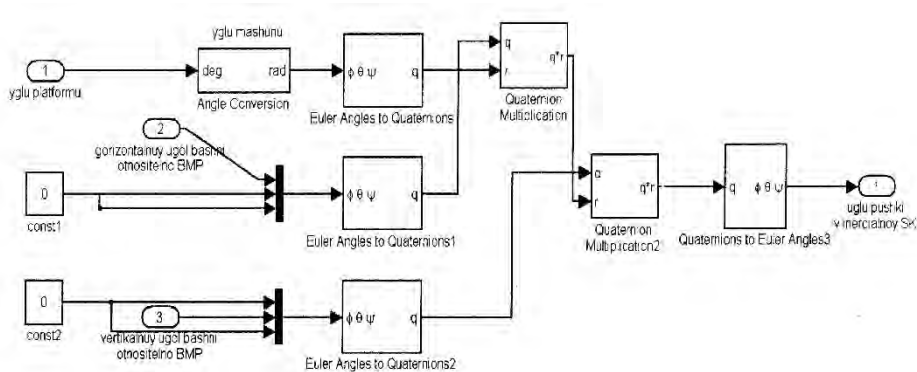


Рисунок 3.27 - Блок Subsystem1. Модель кінематики руху Б

кватерніонів [14,15]. Відомо що кватерніони в порівнянні з кутами Ейлера мають істотні переваги, а саме: немає невизначеності при кутах $\pm 90^\circ$. На виході цього блоку отримуються кути положення башти в інерціальному просторі. Ці кути потім диференціюються та подаються на вхід блоку гіротахометра.

Гіртахометр ГТ-46

Параметри передатної функції гіротахометра ГТ-46 (ДКШ), прийняті відповідно [11]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{\omega_n(p)} = \frac{k_{ГТ}}{T_0^2 p^2 + 2\zeta T_0 p + 1},$$

де, $U(p)$ – вихідна напруга; $\omega_n(p)$ – вимірювана кутова швидкість; $k_{ГТ}$ – статичний коефіцієнт передачі (11,04 Вc/рад); ζ – відносний коефіцієнт



демпфірування (0,5 – 0,75); T_0 – постійна часу (0,006736 с).

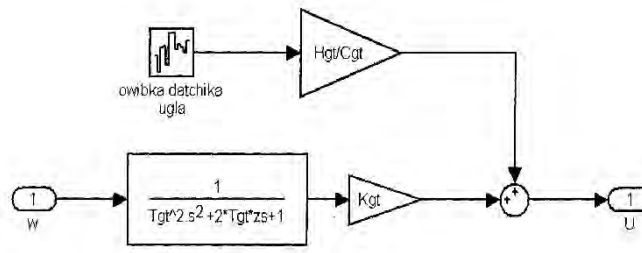


Рисунок 3.28 - Блок Gyrocompass. Модель гіротахометра

У блоці *owibka datchika ugla* моделюються випадкова помилка датчика кута гіротахометра та переводиться в розмірність вольт, а потім додається до вихідного сигналу гіротахометра. Середня помилка датчика кута обирається так, щоб імітувати поріг чутливості гіротахометра 0,015 град/сек.

Блок управління

У цьому блоці реалізується алгоритм керування. Вхідними сигналами є: сигнали з гіротахометра, датчика струму, сигнал з пульта керування, а також приладів приведення та приладу режиму «ЦВ». Вихідним сигналом є сформований сигнал ШІМ, який через підсилювач подається на електродвигун.

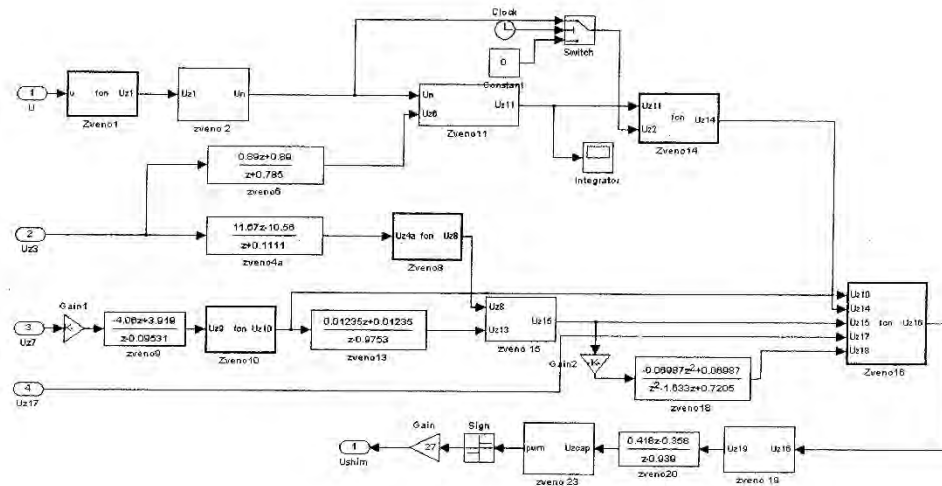


Рисунок 3.29 - ВУ. Модель блоку управління

Були підібрані значення наступних коефіцієнтів, що налаштовуються, у блоці керування, при яких стабілізатор має найкращі характеристики перехідного процесу: $K_{ДГ} = 0,1$ – коефіцієнт підсилення у ланці №10 блоку керування; $K_{ГТ} = 0,1$ – коефіцієнт підсилення у ланці № 8 блоку керування;



$K_V = 0,34$ – коефіцієнт підсилення у ланці № 14 блоку управління.

Електродвигун

Модель двигуна розроблено у вигляді двох блоків – блоку перетворювачів, які містять співвідношення для формування струму якоря двигуна з урахуванням постійної часу якоря, і блоку механічної частини двигуна та відповідають формулам 3.12-3.15.

У таблиці 3.4, 3.5 відповідно, наведено чисельні значення параметрів двигуна ЕДМ02 та редуктора, що використовувались при розрахунках.

Таблиця 3.4 - Чисельні значення параметрів двигуна ЕДМ02

Параметри двигуна		ГН (ЕДМ02)
C_E	Постійна ЕРС, Вс/рад	0,0625
R_{OB}	Опір обмотки, Ом	0,08
T_J	Електромагнітна постійна двигуна, с	0,0015
$J_{ДВ}$	Момент інерції двигуна, Нмс ²	$5 \cdot 10^{-3}$
$M_{СОПР}$	Момент опору	0,0075-0,09
C_M	Постійна моменту навантаження на валу, Нм/А	0,0625
T_J	Електромеханічна постійна	$10 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3.5 - Чисельні значення параметрів редуктора

Параметри редуктора		
C_p	Жорсткість редуктора, Нм/рад	$25 \cdot 10^{-4}$
n_p	Передавальне число редуктора	467,617
χ_L	Сумарний люфт, кут.хв	23,6

У процесі моделювання розглядався варіант з введенням у режим «УПР» підрежиму «УПР-1». Підрежим «УПР-1» вводився з метою виключення, з режиму наведення на малих швидкостях можливих змін нульового сигналу гіротахметра, що впливає на роботу приладового комплексу вимірювання механічних величин та стабілізації.

Алгоритм формування режиму «УПР-1» наведено на рисунку 3.31.

Перехід у режим «УПР-1» забезпечується по команді «УПР-1» з пульта управління ПУ, через 1–2 с після початку роботи виробу.



3.5.2. Результати моделювання

У процесі моделювання здійснювалося порівняння характеру зміни кутового положення й абсолютної швидкості БО у «УПР» та «УПР-1». Для цього протягом 1,5 с, з ПУ посилався сигнал рівнем 10 В. Потім сигнал ПУ обнулявся (рисунок 3.32 а). На другій секунді від початку діапазону здійснювався перехід у режим «УПР-1», тобто обнулявся сигнал ПУ та сигнал ДКШ на вхід інтегратора і запам'ятовувався вихідний сигнал інтегратора та сигнал ПУ передавався на вхід суматора. Тому що на цей час сигнал ПУ дорівнював нулю, зміни кутового положення БО не було.

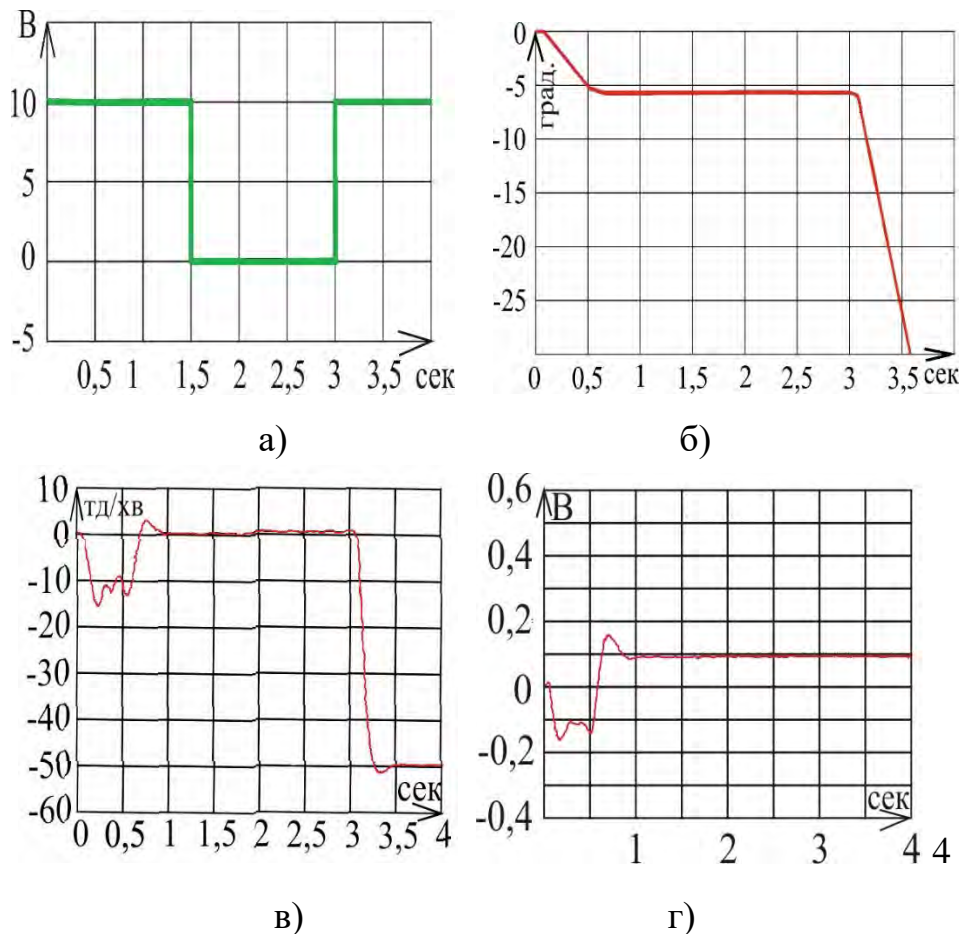
На третій секунді від початку діапазону збільшувався рівень сигналу ПУ до 10 В (рисунок 3.32 а), кут та швидкість БО змінювались, а сигнал інтегратора не змінювався (рисунок 3.32 г). При цьому, швидкість наведення обмежувалась параметрами вихідного сигналу ДКШ по ланцюгу, що демпфірує (рисунок 3.32 в).

Моделювання проводилось для варіанта режиму «УПР-1», коли перехід у режим здійснюється відновленням вхідних сигналів інтегратора та передачею сигналу наведення з ПУ безпосередньо на суматор. При цьому, вихідний сигнал інтегратора відповідає моменту переходу в режим «УПР-1» (рисунок 3.32 г).

Для порівняння з режимом стабілізації керування в режимі «УПР-1» забезпечується при нульовому сигналі ПУ протягом 1,5 с, а потім зміна кута забезпечується пультом у режимі наведення.

Як видно з рисунку 3.32, при відсутності моменту неврівноваженості в режимі «УПР-1», стабілізація по швидкості забезпечує збереження кутового положення башти.

Для оцінки погрішності стабілізації в режимі «УПР-1» під впливом моменту неврівноваженості тривалість режиму «УПР» збільшили до 3 с (рисунок 3.33 а).



**Рисунок 3.32 - а) – вхідний сигнал с ПУ; б) – абсолютний кут φ_{ABC} ;
в) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; г) – сигнал з виходу інтегратора при
 $M_{HP} = 0$ Нм та вхідному сигналі (рисунок 3.32 а)**

Для випадку $M_{HP} = 650$ Нм (рисунок 3.33) стабілізація кутового положення башти також забезпечується, однак при цьому є невеликі відведення (приблизно 0,5 хвилини за 1,5 с) на рівні 5 т.д./хв у режимі АВТ <25 т.д./хв).

При зміні знака моменту невірноваженості (рисунок 3.34) напрямок відведення також змінився, але рівень швидкості відведення не перевищує 5 т.д./хв.

При зміні сигналу наведення у відповідності з циклограмою Рисунок 3.33 з урахуванням стабілізації Б на куті 6° та наступному переході в режим «УПР-1» вихідний сигнал інтегратора не змінюється (рисунок 3.33, 3.34), при цьому відбувається незначне відхилення башти ($\approx 1,5$ кут.хв.) від вихідного положення у бік збільшення або зменшення залежно від знака моменту невірноваженості (рисунок 3.33, 3.34).

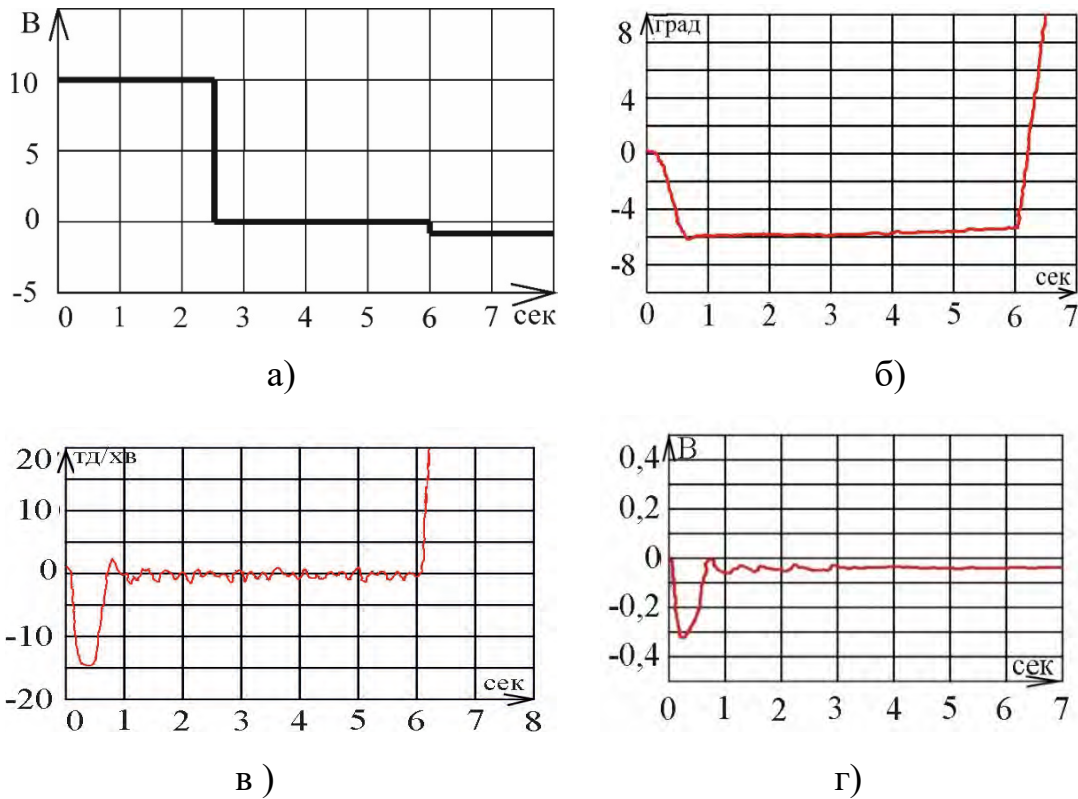


Рисунок 3.33 - а) – вхідний сигнал з ПУ; б) – абсолютний кут φ_{ABC} ; в) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; г) – сигнал з виходу інтегратора при $MHP = 650$ Нм

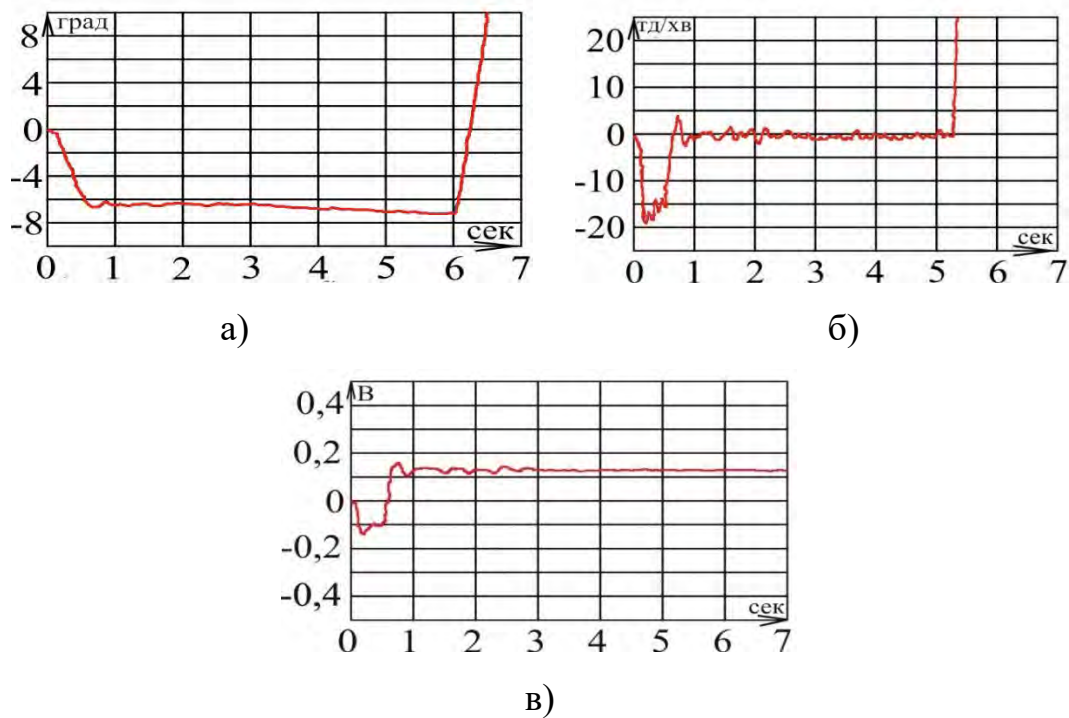


Рисунок 3.34 - а) – абсолютний кут φ_{ABC} ; б) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; в) – сигнал з виходу інтегратора $Mnp = -650$ Нм і вхідному сигналі (рисунок 3.34).



Зі збільшенням тривалості режиму «УПР-1» до 15с. (час тривалості режиму «УПР») відхилення башти від вихідного положення не перевищує 2 хв. (рисунок 3.35).

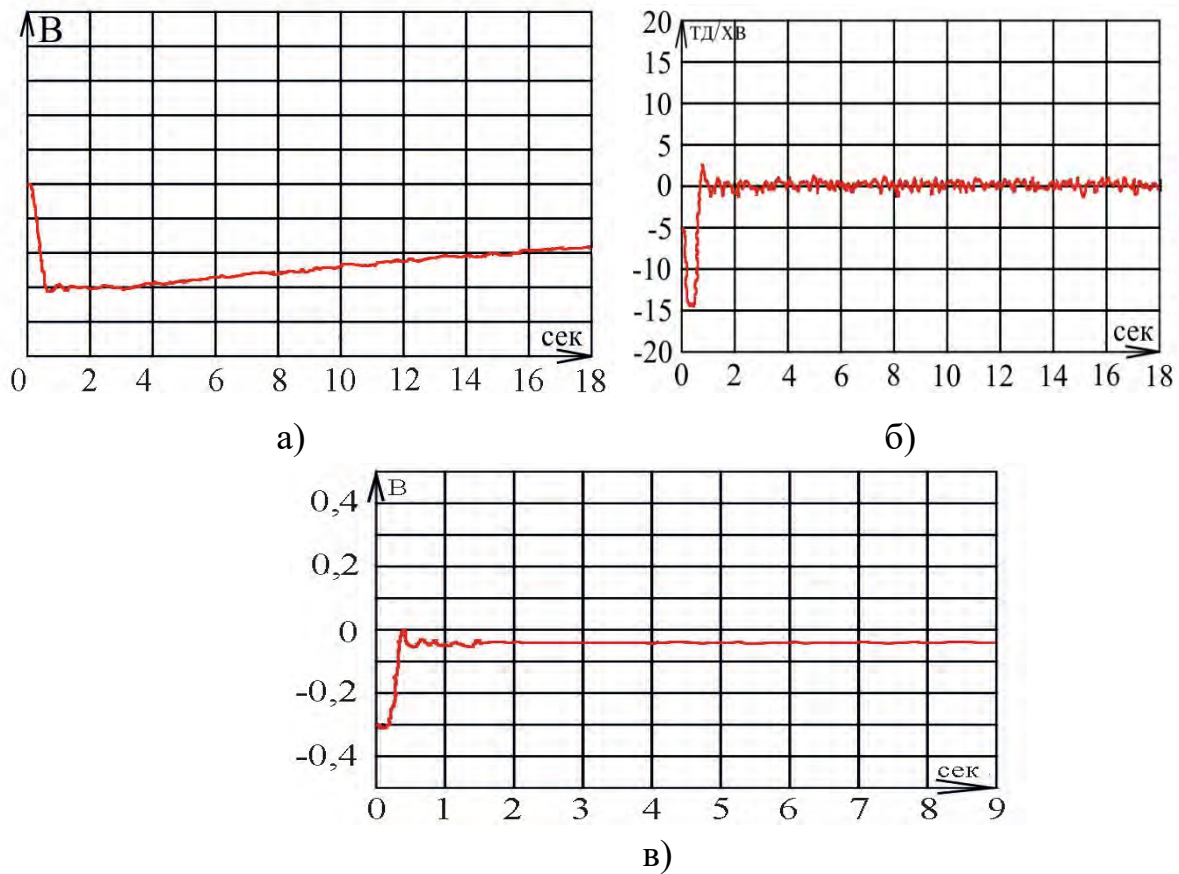


Рисунок 3.35 - а) – абсолютний кут φ_{ABC} ; б) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; в) – сигнал з виходу інтегратора $M_{np} = 650$ Нм

Для імітації режиму наведення блоку БО з малими швидкостями зміну сигналу задавали відповідно до рисунку 3.36 а.

На рисунках 3.36 та 3.37 надано результати режиму наведення в «УПР-1» при рівні моменту невірноваженості $M_{np} = \pm 650$ Нм. По зміні положення БО видно, що в режимі «УПР» з використанням підрежиму «УПР-1» можна забезпечити рівномірне наведення й компенсувати кут її відхилення на інтервалі часу.

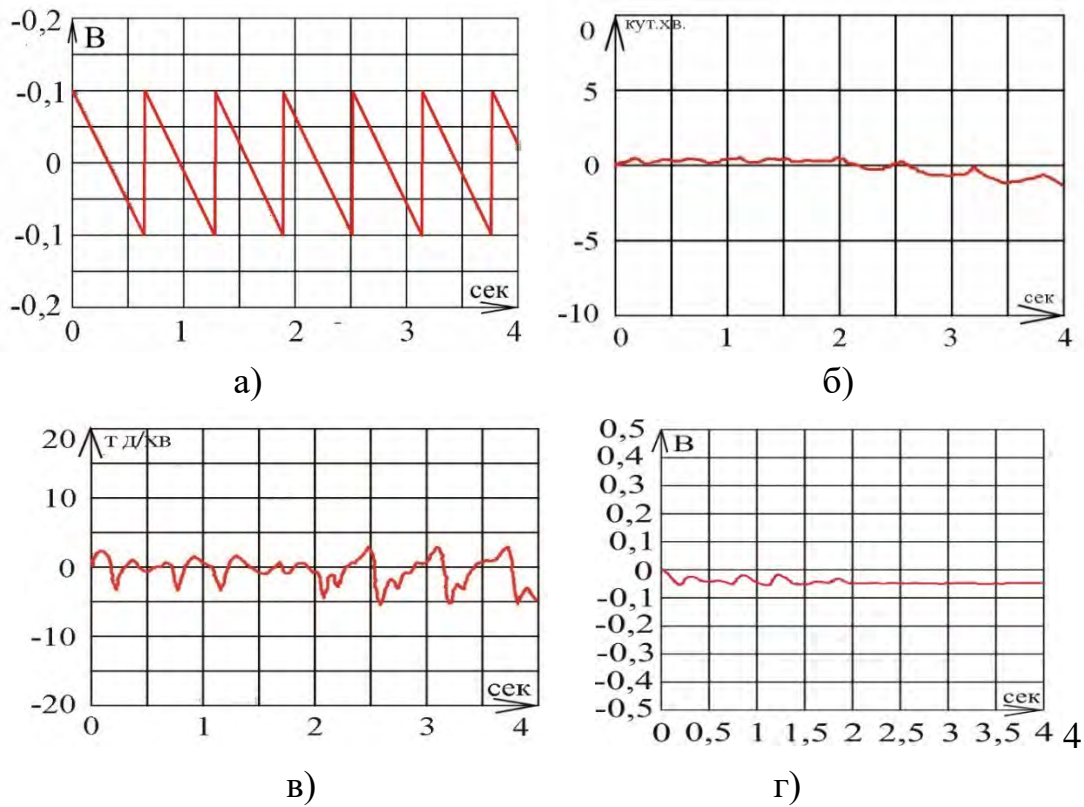


Рисунок 3.36 - а) – вхідний сигнал з ПУ; б) – абсолютний кут φ_{ABC} ; в) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; г) – сигнал з виходу інтегратора $M_{np} = 650\text{Nm}$ та вхідному сигналі (рисунок 3.34 а)

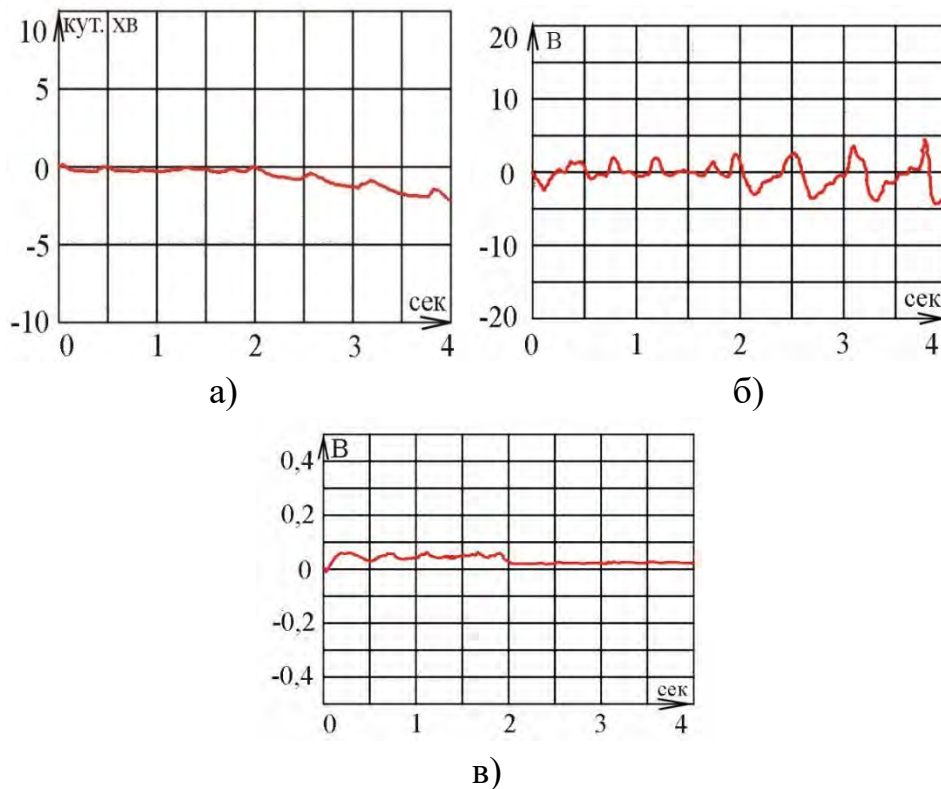


Рисунок 3.37 - а) – абсолютний кут φ_{ABC} ; б) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; в) – сигнал з виходу інтегратора $M_{np} = -650\text{Nm}$ та вхідному сигналі (рисунок 3.36)



За результатами моделювання отримані наступні результати:

1. При моменті неврівноваженості, що не перевищує сумарний момент опору, режим стабілізації забезпечується незалежно від використання в режимі «УПР» підрежиму «УПР-1»;

2. При моменті неврівноваженості, що перевищує сумарний момент опору, та наявності підрежиму «УПР-1» відхилення башти від вихідного положення (на момент переходу в режим «УПР-1») на інтервалі до 15 секунд не перевищує 2 кут.хв. Швидкість відхилення не перевищує поріг чутливості гіротахметра;

3. При наявності підрежиму «УПР-1» забезпечується в режимі «УПР» рівномірне наведення БО на мінімальних швидкостях у варіанті запам'ятовування вихідного сигналу інтегратора на момент переходу в режим «УПР».

3.5.3. Результати експериментального відпрацювання приладового комплексу стабілізації в режимі «УПР» при наявності підрежиму «УПР-1»

Для підтвердження правильності висновків, що отримані за результатами математичного моделювання, проведено експериментальне відпрацювання на одному з комплектів приладової системи стабілізації, на якому було відкореговано програмно-алгоритмічне забезпечення по введенню додаткового підрежиму «УПР-1».

Випробування проводилися тільки по каналу ВН, як найбільш підданому впливу моменту неврівноваженості блоку наведення вертикального каналу. Необхідність випробувань по каналу ГН визначалась за результатами перевірок каналу ВН.

На стенді СТМ02 були перевірені параметри й функціонування приводів ВН і ГН стабілізатора на відповідність технічним вимогам на стабілізатор після доробки привода ВН по введенню режимів «УПР-1». Крім цього, виконано перевірку параметрів привода ВН на стенді СТМ02 у режимах «УПР-1» при імітації моменту неврівноваженості ($M_{НР}$), що перевищує 2 кгм момент опору (M_c) привода.



За результати випробувань отримано наступні данні:

1. При перевірках підтверджено, що параметри й функціонування приводів ВН і ГН на стенді СТМ02 після доробки ПАО привода ВН по введенню режиму «УПР-1» відповідають вимогам документації (без включення стабілізатора у режими «УПР-1»);

2. При імітації на стенді СТМ02 значення $M_{HP}=32$ кгм, та моменту опору $M_{OP} = 30$ кгм «УПР-1» у режимі заміни інтегратора лінійним підсилювачем і у режимі заміни інтегратора аперіодичною ланкою рух привода під впливом моменту невірноваженості відбувається зі швидкістю ω . Це значно перевищує припустиму швидкість відведення у режимі «АВТ».

Зменшення швидкості ω до припустимого значення $\omega_{відн}$ за рахунок збільшення коефіцієнта демпфірування $K_{ГТВН}$ та коефіцієнта підсилення $U_{ВН}$ не забезпечувалось, тому що це призводило до збудження привода ВН.

Оцінка параметрів привода ВН (нерівномірність швидкості наведення, мінімальна швидкість наведення) у режимах УПР-1 при $M_{HP} < M_{OP}$ не проводилася, тому що доцільно дану оцінку зробити в складі УК675;

3. Результати випробувань привода ВН у складі УК675 показали наступне:

3.1. При $M_{HP} < M_{OP}$ ($M_{OP} = 9,0$ кгм, $M_{HP} = 0,75$ кгм):

– при використанні в режимі УПР-1 лінійного тракту замість інтегратора показники привода ВН відповідають вимогам технічних вимог на стабілізатор у режимі УПР:

$$\omega_{min} < 0,02 \text{ } \%/с \text{ (по технічним вимогам: } < 0,02 \text{ } \%/с),$$

$$\omega_{нерівномір} \leq 0,5 \text{ т.д. (по технічним вимогам: } < 1,0 \text{ т.д.).}$$

Оцінка точності у режимі слідкування за рухомим об'єктом за допомогою ручок пульта ПУ у даному режимі роботи привода ВН показує наступне:

– при переміщенні указки по сітці зі швидкістю 1 т.д./с, що відповідає швидкості руху об'єкта спостереження 6 км/год на відстані 1,5 км, погрішність супроводу об'єкта (слідкування лазерного променя за указкою) досягає 0,5 т.д.. Однак, при варіюванні швидкості руху об'єкту (указки) похибка відстеження



досягає 1 т.д., а при реверсі руху 4 т.д.;

– при використанні аперіодичної ланки, замість інтегратора, показники привода ВН поліпшуються ($\omega_{\text{від}} = 0$, $\omega_{\text{мін}} = 0,0015^\circ/\text{с}$, $\omega_{\text{нерівномір}} \leq 0,3$ т.д.).

Недолік у каналі з аперіодичною ланкою – підпливання приводу до 0,5 т.д. при гальмуванні (відсутнє при використанні лінійного тракту), у зв'язку із чим оцінка погрішності відстеження приводом ВН рухомого об'єкту не проводилось;

3.2. При $M_{\text{НР}} > M_{\text{ОПОР}}$ ($M_{\text{ОПОР}} = 9,0$ кгм, $M_{\text{НР}} = 9,37$ кгм):

– даний режим імітується шляхом підвішування додаткової ваги (5,5 кг) до імітатора вертикального каналу на відстані 1,5 м від осі цапф. У момент вмикання режиму «УПР-1» відзначається рух вниз імітатора. Зі збільшенням маси вантажу швидкість руху збільшується. Поворотом ручок пульта ПУ вгору вдається зупинити рух вертикального каналу і навести промінь лазера на контрольну точку.

В умовах даного п. 3.5.3 була проведена оцінка ефективності варіанта реалізації режиму «УПР-1» з обнулінням вхідного сигналу інтегратора та запам'ятовуванням рівня сигналу інтегратора, що передуює моменту переходу в режим «УПР». Результати випробувань показали, що після переходу в режим «УПР-1» забезпечується стабілізація променя лазера на об'єкті, за яким проводиться спостереження протягом ≈ 1 хв, що перевищує тривалість режиму «УПР» (≈ 15 с) та, якщо буде потреба, забезпечується рівномірне наведення променя лазера по мішені.

Результатами випробувань стабілізатора у режимі «УПР» з підрежимом «УПР-1» підтверджено, що:

1. Варіант підрежиму «УПР-1» із запам'ятовуванням вихідного сигналу інтегратора на момент переходу в режим «УПР-1» забезпечує стабілізацію осі щодо вихідного положення й рівномірне наведення в режимі супроводу рухомого об'єкту. При цьому відведення осі стабілізації відсутні;

2).3 метою виключення впливу зміни нульових сигналів гіротахметра, що призводять до відведення осі стабілізації відносного вихідного положення, у



процесі функціонування доцільно ввести в режим «УПР» підрежим «УПР-1» у варіанті обнуління вхідних сигналів інтегратора, запам'ятовування вихідного сигналу інтегратора на момент переходу в «УПР-1» та задання сигналу наведення з ПУ безпосередньо на суматор.

Висновки до розділу 3

Для підтвердження правильності прийнятих схемо-технічних рішень при створенні стабілізатора, корегуванні його режимів роботи до впровадження у матеріальну частину були виконані наступні етапи робіт:

1. Розроблено математичні моделі окремих приладів, вузлів та блоків, що входять до складу стабілізатора;

2. Розроблено математичні моделі у вигляді математичних моделей блоку БО (канал ВН) та математичної моделі Б (канал ГН) для безперервного та дискретного варіантів обчислення;

3. Розроблено математичні моделі горизонтального та вертикального каналів наведення для безперервного та дискретного варіантів обчислення.

4. Проведено за допомогою створених математичних моделей моделювання всіх режимів роботи всіх створених цифрових стабілізаторів.

5. Проведено за допомогою розроблених математичних моделей роботи, що наведені у розділах 4,5.

6. Запропоновано методику, що дозволяє усунути самовідводи БО та Б, що викликані дрейфом нульових сигналів гіротахметра, та призводять до відведення марки прицілу відносного вихідного положення у режимі «УПР». За цією методикою у режимі «УПР» вводиться підрежим «УПР-1», в якому обнулюються вхідні та запам'ятовуються вихідні сигнали інтегратора, на момент переходу в «УПР-1». При такій зміні програмно-алгоритмічного забезпечення сигнали наведення з ПУ безпосередньо надходять на суматор.



Список літератури до розділу 3

1. Терехин В.В. Основы моделирования в MATLAB. Часть 2. Simulink / В.В. Терехин // Учебное пособие. – Новокузнецк. РИО НФИ Кем ГУ. – 2004 – С.376.
2. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK /В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова// Учебное пособие. – Киев: Национальный авиационный университет. – 2008. – С. 91.
3. Бусленко Н.Г. Моделирование сложных систем / Н.Г.Бусленко //- М.: Наука. – 1978.- С. 400.
4. Елисеев, А.Д. Исследование быстродействующего привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения со статическим преобразователем / А.Д. Елисеев, Б.В. Новоселов // Оборонная техника.– 2011. – №8. – С. 24–29.
5. Елисеев, А.Д. Математическая модель статического преобразователя стабилизатора танкового вооружения как нелинейной импульсной системы / А.Д. Елисеев, В.А. Шаталов // Вопросы оборонной техники. Серия IX.– – 2012.–№6(258).
6. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учебник для ВУЗов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев // М.: Высшая школа. – 2001. –С. 343.
7. Егоренко Д. Л. Основы математического моделирования Построение и анализ моделей с примерами на языке Matlab / Д. Л. Егоренко, А.Л. Фратков, В.Ю. Харламов. Под. ред. д-ра техн. наук А.Л. Фраткова // Учеб. Пособие. СПб.: БГТУ.– 1994.
8. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока / В.В. Кочергин // Л.: Энергоатомиздат. – 1988.– С. 168.
9. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов // М.: Высш. шк. – 1994. – С. 318.
10. Семёнов А.С. Математическое моделирование режимов работы двигателя



- постоянного тока в среде MATLAB / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, М.Н. Петрова // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 10-3. – С. 523-528;
11. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // М.: Наука. – 1975. – С. 768
12. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов // Физматлит, Москва. – 2005. – С. 320.
13. Елисеев А.Д. Модернизация привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения / А.Д. Елисеев // *Вооружение. Технология. Безопасность. Управление. Материалы III научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых*. В 3 ч. Часть 1. Ковров. – 2008. – С.157–161.
14. Шарма Д.Н. Уравнения в частных производных для инженеров / Д.Н. Шарма, К. Синг // *Техносфера*, М. – 2002. – С. 320.
15. Ханукаев Ю.И. О кватернионах. Конечные перемещения твердого тела и точки. [Электронный ресурс] / Ю.И. Ханукаев / *Электронный журнал* – С. 338–346. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/033.pdf>.
16. Мелешко В.В. Методические указания к домашним заданиям по курсу "Теория и расчет приборов и систем" [Электронный ресурс]. / В.В. Мелешко // – Киев: НТУУ «КПИ» – 2011. – С. 81.
17. Веселов В.А. Гироскопические измерительные приборы и устройства. / В.А. Веселов, Р.Н. Гробовой, О.С. Ипатов, В.Г. Кузнецов, В.И. Медведев / Учебное пособие. Балтийский государственный технический университет. – 2003. – С. 122.



CHAPTER 4 / РОЗДІЛ 4 RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INSTRUMENT COMPLEX OF STABILIZATION

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИЛАДОВОГО КОМПЛЕКСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ

У даному розділі наведено матеріали експериментальних досліджень, які виконано для підтвердження прийнятих технічних рішень, що розглянуто у попередніх розділах монографії.

Мета розділу – розробка методики проведення експериментальних досліджень для підтвердження запропонованих у монографії теоретичних рішень.

Задача розділу – доступними засобами та методами експериментальних досліджень, у тому числі із застосуванням методів математичного моделювання, підтвердити достовірність технічних характеристик, які наведені у прийнятих схемо-технічних рішеннях. Матеріали експериментальних досліджень [1] представлено у вигляді окремих викладок.

4.1. Експериментальні дослідження двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20 за оцінкою електромагнітної та електромеханічної постійних часу

Метою експериментальних досліджень є вимірювання на кожному із двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20 електромагнітної ($\tau_{\text{ЕЛ. МАГН.}}$) та електромеханічної постійних часу ($\tau_{\text{ЕЛ. МЕХ.}}$) [2-5].

4.1.1. Обсяг досліджень двигунів за оцінкою електромагнітної постійної часу

Випробування двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ЕЛ. МАГН.}}$ проводилися у складі приладового комплексу стабілізації і на автономному робочому місці перевірки двигунів.

1. При випробуваннях у складі стабілізатора в обмотку загальмованого ЕДМ20М (ЕДМ02, ЕДМ20) подавались напруги від підсилювача БКД рівнем



27 В. Час подачі обмежувався до 20 мс за рахунок використання технологічного реле часу (Р. Ч.) у вхідному ланцюзі сигналу «СИГН. ШІМ» підсилювача БКД. Одночасно з подачею зазначеної напруги проводилося осцилографування:

1) Напруги, яка подавалась на обмотки двигуна (для використання цього параметру довідково);

2) Напруги на виході датчика струму (УДС) підсилювача БКД двигуна, що інформує про струм в обмотці. Перерахування значення струму проводилося тільки для максимальних значень $U_{ДС}$.

По осцилограмі $U_{ДС}$ (за формою: зростаюча експонента) визначалась постійна часу експоненти, що відповідає електромагнітний постійний часу двигуна (без врахування похибок, що внесені індуктивностями дроселів БКД та джерела живлення). При випробуваннях за автономною схемою оцінка $\tau_{ЕЛ. МАГН.}$ двигуна проводилася за методикою, яка аналогічна випробуванням у складі стабілізатора, при наступних відмінностях: напруга в обмотку двигуна (далі $U_{ЖИВ.ОБМ.}$) подавалась рівнем 2,4 В на час ~ 25 мс.; у схемі автономних випробувань двигунів використане: джерело напруги постійного струму Б5-21, комутатор 831140А 27В, технологічне Р.Ч.; для виміру споживаного ЕДМ струму послідовно в обмотку двигуна був установлений шунт «75 мВ \times 50А».

4.1.2. Обсяг досліджень двигунів за оцінкою електромеханічної постійної часу

Випробування проводилися в складі стабілізатора з двигунами, які було включено в режим холостого ходу.

Для виміру $\tau_{ЕЛ. МЕХ}$ в обмотку ЕДМ подавалась напруга від БКД 27 В тривалістю ≈ 60 мс з одночасним осцилографуванням напруги $U_{ДС}$, а також напруги на обмотці двигуна (довідково).

По осцилограмі $U_{ДС}$ (за формою: спадаюча експонента) визначалась постійна часу експоненти, що відповідає електромеханічній постійній часу двигуна $\tau_{ЕЛ. МЕХ}$.



4.1.3. Результати досліджень двигунів за оцінкою електромагнітної постійної часу

На рисунках 4.1.-4.3. наведені осцилограми напруги U_{DC} (з показаннями вимірюваного значення $\tau_{ел. магн.}$) для двигунів при випробуваннях у складі стабілізатора (характеризуються поданою в обмотки двигунів напругою $U_{жив.обм}$ рівним 27В).

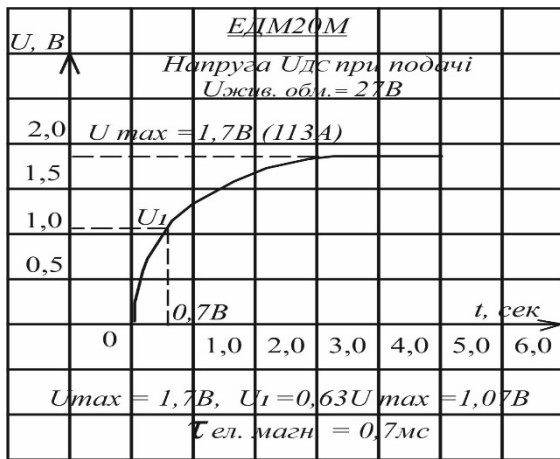


Рисунок 4.1 - Напруга U_{DC} EDM20M при подачі $U_{жив. обм.} = 27V$

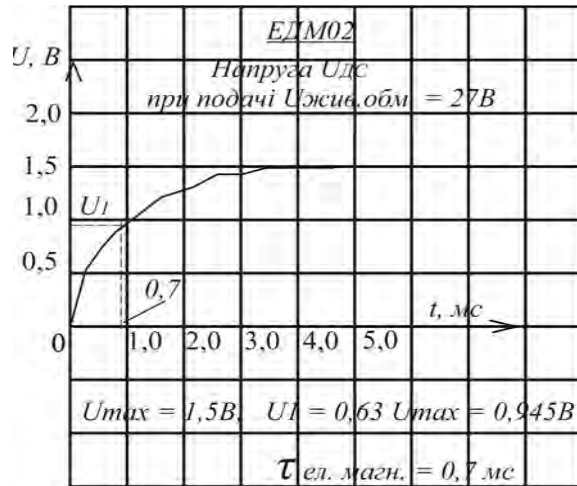


Рисунок 4.2 - Напруга U_{DC} EDM02 при подачі $U_{жив. обм.} = 27V$

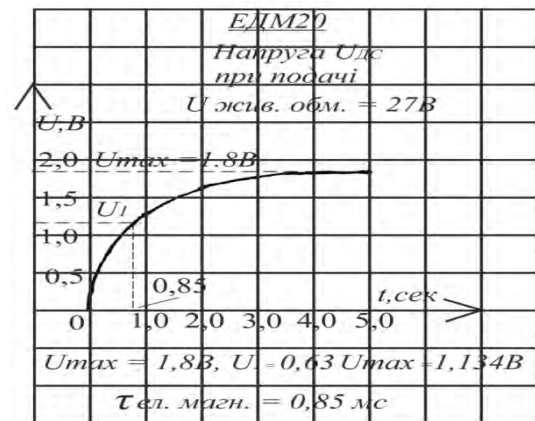


Рисунок 4.3 - Напруга U_{DC} EDM20M при подачі $U_{жив. обм.} = 27V$

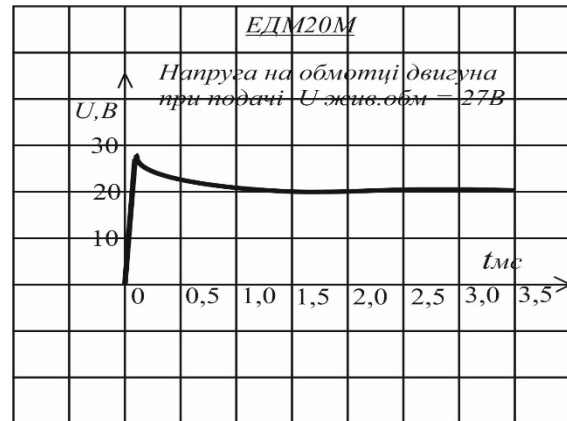


Рисунок 4.4 - Напруга на обмотці двигуна EDM20M при подачі $U_{жив. обм.} = 27V$

На рисунку 4.4 наведена осцилограма напруги на обмотці EDM20M при подачі $U_{жив.обм.} = 27V$ (аналогічна для EDM02, EDM20 при незначних відмінностях).

Характеризується зменшенням напруги на 8В протягом 3,5 мс з моменту подачі $U_{жив.обм.}$ через осідання джерела живлення $=27V$ та спаду напруги на



монтажі та на електро-радіо виробача БКД.

На рисунку 4.7 наведені осцилограми напруги на шунті «75 мВ x 50А» при подачі в обмотки двигунів напруг $U_{\text{жив.обм.}} = 2,4 \text{ В}$ (автономні випробування ЕДМ).

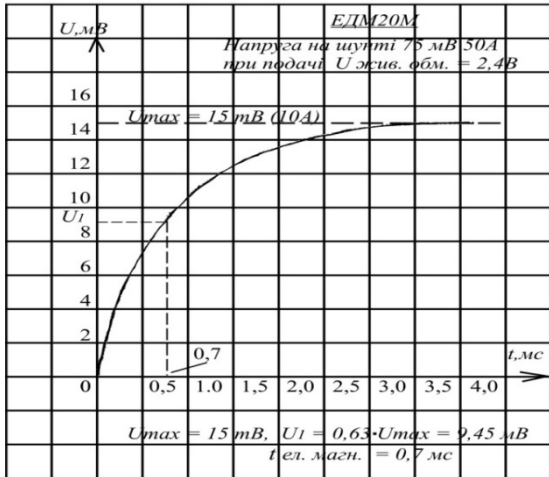


Рисунок 4.5 - Напруга на шунті 75мВ 50А на ЕДМ20М при подачі $U_{\text{жив.обм.}}=2,4\text{В}$

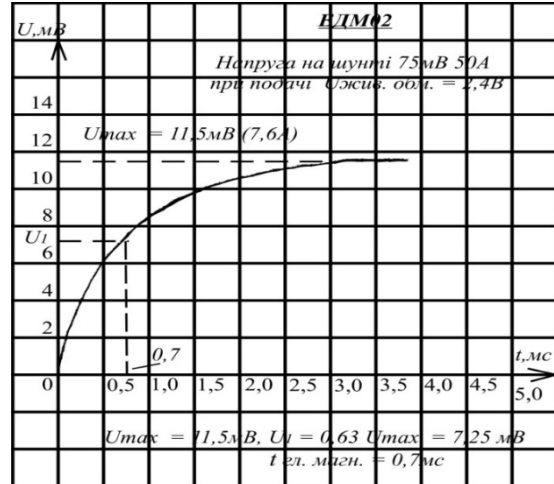


Рисунок 4.6 - Напруга на шунті 75мВ 50А на ЕДМ02 при подачі $U_{\text{жив.обм.}}=2,4\text{В}$

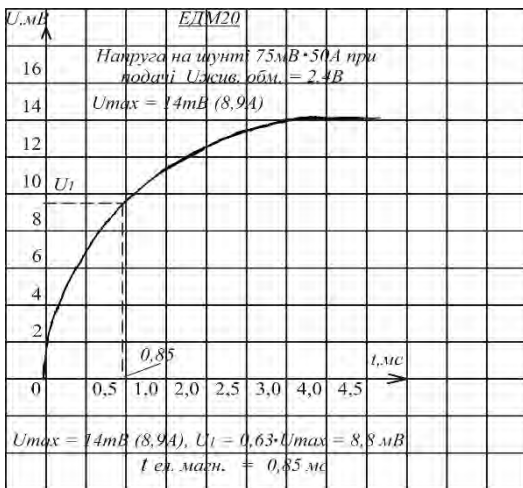


Рисунок 4.7 - Напруга на шунті 75мВ 50А при подачі $U_{\text{жив.обм.}}=2,4\text{В}$

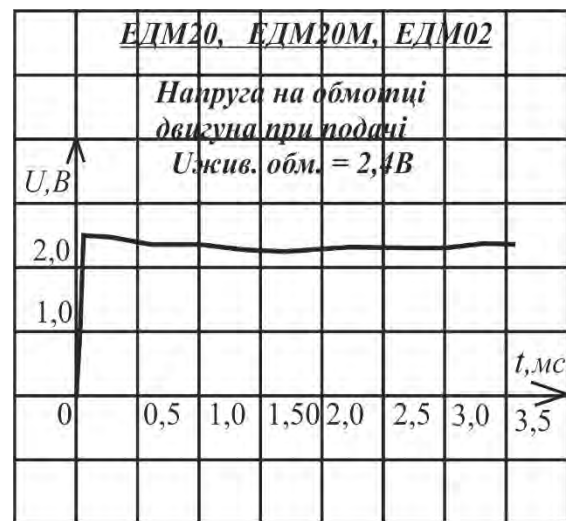


Рисунок 4.8 - Напруга на обмотці двигунів на ЕДМ02 при подачі $U_{\text{жив.обм.}}=2,4\text{В}$

На рисунку 4.8 наведена осцилограма напруги на обмотці двигуна, при подачі $U_{\text{жив.}} = 2,4 \text{ В}$ (ідентична для ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20). Відзначається зменшення напруги на обмотці на 0,2В протягом 1 мс із моменту подачі $U_{\text{жив.обм.}}$ при наступній його стабільності.

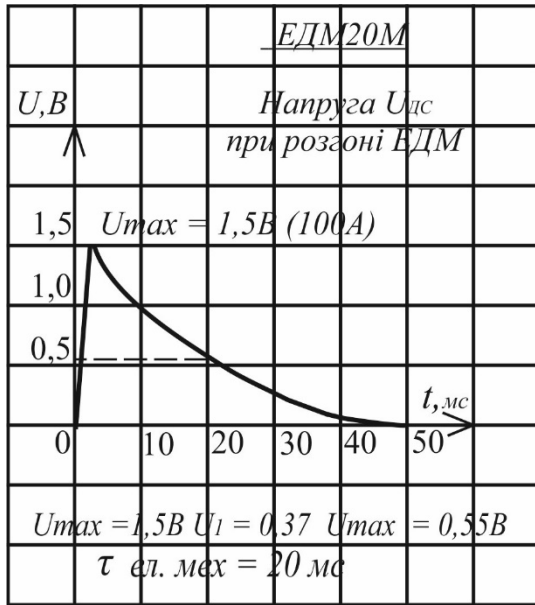


Рисунок 4.9 - Напряга $U_{дс}$ при розгоні ЕДМ20М

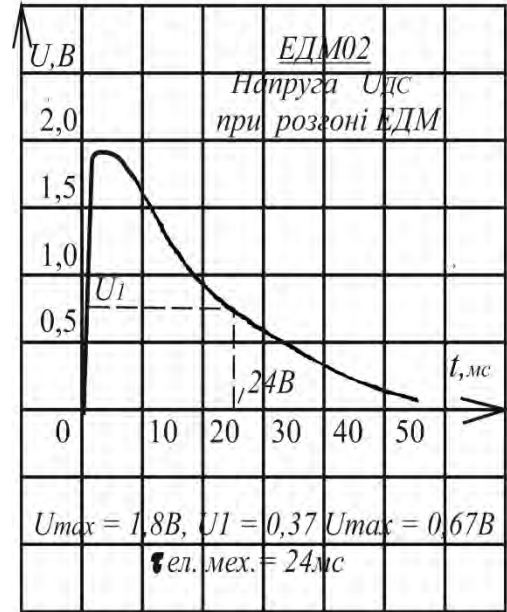


Рисунок 4.10 - Напряга $U_{дс}$ при розгоні ЕДМ02

4.1.4. Результати досліджень двигунів за оцінкою електромеханічної постійної часу

На рисунках 4.9. - 4.11. наведені осцилограми напруг $U_{дс}$ при розгоні в режимі холостого ходу ЕДМ при подачі $U_{жив.обм.} = 27B$ (з вказівкою обмірюваних значень $\tau_{ел.мех.}$).

На рисунку 4.12 наведена осцилограма напруги на обмотці двигуна (ідентична для ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20) при розгоні ЕДМ у момент подачі $U_{жив.обм.} = 27B$.

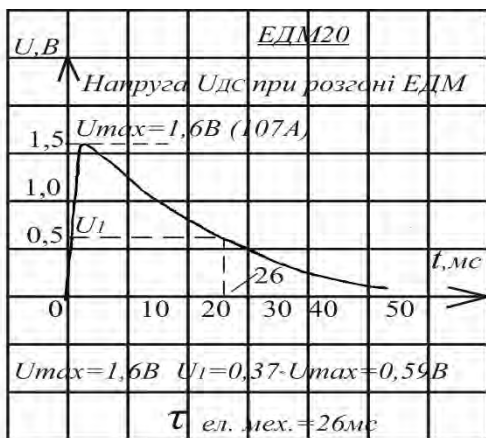


Рисунок 4.11 - Напряга $U_{дс}$ при розгоні ЕДМ20



Рисунок 4.12 - Напряга на обмотках двигунів



За результатами вимірів встановлено:

1. Електромагнітні постійні часу становлять:

0,7 мс - для ЕДМ20М;

0,7 мс - для ЕДМ02;

0,85 мс - для ЕДМ20

2. Електромеханічні постійні часу становлять:

20 мс - для ЕДМ20М;

24 мс - для ЕДМ02;

26 мс - для ЕДМ20

4.2. Експериментальне визначення смуги пропускання гіротахометра ГТ46

Мета проведених випробувань - експериментально визначити фактичну полосу пропускання [6,7] електромеханічних гіротахометрів ГТ46.

Роботи щодо експериментального дослідження смуги пропускання виконувались на одному із зразків ГТ46 у два етапи.

На першому етапі за результатами досліджень перехідних процесів гіротахометра ГТ46 були отримані передатні функції ГТ46.

Дослідження проводились при таких початкових умовах: Сигнал з датчика кута ГТ46 при вимкненому гіромоторі склав: по змінному струму 36,33 мВ, по постійному струму 25 мВ. Обмежувачі кута повороту підвісу знаходились на кутах повороту в обидві сторони, що відповідають напрузі 11,85 В ($3 \pm 0,5$) град. Проводились відхилення підвісу до упору спочатку в одну, а потім в іншу сторону. Сигнал с датчика кута ГТ46 у процесі його приведення у нуль, записувався на осцилограф GDS2204.

Для отримання параметрів передатної функції гіротахометрів були записані осцилограми (рисунок 4.13, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23, 4.25) перехідних процесів, які були піддані математичній обробці. За результатами робіт, які виконані на першому етапі, отримані передатні функції ГТ46 (формули 4.1-4.7).



На другому етапі робіт за передатними функціями побудовані логарифмічні амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики [8, 9] (рисунок 4.14, 4.16, 4.18, 4.20, 4.22, 4.24, 4.26).

За амплітудно-частотними та фазово-частотними характеристиками визначена смуга пропускання, що дорівнює частоті, на якій падіння коефіцієнта підсилення становить 3 Дб.

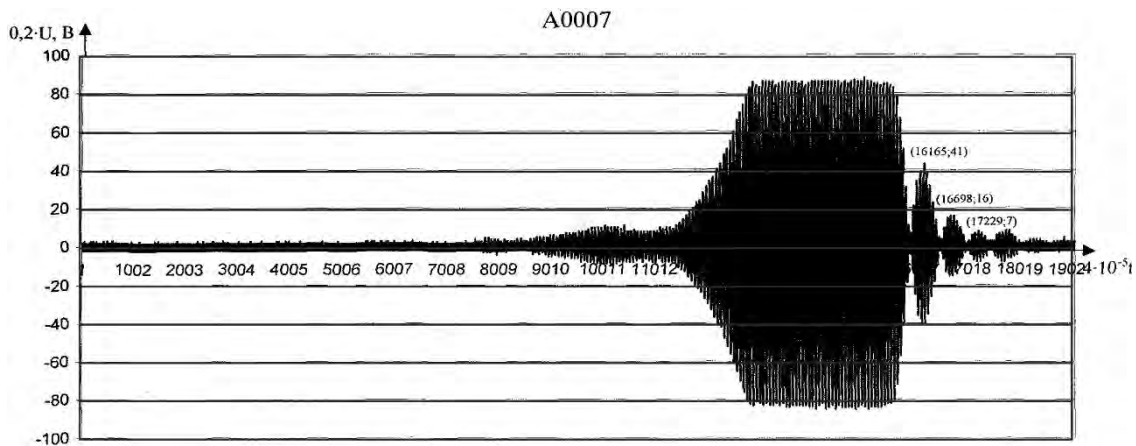


Рисунок 4.13 - Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 1

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

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

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

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

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

де, U – вихідна напруга гіротахметра [В]; ω - вимірювана кутова швидкість

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

$T_0 = \sqrt{\frac{I_n}{C}} = 0,00673 \text{ с}$ - постійна часу; $\zeta = 0,5 \div 0,75$ - відносний коефіцієнт

демпфірування; $H = 0,359 \text{ Нмс}$ - кінетичний момент; $C = 7,45 \text{ Нм/рад}$ - жорсткість торсіону; $K_{ДУ} = 229,2 \text{ В/рад}$ - крутість вихідної характеристики



датчика кута; $I_n = 3,38 \cdot 10^{-4}$ Нмс – момент інерції підвісу.

$$\text{Передатна функція гіротахOMETра } W_1(p) = \frac{11,04}{4,21 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003724 p + 1} \quad (4.1)$$

Смуга пропускання 35,9 Гц

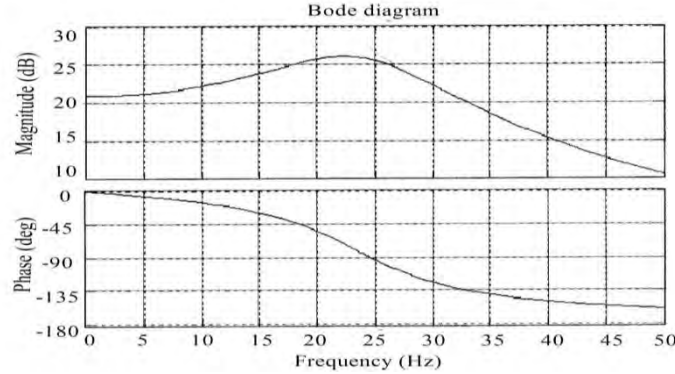


Рисунок 4.14 - Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 (за варіантом 1)

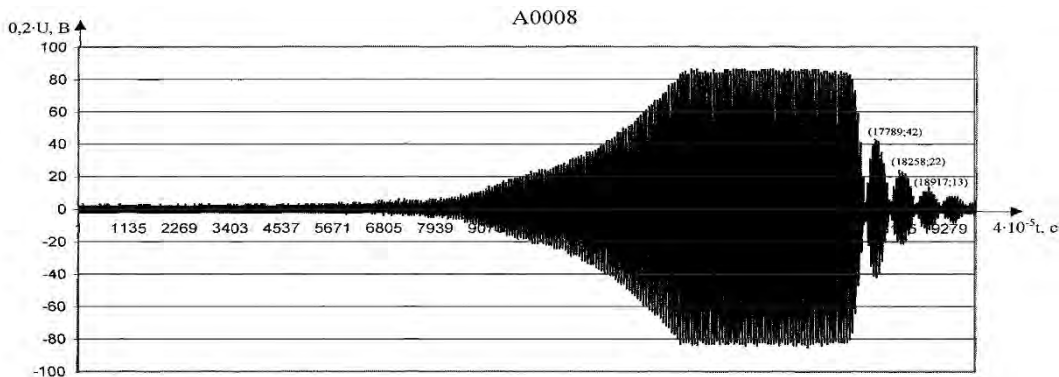


Рисунок 4.15 - Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 2

$$T = (18917 - 17789) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04512 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = 22,16312 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 139,255 \text{ рад/с}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{42}{22} = 28,66255; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 142,1742;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,2016; \quad W(p) = \frac{k}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{k}{1 + 0,002836 p + 4,94719 \cdot 10^{-5} \cdot p^2} \cdot$$

$$\text{Передатна функція гіротахOMETра } W_2(p) = \frac{11,04}{1 + 0,002836 p + 4,94719 \cdot 10^{-5} \cdot p^2} \quad (4.2)$$

Смуга пропускання 33 Гц

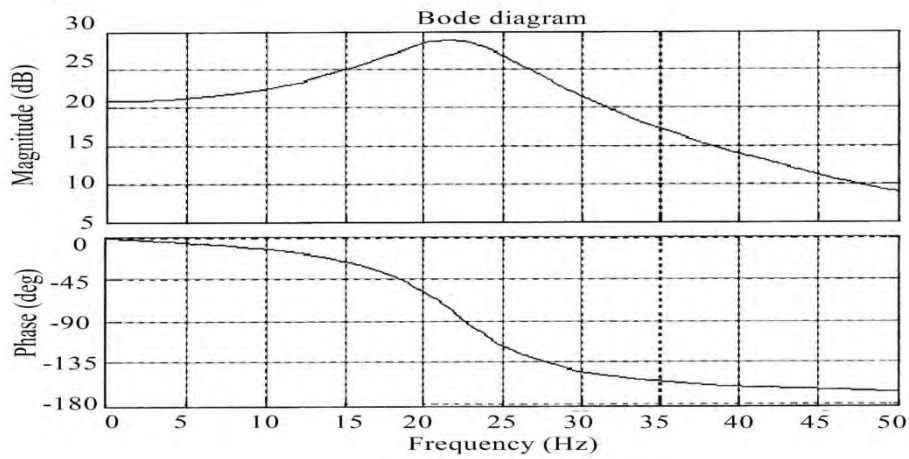


Рисунок 4.16 - Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 2

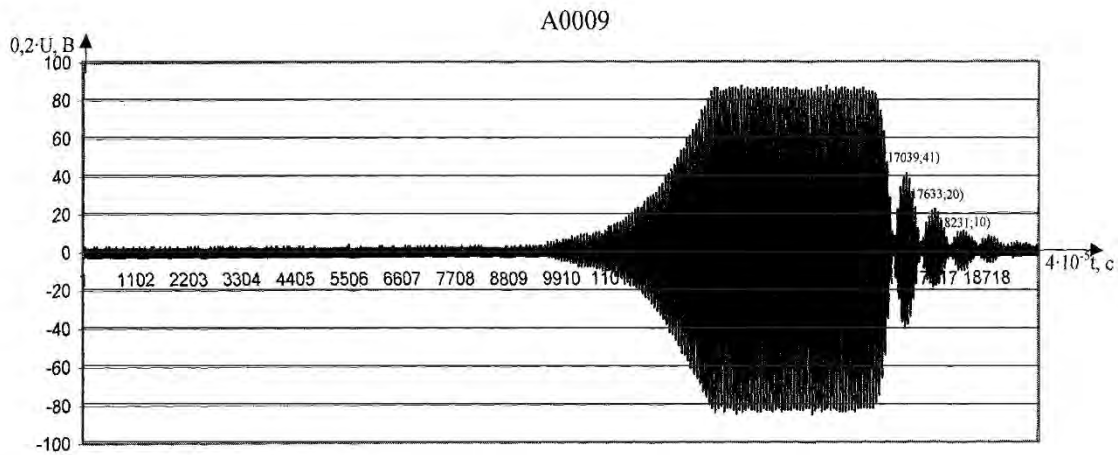


Рисунок 4.17 - Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 3

$$T = (18231 - 17039) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04768 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,4768} = 20,973 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 131,778 \text{ рад/с}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{41}{20} = 30,1107; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 135,1745;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,222754; \quad W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,003296p + 5,47281 \cdot 10^{-5} \cdot p^2} \dots$$

$$\text{Передатна функція гіротахметра } W_3(p) = \frac{11,04}{1 + 0,003296p + 5,47281 \cdot 10^{-5} \cdot p^2} \quad (4.3)$$

Смуга пропускання 32,2 Гц

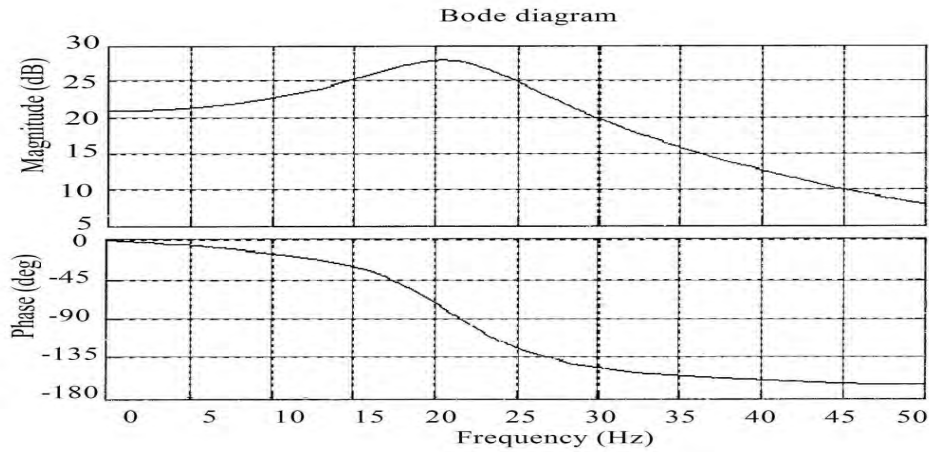


Рисунок 4.18 - Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 3

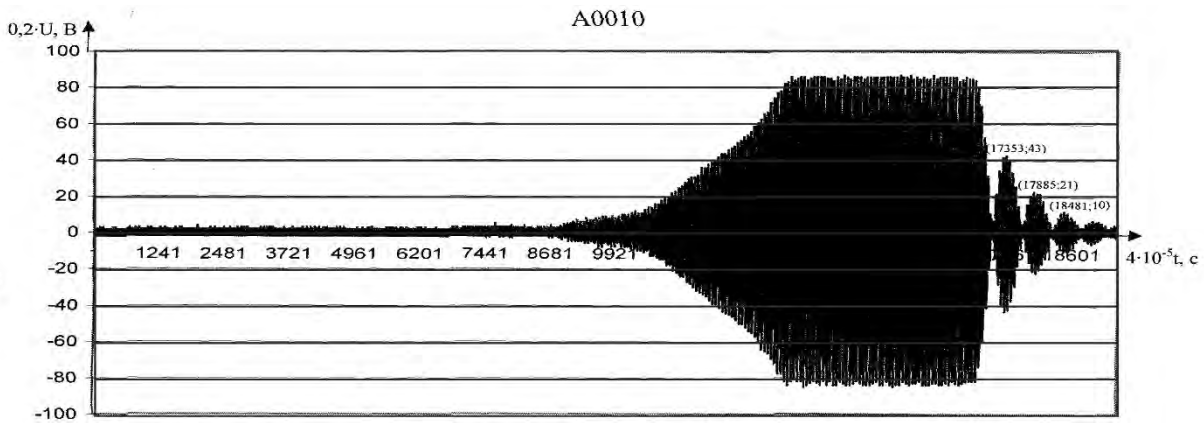


Рисунок 4.19 - Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 4

$$T = (18917 - 17789) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04512 \text{ c}; f = \frac{1}{T} = 22,16312 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 139,255 \text{ рад/с}; \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{43}{21} = 31,7676; q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 142,8325;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,222412; W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,0031143p + 4,90169 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

$$\text{Передатна функція гіротахметра } W_4(p) = \frac{11,04}{1 + 0,0031143p + 4,90169 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}. \quad (4.4)$$

Смуга пропускання 34,1 Гц

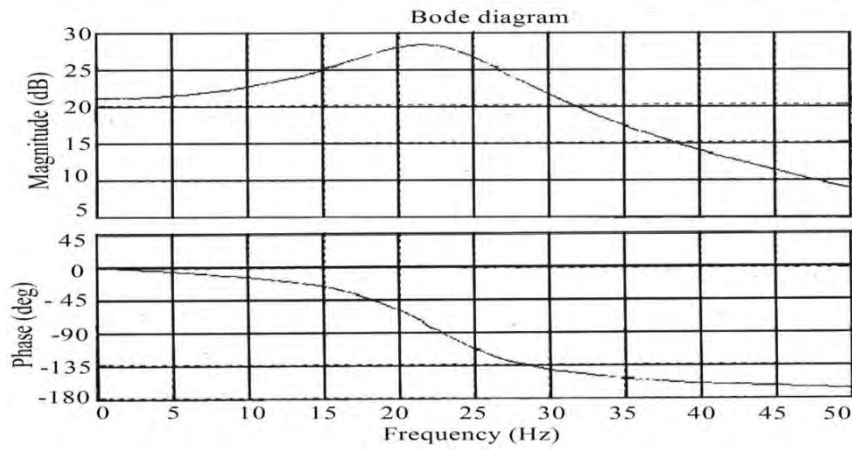


Рисунок 4.20 - Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 4

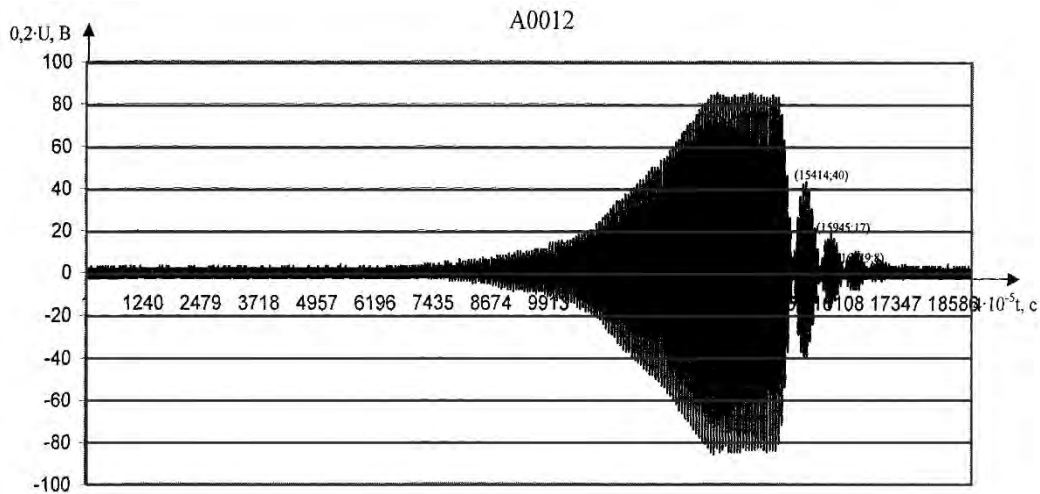


Рисунок 4.21 - Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 5

$$T = (16539 - 15414) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,045 \text{ c}; \quad f = \frac{1}{T} = 22,2222 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 139,6263 \text{ рад/с}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{40}{17} = 38,0296; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 144,7127;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,26279; \quad W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,0036319p + 4,7752 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

$$\text{Передатна функція гіротахметра } W_5(p) = \frac{11,04}{1 + 0,0036319p + 4,7752 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}. \quad (4.5)$$

Смуга пропускання 34 Гц

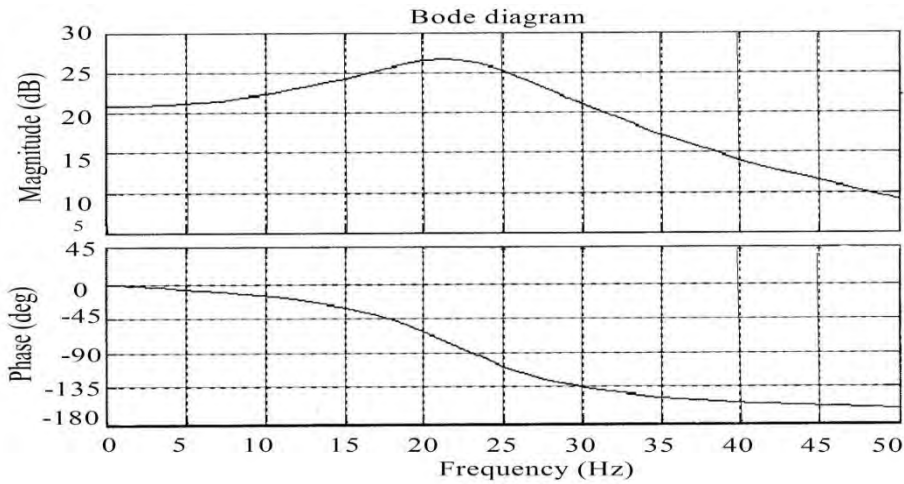


Рисунок 4.22 - Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 5

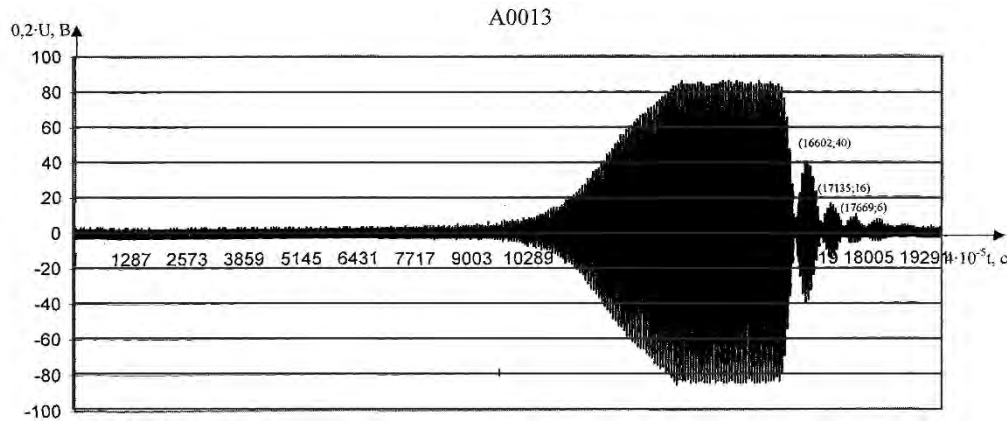


Рисунок 4.23 - Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 6

$$T = (17669 - 16602) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04268 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = 23,43018 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 147,2162 \text{ рад/с}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{40}{16} = 42,93771; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 153,3501;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,279998; \quad W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,0036517 p + 4,25238 \cdot 10^{-5} \cdot p^2};$$

$$\text{Передатна функція гіротахметра } W_6(p) = \frac{11,04}{1 + 0,003652 p + 4,252 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}. \quad (4.6)$$

Смуга пропускання 35,8 Гц

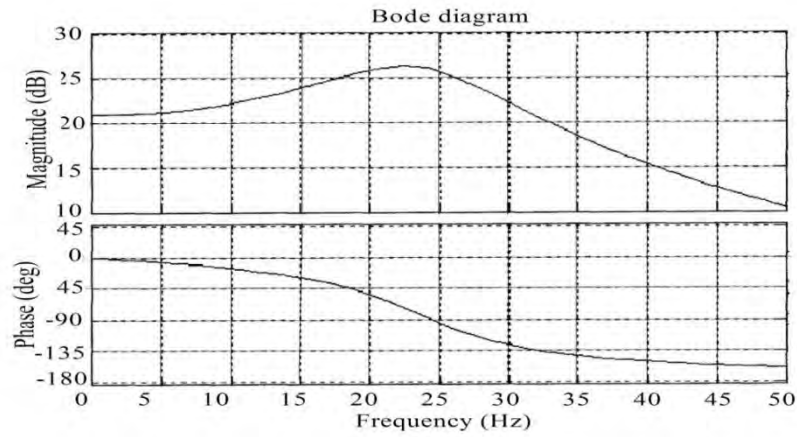


Рисунок 4.24 - Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 6

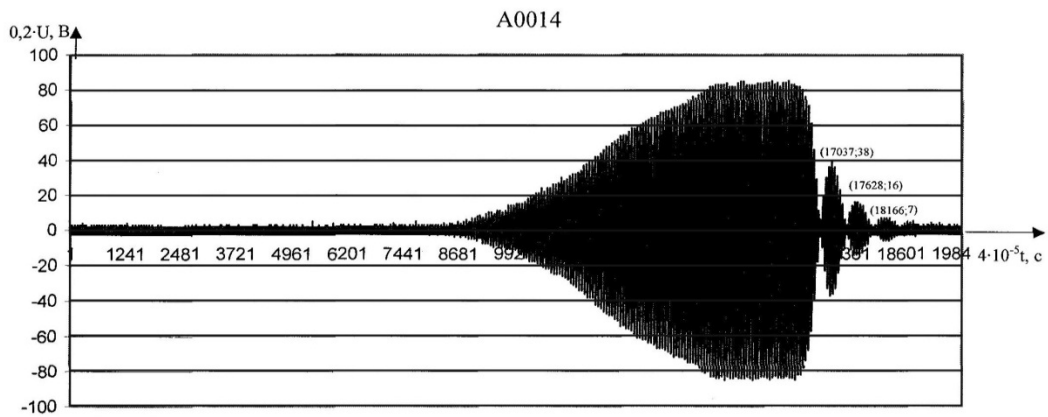


Рисунок 4.25 - Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 7

$$T = (18166 - 17037) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04516 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = 22,14 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 139,1316 \text{ рад/с};$$

$$\gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{38}{16} = 38,30812; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 144,3091; \quad \zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,265459;$$

$$W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,003679p + 4,80189 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

$$\text{Передатна функція гіротахметра } W_7(p) = \frac{11,04}{1 + 0,003679p + 4,80189 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}. \quad (4.7)$$

Смуга пропускання 33,9 Гц

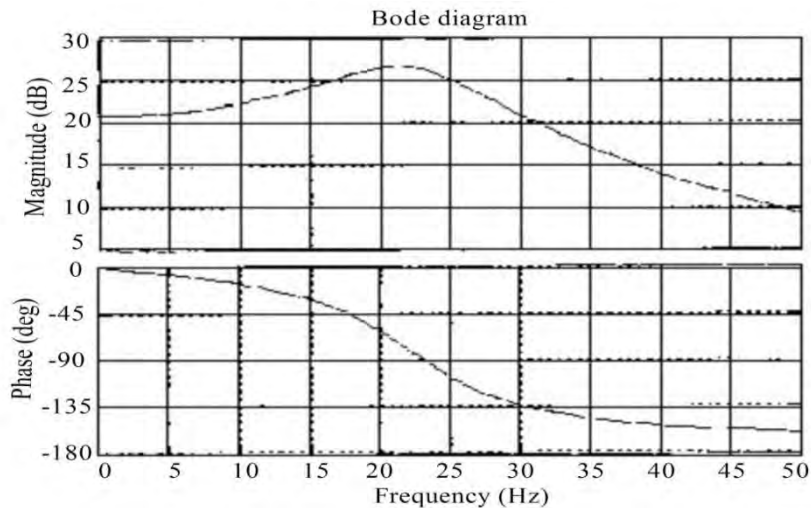


Рисунок 4.26 - Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 7.

За результатами проведених досліджень можна стверджувати, що смуга пропускання ГТ46 для різних варіантів передатних функцій знаходиться у діапазоні 31-36 Гц. Найбільша смуга пропускання для гіротахметра з передатною функцією (варіант 1):

$$W_1(p) = \frac{11,04}{4,21 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003724 p + 1} \quad (4.1)$$

4.3. Дослідження зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності

З метою вивчення можливості підвищення точнісних характеристик стабілізатора було проведено моделювання з використанням як традиційного датчика кутової швидкості (ДКШ) ГТ46, так і сенсору нового типу, заснованого на MEMS-технології G20-075-100.

Використання нових твердотільних ДКШ є одним з основних напрямків сучасного приладобудування. Такі датчики мають широку область застосування, у тому числі, стабілізацію платформ із установленими на них вимірювальними пристроями й системи керування рухомими об'єктами різного класу, вимірювальні блоки для інерціальної навігації.



Одночасно з гіротахометром ГТ46 [11] та ДКШ КВГ [12] була проведена оцінка впливу полоси пропускання та дискретності обчислення з використанням ДКШ MEMSG20-075-100 [13,14] з половою пропускання 100 Гц і ВОГ ВГ910Ф [15] з половою пропускання 450 Гц.

При моделюванні використовувались обчислювальні схеми гіроскопічних вимірювачів ГТ46, G20-075-100 та ВГ910Ф, які представлені у розділі 2 на рисунку 2.2, а технічні характеристики цих ДКШ наведені, відповідно, у таблицях 2.1, 2.3, 2.4.

Дослідження можливості підвищення точності стабілізатора з урахуванням уведення ДКШ нового типу було проведено з урахуванням таких основних положень, як оптимізація параметрів посилення ДКШ та постійної часу інтегратора, а також налаштувальних коефіцієнтів у контурах керування.

Оптимізація проводилася на підставі мінімізації H_2 - норми замкненої передатної функції лінійної моделі стабілізатора

$$H_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}(W(j\omega)^* W(j\omega)) d\omega}, \quad (4.8)$$

де, $W(j\omega)$ - передатна функція замкненої системи стабілізації,

* - символ комплексно - сполученої матриці.

Обраний критерій забезпечує високу точність процесів керування з урахуванням можливості зміни параметрів системи.

У процесі оптимізації були визначені наступні варіанти оптимальних значень налаштувальних коефіцієнтів блоку управління, які наведені в таблиці 4.1.

В основу аналізу результатів моделювання були покладені оцінка динамічної погрішності стабілізатора і його реакція на імпульсний вплив.

Оцінка динамічної погрішності стабілізатора проводилася на підставі дослідження реакції на гармонійний сигнал, що подавався на вхід ДКШ (рисунок 4.27).



Таблиця 4.1 - Оптимальні значення налаштувальних коефіцієнтів блока управління

	Коефіцієнт підсилення тракту управління $У(0 \div 136)$	Коефіцієнт передачі сигналу гіротахметра $ГТ(0 \div 125)$	Коефіцієнт передачі в ланцюзі зворотного зв'язку по струму $ДТ(0 \div 125)$
Варіант 1	102	9	10
Варіант 2	85	7	8
Варіант 3	44	6	8
Варіант 4	102	7	10
Варіант 5	109	6	2
Варіант 6	109	7	2

Амплітуда та частота змінення сигналу, що відповідає коливанням корпусу виробу з амплітудою $2,5^\circ$ та частотою $0,8$ Гц, аналогічні методам випробувань 2Э52 [16].

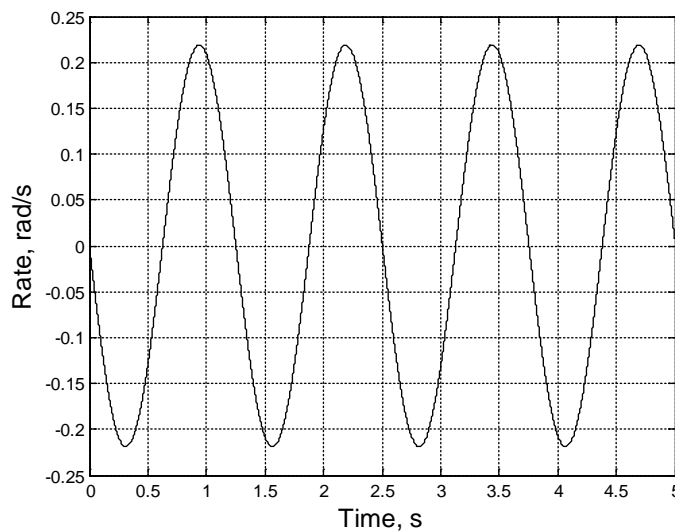


Рисунок 4.27 - Гармонійний вплив, що задається на вході ДКШ

Оцінка імпульсного впливу проводилася на підставі дослідження реакції на послідовність імпульсів, що подавались на вхід ДКШ. Параметри імпульсних впливів приймалися у відповідності з даними, які отримані при проведенні ударних випробувань в польових умовах - тривалість імпульсу $5,0$



мс з амплітудою 0,5 рад/с, що відповідає вихідному сигналу ГТ46 на рівні 6В.

4.3.1. Результати досліджень щодо впровадження нових датчиків кутової швидкості

У процесі моделювання [17,18] були розглянуті варіанти налаштувальних коефіцієнтів блоку керування, значення яких наведені в таблиці 4.1. Моделювання виконувалося на прикладі горизонтального каналу блоку управління.

Для перших трьох варіантів налаштувальних коефіцієнтів проводилося порівняльне моделювання з використанням двох типів сенсорів: ГТ46 та G20-075-100 зі смугою пропускання 100 Гц. Результати моделювання для першого варіанта налаштування представлені на рисунках 4.28 та 4.29. Відомо, що збільшення коефіцієнта підсилення позитивно впливає на жорсткість системи.

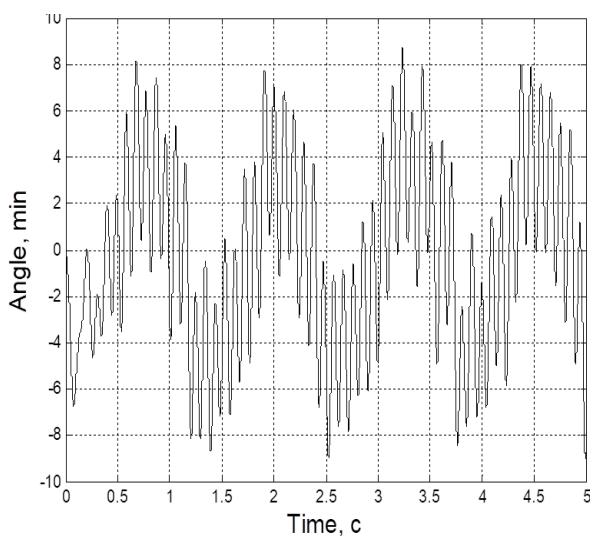


Рисунок 4.28 - Динамічна похибка стабілізатора з ГТ46 при завданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 1 налаштування

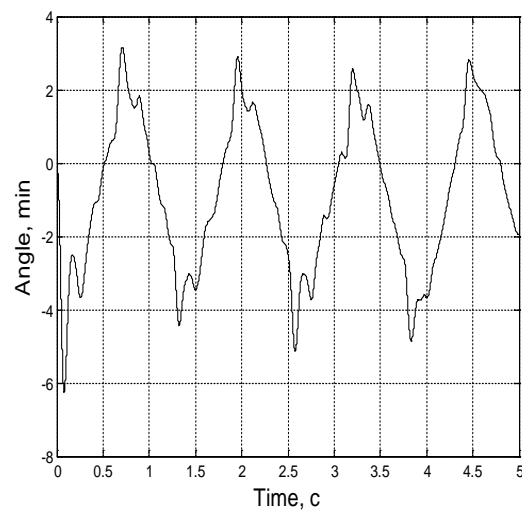


Рисунок 4.29 - Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 1 налаштування

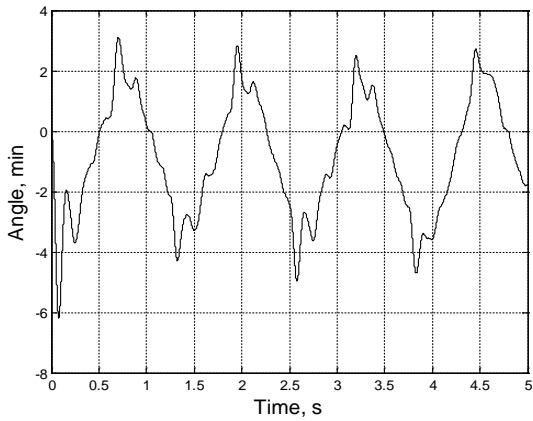


Рисунок 4.30 - Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу $0,219\text{Cos}(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 1 налаштування $K_y=10$

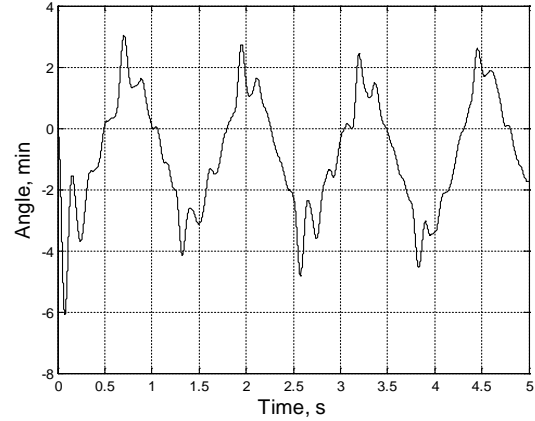


Рисунок 4.31 - Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу $0,219\text{Cos}(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 1 налаштування $K_y=116$

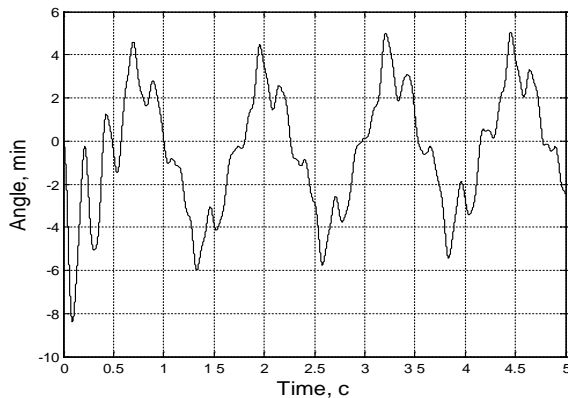


Рисунок 4.32 - Динамічна похибка стабілізатора з ГТ46 при завданні сигналу $0,219\text{Cos}(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 2 налаштування

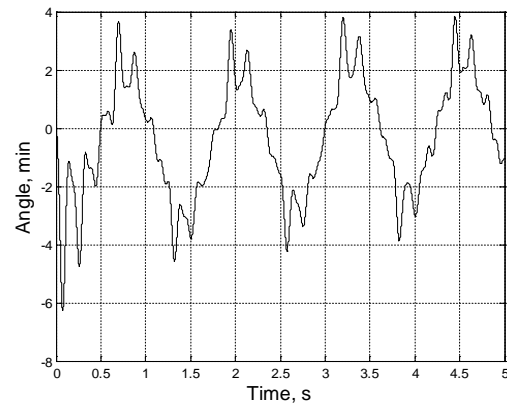


Рисунок 4.33 - Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу $0,219\text{Cos}(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 2 налаштування

Найбільшим коефіцієнтом підсилення характеризується варіант 1 налаштувальних коефіцієнтів. На відміну від стабілізатора з використанням ГТ46, введення ДКШ МЕМС дозволяє збільшувати коефіцієнт підсилення й



тим самим підвищити жорсткість системи. Результати моделювання показали, що прийнятна динамічна помилка зберігається при подальшому збільшенні коефіцієнта підсилення до $K_y=109$ і $K_y=116$. Збільшення коефіцієнта K_y до значення 122 призводить до збільшення коливальності динамічної помилки стабілізатора. Результати моделювання при збільшенні коефіцієнта підсилення до 109 і 116 представлені на рисунках 4.30 та 4.31. Результати моделювання для другого й третього варіантів налаштування представлені на рисунках 4.32-4.34.

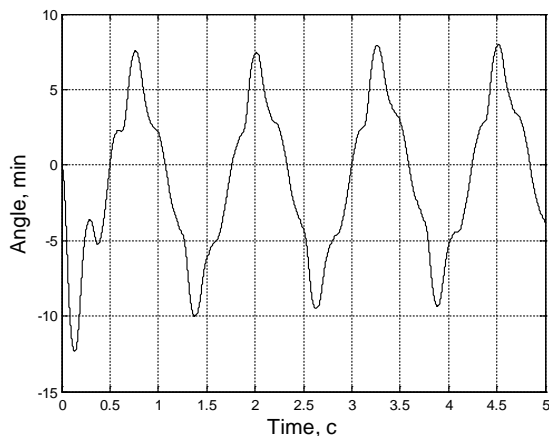


Рисунок 4.34 - Динамічна похибка стабілізатора з ГТ46 при завданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 3 налаштування $K_y=44$

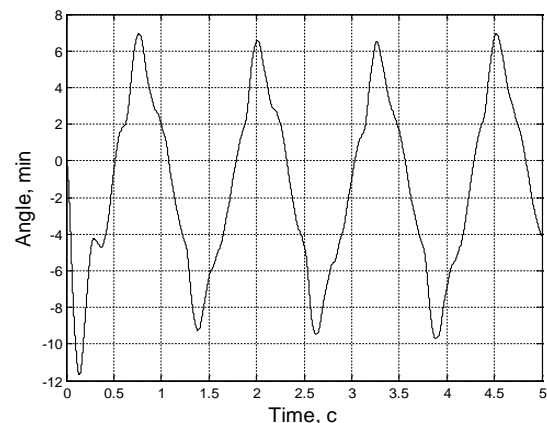


Рисунок 4.35 - Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 3 налаштування $K_y=44$

Аналіз рисунків 4.30-4.35 показує, що зі зменшенням коефіцієнта підсилення характер зміни амплітуди динамічної помилки для ДКШ ГТ-46 та G20-075-100 збігається. Це дає можливість припускати, що високочастотні коливання, які мають місце на рисунку 4.28., обумовлені досить високим коефіцієнтом підсилення $K_y=102$. Крім того, слід ураховувати те, що до складу стабілізатора із ГТ46 входить смуговий фільтр для зменшення резонансних частот (рисунок 4.36). Застосування ДКШ МЕМС, що характеризуються високими резонансними частотами, дозволяє виключити смуговий фільтр із складу стабілізатора.

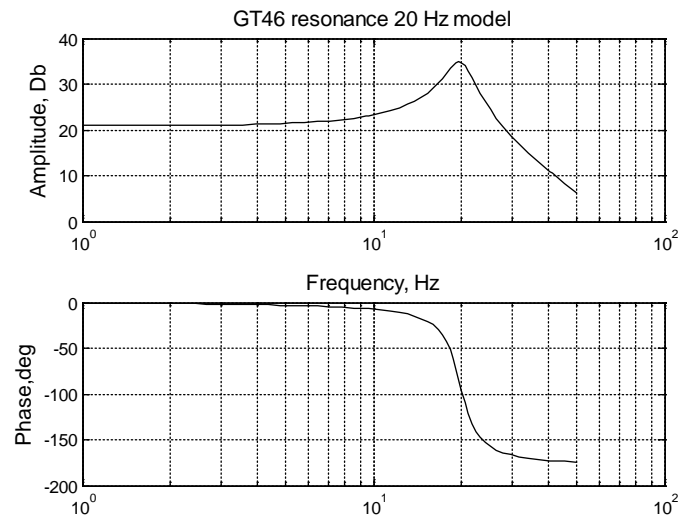


Рисунок 4.36 - ЛАЧХ ГТ46 з резонансом 20 Гц

Зі зменшенням коефіцієнта підсилення до 44 (рисунки 4.34 та 4.35, що відповідають варіанту 3 налаштування) амплітуда динамічної помилки й характер її зміни стають ідентичними. При цьому, амплітуда динамічної помилки стабілізатора перевищує припустиме значення в 2 рази.

4.3.2. Результати досліджень впливу смуги пропускання

Результати дослідження впливу ширини смуги пропускання ДКШ на завадостійкість стабілізатора представлені на рисунках 4.37 – 4.40, де задаються смуги пропускання 100 Гц, 200 Гц, 300 Гц, 400 Гц відповідно. При цьому використовується варіант 4 налаштувальних коефіцієнтів таблиці 4.1. Графічні дані з наведених рисунків демонструють, що зі збільшенням смуги пропускання ДКШ забезпечується більш плавне відпрацювання гармонійного впливу, що задається. При цьому виконуються вимоги щодо точності стабілізатора, які зазначені в технічному завданні – динамічна похибка не перевищує 1 т.д. (3.6 кут. хв).

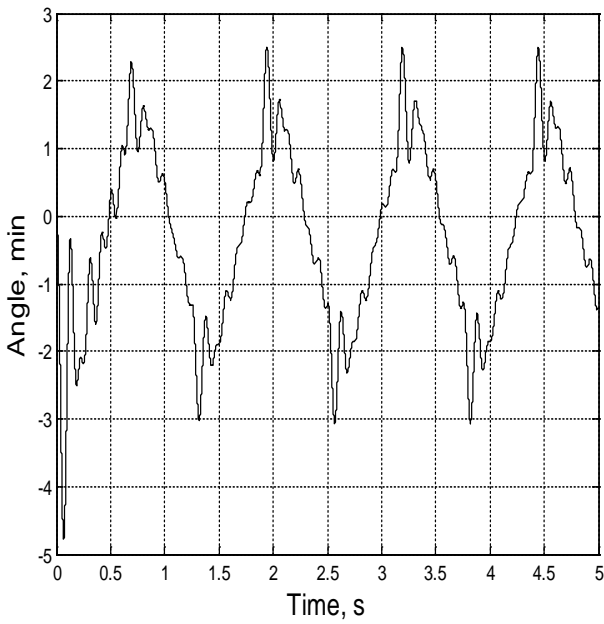


Рисунок 4.37 - Динамічна похибка при смузі пропускання ДКШ 100 Гц

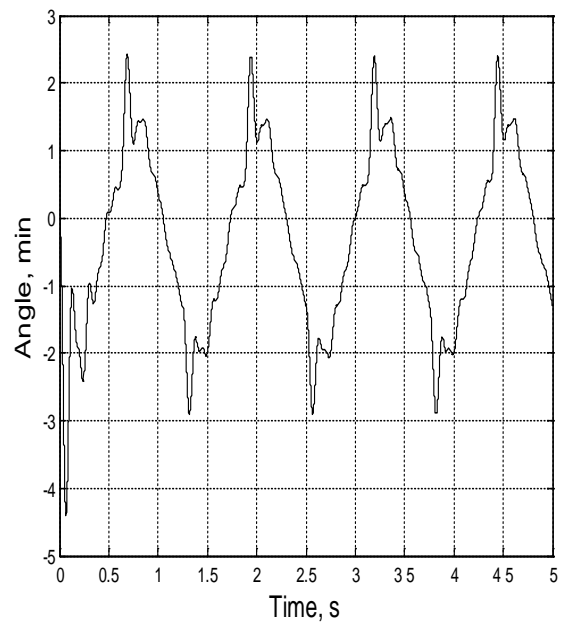


Рисунок 4.38 - Динамічна похибка при смузі пропускання ДКШ 200 Гц

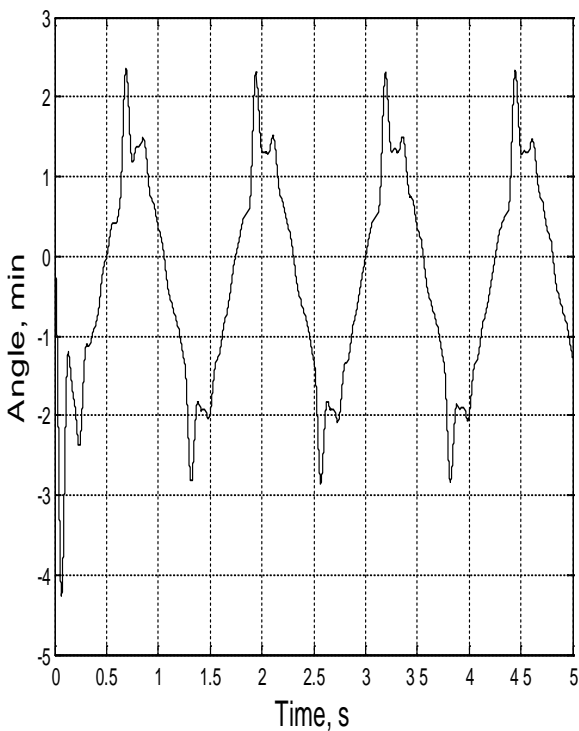


Рисунок 4.39 - Динамічна похибка при смузі пропускання ДКШ 300 Гц

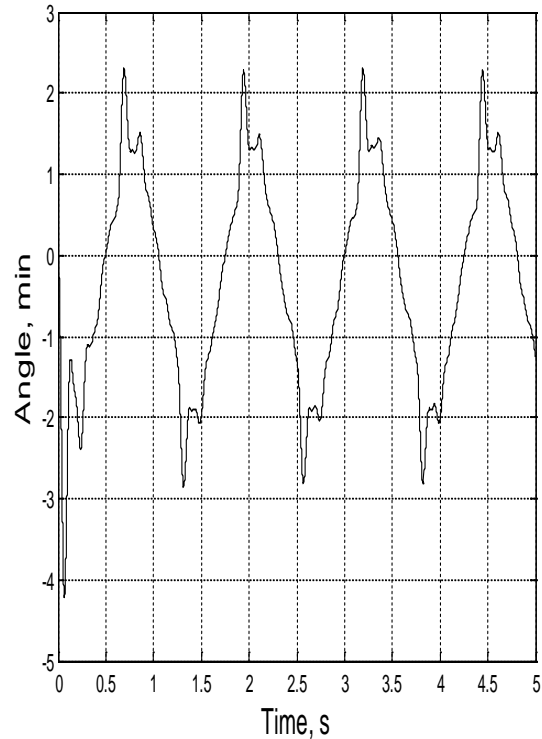
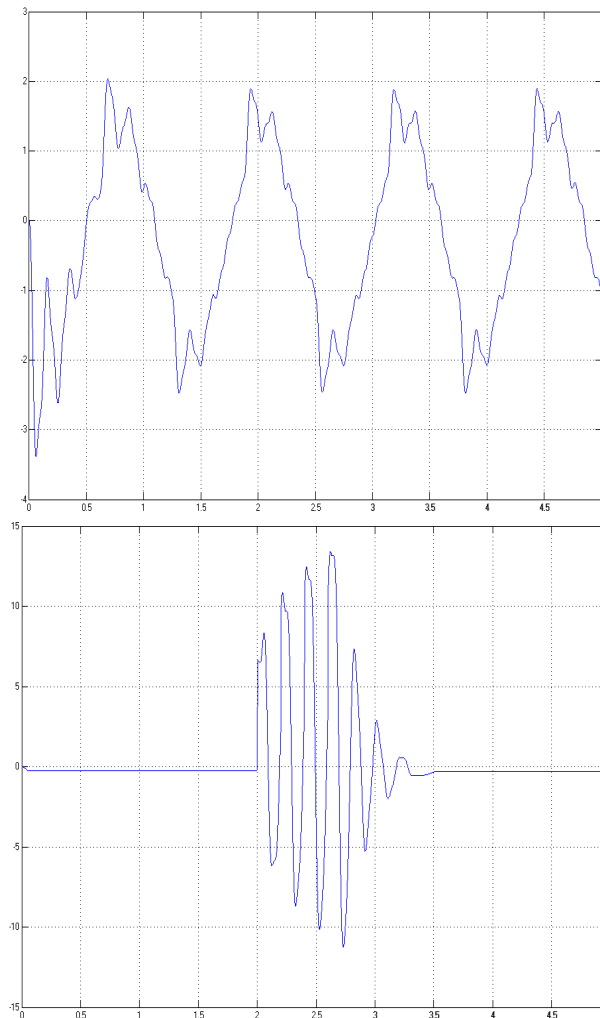


Рисунок 4.40 - Динамічна похибка при смузі пропускання ДКШ 400 Гц



**Рисунок 4.41 - Динамічна похибка
СО при дискретності 1,0 мс для
ВГ910Ф**

**Рисунок 4.42 - Відпрацювання
послідовності імпульсів при
дискретності 1,0 мс для ВГ910Ф**

4.3.3. Моделювання зміни дискретності обчислення сигналів керування з коріолісового вібраційного гіроскопа

З урахуванням отриманих результатів було проведено моделювання роботи стабілізатора з введенням ДКШ КВГ до вертикального каналу стабілізатора, тому що на вертикальний канал діють більш інтенсивні збудження.

Мета моделювання - порівняння погрешностей стабілізатора вертикального каналу стабілізатора з урахуванням введення в математичну модель стабілізатора моделі коріолісового вібраційного гіроскопу (КВГ) (рисунок 2.2 б) 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:



- 1) Зміни кутового положення БО при русі виробу по пересіченій місцевості;
- 2) При впливі імпульсних збурювань (відпрацювання послідовності імпульсів).

На Рисунок 4.43 та 4.44 наведені результати моделювання руху виробу по пересіченій місцевості у відповідності з наступною циклограмою:

- ділянка (1) відповідає розгону корпусу виробу по куту;
- ділянка (2) відповідає зміні кутового положення корпусу виробу зі сталою швидкістю;
- ділянка (3) відповідає гальмуванню корпусу виробу;
- ділянка (4) відповідає руху корпусу виробу по горизонтальній площині.

За результатами моделювання встановлено, що при розвороті корпусу виробу похибка блоку озброєння (БО), що встановилася (відхилення від вихідного положення), становить 5 кут. хв. при дискретності обчислення 1,7 мс (рисунок 4.43) та не перевищує 2 кут. хв. (рисунок 4.44) при дискретності обчислення 1,0 мс. Позначення на рисунках 4.43 та 4.44 відповідають: 1 – розгін корпусу виробу; 2 – рух корпусу виробу з сталою швидкістю; 3 – гальмування корпусу виробу зі сталою швидкістю.

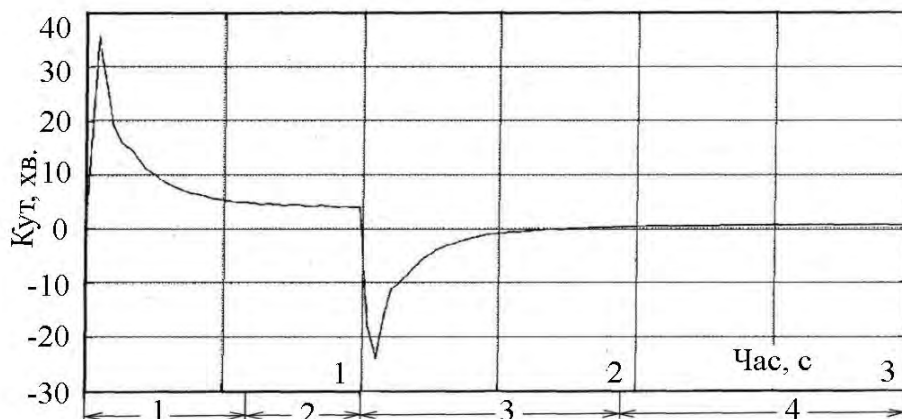


Рисунок 4.43 - Зміна кутового положення БО при русі виробу по пересіченій місцевості (дискретність 1,7 мс, смуга пропускання ДУС 100 Гц)

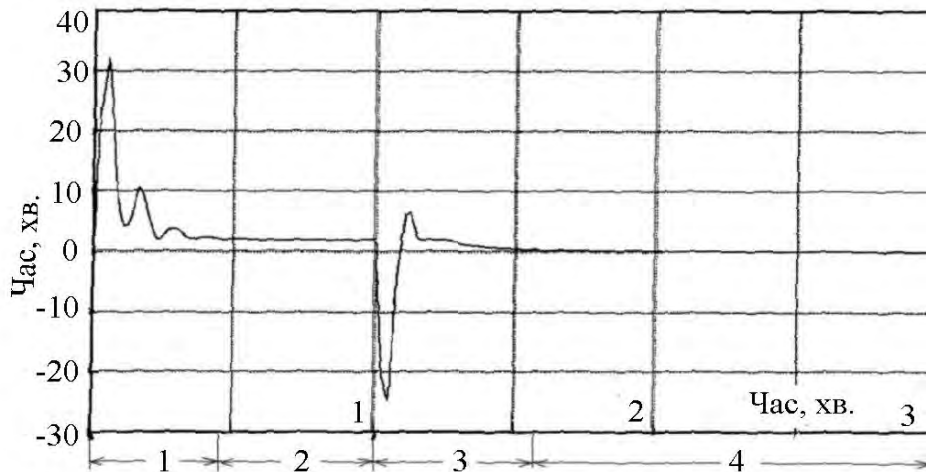


Рисунок 4.44 - Зміна кутового положення БО при русі виробу по пересіченій місцевості (дискретність 1,0 мс, смуга пропускання ДУС 100 Гц)

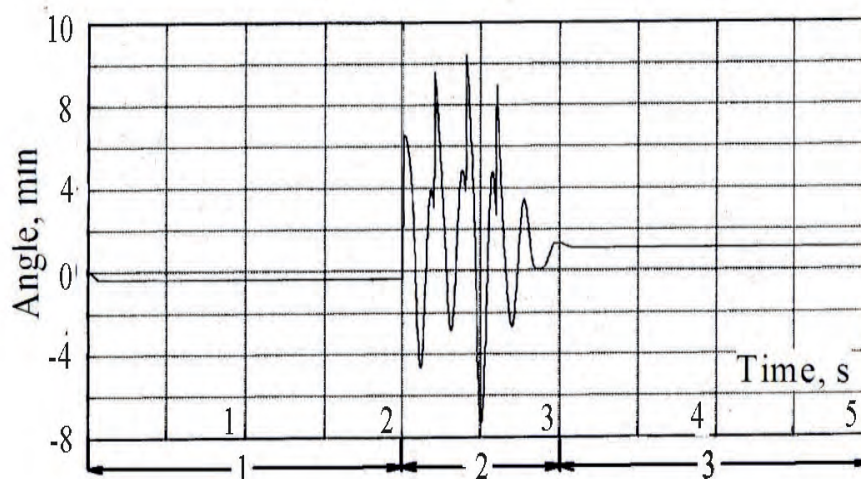
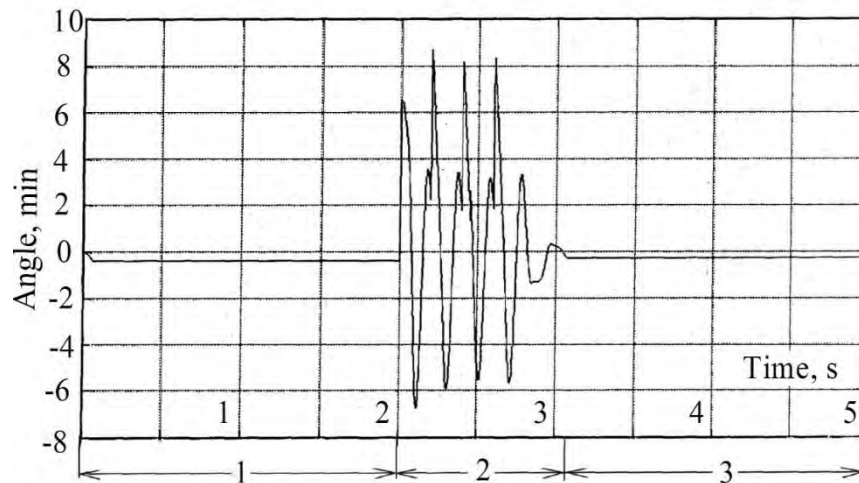


Рисунок 4.45 - Відпрацювання послідовності імпульсів при дискретності: 1,7 мс для ДКШ зі смугою пропускання 100 Гц

На Рисунок 4.45 та 4.46 наведені результати моделювання, що відповідають зміні кутового положення БО при відпрацюванні послідовності імпульсів: де, 1 – кутове положення БО до подачі імпульсів; 2 – кутове положення БО при подачі імпульсів; 3 – кутове положення БО після подачі імпульсів.

За результатами дослідження впливу ширини смуги пропускання та частоти інформаційного обміну встановлено, що формування вихідних сигналів має бути не менш 1000 Гц, а смуга пропускання – не менш 100 Гц.



**Рисунок 4.46 - Відпрацювання послідовності імпульсів при дискретності:
1,0 мс для ДКШ зі смугою пропускання 100 Гц**

4.4. Вибір методу оцінки динамічної похибки стабілізації

Метою досліджень є вибір методу визначення динамічної похибки стабілізатора [19, 20], який:

- дає при моделюванні значення динамічної похибки стабілізації, близькі до зазначеного вище значення (2 т. д.) для 2E52 [21];
- використовує обчислювальні потужності блоку керування (БУ);
- визначається з пульта керування (ПУ) стабілізатора без введення персонального комп'ютера на робоче місце оператора.

Дослідження було побудовано на вертикальному каналі стабілізатора, на який більше впливають зовнішні впливи.

При експериментальних дослідженнях, які проводились методом математичного моделювання, будуть розглянуті три наступні методи визначення динамічної похибки:

Метод 1: Подача синусоїдального сигналу в блоці управління в точку «збиття» (рисунок 4.47 після інтегратора) та визначення амплітуди поточного значення амплітуди 2 виходу інтегратора та синусоїдального сигналу 1, що задається (рисунок 4.48), з урахуванням фазового запізнення.

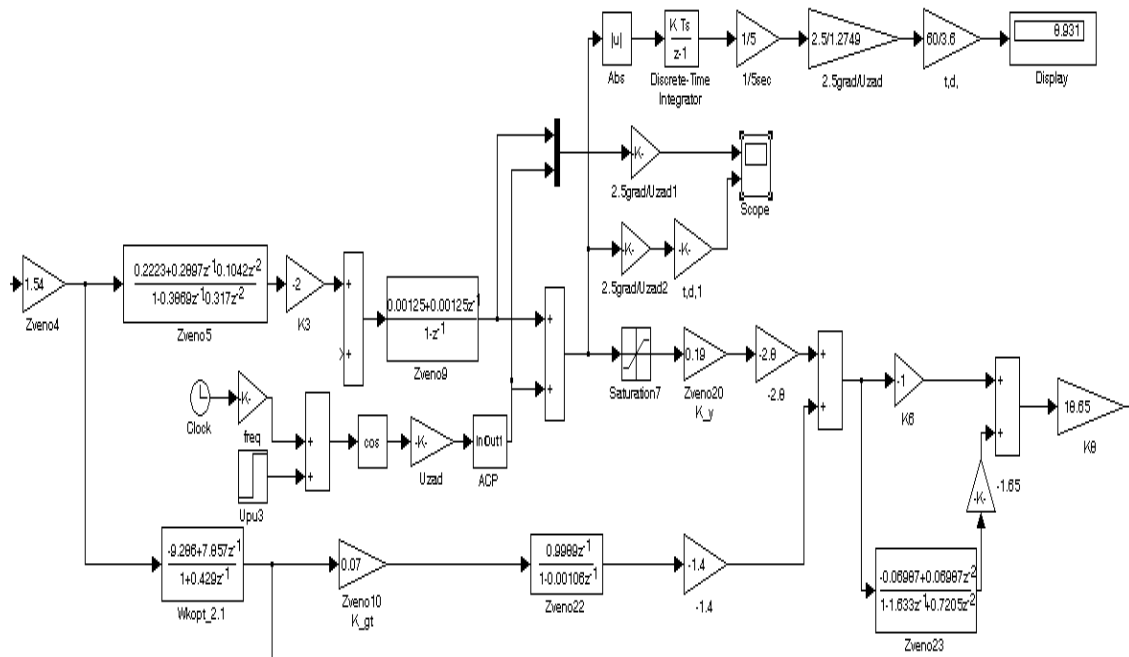


Рисунок 4.47 - Схема блока управління для визначення динамічної похибки у точці «збиття» при частоті обчислення 400 Гц та ГТ46 як ДКШ

Метод 2: Подача синусоїдального сигналу у блок управління у точку «збиття», як у методі 1 (рисунок 4.47), та визначення різниці максимальних значень амплітуд сигналу $2 U_{\text{ІНТ}}$ (В) після інтегратора та сигналу, що задається $1 U_{\text{ЗАД}}$ (В) (рисунок 4.49). Різниця амплітуд ($U_{\text{ЗАД}} - U_{\text{ІНТ}}$) поділена на сигнал, що задається у точці «збиття» $U_{\text{ЗАД}} 1$, дає відносне значення динамічної похибки за методом 2. Для переходу до абсолютного значення динамічної похибки в кутових одиницях необхідно помножити відносне значення на амплітуду коливань блоку озброєння, що задаються $A_{\text{ЗАД}} = 2,5$ град, а потім перевести у т. д.:

$$\delta_2 = \left(\frac{60}{3,6} \right) 2,5 |U_{\text{ЗАД}} - U_{\text{ІНТ}}| / U_{\text{ЗАД}} \quad (4.9)$$

У теорії інформаційних систем [22] вищевказана похибка називається динамічною частотною похибкою. Ще можна вважати таку похибку похибкою коефіцієнта перетворення. Вираз (4.9) дозволяє також будувати амплітудно-частотні характеристики стабілізатора.

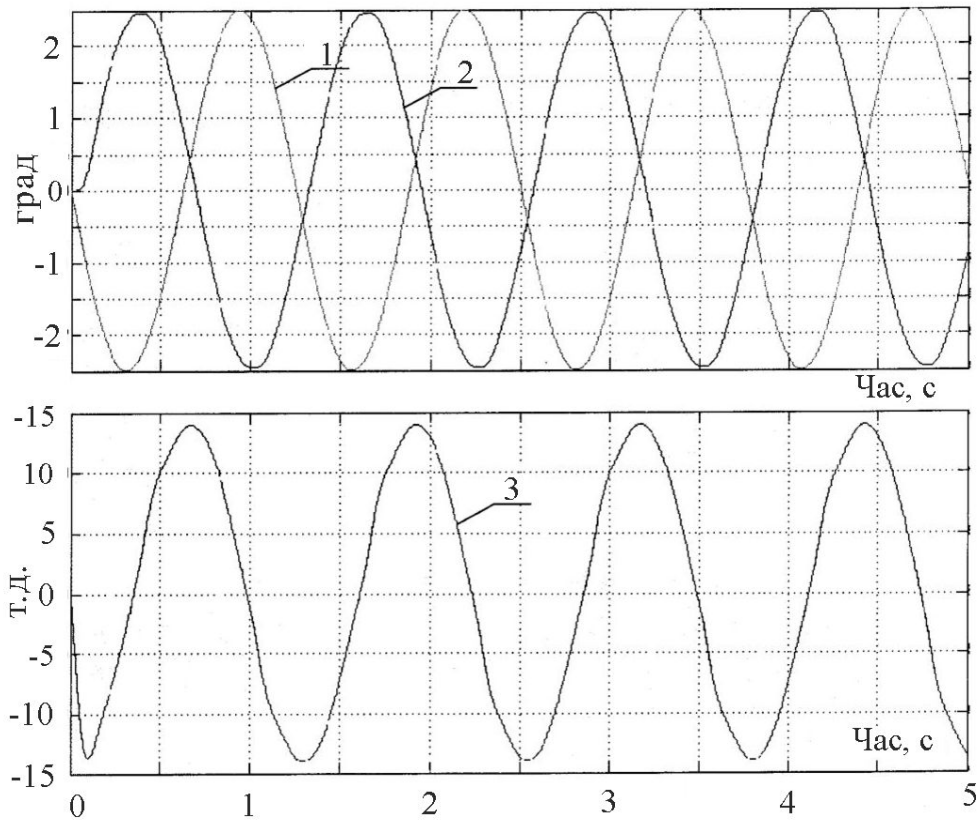


Рисунок 4.48 - Сигнали у точці «збиття» блоку управління: 1 - задаваний (град.), 2 - після інтегратору (град.), 3 - сумарний (т. д.) при частоті обчислення 400 Гц та ГТ46 як ДКШ

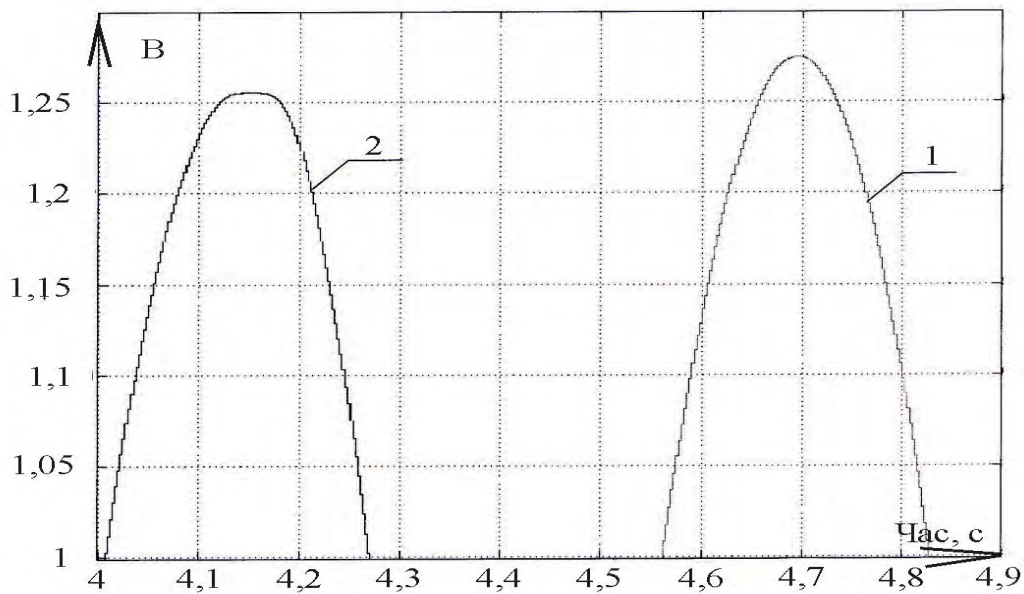


Рисунок 4.49. Порівняння амплітуд сигналів у точці «збиття»: 1 – задаваний (В), 2 - після інтегратору (В) при частоті обчислення 400 Гц та ГТ46 як ДКШ



Метод 3: Подача синусоїдального сигналу до блоку управління в точку після оцифровки вихідного сигналу датчика кутової швидкості (рисунок 4.50) з подальшим інтегруванням сумарного сигналу (рисунок 4.51) з виходу датчика кутової швидкості 2 (ГТ або КВГ) та сигналу, що задається 1, для отримання похибки 3 в значеннях кута відхилення блоку озброєння.

Метод дослідження динаміки системи управління за сигналом кутової швидкості можна використовувати відповідно до наступного: по-перше, основною задачею стабілізації є забезпечення мінімальної кутової швидкості стабілізованої платформи [22]; по-друге, побудову частотних характеристик розімкнених систем управління в деякому діапазоні частот квазистатичного руху (від частот 0,1 Гц до роботи у режимі граничних прискорень (до частот $E_{\max} / \omega_{\max} = 2 \frac{1}{c}$), де, $E_{\max} = 60$ град/сек² – граничне прискорення, $\omega_{\max} = 35$ %/с – максимальна швидкість БО) виконують при заданій кутовій швидкості [22].

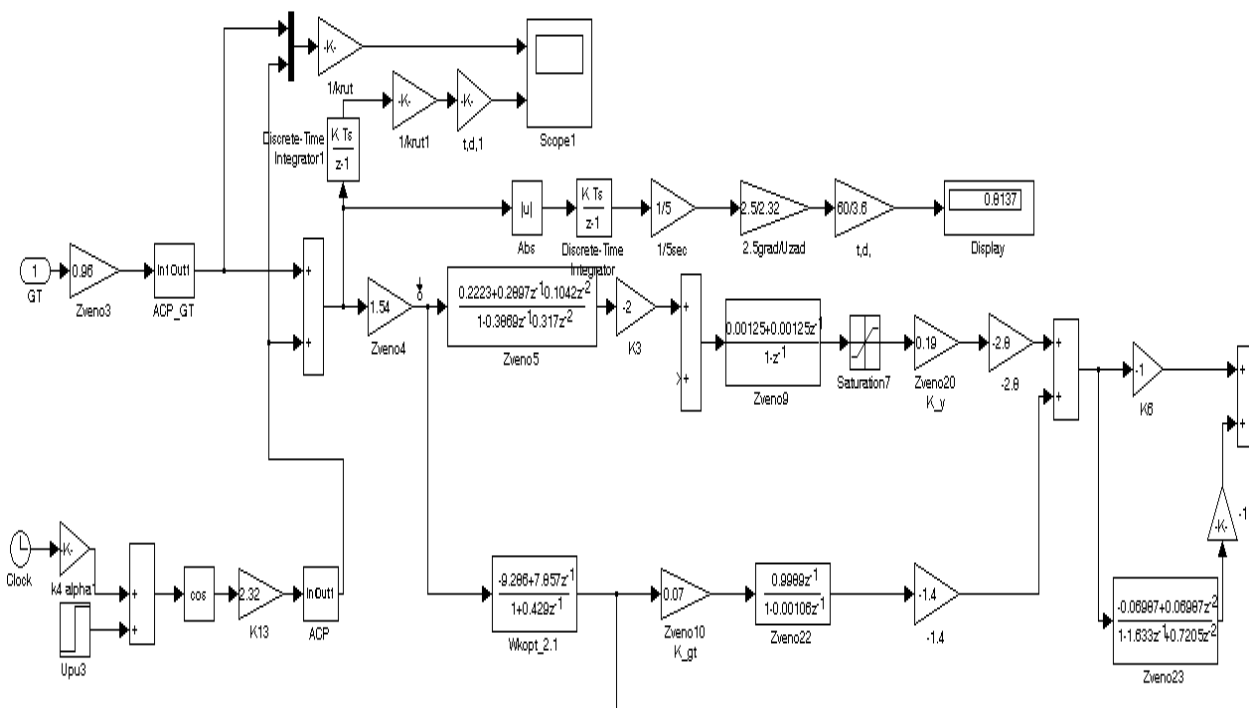


Рисунок 4.50 - Схема блоку управління для визначення динамічної похибки у точці оцифровки сигналу ДГШ ГТ46 при частоті обчислення 400 Гц

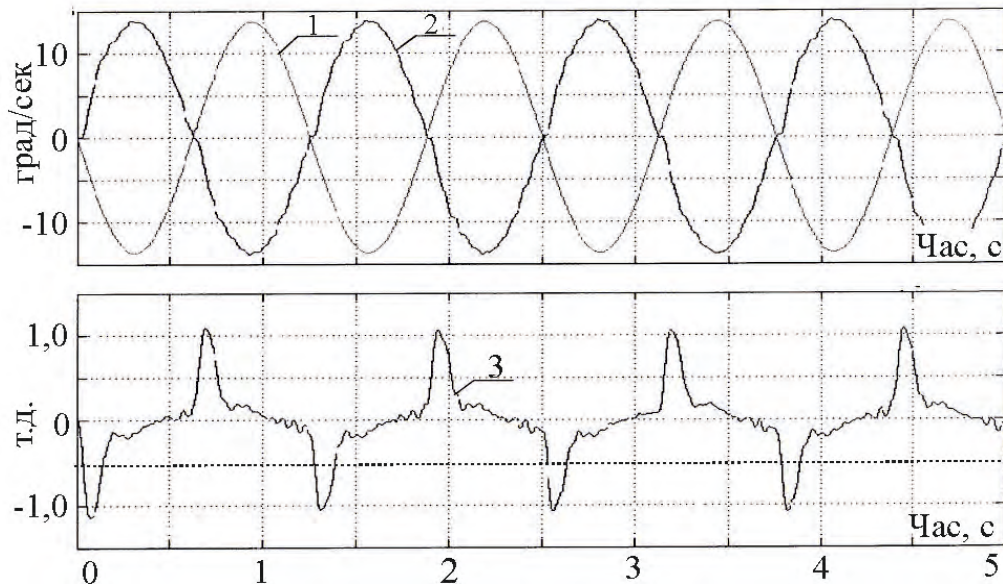


Рисунок 4.51 - Сигнали блоку управління у точці оцифровки сигналу ДКШ: 1 –такий, що задається (град/сек), 2 - після ДКШ (град/сек), 3 - інтеграл сумарного сигналу (т. д.) при частоті обчислення 400 Гц та ГТ46 як ДКШ

У всіх методах сигнали приводяться через крутість ДКШ $K\omega=0,17$ В/град·сек або відносну форму до вхідних впливів: куту у градусах та кутовій швидкості у град/сек.

Визначення динамічної похибки проводилося по вертикальному каналу при частоті 0,8 Гц амплітудою 2,5 градуси.

При моделюванні за схемами, що наведені на рисунках (рисунок 4.47 та рисунок 4.50) на блоках «Display» представлені у цифровому вигляді результати моделювання та інші результати, які важливі для аналізу вказаних методів визначення динамічної похибки. Ці результати усереднені інтегруванням по модулю за час виміру та діленням на цей час інтегрування значення:

- сумарного кута у точці «збиття», отриманого за методом 1 (рисунок 4.47);
- приведеної до амплітуди кутових коливань, що задаються (2,5 град) сумарної кутової швидкості, отриманої за методом 3 (рисунок 4.50).



Перед подачею сигналу, що задається, у точку «збиття» за методами 1 та 2 проводилась попередня калібровка його амплітуди при постійному впливі. Для цього у точку «збиття» подавався стрибок амплітуди напруги, при якому зміна кута моделі блоку озброєння складала 2,5 град. Необхідна величина амплітуди стрибка напруги визначалась шляхом перебору декількох значень. Значення амплітуди заданого сигналу представлені для кожної моделі.

Для досліджень взято три типи стабілізаторів:

- з гіротахометром ГТ46 як датчика кутової швидкості та частотою обчислення цифрового блоку управління 400 Гц;
- з КВГ як датчика кутової швидкості та частотою обчислення цифрового блоку управління 400 Гц;
- з частотою обчислення цифрового блоку управління 1000 Гц та КВГ як датчик кутової швидкості.

Результати моделювання таких стабілізаторів додатково зможуть показати, які характеристики первинного вимірювача кутової швидкості дозволять підвищити точність стабілізації та показати, наскільки покращиться динаміка стабілізатора при збільшенні частоти обчислення цифрового блоку управління.

4.4.1. Результати моделювання

Визначення динамічної похибки вертикального каналу для варіанта побудови стабілізатора із частотою дискредитації 400 Гц та ГТ - 46 як вимірювача кутової швидкості.

Для визначення динамічної похибки за першими двома методами проводиться калібрування сигналу, що задається, у точці «збивання» (рисунок 4.47). Поворот блоку озброєння по вертикальному каналу на кут $\Delta_{зад} = 2,5$ град. (рисунок 4.52) забезпечується подачею в точку «збиття» блоку управління напруги амплітудою $U_{зад 1} = 1,2749$ В.

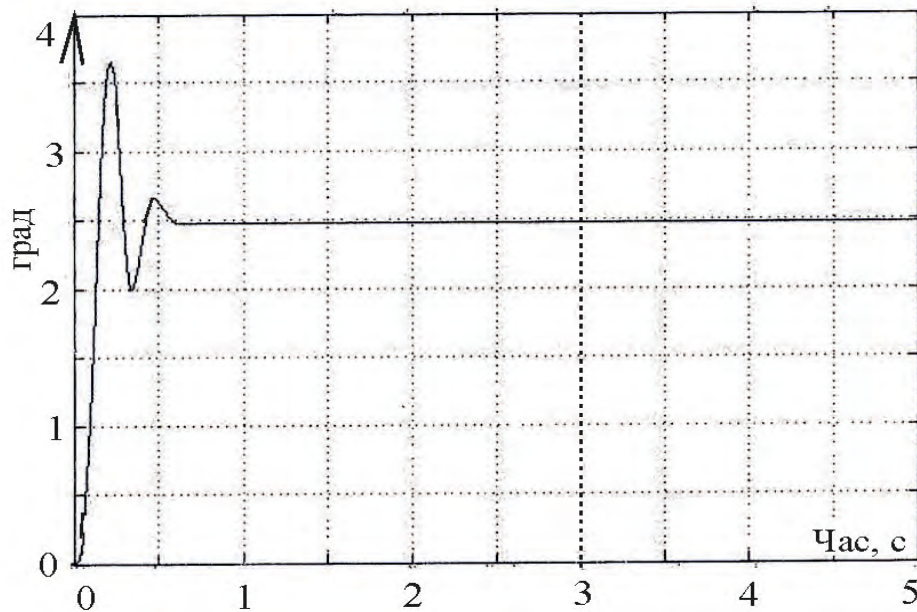


Рисунок 4.52 - Відпрацювання стабілізатором стрибкоподібної напруги у точці «збиття»

Заданий сигнал з такою амплітудою напруги $U_{\text{Зад1}}=1,2749$ В (рисунок 4.49) та частотою $f=0,8$ Гц подається у точку «збивання». Одержано величину динамічної похибки за методом 1: $\delta_1 = 14$ т. д. (рисунок 4.48) . Усереднене значення такої похибки протягом 5 секунд (див. «Display» на рисунку 1) складе $\delta_{\text{1CP}} = 8,9$ т. д. (рисунок 4.47).

Амплітуда вихідного сигналу інтегратора склала $U_{\text{Інт}} = 1,255$ В (рисунок 4.49). При амплітуді сигналу, що задається, $U_{\text{Зад}} = 1,2749$ В по формулі (4.9), одержано динамічну помилку стабілізації за методом 2:

$$\delta_2 = \frac{(60/3,6)2,5|1,255-1,2749|}{1,2749} = 0,0436 \text{ т.д.} \quad (4.10)$$

Максимальне значення інтеграла сумарного сигналу (заданого $\Omega_{\text{Зад}} 2$ та виходу ДКШ $\Omega_{\text{ДКШ}} 1$, див. Рисунок 4.51) у точці після оцифровки сигналу $1_{\text{ДКШ}}$ дає значення максимального відхилення блоку озброєння (3 див. Рисунок 4.51) від заданого при гармонічному впливі, тобто динамічну помилку стабілізації за методом 3: $\delta_3=1,15$ т. д. При цьому, осереднена помилка кутової швидкості, що відпрацьовується, приведена до амплітуди кутових коливань, що задаються (2,5 град.), складе (див. «Display» на рисунку 4.50) δ_{3CP}



= 0,81 т. д.

Попереднє калібрування теж потрібно проводити в такому випадку, якщо крутість ДКШ не буде відповідати заданому значенню. При цьому, калібрування здійснюється шляхом завдання постійної напруги величиною $U_{\text{Зад3}} = 1,7\text{В}$ у точку після оцифровки сигналу ДКШ та визначенням часу t проходження блоком озброєння деякого значення кута ($\alpha = 90$ град. або 30 град.) . Подальше перерахування крутості за формулою $K_{\omega\text{ОЦ}} = U_{\text{Зад}}(\alpha / t)$ продемонструє, наскільки крутість $K_{\omega\text{ОЦ}}$ відповідає заданій K_{Ω} , і які вносити зміни в блок керування для виставки заданої крутості ДКШ. При моделюванні, замість крутості, можна здійснити добір напруги гармонійного сигналу, що задається, $U_{\text{Зад1}}$ таким чином, щоб амплітуда коливань блоку озброєння склала 2,5 град.

При моделюванні амплітуда гармонійного сигналу, яка забезпечує амплітуду коливань блоку озброєння в 2,5 град. відповідала $U_{\text{Зад4}} = 2,32$ В, що відрізняється від $U_{\text{Зад2}} = 2,125$ В, отриманої раніше розрахунковим шляхом. Причиною тому є введення по ланцюгах контуру блоку керування певних оптимізаційних коефіцієнтів у ланці 3 $K_3 = 0,96$ та ланці $K_4 = 1,54$ (рисунок 4.50) на шляху сигналу ДКШ до інтегруючої, та демпфіруючим ланцюгам.

Результати моделювання узагальнені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Результати моделювання динамічної похибки вертикального каналу стабілізатора

Параметри стабілізатора	$U_{\text{Зад1}}$, В	δ_1 , т.д.	$\delta_{1\text{СР}}$, т. д.	$U_{\text{Інт}}$, В	δ_2 , т.д..	$U_{\text{Зад4}}$, В	δ_3 , т.д.	$\delta_{3\text{СР}}$, т.д.
ДКШ ГТ46, час обчислення 400 Гц	1,275	14	8,9	1,255	0,5	2,32	1,15	0,81
ДКШ КВГ, час обчислення 400 Гц	1,262	14	8,9	1,24	0,58	2,3	1,15	0,8



ДКШ КВГ, час обчис - лення 1000 Гц	1,263	15	8,9	1,255	1,016	2,3	1,5	1,35
---	-------	----	-----	-------	-------	-----	-----	------

За допомогою математичного моделювання отримані наступні результати:

1. Динамічна похибка в точці «збиття» з урахуванням фазового запізнювання (метод 1) дає значення, що завжди перевищують 2 т.д;

2. Найменше значення динамічної похибки (0,015 т.д.) отримано при визначенні її за різницями амплітуд сигналів у точці «збиття» (метод 2).

3. Динамічна похибка при подачі сигналу до блоку управління в точку після оцифровки виходу датчика кутової швидкості (метод 3) склала 1,15 т.д.

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

Висновки до розділу 4

1. У результаті експериментальних досліджень встановлено:

- електромагнітні постійні часу становлять (за результатами вимірів):

- 0,7 мс – для ЕДМ20М,
- 0,7 мс – для ЕДМ02,
- 0,85 мс – для ЕДМ20;

- електромеханічні постійні часу становлять:

- 20 мс – для ЕДМ20М,
- 24 мс – для ЕДМ02,
- 26 мс – для ЕДМ20;

2. Смуга пропускання ГТ46 для різних варіантів передатних функцій знаходиться у діапазоні 31-36 Гц . Найбільша смуга пропускання для



гіротахометра з передатною функцією (варіант 1):

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

3. Математичним моделюванням визначено, що підвищення точнісних характеристик може бути досягнуто за рахунок зменшення дискретності обробки цифровим обчислювачем блоку управління до 1, 0 мс та полосою пропускання не менше 100 Гц;

4. Порівняння похибок стабілізації у вертикальному каналі при дискретності обчислення 1,7 мс та 1,0 мс показало, що при тривалості дискретності обчислення 1,0 мс похибка, що встановилася при розгоні й русі виробу з постійною швидкістю, у порівнянні з результатами при дискретності 1,7 мс - у два рази менше, а після впливу імпульсних збурювань блок озброєння при дискретності 1,0 мс повертається у вихідне положення з похибкою, що не перевищує 0,1 кут. хв;

5. Динамічна похибка у точці «збивки» з урахуванням фазового запізнювання (метод 1) дає значення, що завжди перевищують 2 т. д;

6. Найменше значення динамічної похибки (0,015 т. д.) отримано при визначенні її за різницями амплітуд сигналів у точці «збивки» (метод 2).;

7. Динамічна похибка при подачі сигналу до блоку управління у точку після оцифровки виходу датчика кутової швидкості (метод 3) склала 1,15 т.д.

За результатами робіт визначено, що найменше значення динамічної похибки до заявленої у технічній документації на 2Е52 (≤ 2 т. д.) було досягнуто при подачі синусоїдального сигналу у точку після виходу датчика кутової швидкості (метод 2).

Список літератури до розділу 4

1. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая/Л. : Энергоатом. –1990. – С. 288.



2. Величко Т.И., Родькин Д.И. Теория электропривода. Часть 1 .Механика и характеристики двигателей / Т.И. Величко, Д.И. Родькин // КГПИ, Кременчуг. – 1999. – С. 237.

3. Кардонов Г.А. Курс лекций по электроприводу [Электронный ресурс] / Г.А. Кардонов // Государственный институт точной механики и оптики, Санкт – Петербург. – 2003. – Режим доступа: ets.ifmo.ru/kardonov/privod/privod.htm.

4. Донбасский государственный технический университет / УЧЕБ_ПОСОБИЕ_часть_2 / редак / 5-6 МЕХАНИЧ_ПП-измен_A5.doc <https://studfile.net/preview/5060890/page:2/>

5. Московский государственный открытый университет им. В. С. Черномырдина. Электрический привод / Главы по ЭП / 10_Глава 8.doc <https://studfile.net/preview/2263789/page:3/>

6. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов / Наука. – Москва. – 1975г. – С. 768.

7. Головкин Д. В. Метрологія та основи вимірювань / Д. В. Головкин, К. Г. Рого, Ю. О. Скрипник // Либідь. – Київ. – 2001. – С. 408.

8. Одинцов А.А. Теория и расчет гироскопических приборов / А.А. Одинцов // Учебное пособие., Высшая школа., Главное издательство. – Киев. – 1985. – С. 392.

9. Александрова А.Д. Индикаторные гироскопические платформы / А.Д. Александров, Е.А. Правоторов, В.Ф. Рафельсон, М.П. Фельдман // Машиностроение. – 1979. – С. 239.

10. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння [текст]: монографія / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасников, В.В. Чіковані // ЖДТУ. – Київ. – 2014. – С. 176.

11. Гиротахометри ГТ46-01. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.

12. КВГ, ЦКВГ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://zelaz.ru/koriolisovyy-vibracionnyy-giroskop-kvg-ckvg.htm>.

13. G20 to axis MEMS rate gyro. [Электронный ресурс] – Режим доступа:



<http://www.gliadortechologies.com>.

14. Nasiri S. A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status. [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<http://www.invensense.com/shared/pdf/MemsGyroComp.pdf>

15. Волоконные датчики вращения ВГ***. Сводные ТУ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.

16. Техническое описание боевой машины пехоты БМП-3. М, Воениздат. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://eknigi.org/voennaja-istorija/181170-bmp3-tehnicheskoe-opisanie-boevoy-mashiny-pehoty.html/>

17. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK / В.В. Васильев, Л.А Симак, А.М. Рыбникова // Учебное пособие. К.: НАН Украины. – 2008. – С. 91.

18. Ashish Tewari Modern Control Design. With MATLAB and SIMULINK. Indian Institute of Technology, Kanpur, India. John Wiley & Sons Ltd Baffins Lane, Chichester, West Sussex, PO19 1UD, England. P-503.

19. Лазарева Т. Я. Основы теории автоматического управления / Т.Я Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов // Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – С. 352.

20. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации / В.А. Бесекерский, Е.А. Фабрикант // Судостроитель, Л. – 1968. – С. 348.

21. Березин С.М. Комплекс вооружения БМП-3 / С.М. Березин, В.П. Конончук, А.П. Луньков, А.И. Никонов // Вестник бронетанковой техники. – № 5. – 1991.

22. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский // Вища школа. – Киев. – 1983. – С. 455.



CHAPTER 5 / РОЗДІЛ 5
DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF
MEASURING DYNAMIC STABILIZATION ERROR

РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ
ПОХИБКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ

Основою для практичного визначення похибки стабілізації була методика вимірювання срединної похибки аналогових двоплощинних стабілізаторів 2Е36, яка була розроблена в 80-х роках минулого сторіччя [1]. Ця срединна похибка повинна була не перевищувати ± 1 т. д. (1 тисячна дистанції = 3,6 кут. хв.) [2] у кожній із площин наведення: горизонтальній (ГН) або вертикальній (ВН). Перевірка срединної похибки проводилася у складі виробу замовника на типовій трасі [3] при періодичних випробуваннях на 2-х стабілізаторах серійного виготовлення раз на рік.

5.1. Аналіз літературних даних та постановка задачі

З початку створення вітчизняних аналогових та цифрових стабілізаторів перевірка похибки стабілізації проводилась за методом 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. Тому, вимоги до вимірювання точності, засобів вимірювання, контролю основних технічних параметрів стабілізаторів є особливо актуальними, оскільки вони стосуються безпеки держави.

У роботі [1] наведені матеріали щодо вимірювання срединної похибки стабілізації аналогових стабілізаторів 2Е36 та стабілізаторів, що мають аналогічну модель побудови, методом кінографування. Показано, що цей процес проводиться тільки у складі основного виробу [2], в умовах типової траси. Дана методика обробки результатів, що доволі трудомістка, рутинна та займає багато часу на обчислення похибки в ручному режимі.



Зрозуміло, що метод кінографування на час його розробки, а це середина 80-х років минулого сторіччя, був прогресивний та проводився за допомогою кінокамери, що закріплювалась на стабілізованій (у двох площинах) частині виробу. Кінокамера фіксувала переміщення стабілізованої частини виробу по каналам горизонтального та вертикального наведення при русі виробу по типовій трасі.

До недоліків цього методу можна віднести і 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 допускалося застосування приладу (Прилад ПС) з комплекту стабілізатора 2Е26М [3]. Прилад ПС – це електронний вимірювальний пристрій, що призначений для визначення величини середньої похибки та проценту часу нестабілізованого стану виробу стабілізатора 2Е26М у площинах ВН та ГН.

Прилад отримував з блоку управління стабілізатором інформацію від датчиків кута по каналам вертикального та горизонтального наведення та порівнював ці значення із значеннями, які не перевищували відповідні допустимі норми для даної типової траси (п. 1.5 розділ 1). Застосування цього приладу значно полегшило вимірювання середньої похибки.

Подолання труднощів вимірювання похибки стабілізації знайшло свою реалізацію у стабілізаторі 2Е52 [4-6], що був розроблений з новими технічними характеристиками. В документації на стабілізатор 2Е52 були встановлені вимоги до перевірки середньої 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 схематехнічні принципи побудови. Стабілізатор 2Е36 побудовано на принципі «силової» стабілізації, що передбачає наступне:

- оптико-електронний прилад ОЕМ «жорстко» [6] зв'язаний з



блоками БО та Б;

– наведення блоку БО та Б виконується безпосередньо за допомогою пультів управління стабілізатора. При такому принципі побудови наведення з пульта управління стабілізатором Б та БО доводиться застосовуються великі моменти тому, що вони мають значні маси та моменти інерції, що призводить до суттєвих похибок.

У стабілізаторі 2E52 [6] блоки наведення Б і БО та прилад візування спостереження за об'єктами виконані за принципом «незалежної» стабілізації, а саме, блоки Б та БО не мають жорсткого зв'язку з приладом спостереження за об'єктами. У цьому стабілізаторі, як прилад спостереження за об'єктами, використовується прилад зі стабілізованим полем зору (СПЗ). Принцип дії цього стабілізатора полягає в тому, що наведення поля зору приладу СПЗ виконується за допомогою пультів управління стабілізатора, а наведення Б та БО проводиться за сигналами від датчиків кута приладу СПЗ.

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.

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

До невирішених 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 методу вимірювання динамічної похибки.



5.2. Мета та завдання дослідження розробки та впровадження методу вимірювання динамічної похибки стабілізації

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

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Визначити точку подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора;
2. Визначити значення основних параметрів синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ щодо механічних характеристик атестованого стенду для проведення випробування СТМ02 та учбового комплексу УК675;
3. Визначити параметри подачі сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ у складі технологічного стенду СТМ02 та комплексу УК675;
4. Визначити достатність обчислювальних можливостей блоку управління та пульта управління без введення до робочого місця перевірки персонального комп'ютера.

5.3. Основна частина методу визначення динамічної похибки стабілізації

5.3.1. Початкові вимоги

Для застосування технічних вимог щодо визначення динамічної похибки стабілізації у цифрових стабілізаторах необхідно було розробити технічні вимоги та метод 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 (рисунок 5. 1, а) та учбового комплексу УК675 (рисунок 5.1, б);



а)

б)

Рисунок 5.1 - Обладнання для проведення випробувань: а) – стенд СТМ02; б) – учбовий комплекс УК675

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

4) методу обчислення динамічної похибки стабілізації;

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

5.3.2. Визначення точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора

Дослідження по визначенню точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора розглянуто у п 4.4 розділу 4. Виконання досліджень проводились методом математичного моделювання. Для визначення точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора було запропоновано три методи.

За результатами робіт визначено, що найменше значення динамічної похибки до заявленої у документації на 2Е52 (≤ 2 т. д.) було досягнуто при



подачі синусоїдального сигналу в точку після виходу датчика кутової швидкості (метод 2).

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

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

Динамічна похибка стабілізаторів 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 БО виробу УК 675 (ω_Σ).

5.3.3.1. Задання збурюючої кутової швидкості

Для задання ω_Σ у стабілізаторі СВУ-500-4Ц в БУ1022-04 та ПУ03-05 на час проведення випробувань була додатково до основної програми встановлена технологічна програма алгоритмічного забезпечення ПА351, яка дозволяла в ручному режимі проводити роботи по визначенню динамічної похибки вертикального ДВН або горизонтального ДГН каналів. При натисканні кнопки «ВВІД» на виході ланки 4 ВН (ГН) (перша ланка після аналогового-цифрового перетворювача (АЦП) у тракті проходження сигналів ГТ46) формувалась функція $U_{\omega_\Sigma} = U_{\text{МВН(ГН)}} \text{Cos} \omega t$, 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 $U_{\omega_\Sigma} = U_{\text{МВН(ГН)}} \text{Cos} \omega t$,

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 $\omega = 5,02 \cdot \frac{1}{c}$.



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

Значення U_M підбирались експериментально за переміщенням променя лазера в межах об'єкта спостереження та складали: для УК 675 – $U_{MBH}=1,39$ В, $U_{MГH}=1,46$ В; для СТМ 02 – $U_{MBH}=1,5$ В, $U_{MГH}=1,7$ В.

На рисунку 5.2 наведено схему робочого місця для перевірки динамічної похибки стабілізатора СВУ-500-4Ц.

В результаті проведеної перевірки встановлено, що 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).

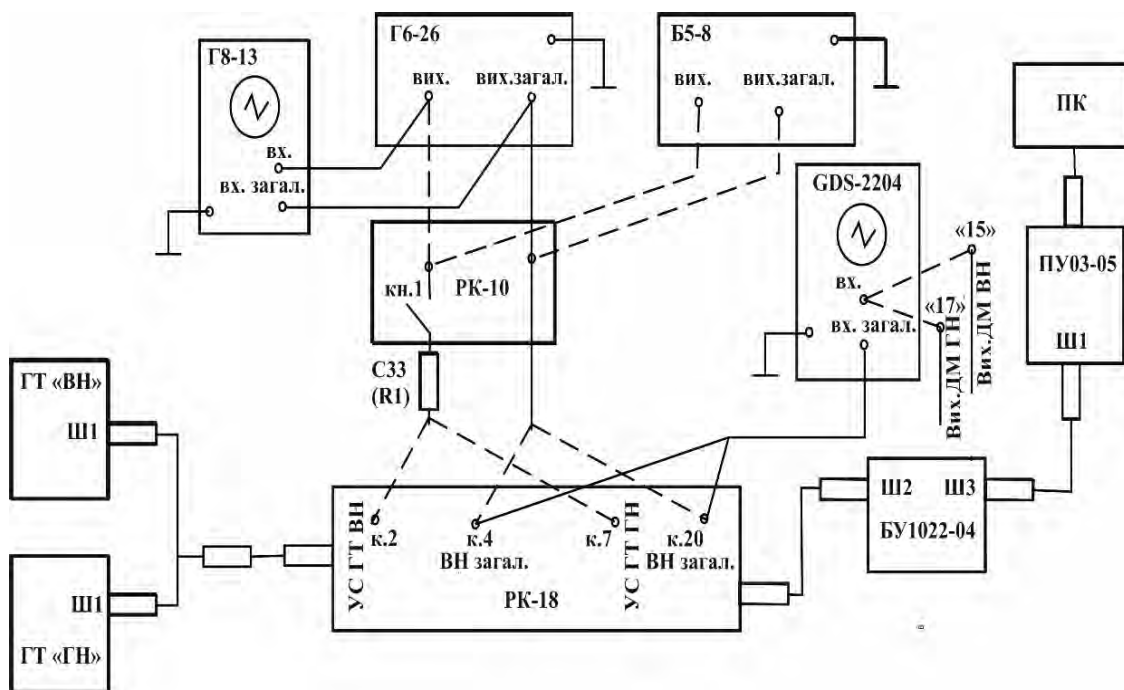


Рисунок 5.2 - Схема робочого місця для перевірки динамічної похибки стабілізатора: *С8-13 – осцилограф; Г6-26 – генератор сигналів; Б5-8 – блок живлення; РК-10 – технологічна коробка; GDS-2204 – осцилограф; ГТ-ВН, ГТ-ГН – датчики кутової швидкості (ДКШ); РК-18 – розподільча коробка; БУ1022-04 – блок управління стабілізатора; ПУ03-05 – пульт управління стабілізатора; ПК – персональний комп'ютер*



5.3.3.2. Фіксація сигналів сумарної швидкості

Фіксація значень $\omega_{\Sigma BH(\Gamma H)}$ СВУ-500-4Ц проводилась накопиченням масиву значень на виходах демодуляторів відповідних каналів після АЦП (вхід ланки 4), яка передавала його в персональний комп'ютер, підключений до ПУ03-05 та побудовою графіків функцій $U_{\omega\Sigma}$ та $\int_{t=0}^{t=3,75c} U_{\omega\Sigma} dt$.

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 рисунку 5.2.

5.3.3.3. Розрахунок динамічних похибок

Оскільки,

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

та обравши за графіком функції $\int_{t=0}^{t=3,75c} U_{\omega\Sigma BH(\Gamma H)} dt$ максимальне значення, яке дорівнює $K_{\omega BH(\Gamma H)} \cdot \varphi(t)_{\max BH(\Gamma H)}$, визначається динамічна похибка каналу за формулою:

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

де, φ – кут відхилення осі, що досліджується, від заданого напрямку;

K_{ω} – крутість характеристики тракту проходження сигналів ДКШ

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

5.3.3.4. Визначення значення крутості

Для визначення значення $K_{\omega BH(\Gamma H)}$ СВУ-500-4Ц від джерела постійної напруги С8-13 на к. 2 відносно к. 4 (к.7 відносно к. 20) коробки РК18 (рисунок 5.2) подавався стрибок постійної напруги рівнем $U_{MBH(\Gamma H)}$ та фіксувався час



$t_{PBH(ГН)}$ повороту на кут $\alpha_{BH(ГН)}$:

$\alpha_{BH} = 80^\circ$ (від нижнього до верхнього кута обмежувача повороту);

$\alpha_{ГН} = 60^\circ$ (відлік по азимутальному приладу УК675).

Результати експериментального відпрацювання динамічної похибки стабілізатора наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - 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 φ_{max} , Вс	Динамічна похибка, т.д.	№ рисунку
Канал ВН								
СВУ-500-4Ц на СТМ0 2	1,5	3,75	41,6	11,09	0,134	0,0157	1,95	5.4
СВУ-500-4Ц (УК675)	1,39	8,06	80	9,92	0,14	0,0076	0,93	5.6
Канал ГН								
СВУ-500-4Ц на СТМ 02	1,7	3,75	43,9	11,7	0,145	0,021	2,4	5.3
СВУ-500-4Ц на УК675	1,46	6,59	60	9,1	0,160	0,0185	1,93	5.5

Для визначення значень $K_{\omega BH(ГН)}$ СВУ-500-4Ц крутість каналу ВН (КВН), крутість каналу ГН (КГН) при натисканні кнопки «ВВІД» на вихід ланки 4



ВН(ГН) подавався програмно стрибком рівнем $U_{\text{МВН(ГН)}}$.

– на СТМ02 – на час 3,75с та фіксувався кут розвороту платформи – $\alpha_{\text{ВН(ГН)}}$;

– на УК675 фіксувався час розвороту $t_{\text{РВН(ГН)}}$ УК675 на кут $\alpha_{\text{ВН}} = 80^\circ$ або $\alpha_{\text{ГН}} = 60^\circ$.

Значення крутості K_ω вираховувалось у відповідності з виразом:

$$K_{\omega_{\text{ВН(ГН)}}} = \frac{U_{\text{МВН(ГН)}}}{\omega_{\text{ВН(ГН)}}}, \quad (3)$$

$$\text{де, } \omega_{\text{ВН(ГН)}} = \frac{\alpha_{\text{ВН(ГН)}}}{t_{\text{РВН(ГН)}}}.$$

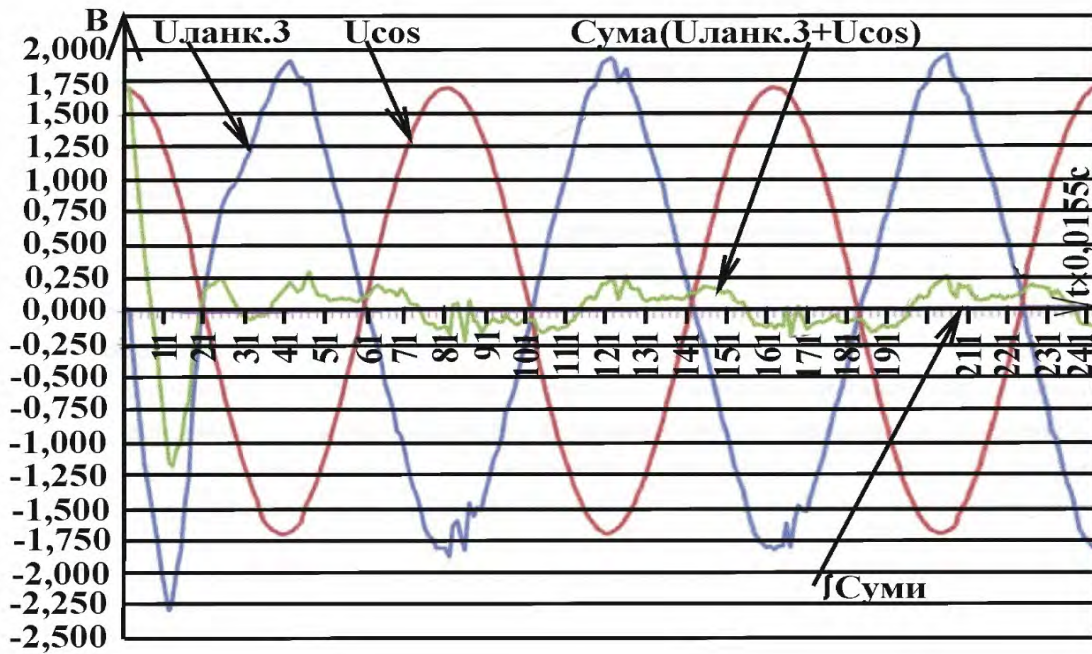
Визначення крутості вихідної характеристики датчиків кутової швидкості необхідно для більш точного розрахунку динамічної похибки стабілізації та повинно проводитись на кожному із комплектів стабілізатора тому, що крутість кожного конкретного датчика кутової швидкості може змінюватись у заданих межах.

5.3.3.5. Результати випробувань щодо відпрацювання динамічної похибки стабілізації

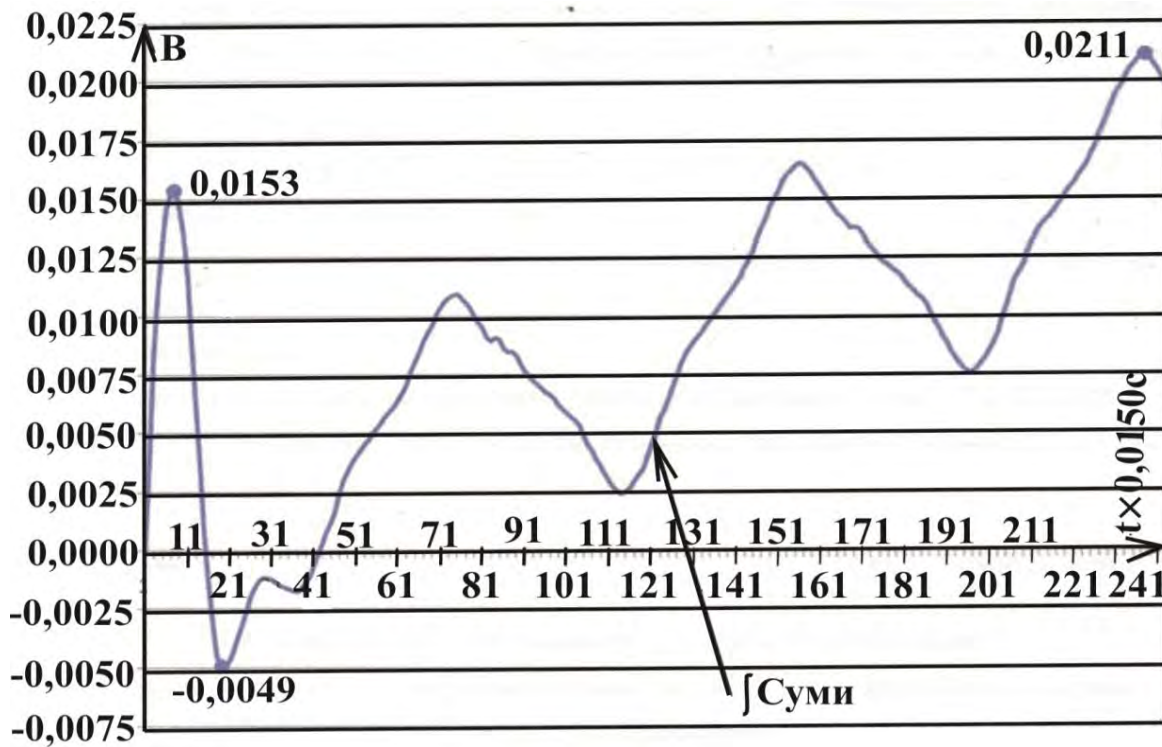
Результати досліджень випробувань наведені у таблиця 1 та на рисунках 5.3.–5.6.

По графіках (рисунки 5.3–5.6) наглядно простежується зміна у часі основних сигналів стабілізатора $U_{\text{ЛАНК 3}}$, U_{COS} , $\int \text{Сума}(U_{\text{ЛАНК 3}} + U_{\text{COS}})$, $\int \text{Суми}$, по обчисленню яких вираховувалась динамічна похибка стабілізації. Для більшої наочності графік $\int \text{Суми}$ наведено у збільшеному масштабі.

Запропонований метод пошуку (пункт 5.3.2) точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора за допомогою математичного моделювання дозволив вирішити поставлене завдання. Отримані результати повністю погоджуються з результатами вимог щодо вимірювання динамічної похибки (≤ 2 т.д.) стабілізатора 2E52. Показано, що серед трьох розглянутих методів подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора

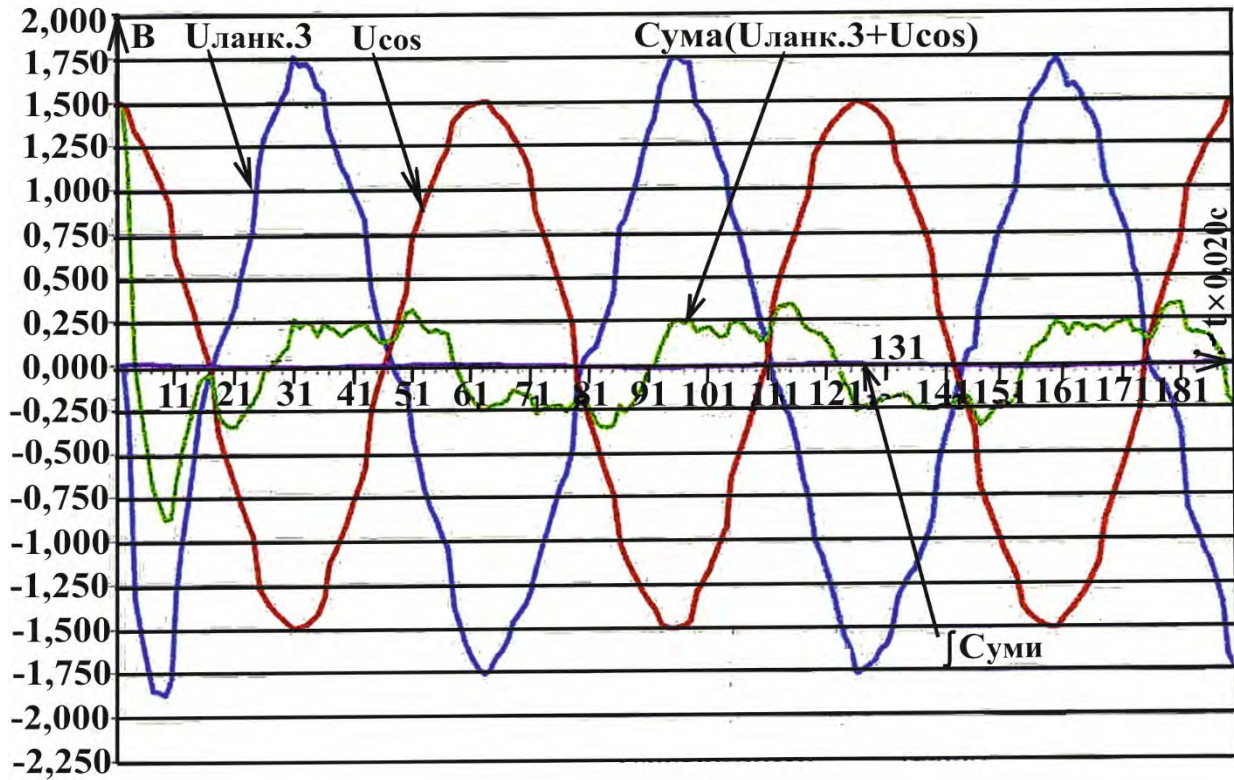


а)

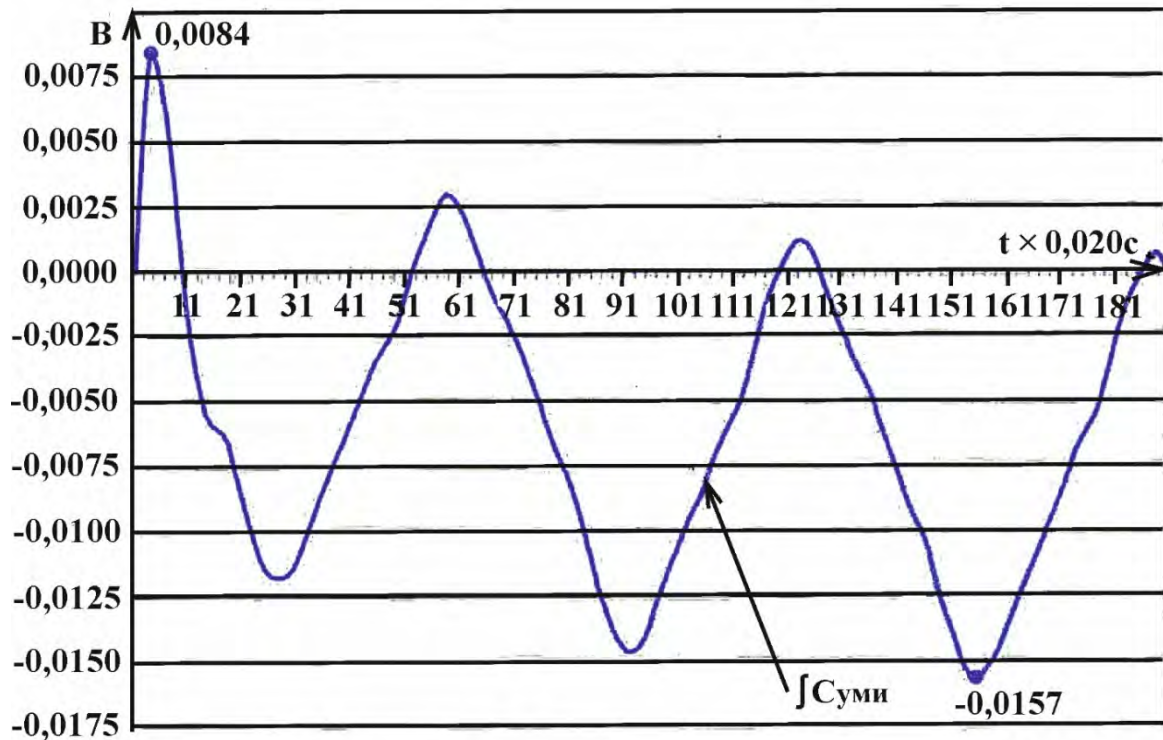


б)

Рисунок 5.3 - СВУ-500-4Ц на СТМ02 Канал ГН: а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу \int Суми

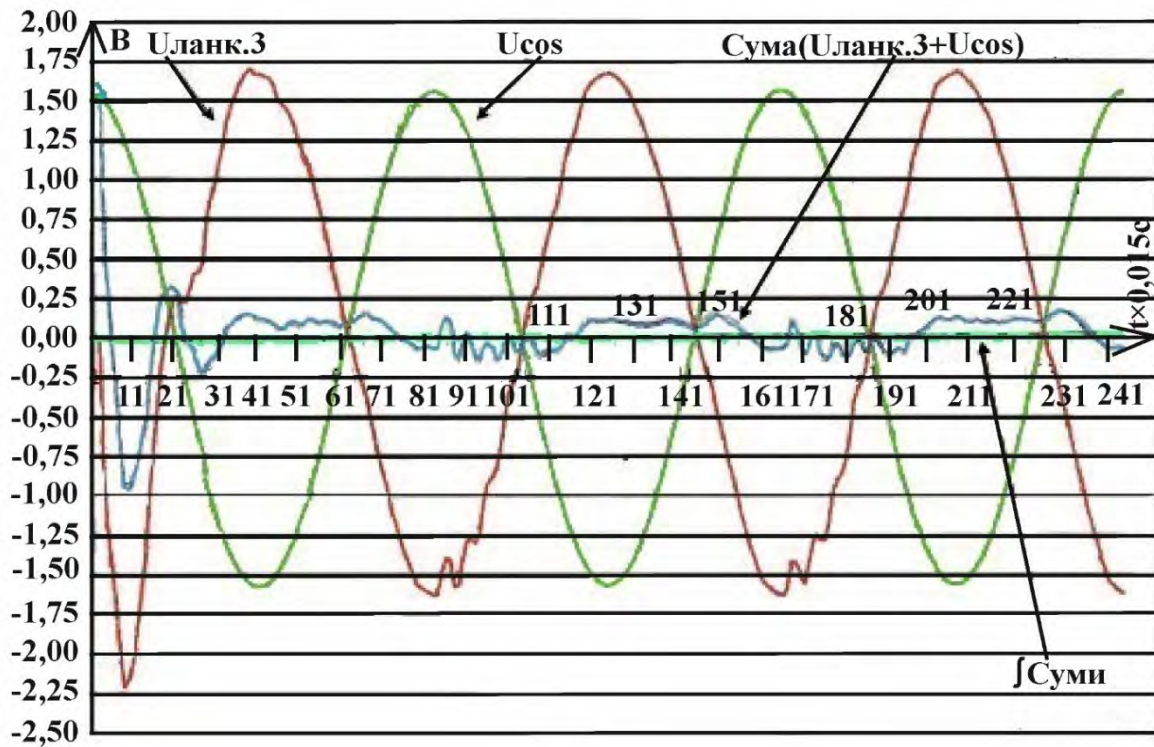


а)

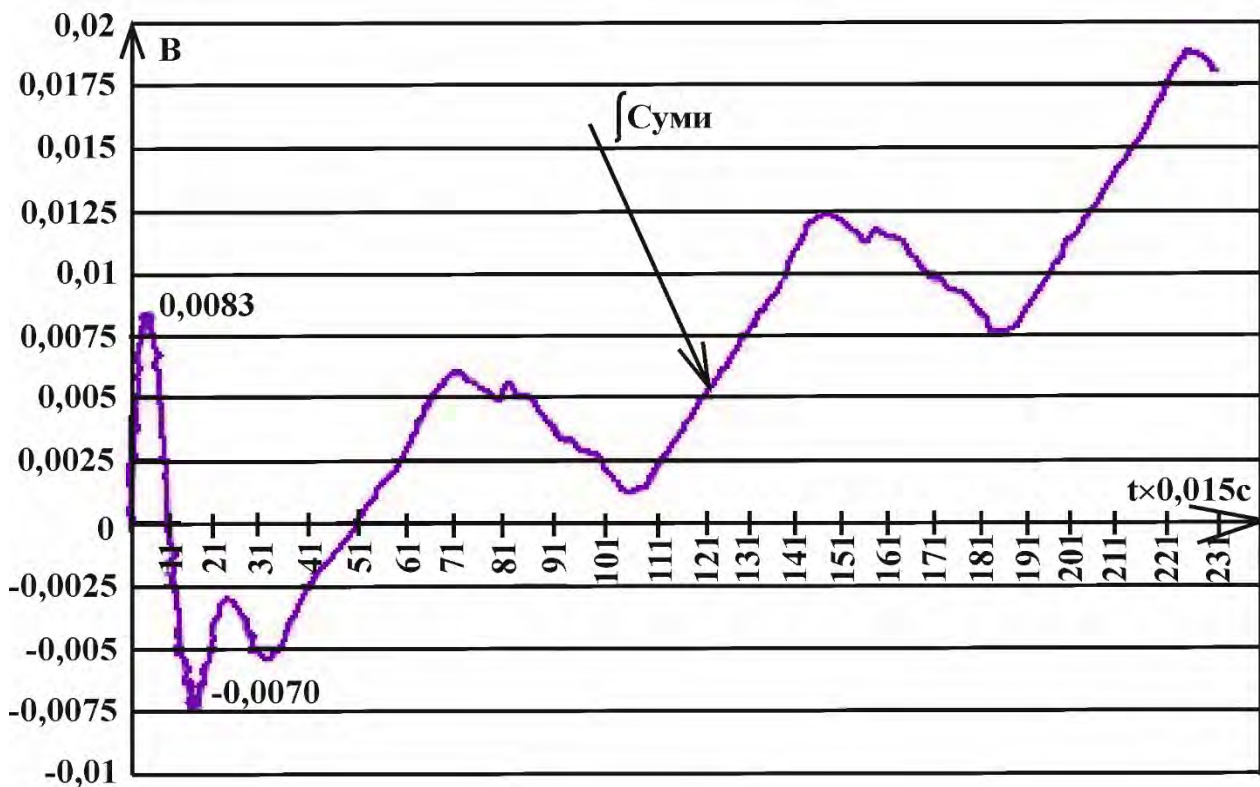


б)

Рисунок 5.4 - СВУ-500-4Ц на СТМ02 канал ВН : а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу $\int \text{Суми}$

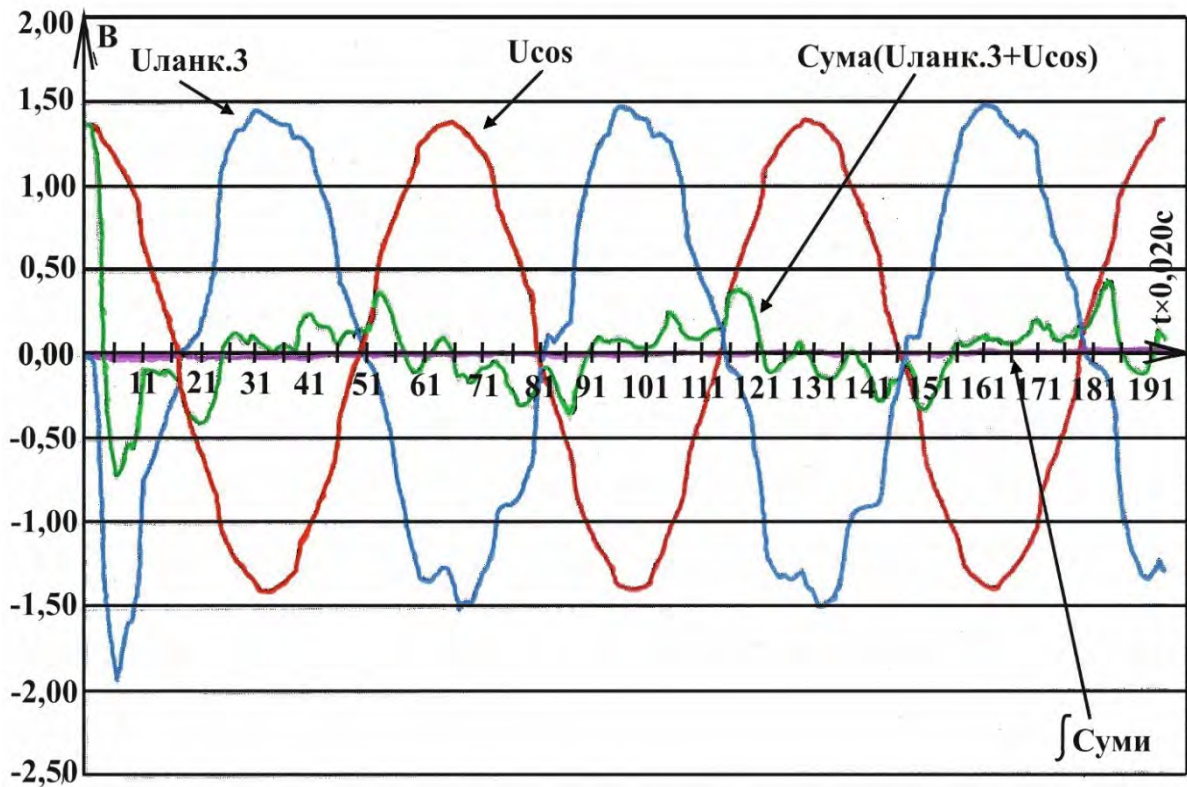


а)

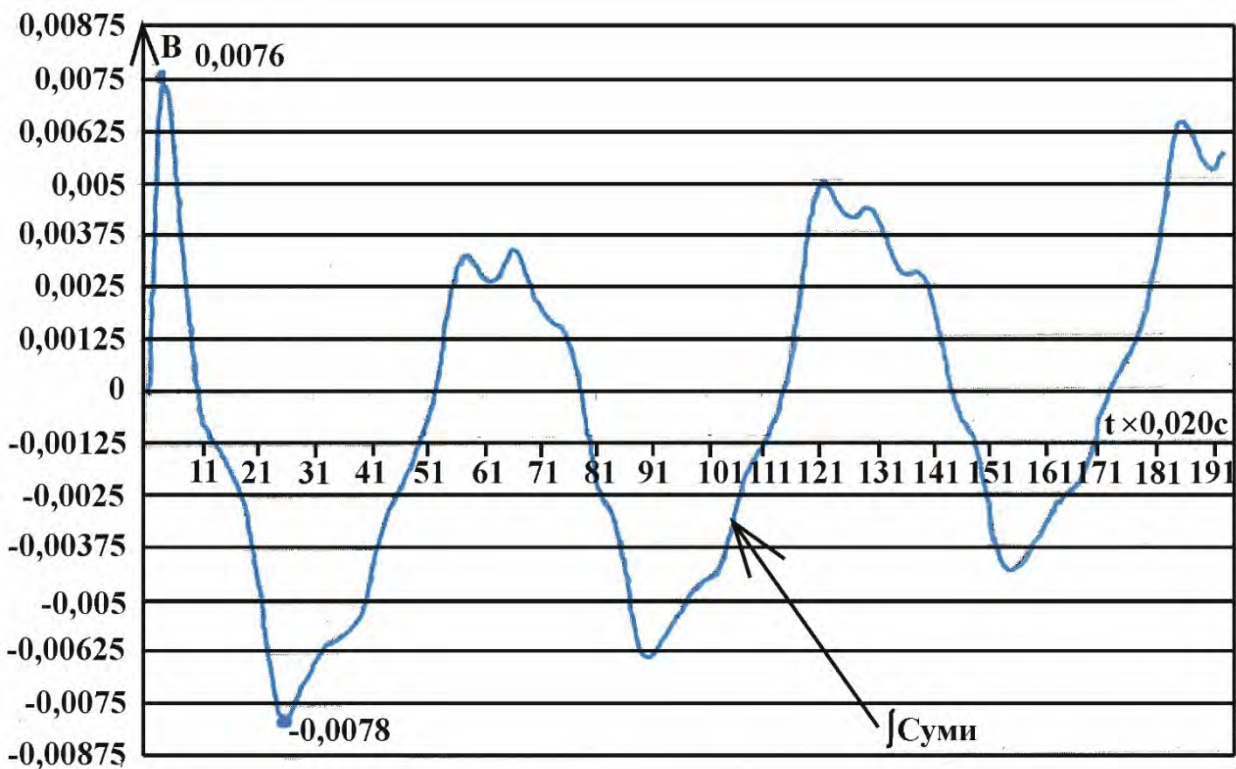


б)

Рисунок 5.5 - 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)

Рисунок 5.6 - СВУ-500-4Ц на УК675 канал ВН : а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу ∫ Суми



визначено метод 2 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».

Застосування методу експериментального відпрацювання є ефективним для визначення значень основних параметрів синусоїдального сигналу щодо механічних характеристик стенду СТМ02 та учбового комплексу УК675. Відмінною особливістю цього методу є те, що відпрацювання проводиться на обладнанні, яке за своїми механічними характеристиками імітує механічні навантаження по каналам ВН та ГН реального виробу. При цьому, частота подачі сигналу залишилась незмінною та прийнята 0,8 Гц, що відповідає вимогам стабілізатора 2E52. 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 по каналам ВН та ГН.

Відмінною особливістю розробленого методу подачі сигналу у складі технологічного стенду СТМ02 та комплексу УК675 є те, що він був запрограмований у вигляді додатку ПА351 до основної програми математичного забезпечення стабілізатора. До складу програми ПА351 входили всі намічені етапи виконання робіт. Характерно, що програма, на час досліджень працювала у ручному режимі, що значно спростило виконання експериментальних робіт та дало можливість корегування окремих коефіцієнтів.

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

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



Висновки до розділу 5

1. Розроблено новий метод вимірювання динамічної похибки стабілізації шляхом робіт щодо математичного моделювання та експериментального відпрацювання;

2. Встановлено, що значення мінімальної динамічної похибки стабілізації, що отримано у результаті експериментального відпрацювання, не перевищує величини, наведеної у вимогах на стабілізатор 2Е52 (≤ 2 т.д.);

3. За позитивними результатами проведеного дослідження, нову методику вимірювання динамічної похибки стабілізації введено до технологічного процесу виготовлення стабілізаторів озброєння.

Список літератури до розділу 5

1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БМП-2. Часть. 1. [Електронний ресурс] – М – 1987. – С. 247. – Retrieved from <http://armyman/info/books/id-44.html>.

2. Кудрявцев А.М Стабилизаторы вооружения 2Э36 устройство и обслуживание. [Електронний ресурс] / А.М. Кудрявцев, О.К. Уласевич, В.Н. Жеглов, В.Ю. Гумилев // Рязань, РВВДКУ(ВИ). – 2013г. – С.144. Retrieved from <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.

3. Стабилизатор 2Э26М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Альбом рисунков. – Воениздат. – М. – 1984.

4. Техническое описание боевой машины пехоты БМП-3. [Електронний ресурс] М, Воениздат. – 1988 – С. 71. Retrieved from <http://eknigi.org/voennaja-istorija/181170-bmp3-tehnicheskoe-opisanie-boevoy-mashiny-pehoty.html/>

5. Березин С.М. Комплекс вооружения БМП-3 / С.М. Березин, В.П. Конончук., А.П. Луньков, А.И. Никонов // Вестник бронетанковой техники. –1991. – № 5.

6. Патент РФ 2360208 С2 МПК F41H 7/02, F41A 27/30. Комплекс



вооружения боевой машины и стабилизатор вооружения / И.В. Степанченко, С.С. Сальников, И.А. Матвеев, Л.А. Богданова, Е.В. Власов, Г.С. Ширяев, В.В. Попов. – №2007124064/02; заявл. 10.01.2009; опубл. 27.06.2009. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/RU2360208C2/ru>.

7. Лепешинский И.Ю. (2010). Автоматические системы управления вооружением. [Электронный ресурс] / И.Ю Лепешинский, П.М. Варлаков,

Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев // Учебное пособие. Омск, Изд-во ОмГТУ. – 2013. Retrieved from mslstoryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.

8. Безвесільна О.М. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації / Безвесільна, О.М., Цірук, В.Г., Чепюк // Журнал «Вісник інженерної академії України». – №2, 2014. – С. 155–159.

9. Цірук В.Г. Розробка методу підвищення точності вимірювання кутової локалізації та прискорення гіростабілізованої платформи // Журнал «Технологічний аудит та резервування». – 2018. – №4 / 1 (42). – С. 11–16.

10. Cherepansra, I., The procedure for determining the normalization of random error of an informationmeasuring system with elements of artificial intelligence/ I. Cherepansra, O. Bezvesilna, A. Sazonov, S. Nechai, T. Khylichenko // Eastern-European Jornal of Enterprice Technologies. – 2017. – Vol 5, NO 9(89). – P. 58–67.

11. Simulink – Simulation and Model-Based Design, Retrieved from <http://www.mathworks.com/products/simulink>.

12. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK [Электронный ресурс] / В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова // Учебное пособие. Национальный авиационный университет. – 2008. – С. 91. Retrieved from <https://www.twirpx.com/file/85759/>.

13. Liu, J. Signal Processing Technique for Combining Numerous MEMS Gyroscopes Based on Dynamic Conditional Correlation [Text] / J. Liu, Q. Shen, W. Qin // Micromachines. – 2015. – Vol. 6, Issue 6. – P. 684–689. doi: 10.3390/mi6060684.

14. Ting, T. O. State-of-Charge for Battery Management System via Kalman



Filter [Text] / T. O. Ting, K. L. Man, C.-U. Lei, C. Lu // Engineering Letters. – 2014. – Vol. 22, Issue 2. – P. 75–82. 5. Chaudhuri, S. S. Vision Based Target-Tracking Realized with.

15. Ji, X. (2015). Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array [Text] / X. Ji // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6. doi: 1

16. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (2004), IEEE std.1431™, 69.



Conclusions / Висновки

Викладені у монографії дослідження дозволили вирішити актуальну і складну науково-технічну задачу, що має важливе значення – підвищення точнісних характеристик приладового комплексу стабілізації (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).

Отримано наступні нові результати:

1. Розроблено нові методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації.

Проведено порівняльний аналіз із застосуванням методів математичного моделювання підтвердив доцільність застосування як сенсорів кутової швидкості твердотільних гіротахometrів, за рахунок більш високої смуги пропускання та підвищеної частоти інформаційного обміну, що, в свою чергу, призводить до зменшення похибок та покращення характеристик стабілізаторів;

2. Проведено розробку математичних моделей основних компонентів та каналів управління приладової системи стабілізації, що дозволило провести моделювання окремих режимів роботи стабілізатора;

3. Визначено та підтверджено математичним моделюванням і експериментально шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, а саме:

- 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. Запропонована модель побудови стабілізатора дозволяє підвищити точність стабілізації та зменшити вимоги щодо вимірювання динамічної похибки стабілізації з 2 т.д. до 0,5 т.д;

6. Розроблено наступні методи вимірювання механічних параметрів, що впливають функціонування стабілізатора:

– електронна виставка датчиків кутової швидкості, що враховує похибки їх виставки, та усуває взаємовплив каналів без застосування трудомістких ручних операцій;

– метод вимірювання моментів опору обертанню, що виконується вимірюванням струмів споживання блоку вертикального наведення та блоку горизонтального наведення та порівняння їх з граничними значеннями для кожного з каналів;

– метод вимірювання жорсткості вертикального та горизонтального каналів наведення;

7. Розроблено та впроваджено у виробництво метод вимірювання динамічної похибки стабілізації, що визначається за результатами відпрацювання стабілізатором синусоїдальний сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$, що дозволяє:

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

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

Розроблений метод не потребує додаткової доробки матеріальної частини стабілізатора та реалізується за рахунок зміни програмно-алгоритмічного забезпечення.



References / Список використаних джерел

1. Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев [Электронный ресурс] // Учебное пособие. – Омск. – 2010.
2. 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.
3. Безвесільна О.М. Оптимізація, ідентифікація, алгоритмічна обробка параметрів чутливих елементів стабілізатора легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, С.П. Маляров, Л.О. Чепюк // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2015. – С. 217.
4. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння. / О.М. Безвесільна, В.П. Квасніков, В.Г. Цірук, В.В. Чиковані. // Монографія. – НПО «Пріоритети», Київ: ЖДТУ. – 2014. – С.176.
5. Безвесільна О.М. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Ю.О. Подчашинський // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – С.201.
6. Безвесільна О.М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – С.174.
7. Цірук В.Г. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасніков, Л.О. Чепюк // Вісник Інженерної академії України. – № 2, 2014р. – С. 155 – 159.
8. Цірук В.Г. 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.
9. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Боевая машина пехоты БМП-2. Часть. 1. [Электронный ресурс] /– 1987. – Retrieved fromt



<http://armyman/info/books/id-44.html>.

10. Безвесільна О.М. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин: підручник / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, Г.С. Тимчик // – Житомир: ЖДТУ. – 2011. – С.876.

11. Безвесільна О.М. Особливості цільових задач, що вирішуються рухомими об'єктами та їх вплив на склад комплексів орієнтації і навігації /О.М. Безвесільна // Міжнародний науковий журнал «Технологічні комплекси» – № 1(7), 2013р. – С. 51 – 53.

12. Левин И. Я. Справочник конструктора точных приборов./ Левин И. Я. // М, Оборонгиз. – 1962. – С.727.

13. Цірук В.Г. Компенсація похибок датчиків первинної інформації /В.Г. Цірук // VII Міжнародна науково-технічна конференція "Гіротехнології, навігація керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки", 23,24 квітня 2009 р.: Збірка доповідей. Ч1/К.: НТУУ "КПІ".– 2009.- С.36–42.

14. Бабаев А.А. Стабилизация оптических приборов / А.А. Бабаев // Л.:Машиностроение. – 1975. – С.158.

15. Безвесільна О.М. Принципи побудови системи для вимірювання механічних величин на основі двомірної інформації / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський // Вісник Інженерної академії України. – №3,1974, 2009. – С.52-55.

16. 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, Пшемишль. – 07–15.03.2018. – С. 3–8.

17. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння. /Безвесільна О.М. В.П. Квасніков, В.Г. Цірук, В.В. Чиковані // Монографія. – НПО «Пріоритети». – Київ, ЖДТУ.– 2014. – С. 176.

18. Гиротахometri ГТ46-01. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.

19. Безвесільна О.М. Математична модель та технічні характеристики гіротахметра ГТ46 / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, Д.С. Козюков // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція «Технічні науки на



сучасному етапі» (присвячена Дню науки). – Житомир. – 19.05.2018. – С. 92-93.

20. КВГ, ЦКВГ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://zelaz.ru/koriolisovyy-vibracionnyy-giroskop-kvg-ckvg.htm>.

21. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (2004), IEEE std.1431™, 69.

22. Волоконные датчики вращения ВГ***. Сводные ТУ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.

23. G20 to axis MEMS rate gyro. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.gladiortechologies.com>.

24. Сущенко О.А. Обзор современного состояния микроэлектромеханических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О.А. Сущенко, С.В. Карасев // *Електроніка та системи управління*. – №1(27), 2011. – С. 103-108.

25. Liu, J. Signal Processing Technique for Combining Numerous MEMS Gyroscopes Based on Dynamic Conditional Correlation [Text] / J. Liu, Q. Shen, W. Qin // *Micromachines*. – 2015. – Vol. 6, Issue 6. – P. 684–689. doi: 10.3390/mi6060684.

26. Ji, X. (2015). Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array [Text] / X. Ji // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6.

27. Ji, X. Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array [Text] / X. Ji // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6. doi: 1.

28. Юферов Ф.М. Электрические двигатели автоматических устройств. / Ф.М. Юферов // «Высшая школа». – М. –1976. – С.416.

29. Электрические машины автоматических устройств / М.М Кацман // *Инфа-М*. – М. – 2002. – С.264.

30. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БМП-2. Часть. 1. [Электронный ресурс] М. – 1987. – Режим доступа: <http://armyman/info/books/id-44.html>.

31. Кудрявцев А.М.. Электрооборудование бронетанковой техники. Стабилизаторы вооружения 2Э36: устройство и обслуживание [Электронный ресурс] / А.М. Кудрявцев, О.К. Уласевич, В.Н. Жеглов, В.Ю. Гумилев //



Учебное пособие. Рязань. – 2013г. – С. 144. Режим доступа: <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.

32. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1 и 2. БМП-3. [Электронный ресурс] – Воениздат. МО М – 1998. – Режим доступа: <https://mil.in.ua/forum/viewtopic.php?t=893>.

33. Терехин В.В. Основы моделирования в MATLAB. Часть 2. Simulink / В.В. Терехин // Учебное пособие. – Новокузнецк. РИО НФИ Кем ГУ. – 2004 – С.376.

34. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK /В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова// Учебное пособие. – Киев: Национальный авиационный университет. – 2008. – С. 91.

35. Бусленко Н.Г. Моделирование сложных систем / Н.Г.Бусленко //- М.: Наука. – 1978.- С. 400.

36. Елисеев, А.Д. Исследование быстродействующего привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения со статическим преобразователем / А.Д. Елисеев, Б.В. Новоселов // Оборонная техника. – 2011. – №8. – С. 24–29.

37. Елисеев, А.Д. Математическая модель статического преобразователя стабилизатора танкового вооружения как нелинейной импульсной системы / А.Д. Елисеев, В.А. Шаталов // Вопросы оборонной техники. Серия IX. – 2012. – №6(258).

38. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учебник для ВУЗов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев // М.: Высшая школа. – 2001. – С. 343.

39. Егоренко Д. Л. Основы математического моделирования Построение и анализ моделей с примерами на языке Matlab / Д. Л. Егоренко, А.Л. Фратков, В.Ю. Харламов. Под. ред. д-ра техн. наук А.Л. Фраткова // Учеб. Пособие. СПб.: БГТУ. – 1994.

40. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока / В.В. Кочергин // Л.: Энергоатомиздат. – 1988. – С. 168.

41. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов // М.: Высш. шк. – 1994. – С. 318.



42. Семёнов А.С. Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, М.Н. Петрова // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 10-3. – С. 523-528; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39249> (дата обращения: 20.04.2020).

43. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // М.: Наука. – 1975. – С. 768.

44. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов // Физматлит, М. – 2005. – С. 320.

45. Елисеев А.Д. Модернизация привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения / А.Д. Елисеев // *Вооружение. Технология. Безопасность. Управление. Материалы III научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых*. В 3 ч. Часть 1. Ковров. – 2008. – С.157–161.

46. Шарма Д.Н. Уравнения в частных производных для инженеров / Д.Н. Шарма, К. Синг // *Техносфера*, М. – 2002. – С. 320.

47. Ханукаев Ю.И. О кватернионах. Конечные перемещения твердого тела и точки.[Электронный ресурс] / Ю.И. Ханукаев / *Электронный журнал «Исследовано в России»*. – С. 338–346. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/033.pdf>.

48. Мелешко В.В. Методические указания к домашним заданиям по курсу "Теория и расчет приборов и систем" [Электронный ресурс]. / В.В. Мелешко // – Киев: НТУУ «КПИ» – 2011. – С. 81.

49. Веселов В.А. Гироскопические измерительные приборы и устройства. /В.А. Веселов, Р.Н. Грбовой, О.С. Ипатов, В.Г. Кузнецов, В.И. Медведев / Учебное пособие. Балтийский государственный технический университет. – 2003. – С. 122.

50. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая/Л. : Энергоатом. –1990. – С. 288.

51. Величко Т.И., Родькин Д.И. Теория электропривода. Часть 1.Механика и характеристики двигателей / Т.И. Величко, Д.И. Родькин // КГПИ, Кременчуг. – 1999. – С. 237.



52. Кардонов Г.А. Курс лекций по электроприводу [Электронный ресурс] / Г.А. Кардонов // Государственный институт точной механики и оптики, Санкт – Петербург. – 2003. – Режим доступа: ets.ifmo.ru/kardonov/privod/privod.htm.

53. Донбасский государственный технический университет / УЧЕБ_ПОСОБИЕ_часть_2 / редак / 5-6 МЕХАНИЧ_ПП-измен_A5.doc <https://studfile.net/preview/5060890/page:2/>

54. Московский государственный открытый университет им. В. С. Черномырдина. Электрический привод / Главы по ЭП / 10_Глава 8.doc <https://studfile.net/preview/2263789/page:3/>.

55. Головки Д. В. Метрологія та основи вимірювань / Д. В. Головки, К. Г. Рого, Ю. О. Скрипник // Либідь. – Київ. – 2001. – С. 408.

56. Одинцов А.А. Теория и расчет гироскопических приборов / А.А. Одинцов // Учебное пособие., Высшая школа., Главное издательство. – Киев. – 1985. – С. 392.

57. Александрова А.Д. Индикаторные гироскопические платформы / А.Д. Александров, Е.А. Правоторов, В.Ф. Рафельсон, М.П. Фельдман // Машиностроение. – 1979. – С. 239.

58. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння [текст]: монографія / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасников, В.В. Чіковані // ЖДТУ. – Київ. – 2014. – С. 176.

59. Nasiri S. A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.invensense.com/shared/pdf/MemsGyroComp.pdf>.

60. Техническое описание боевой машины пехоты БМП-3. [Электронный ресурс] М, Воениздат. – 1988 – С. 71. Retrieved from <http://eknigi.org/voennaja-istorija/181170-bmp3-tehnicheskoe-opisanie-boevoy-mashiny-pehoty.html/>.

61. Ashish Tewari Modern Control Design. With MATLAB and SIMULINK. Indian Institute of Technology, Kanpur, India. John Wiley & Sons Ltd Baffins Lane, Chichester, West Sussex, PO19 1UD, England. P-503.

62. Лазарева Т. Я. Основы теории автоматического управления / Т.Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов // Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – С. 352.



63. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации / В.А. Бесекерский, Е.А. Фабрикант // Судостроитель, Л. – 1968. – С. 348.

64. Березин С.М. Комплекс вооружения БМП-3 / С.М. Березин, В.П. Конончук, А.П. Луньков, А.И. Никонов // Вестник бронетанковой техники. – № 5. – 1991.

65. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский // Вища школа. – Киев. – 1983. – С. 455.

66. Кудрявцев А.М. Стабилизаторы вооружения 2Э36 устройство и обслуживание. [Электронный ресурс] / А.М. Кудрявцев, О.К. Уласевич, В.Н. Жеглов, В.Ю. Гумилев // Рязань, РВВДКУ(ВИ). – 2013г. – С.144. Retrieved from <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.

67. Стабилизатор 2Э26М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Альбом рисунков. – Воениздат. – М. – 1984.

68. Патент РФ 2360208 С2 МПК F41H 7/02, F41A 27/30. Комплекс вооружения боевой машины и стабилизатор вооружения / И.В. Степанченко, С.С. Сальников, И.А. Матвеев, Л.А. Богданова, Е.В. Власов, Г.С. Ширяев, В.В. Попов. – №2007124064/02; заявл. 10.01.2009; опубл. 27.06.2009. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/RU2360208C2/ru>.

69. Лепешинский И.Ю. (2010). Автоматические системы управления вооружением. [Электронный ресурс] / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев // Учебное пособие. Омск, Изд-во ОмГТУ. – 2013. Retrieved from mslstarjussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.

70. Безвесільна О.М. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації / Безвесільна, О.М., Цірук, В.Г., Чепюк // Журнал «Вісник інженерної академії України». – №2, 2014. – С. 155–159.

71. Цірук В.Г. Розробка методу підвищення точності вимірювання кутової локалізації та прискорення гіростабілізованої платформи // Журнал «Технологічний аудит та резервування». – 2018. – №4 / 1 (42). – С. 11–16.

72. Cherepansra, I., The procedure for determining the normalization of random error of an informationmeasuring system with elements of artificial intelligence/ I.



Cherepansra, O. Bezvesilna, A. Sazonov, S. Nechai, T. Khylichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol 5, NO 9(89). – P. 58–67.

73. Simulink – Simulation and Model-Based Design, Retrieved from <http://www.mathworks.com/products/simulink>.

74. Ting, T. O. State-of-Charge for Battery Management System via Kalman Filter [Text] / T. O. Ting, K. L. Man, C.-U. Lei, C. Lu // Engineering Letters. – 2014. – Vol. 22, Issue 2. – P. 75–82. 5. Chaudhuri, S. S. Vision Based Target-Tracking Realized with.



SCIENTIFIC EDITION

MONOGRAPH

**INCREASING THE ACCURACY OF THE
STABILIZATION COMPLEX**

*ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КОМПЛЕКСУ
СТАБІЛІЗАЦІЇ*

Authors:

Bezvesilna Ylena, Kyrychuk Yuriy, Tolochko Tetiana

Monograph published in the author's edition

The monograph is included in
International scientometric databases

500 copies
November, 2023

Published:
ScientificWorld -Net Akhat AV
Lußstr 13,
Karlsruhe, Germany



e-mail: editor@promonograph.org
<https://de.promonograph.org>

ISBN 978-3-949059-98-8



9 783949 059988



