

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МУРАХОВСЬКИЙ СЕРГІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 531.383

ДИСЕРТАЦІЯ
АЛГОРИТМІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
ГІРОТЕОДОЛІТІВ НА ОБМЕЖЕНО РУХОМІЙ ОСНОВІ

05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ С. А. Мураховський

Науковий керівник

Лазарєв Юрій Федорович, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Мураховський С. А. Алгоритмічні засоби підвищення точності гіротеодолітів на обмежено рухомій основі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.03 «Гіроскопи та навігаційні системи». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2018.

В дисертації отримані такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено метод визначення параметрів руху чутливого елемента гіротеодоліта відносно головної осі – кута та кутової швидкості на основі інформації з системи стабілізації обертів гіромотора.

2. Розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елемента в азимуті на основі ідентифікатору стану, визначено необхідні власні частоти на основі аналізу частотних характеристик системи.

3. Удосконалено метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за рахунок використання внутрішніх джерел інформації приладу, та показано ефективність розроблених методів при дії на гіротеодоліт поступальної вібрації, як детермінованої так і випадкової.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на їх основі можливе використання наземних гірокомпасів та гіротеодолітів в умовах обмежено рухомої основи, при цьому є можливість забезпечення необхідної точності. Розроблені методи визначення параметрів руху чутливого елемента гіротеодоліту захищено патентами України на корисну модель.

Розвиток сучасних засобів наземної орієнтації потребує використання у своєму складі гіроскопічних компасів середньої та високої точності. Високі вимоги до гірокомпасів та гіротеодолітів, які використовуються в системах

наземної орієнтації обумовлюють необхідність роботи приладу в умовах поступальної та кутової вібрації. В наш час актуальним є розробка нових та вдосконалення існуючих методів підвищення точності наземних гірокомпасів. Вирішення задачі підвищення точності можливе як конструктивними методами, так і за допомогою засобів математичної обробки інформації, яка видається приладом. Можливість використання алгоритмічних засобів підвищення точності дозволяє значно зменшити витрати на розробку та виготовлення гірокомпасу, який здатний працювати в умовах збурень основи.

Проведено огляд сучасних засобів наземного орієнтування, що базуються на різноманітних принципах роботи. Розглянуто гіротеодоліти, створені на базі роторних гіроскопів, особливу увагу приділено приладам і системам вітчизняного виробництва. Проведено аналіз можливостей використання інерціальних навігаційних систем для визначення азимутів. Розглянуто гіроскопічні прилади, що комплексуються з супутниковими навігаційними системами та особливості їх використання при початковій виставці. Проведено аналіз методів підвищення точності гіроскопічних засобів наземної орієнтації та показано, що одним з актуальних шляхів підвищення точності гіротеодолітів є використання алгоритмічних методів підвищення точності.

Проведено аналіз математичної моделі руху чутливого елементу гіротеодоліту, розглянуто повні та прецесійні рівняння руху. Розроблено модель вихідного сигналу гіротеодоліту, який працює в компенсаційному режимі. Розроблено інформаційну модель гіротеодоліту на обмежено рухомій основі, яка містить динамічні рівняння руху чутливого елементу, зовнішні збурення, що діють на об'єкт дослідження, сигнали, які формуються в допоміжних системах керування, надлишкову інформацію, яка наявна в самому приладі. Розроблено комплекс програмних засобів в системі MATLAB та перевірено його адекватність відомим теоретичним залежностям.

Проведено аналіз впливу гармонічної вібрації на точність гіротеодоліту, отримано аналітичні залежності вібраційної похибки на основі частотних характеристик. Показано, що вібраційна похибка залежить від параметрів приладу; напрямку вібрації і положення головної осі гіроскопа відносно площини меридіану, амплітудно-частотних характеристик приладу, а також амплітуди і частоти вібрації точки підвісу. Проведено аналіз впливу випадкової вібрації на точність гіротеодоліту, отримано аналітичні залежності вібраційної похибки на основі кореляційних функцій. Показано, що вібраційна похибка залежить від параметрів приладу; напрямку вібрації, динамічних характеристик приладу, а також дисперсії вібрації і переважаючої частоти вібрації точки підвісу. Проведено аналіз шляхів підвищення точності гіротеодолітів на обмежено рухомій основі та запропоновано використання методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки. Проведено моделювання алгоритмічної компенсації на основі розробленої інформаційної моделі гіротеодоліта.

Розглянуто методи визначення додаткових параметрів руху чутливого елемента гіротеодоліту. Розроблено та змодельовано метод диференціювання сигналу датчику кута, в системі компенсаційного зворотного зв'язку. Проведено синтез спостережування для визначення оцінки кутової швидкості чутливого елемента гіротеодоліту та обрано власні частоти спостережування, які дозволяють зменшити похибки оцінювання з заданому частотному діапазоні. Проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки на основі визначеної кутової швидкості чутливого елемента в азимуті.

Розглянуто систему керування кутовою швидкістю обертання гіромотора. На основі математичної моделі руху чутливого елемента в негіростабілізованій площині розроблено метод оцінювання додаткових параметрів руху. Проведено моделювання та визначено похибки оцінювання. Розроблено розширену програмну модель гіротеодоліту та проведено

моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки на основі визначених оцінок при гармонічній та випадковій вібрації основи.

Проведено визначення типових прискорень, що діють в місцях встановлення гіротеодолітів апаратно-програмним комплексом в складі трьох акселерометрів. На основі спектрального аналізу отриманих експериментальних даних показано, що в спектрі вібрації існують частоти близькі до резонансних частот коливань чутливого елемента. Проведено імітаційне моделювання впливу віброприскорень на точність гіротеодоліту.

Розглянуто конструктивну схему гіротеодоліту з компенсаційним методом вимірювання азимуту. Проаналізовано склад та характеристики системи стабілізації обертів гіромотору. Розглянуто вихідні сигнали системи стабілізації та проведено компенсацію вібраційної похибки на основі експериментальних даних.

Ключові слова: гіротеодоліт, наземний гірокомпас, поступальна вібрація, вібраційна похибка, алгоритмічна компенсація, ідентифікатор стану, імітаційне моделювання.

SUMMARY

Murakhovskyy S. Algorithmic means for increasing the accuracy of gyrotheodolites on a limited mobile basis. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.11.03 "Gyroscopes and navigation systems". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2018.

In the dissertation the following scientific results were received:

1. The method for determining the parameters of motion of a sensitive element of a gyrotheodolite relative to the main axis - angle and angular velocity on the basis of information from the system of stabilization of the rotation of the gyromotor was first developed.

2. The method of determining the angular velocity of a sensitive element in the azimuth on the basis of the state identifier is developed, the necessary eigenfrequencies are determined on the basis of the analysis of the frequency characteristics of the system.

3. The method of algorithmic compensation of a vibration error due to the use of internal sources of information of the device is improved, and the efficiency of the developed methods under the action on the gyrotheodolite of the translational vibration, both deterministic and random, is shown.

The practical value of the results obtained is that on the basis of them it is possible to use land gyrocompasses and gyrotheodolites in conditions of a limited mobile basis, while the possibility of providing the necessary accuracy is possible. The developed methods for determining the parameters of the motion of a sensitive element of gyrotheodolite are protected by patents of Ukraine on the utility model.

The development of modern ground-based means requires the use of middle and high-accuracy gyroscopic compasses in its composition. High requirements for gyrocompasses and gyrotheodolites, which are used in ground-based systems,

necessitate the device to operate in conditions of linear and angular vibration. In our time, the development of new and improving existing methods for improving the accuracy of ground gyrocompasses is relevant. The solution of the problem of increasing accuracy is possible both by constructive methods, and by means of mathematical processing of information, which is issued by the device. Possibility of using algorithmic means of increasing accuracy makes it possible to significantly reduce the costs of developing and manufacturing a gyrocompass, which is capable of operating under conditions of perturbation of the base.

An overview of ground orientation systems based on a variety of principles is conducted. The gyrotheodolites created on the basis of rotor gyroscopes are considered, special attention is paid to devices and systems of domestic production. The analysis of possibilities of use of inertial navigation systems for azimuth determination is carried out. Gyroscopic devices that are integrated with satellite navigation systems and features of their use at the initial exhibition are considered. The analysis of methods for increasing the accuracy of gyroscopic terrestrial orientation methods has been carried out and one of the topical ways to increase the accuracy of gyrotheodolites is the use of algorithmic methods for increasing accuracy.

An analysis of a mathematical model of the sensitive element was carried out, and it was clear that the precession and full equations. The model of the output signal to the gyrotheodolite, which is in practice in compensation mode, is broken down. An information model has been developed that includes the dynamic equations of motion of a sensitive element, external perturbations acting on the object of research, the signals generated in the auxiliary control systems, the excess information available in the device itself. The complex of software programs in the MATLAB system and the adequacy of the theoretical reservoirs has been broken down.

An analysis of the effect of harmonic vibration on the accuracy of gyrotheodolite has been obtained, analytical dependences of the vibration error on the basis of frequency characteristics have been obtained. It is shown that the

vibration error depends on the parameters of the device; direction of vibration and position of the main axis of the gyroscope relative to the meridian plane, amplitude-frequency characteristics of the device, as well as the amplitude and frequency of the overload point of the suspension. An analysis of the influence of random vibration on the accuracy of gyrotheodolite was obtained, analytical dependences of the vibration error on the basis of correlation functions were obtained. It is shown that the vibration error depends on the parameters of the device; the direction of vibration, the dynamic characteristics of the device, as well as the variation of overload and the overwhelming frequency of the vibration of the suspension point. The analysis of ways to increase the accuracy of gyrotheodolites at work on a limitedly mobile basis is carried out and the use of the method of algorithmic compensation of vibrational error is proposed. The algorithmic compensation modeling is carried out on the basis of the developed information model of gyrotheodolite.

The methods of determination of additional parameters of motion of a sensitive element of gyrotheodolite are considered. The method of differentiating the signal of the angle sensor, in the compensation feedback system, is developed and simulated. The observed synthesis was carried out to determine the estimation of the angular velocity of the sensitive element of the gyrotheodolite, and the eugenic frequencies of the observed one were chosen, which allow to reduce the estimation errors with a given frequency range. A simulation of algorithmic compensation of vibration error based on the determined angular velocity of a sensitive element in azimuth.

The system of control of the angular speed of the gyromotor is considered. On the basis of the mathematical model of motion of a sensitive element in a nongyrostabilized plane, a method for estimating additional parameters of motion is developed. The simulation was carried out and the estimation errors were determined. The expanded software model of gyrotheodolite was developed and algorithmic compensation of vibration error was simulated on the basis of definite estimates for harmonic and random vibration of the base.

The definition of typical accelerations in the places of installation of gyrotheodolite by hardware and software complex consisting of three accelerometers is carried out. On the basis of the spectral analysis of the experimental data obtained, it is shown that in the vibration spectrum there are frequencies close to the resonance frequencies of the oscillations of the sensitive element. Imitational simulation of vibration acceleration influence on accuracy of gyrotheodolite is carried out.

The constructive scheme of gidroeodolite with compensating method of azimuth measurement is considered. The composition and characteristics of the stabilization system of the rotation of the gyromotor are analyzed. The output signals of the stabilization system are considered and compensation of the vibration error is made on the basis of experimental data.

Keywords: gidroeodolite, land gyrocompass, linear vibration, vibrational error, algorithmic compensation, state identifier, imitational simulation.

List of main publications of the applicant:

1. Мураховский С.А. Динамика наземного компенсационного маятникового гирокомпаса / С.А. Мураховский, Ю.Ф. Лазарев, П.С. Мироненко // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – №2. – С. 125-130.

Здобувачем проаналізовано залежність вібраційної похибки від амплітуди та частоти вібрації, виконано моделювання динаміки чутливого елемента гірокомпаса.

2. Мураховский С.А. Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховский, А.А. Хоца // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – №1. – С. 151-156.

Здобувачем розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елемента гіртеодоліта в азимуті на основі синтезу ідентифікатору стану.

3. Мураховский С.А. Метод определения дополнительных параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховський // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – №2. – С. 106-109.

Здобувачем розроблено метод визначення параметрів руху чутливого елементу гиротеодоліта в негіростабілізованій площині на основі інформації з системи стабілізації обертів гіромотора, проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

4. Мураховський С.А. Визначення похибки гиротеодоліта при дії випадкової вібрації / С.А. Мураховський // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – 2013. - Вип.45 – С.24-30 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).

Здобувачем проаналізовано вплив випадкової вібрації на вібраційну похибку гиротеодоліта, отримано залежності похибки від зовнішніх та внутрішніх факторів.

5. Мироненко П.С. Оцінювання параметрів руху чутливого елементу гиротеодоліту з використанням фільтра Калмана / П. С.Мироненко, С. А. Мураховський, О. М. Сапегін, А. О. Боярчук. // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – №4. – С. 129–133.

Здобувачем виконано синтез фільтра Калмана, проведено моделювання визначення оцінок параметрів руху чутливого елементу.

6. Мироненко П.С. Імітаційне моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гиротеодоліту / П. С.Мироненко, С. А. Мураховський, О. М. Сапегін // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2018. – №2. – С. 70–76 (Входить до WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, РИНЦ та EBSCO).

Здобувачем виконано імітаційне моделювання впливу поступальної вібрації на точність гиротеодоліту на основі експериментальних даних, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для використання методів алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

7. Пат. 73373 Україна, МПК G01C 19/00 Гіротеодоліт / Мураховський С.А., Хоца А.А.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – № U201201830; заявл. 17.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18/2012.

Здобувачем запропоновано метод визначення кутової швидкості чутливого елементу.

8. Пат. 81188 Україна, МПК G01C 19/00 Гіротеодоліт / Мураховський С.А., Сапегін О.М.; заявники та патентовласники Мураховський С.А., Сапегін О.М. – № U 201214568; заявл. 19.12.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл. №12/2013.

Здобувачем запропоновано метод визначення додаткових параметрів руху чутливого елементу.

9. Мураховский С.А. Наземный маятниковый гироскоп на ограниченно возмущаемом основании / С.А. Мураховский, О.Д. Чуракова, А.М. Шостак // Приладобудування - 2006: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2006. – С.42.

Здобувачем проведено моделювання динаміки наземного маятникового гіроскопаса компенсаційного типу при поступальній вібрації основи.

10. Мураховский С.А. Выбор параметров контура управления наземного маятникового гироскопаса с магнитным подвесом чувствительного элемента / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2008: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008. – С.24-25.

Здобувачем запропоновано контур керування компенсаційним зворотним зв'язком в наземному гіроскопасі.

11. Мураховский С.А. Уменьшение влияния пространственной вибрации на точность наземного маятникового гироскопаса / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2009: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2009. – С.22-23.

Здобувачем проаналізовано вплив просторової вібрації на точність маятникового гіроскопаса.

12. Лазарев Ю.Ф. Моделирование динамики наземного маятникового гироскопа / Ю.Ф. Лазарев, С.А. Мураховский // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті, економіці: міжнар. наук.-практ. конф. : Зб. матер. – Луганськ: ЛНУ ім. Тараса Шевченка, 2010. – С.51-52.

Здобувачем проведено моделювання динаміки гіроскопа при дії поступальної вібрації.

13. Мураховский С.А. Моделирование алгоритмической компенсации вибрационной погрешности наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2010: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2010. – С.34-35.

Здобувачем проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

14. Мураховский С.А., Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2011: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – С.27.

Здобувачем проведено синтез спостережувача для визначення оцінки кутової швидкості чутливого елементу гіротеодоліта в азимуті.

15. Мураховський С.А. Метод визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту навколо головної осі / С.А. Мураховський, А.А. Хоца // Приладобудування - 2012: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – С.24-25.

Здобувачем запропоновано метод визначення параметрів кутового руху чутливого елементу гіротеодоліта в негіростабілізованій площині.

16. Мураховський С.А. Визначення похибки гіротеодоліту при дії випадкової вібрації / С.А. Мураховський // Приладобудування - 2012: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – С.29-30.

Здобувачем проведено моделювання динаміки гіротеодоліта, що встановлено на основу, яка здійснює поступальну випадкову вібрацію.

17. Мураховський С.А. Використання фільтра Калмана в гіротеодоліті / С.А. Мураховський, О.М. Сапегін // Приладобудування - 2013: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2013. – С.29-30.

Здобувачем запропоновано використання фільтра Калмана для визначення оцінок кутового руху чутливого елемента гіротеодоліту.

18. Мураховский С.А. Метод измерения параметров движения чувствительного элемента гироскопа / С.А. Мураховский, А.Н. Сапегин // Современные технологии в системах управления и вооружения: междунар. науч.-техн. конф.: Сб. матер. – Ковров: ФГБОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", 2013. – С.18-19.

Здобувачем запропоновано вибір параметрів ідентифікатора стану на основі аналізу частотних характеристик гіротеодоліту.

19. Мураховський С.А., Експериментальні дослідження методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту / С.А. Мураховський // Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2014. – С.27-28.

Здобувачем проведено аналіз експериментальних даних для використання методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

ЗМІСТ

Анотація.....	2
Summary.....	6
Перелік умовних позначень і скорочень.....	18
Вступ.....	19
РОЗДІЛ 1. Огляд сучасних приладів наземного орієнтування та методів підвищення їх точності.....	25
1.1. Аналіз сучасного стану розвитку приладів наземного орієнтування.....	25
1.2. Класифікація приладів наземного орієнтування.....	29
1.2.1. Гіртеодоліти, побудовані на основі роторних гіроскопів.....	29
1.2.2. Гіртеодоліти на основі інерціальних навігаційних систем.....	32
1.2.3 Гіроскопічні прилади, комплексовані зі супутниковими навігаційними системами.....	34
1.3. Загальна характеристика похибок наземних гірокомпасів та гіртеодолітів.....	35
1.4. Методи підвищення точності гіроскопічних приладів наземного орієнтування.....	38
1.5. Мета і задачі наукових досліджень.....	44
РОЗДІЛ 2. Модель дослідження гіртеодоліта на обмежено рухомій основі.....	46
2.1. Математична модель руху маятникового чутливого елемента гіртеодоліта.....	46
2.1.1. Системи координат, що використовуються.....	46
2.1.2. Повні рівняння руху чутливого елемента ГТ.....	48
2.1.3. Рівняння руху чутливого елемента ГТ.....	49
2.1.4. Модель вихідного сигналу.....	51

2.2. Інформаційна модель гіротеодоліту на обмежено рухомій основі..	52
2.2.1. Складання інформаційної моделі.....	52
2.2.2. Програмна модель гіротеодоліта.....	54
2.2.3. Перевірка адекватності інформаційної моделі об'єкта дослідження.....	54
2.3. Аналіз впливу вібрації основи на точність гіротеодоліта.....	58
2.3.1. Лінеаризовані рівняння руху маятнікового ЧЕ ГТ.....	59
2.3.2. Аналіз вібраційної похибки при гармонічній поступальній вібрації основи.....	61
2.3.3. Аналіз вібраційної похибки при випадковій вібрації основи в площині горизонту.....	64
2.4. Обґрунтування шляхів підвищення точності гіротеодоліта.....	69
2.4.1. Аналіз можливостей застосування методів підвищення точності	69
2.4.2. Моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за умов гармонічної вібрації основи.....	71
2.4.3. Моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за умов випадкової вібрації основи.....	76
Висновки до розділу 2.....	80
 РОЗДІЛ 3. Розробка методів та засобів компенсації вібраційної похибки.....	82
3.1. Метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки по додатковій інформації про рух чутливого елемента гіротеодоліта в азимуті.....	82
3.1.1. Чисельне диференціювання вихідного сигналу датчика кута.....	82
3.1.2. Визначення оцінок додаткових параметрів руху ЧЕ.....	84
3.1.3. Синтез спостережувача.....	87
3.1.4. Моделювання компенсації похибки за оцінкою $\hat{\alpha}$	98
3.2. Метод визначення кута та кутової швидкості чутливого елемента в негіростабілізованій площині.....	101

3.2.1. Система стабілізації обертів гіромотора.....	101
3.2.2. Математична модель руху чутливого елемента.....	103
3.2.3. Визначення оцінок кута та кутової швидкості чутливого елемента в негіростабілізованій площині.....	104
3.2.4. Моделювання оцінювання кута γ та кутової швидкості $\dot{\gamma}$	108
3.3. Моделювання алгоритмічної компенсації з використанням розроблених методів визначення додаткових параметрів руху ЧЕ.....	111
3.3.1. Розширена програмна модель.....	111
3.3.2. Моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за умов гармонійної вібрації основи з використанням розроблених методів визначення додаткових параметрів руху ЧЕ.....	113
3.3.3. Моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за умов випадкової вібрації основи з використанням розроблених методів визначення додаткових параметрів руху ЧЕ.....	115
Висновки до розділу 3.....	118
РОЗДІЛ 4. Експериментальні дослідження роботи ГТ з алгоритмічною компенсацією вібраційної похибки.....	
4.1. Визначення прискорень, що спричиняють вібраційну похибку ГТ.....	120
4.1.1. Апаратурне та програмне забезпечення.....	120
4.1.2. Методика проведення вимірювань.....	121
4.1.3. Спектральний аналіз отриманих експериментальних даних.....	123
4.1.4. Імітаційне моделювання впливу віброприскорень на точність гіротеодоліту.....	126
4.2. Експериментальні дослідження методу алгоритмічної компенсації.....	127
4.2.1. Опис конструктивної схеми гіротеодоліта.....	128
4.2.2. Технічні характеристики системи стабілізації обертів гіромотора.....	130

4.2.3. Результати визначення додаткових параметрів руху ЧЕ ГТ на основі вимірювань вихідного сигналу ІФД.....	133
4.2.4. Результати обчислень вібраційної похибки за експериментальними даними. Порівняльний аналіз отриманих результатів з вимірюваннями азимуту гіротеодолітом.....	135
Висновки до розділу 4.....	137
 Висновки.....	 138
Список використаних джерел.....	140
 Додаток А.....	 153
Додаток Б.....	156
Додаток В.....	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ГТ	– гіротеодоліт
ЧЕ	– чутливий елемент
ГМ	– гіромотор
ДГК	– двоступеневий гірокомпас
БІНС	– безплатформна інерціальна навігаційна система
ВЗС	– віброзахисна система
ОФК	– оптимальний фільтр Калмана
АЧХ	– амплітудно-частотна характеристика
ФЧХ	– фазочастотна характеристика
АЦП	– аналогово- цифровий перетворювач
БРіС	– блок розгону і стабілізації
ІФД	– імпульсний фазовий дискримінатор
ПК	– пристрій керування
МК	– мікроконтролер

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Розвиток сучасних засобів наземної орієнтації потребує використання у своєму складі гіроскопічних компасів середньої та високої точності. Такі прилади забезпечують автономність вимірювань азимуту оскільки не використовують зовнішні джерела інформації. Суттєвою особливістю роботи гіротеодоліта є необхідність його встановлення на спеціальне посадкове місце, яке унеможливорює вплив зовнішніх збурень на точність приладу. Таким чином час розгортання комплексу, та, відповідно, і час вимірювання збільшується.

Високі вимоги до часу видачі інформації гірокомпасом або гіротеодолітом, які використовуються в системах наземної орієнтації обумовлюють необхідність роботи приладу в умовах поступальної та кутової вібрації. Відповідно, необхідна розробка нових методів та засобів, призначених для забезпечення можливості роботи гіротеодолітів в умовах обмежено рухомої основи.

Значні дослідження поведження гірокомпасів в умовах вібрації проводились у 70-90-х роках ХХ ст. Сучасні прилади мають значні відмінності, внаслідок застосування нових технологій в галузі електроніки та обробки інформації, що відкриває нові перспективи для розширення функціональних можливостей гіротеодолітів.

Актуальність теми полягає в розробці нових та вдосконаленні існуючих методів підвищення точності наземних гіротеодолітів. Вирішення задачі підвищення точності можливе як конструктивними методами, так і за допомогою засобів математичної обробки інформації, яка видається приладом. Можливість використання алгоритмічних засобів підвищення точності дозволяє значно зменшити витрати на розробку та виготовлення гірокомпасу, який здатний працювати в умовах збурень основи.

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

Дисертаційну роботу виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації в рамках ініціативної науково-дослідної роботи «Розробка методичного забезпечення та макетного зразку системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring» (№ДР 0115U000318) та переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року (постанова КМ України №942 від 07.09.2011 р. зі змінами внесеними згідно з Постановами КМ № 970 від 24.10.2012, № 741 від 23.09.2015, № 556 від 23.08.2016): Нові апаратні рішення для перспективних засобів обчислювальної техніки, інформаційних та комунікаційних технологій, Інтелектуальні інформаційні та інформаційно-аналітичні технології. Робота виконувалась відповідно за задач основного науково-технічного напрямку досліджень кафедри приладів і систем орієнтації і навігації.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення точності гіротеодоліта, що встановлюється на основі, яка здійснює поступальний рух, шляхом застосування алгоритмічних засобів обробки його вихідної інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні наукові і прикладні задачі:

- на основі аналізу проблеми в літературні визначити фактори, що впливають на точність гіротеодоліта, що встановлено на обмежено рухомій основі
- розробити математичну модель наземного маятникового гіротеодоліта, яка враховує поступальну вібрацію основи, а також особливості його роботи в компенсаційному режимі;
- визначити похибки гіротеодоліта, які виникають внаслідок дії поступальної вібрації;

- обґрунтувати наукові методи, що застосовуються для вирішення задачі підвищення точності гіротеодоліта під дією поступальної вібрації;
- розробити математичну модель алгоритмічної компенсації похибок гіротеодоліта;
- розробити комплекс методів, що призначені для визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліта;
- експериментально дослідити розроблені методи на діючих приладах.

Об'єктом дослідження є гіротеодоліт, який працює в умовах зовнішніх збурень.

Предметом дослідження є вібраційна похибка гіротеодоліта та методи її компенсації.

Методи дослідження. При проведенні теоретичних і експериментальних досліджень використовувались: метод кінетостатики, рівняння Лагранжа 2-го роду, методи теорії автоматичного керування, методи аналізу частотних характеристик, методи прикладної теорії стаціонарних випадкових функцій, методи кореляційного та спектрального аналізу, перетворення Фур'є та Лапласа, методи синтезу спостерігаючих пристроїв та ідентифікаторів стану, методи оптимальної фільтрації, методи математичного моделювання динамічних систем, методи обробки результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено метод визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліта відносно головної осі – кута та кутової швидкості на основі інформації з системи стабілізації обертів гіромотора.

2. Вперше розроблено інформаційну модель гіротеодоліта, в якій враховано як основні динамічні властивості приладу в умовах вібраційного збурення, так і внутрішні джерела інформації, які можуть бути використані для підвищення точності.

3. Розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елементу в азимуті на основі ідентифікатору стану, визначено необхідні власні частоти на основі аналізу частотних характеристик системи.

4. Удосконалено метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за рахунок використання внутрішніх джерел інформації приладу, та показано ефективність розроблених методів при дії на гіротеодоліт поступальної вібрації, як детермінованої так і випадкової.

Практична цінність одержаних результатів.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що в ній розроблено алгоритми компенсації вібраційної похибки гіротеодолта на обмежено рухомій основі за додатковою інформацією про рух чутливого елементу; розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для компенсації вібраційної похибки, статистичного аналізу похибки при дії випадкової вібрації; розроблено рекомендації по вибору параметрів гіротеодоліта та діапазону можливих амплітуд і частот поступальної вібрації основи.

Розроблені методи визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту захищено патентами України на корисну модель.

Впровадження результатів.

Метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту та метод оцінювання кутової швидкості чутливого елементу використані на етапі лабораторних досліджень в КП СПБ “Арсенал” та можуть знайти застосування при створенні перспективних високоточних гіротеодолітів. Розроблені методи та результати теоретичних досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для розробки і покращення систем оцінки параметрів руху чутливих елементів гіроскопічних приладів.

Особистий внесок здобувача.

Автором самостійно отримано основні положення, які винесені на захист: проаналізовано залежність вібраційної похибки від амплітуди та частоти вібрації, виконано моделювання динаміки чутливого елементу гірокомпаса, розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елементу гіротеодоліта в азимуті на основі синтезу ідентифікатору стану, розроблено метод визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліта в негіростабілізованій площині на основі інформації з системи стабілізації обертів гіромотора, проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки, проаналізовано вплив випадкової вібрації на похибку гіротеодоліта, отримано залежності похибки від зовнішніх та внутрішніх факторів, виконано синтез фільтра Калмана, запропоновано вибір параметрів ідентифікатора стану на основі аналізу частотних характеристик гіротеодоліту, проведено моделювання визначення оцінок параметрів руху чутливого елементу, виконано імітаційне моделювання впливу поступальної вібрації на точність гіротеодоліту на основі експериментальних даних, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для використання методів алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто автором виконано: [76, 82] – виконано моделювання динаміки гіротеодоліта в умовах поступальної гармонічної вібрації основи, проаналізовано частотні характеристики вібраційної похибки, [77, 97] – розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елементу гіротеодоліта в азимуті на основі синтезу ідентифікатору стану, запропоновано вибір коефіцієнтів спостережування на основі аналізу частотних характеристик, [89, 91] – виконано синтез фільтра Калмана, проведено моделювання визначення оцінок параметрів руху чутливого елементу, [92] – виконано імітаційне моделювання впливу поступальної вібрації на точність гіротеодоліту на основі експериментальних даних, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для використання методів алгоритмічної компенсації вібраційної похибки, [86,

89] – запропоновано метод визначення додаткових параметрів руху чутливого елементу, вибір параметрів ідентифікатора стану на основі аналізу частотних характеристик гіротеодоліту, [75] – проведено моделювання динаміки наземного маятникового гірокомпаса компенсаційного типу при поступальній вібрації основи, [84] – запропоновано метод визначення параметрів кутового руху чутливого елементу гіротеодоліта в негіростабілізованій площині.

Апробація результатів дисертації.

Наукові результати дисертації обговорювались на 12 конференціях, серед них міжнародні науково-технічні конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м. Київ, 2006-2015 рр), міжнародні науково-технічні конференції «Сучасні технології в системах керування і озброєнь» (м. Ковров, Російська Федерація, 2012 рр.), IV всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті, економіці» (м. Луганськ, 2010 р.)

Публікації.

По темі дисертації опубліковано 19 робіт, в тому числі 6 статей в наукових фахових виданнях, 11 тез доповідей в збірках матеріалів конференцій, 2 патенті України на корисну модель.

Структура і об'єм дисертації.

Дисертація містить вступ, огляд стану проблеми і постановку задачі досліджень, 4 розділи, загальні висновки по роботі, список використаних джерел із 102 найменувань та 3 Додатків. Дисертаційна робота викладена на 165 сторінках, основний зміст роботи становить 152 сторінки друкованого тексту, в тому числі 53 рисунки і 6 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ НАЗЕМНОГО ОРІЄНТУВАННЯ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ТОЧНОСТІ

1.1. Аналіз сучасного стану розвитку приладів наземного орієнтування

Розробка і застосування гіроскопічного методу орієнтування були б неможливі без створення гіроскопічних приладів, що відповідають вимогам геодезичного та маркшейдерського виробництва. Сутність вимог зазвичай зводиться до точності і часу одноразового визначення азимута, надійності та зручності приладу в експлуатації та його масо-габаритних характеристик. Особливістю наземних засобів азимутального орієнтування, побудованих на гіроскопічних вимірювачах, є висока точність визначення напрямку географічного меридіану за відносно короткий проміжок часу незалежно від природних умов, тобто автономно.

Ця особливість визначає різноманітність практичного використання наземних гірокомпасів [1-5]:

- 1) визначення азимутів ліній при будівництві метро, в шахтних та гірничих роботах;
- 2) визначення азимутів при проектуванні залізничних колій, каналів, ліній електропередачі, трубопроводів, і т.п.;
- 3) вимірювання магнітного схилення, визначення магнітних аномалій, азимутальна прив'язка пунктів геофізичних вимірювань;
- 4) контроль та орієнтування радіотехнічного та навігаційного обладнання аеропортів;
- 5) азимутальна прив'язка артилерійських та ракетних військових комплексів.

Зважаючи на широке використання сучасних методів орієнтування на основі супутникових навігаційних систем, особливо велике значення набуває використання гіротеодолітів у підземних роботах та при роботі в складі військової техніки, тобто у випадках недоступності зовнішніх джерел інформації [6-9]. Вдосконалення технології видобутку корисних копалин, збільшення розмірів шахтних полів і глибини розробки вимагають підвищення точності і надійності побудови планової підземної маркшейдерської опорної мережі. Відомо, що цього можна досягти двома способами [3,5]:

- збільшенням точності кутових вимірів;
- гіроскопічним орієнтуванням окремих сторін мережі.

Впровадження у практику маркшейдерських робіт гіротеодолітів дозволяє значно підвищити точність планового положення пунктів підземної опорної мережі і вирішити проблему орієнтування гірських виробок на глибоких горизонтах. Геометричним орієнтуванням вирішити цю задачу для стовбурів глибиною 800-2000 м при необхідній точності просто неможливо.

Сучасні наземні гірокомпаси і гіротеодоліти являють собою складні прилади, для створення яких було витрачено десятиліття наполегливої роботи інженерів і науковців. Особливо слід відзначити роботи М. Шулера, О. Релленсмана, М.А. Сергєєва, Н.Н. Воронкова, В.Ю. Торочкова, В.В. Кутирева, В.Н. Лаврова. Значний вклад у розвиток приладів наземного гіроскопічного орієнтування внесли українські вчені та конструктори, зокрема С.П. Парняков, А.С. Довгополий, С.В. Гусовський, Ф.А. Сумішин, В.І. Бузанов, М.М. Голік, О.Ю. Дмитрієв.

Українське казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», є провідним розробником гіроскопічних приладів наземного орієнтування ще з радянських часів. Незважаючи на складності перехідного періоду в 90-х роках XX сторіччя, конструкторське бюро розробило та модернізувало значну кількість наземних гірокомпасів та гіротеодолітів, технічні характеристики яких наведено в табл.1.1 [10-12].

Таблиця 1.1. Гіротеодоліти КП СПБ «Арсенал»

Тип гіротеодолита (наземного гірокомпаса)	Час визначення азимуту (хв.)	Середньоквадратична похибка визначення азимуту (кут. сек.)
15Ш29	36	5
1Г17	12	30
АГК- 2М	20	4,3
ГТ-3, ГТ-3М	38	3
АГК-П	52	2
ШВГ-1	20	35
ГТХ	20	10
	8	30
UGT-L	12	15
UGT-H	10	15
UGT-A	40	2

Одним з світових лідерів у виробництві гіротеодолітів є німецька фірма DMT, прилади якої *Gyromat 3000*, *Gyromat 5000* застосовувались при будівництві тунелю під Ла-Маншем. Останніми роками з'явилися прилади, в яких гіроскопічна частина, так звана насадка, виготовляється окремо і встановлюється на звичайний теодоліт або далекомір. Такі прилади мають дещо менш високу точність, але при цьому менші масо-габаритні параметри, зокрема *Sokkia Gyro X II*, *GYROMAX AK-2M*. Порівняльні характеристики закордонних ГТ наведені в таблиці 1.2.[13-16]

Широке коло застосування приладів наземного орієнтування передбачає різні вимоги до точності та часу визначення азимутів. В деяких випадках немає необхідності у високоточних вимірюваннях, але інформація потрібна за короткий проміжок часу, тому виробники часто поєднують в одному приладі декілька режимів вимірювання, з можливістю вибору оптимального з точки зору швидкодії та точності.

Таблиця 1.2. Порівняльні характеристики сучасних гіртеодолітів

№п.п.	Назва	Країна	Точність визначення азимуту (кут. сек.)	Час визначення азимуту (сек.)	Температурний діапазон (°C)	Маса (кг)
1	Gyromat 3000	Німеччина	3	600	-20 ... +50	11,5 (без теодоліту)
2	Gyromat 3000	Німеччина	15	300	-20 ... +50	11,5 (без теодоліту)
3	Gyromat 3000	Німеччина	30	120	-20 ... +50	11,5 (без теодоліту)
4	Gyromat 5000	Німеччина	2,4	540	-20 ... +50	11,5 (без теодоліту)
5	Gyromat 5000	Німеччина	6	420	-20 ... +50	11,5 (без теодоліту)
6	Gyromat 5000	Німеччина	15	300	-20 ... +50	11,5 (без теодоліту)
7	Sokkia Gyro X II	Японія - США	15	360	-20 ... +50	11,1
8	GYROMAX AK-2M	Німеччина	20	900	н/д	9,1 (без теодоліту)

1.2. Класифікація приладів наземного орієнтування.

Прилади, які призначені для визначення азимутів напрямків на поверхні Землі, в різних джерелах називають наземними гірокомпасами, показчиками меридіана, індикаторами меридіана, гіроорієнтаторами, гіробусолями або гіртеодолітами. Останнє визначення достатньо повно відображає сутність такого приладу як поєднання кутовимірювальної частини – теодоліту та гіроскопічного показчика істинного меридіану [2], тому в подальшому будемо використовувати його в даній роботі.

1.2.1. Гіртеодоліти, побудовані на основі роторних гіроскопів.

У більшості випадків гіртеодолітом або наземним гірокомпасом називають геодезичний гіроскопічний прилад, що призначений для визначення азимутів напрямків на земній поверхні. Такий прилад не обов'язково має в своєму складі безпосередньо кутовимірювальну теодолітну частину, а досить часто визначає азимут нормалі до контрольної оптичної поверхні. При цьому в класичному розумінні гіртеодоліт є триступеневим маятниковим гірокомпасом або двоступеневим гірокомпасом з ротором, що швидко обертається, і головна вісь якого розташована горизонтально [2].

Двоступеневий гірокомпас (ДГК) є технічною реалізацією гіроскопа Фуко I роду. Основною перевагою ДГК є швидкість вимірювання азимуту внаслідок малого періоду власних коливань, однак при цьому вісь підвісу такого приладу має бути орієнтована вздовж вертикалі з високою точністю, а також необхідно забезпечити відсутність кутових коливань основи, або їх алгоритмічну компенсацію. У випадку побудови гіртеодоліта по схемі двоступеневого гірокомпасу також необхідно використовувати спеціальні маломоментні типи підвісу чутливого елементу – поплавковий або торсіонний [17].

В останні роки в Україні розроблено ДГК [18,19], який являє собою насадку, що встановлюється на прилади типу бусоль або далекомір. Такий гіротеодоліт – комплексований прилад, що складається з двоступеневого астатичного гіроскопу і нахиломіру. Чутливий елемент ДГК, всередині якого знаходиться гіромотор (ГМ) з дзеркальним торцем, на зовнішньому радіусі якого розташовані отвори, кріпиться в корпусі за допомогою торсіонів. Датчик кута (автоколіматорного типу) встановлюється у такий спосіб, щоб по чергову прив'язуватись до дзеркальної поверхні торця ГМ і до дзеркальної поверхні чутливого елемента нахиломіра через отвори на гіромоторі. Для реалізації компенсаційного методу вимірювання азимуту у приладі встановлено датчик моменту. Покази нахиломіру враховуються у вигляді поправки при обчисленні азимуту.

Стримуючим фактором розвитку такого типу приладів є складність технічної реалізації схеми одночасного вимірювання кутового положення чутливих елементів гіроскопа і нахиломіра, а також алгоритм врахування кутового положення корпусу приладу в показах гірокомпаса. В цілому схема двоступеневого гірокомпаса не отримала великого розповсюдження, тому більшість сучасних гіротеодолітів побудовані за схемою триступеневого маятникового гірокомпаса [20-23].

При аналізі динаміки триступневих маятникових гірокомпасів досить суттєве значення має тип підвісу чутливого елемента (ЧЕ):

- а) підвіс, що має нерухому точку, відносно якої можливий рух лише кутовий рух, в більшості випадків поплавковий;
- б) підвіс, в якому чутливий елемент має можливість здійснювати не тільки обертальний, а й поступальний рух, тобто торсіонний або безконтактний (електромагнітний та електростатичний).

Поплавковий підвіс передбачає жорстке закріплення гіромотора всередині герметичного поплавка, як правило циліндричної форми, який є чутливим елементом гіротеодоліта [2, 24]. Об'єм та масу ЧЕ маятникового гірокомпаса обирають, щоб рівнодійна сили тяжіння та сили Архімеда мала

невелику величину і була спрямована вгору. У верхній частині ЧЕ закріплюється шпиль, яким чутливий елемент спирається на підп'ятник у корпусі приладу. Очевидно, що в такому випадку центр мас чутливого елемента буде розташовано нижче точки підвісу. Живлення гіромотора за такої схеми підвісу здійснюється зазвичай через підтримуючу рідину, яка має електропровідні властивості, а на корпусі та чутливому елементі нанесені відповідні електроди.

Для підвищення точності гіртеодолітів було розроблено торсіонний підвіс чутливого елемента, який отримав велике практичне розповсюдження завдяки зменшенню шкідливого моменту, що сприяє відповідному зменшенню похибки визначення азимуту [2, 25]. За такого підвісу гіромотор жорстко закріплюється всередині гірокамери, яка підвішується на тонкій металевій стрічці (торсіоні), суміщеній з вертикальною віссю кутовиміральної частини приладу. При цьому велике значення мають характеристики матеріалу, з якого виготовлено торсіон. Необхідно, щоб торсіонна стрічка мала невеликий момент пружної протидії, яка виникає при закрученні її кінців та згинах полотна, а також малу остаточну деформацію та достатню механічну міцність. Безмоментність торсіонних підвісів забезпечується також за допомогою спеціального кріплення торсіонної стрічки в приладі. Для уникнення закручення кінців стрічки, що може статись при повороті ЧЕ навколо вертикальної осі, верхній затискач торсіона роблять рухомим, обертаючи його за допомогою автоматичної слідкувальної системи синхронно з азимутальним рухом чутливого елемента. Для зменшення моменту пружної протидії, площину стрічки при жорсткому закріпленні її нижнього кінця в гірокамері встановлюють під прямим кутом до осі обертання ротора гіромотора. Живлення гіромотора в такому приладі звичайно здійснюється через металічні стрічкові струмопідводи.

В теперішній час найбільше застосування порівняно з іншими типами має безконтактний магнітний підвіс. Чутливий елемент наземного маятникового гірокомпаса з електромагнітним підвісом являє собою

циліндричну штангу з немагнітного матеріалу, у верхній частині якої закріплено феромагнітну кулю, яка є ротором магнітного підвісу, а в нижній частині закріплюється гірокамера, в якій знаходиться гіроскоп [26,27]. Основною перевагою таких приладів є відсутність моментів сил сухого тертя, які суттєво знижують точність гіроскопічних систем з точкою підвісу. Гіроскопи з магнітним підвісом вирізняються специфічними магнітними силами і моментами, малими дисипативними силами і силами сухого тертя, можливістю варіювання в широкому діапазоні значень основними параметрами електромагнітних зв'язків при незмінності інерційних і геометричних характеристик системи. В безконтактних підвісах ЧЕ використовуються, переважно, ротори у формі кулі. Порушення сферичної симетрії зовнішньої поверхні ротора призводить до появи неконтрольованого шкідливого моменту, що спричиняє похибки при визначенні азимуту [28].

Особливості динаміки безопорних гіроскопічних приладів, що вивішуються в магнітному полі, зокрема стійкість руху ЧЕ при роботі приладу в умовах просторової вібрації, розглянуто в роботі [26]. Дослідження проводились за умови розділення змінних, що описують динаміку підвісу і просторові коливання чутливого елементу. Були встановлені умови збурення нелінійних резонансних коливань і проведено їх аналіз в залежності від основних параметрів гірокомпасу.

1.2.2. Гіротеодоліти на основі інерціальних навігаційних систем

В останні роки для наземного орієнтування досить часто використовуються інерціальні системи різного типу, які працюють в режимі гірокомпасування, як правило, аналітичного. В якості гіроскопічних датчиків в таких приладах можуть бути використані лазерні, волоконно-оптичні, динамічно-налагоджувані, твердотільні гіроскопи. У порівнянні з класичними гіротеодолітами такі системи мають помітно меншу точність, у кращих зразків на основі лазерних гіроскопів – 5-10 кутових хвилин. Для

досягнення відповідної точності визначення азимуту гіроскопи повинні мати кутову швидкість дрейфу не більше 0,005 °/годину, а акселерометри – зміщення нуля не більше $10^{-4} g$.

У більшості випадків використовуються дві основні конструктивні схеми побудови гіротеодолітів на основі інерціальних систем:

1) з використанням одного датчика кутової швидкості з обертанням його вимірювальної осі в площині горизонту [30];

2) з використанням безплатформової інерціальної навігаційної системи (БІНС), до складу якої входять трикомпонентний гіроскопічний вимірювач кутової швидкості і дво- або трикомпонентний вимірювач удаваного прискорення (акселерометр) [31].

Суттєвими недоліками першої схеми побудови є наявність рухомих механічних частин, а також обмежений динамічний діапазон приладу. Серед розробок можна відзначити гіротеодоліти на основі лазерного гіроскопа ЦНДІ «Полюс» (Росія) (рис.1.1) [30], лазерний гірокомпас 9A184 ЗАТ «Істок» (Росія).

Друга схема побудови позбавлена зазначених недоліків, та, крім того, має значну перевагу, оскільки повноцінна БІНС може використовуватись для вирішення інших задач, в тому числі навігаційних. Такі системи також можуть використовуватись в умовах рухомої основи, що значно спонукає їх розробників до підвищення точності. Серед системи другого типу, що випускаються серійно, можна виділити наступні: волоконно-оптичний гірокомпас KVH Industries (США); волоконно-оптичний гірокомпас Octans (Франція); волоконно-оптичний гірокомпас Polaris FOG-100, , гіроскопічний компас TOGS-S (CDL, Великобританія)

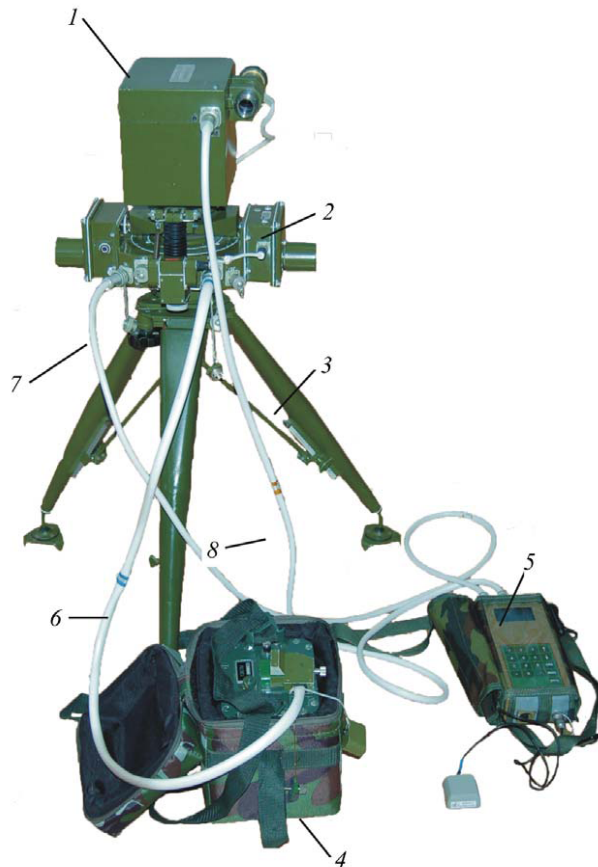


Рис.1.1. Лазерний гірокомпас ЛГК-4 в робочому положенні: 1 — лазерний гірокомпас ЛГК-4; 2 — система наведення; 3 — штатив; 4 — батарея живлення; 5 — мікроЕОМ; 6 — кабель живлення; 7,8 — кабелі зв'язку

Окремо необхідно зазначити проблематику алгоритмів обробки інформації в безплатформових навігаційних системах, якій приділяється значна увага як в нашій країні так і в провідних країнах Західної Європи, Північної Америки, Південно-Східної Азії. Для наземних систем переважне значення має задача орієнтації у просторі, тому окремо розглядаються безплатформові інерціальні системи орієнтації [32-34].

1.2.3 Гіроскопічні прилади, комплексовані зі супутниковими навігаційними системами.

Схеми комплексування астатичних гіроскопів, які відрізняються тим, що не мають позиційного моменту, який приводить головну вісь в площину

меридіану, з приладами, наприклад, магнітного курсу загальноповідомі. Найчастіше використовуються гіроскопи напрямку, що обладнані системами горизонтальної та азимутальної корекції, у поєднанні з індукційними датчиками магнітного курсу [2].

В останні роки запропоновано модернізацію відомих схем побудови на основі автономної початкової виставки в азимуті, а також за рахунок попередньої калібровки систематичного дрейфу гіроскопа з подальшим його врахуванням [35], в роботі розглянуто також похибки приладу, що виникають внаслідок збурень маятника системи корекції прискореннями об'єкта, на якому він встановлений. Новий алгоритм системи горизонтальної корекції, що передбачає налаштування на період Шулера, дозволяє значно зменшити дрейф гіроскопа під дією зовнішніх збурень [36, 37].

Широке використання супутникових навігаційних систем для наземного орієнтування об'єктів обмежується слабкою захищеністю від зовнішніх перешкод, як природних так і штучних. В той же час гіроскопічні вимірювачі є автономними та захищеними від перешкод, однак мають методичні та інструментальні дрейфи. В роботах [38, 39] показано можливості визначення інформації про складові швидкості на основі сигналу інтегрально-позиційної горизонтальної корекції. Порівняння показів, що знімаються в горизонтальному каналі корекції з даними супутникової навігаційної системи дозволяє одержати підвищення точності визначення курсу, аналогічно до комплексування інерціальних систем.

1.3. Загальна характеристика похибок наземних гірокомпасів та гіротеодолітів

Виходячи з відомих математичних моделей гіротеодолітів, похибки таких приладів можна розділити на методичні та інструментальні [17, 29]. До основних методичних похибок відносяться:

1) похибка, що виникає від неточного горизонтування приладу. Цю похибку зменшують за допомогою спеціальних пристроїв, при цьому час, який необхідний для горизонтування, додається до загального часу вимірювання. В сучасних конструкціях точність горизонтування забезпечують на рівні 30".

2) похибка від негоризонтальності головної осі гіроскопа, яка призводить до зміни напрямного моменту внаслідок наявності множника $\cos\beta$.

3. Карданова похибка, яка виникає внаслідок вимірювання вихідного кута α в площині, що не співпадає з площиною горизонта.

4. Вібраційна похибка, яка є проявом випрямного ефекту і виникає при роботі поруч з приладом обладнання, яке генерує вібрації.

Інструментальні похибки визначаються недосконалістю конструкції гіротеодоліта, до основних можна віднести:

1. Похибка від моменту сил сухого тертя. Виникає внаслідок тертя елементів конструкції, зокрема токопідводів.

2. Похибка від технологічної неточності виготовлення елементів підвісу. Для магнітного підвісу, наприклад, характерною є похибка, що виникає внаслідок анізотропії феромагнітного матеріалу, з якого виготовлено якір на чутливому елементі.

3. Нестабільність масштабного коефіцієнту приладу, яка виникає при дії факторів навколишнього середовища, наприклад, змінюванні температури повітря або зовнішніх магнітних полів.

4. Для приладів, які мають в своєму складі теодолітну частину характерна також колімаційна похибка, що обумовлена неперпендикулярністю вісі візування та осі обертання зорової труби.

Більшість зазначених методичних та інструментальних похибок мають відносно невеликі абсолютні значення в межах одиниць кутових хвилин, крім того існує значна кількість робіт, які присвячені питанням їх зменшення. Достатньо повний аналіз прецесійного руху чутливого елемента гірокомпасу

для різних випадків системи підвісу наведено в монографії [29]. Крім того, в наведеній роботі розглянуто вплив збурень основи на похибки наземних гірокомпасів, тобто наведено аналіз збуреного руху для вимушених і параметричних коливань чутливого елемента. Розглянуто параметричні коливання внаслідок дії наступних факторів:

- а) непостійність коефіцієнтів пропорційності дисипативних сил;
- б) непостійність коефіцієнтів пропорційності відновлювальних сил;
- в) непостійність кінетичного моменту гіроскопа.

Окремо слід виділити серед них вібраційну похибку, яка може навіть за невеликих амплітуд вібрацій досягати десятків градусів. Аналіз похибок, що виникають при вібрації основи докладно висвітлений в роботах [40-44]. Зокрема в роботі [42] показано, що стала складова похибки гіротеодоліта в азимуті має в основі випрямний ефект, що виникає внаслідок наявності в рівнянні руху ЧЕ в азимуті мультиплікативних членів 2-го порядку малості.

В цілому питанням підвищення вібростійкості гіроскопічних приладів присвячено достатньо значна кількість робіт [45-50]. В монографії [46] розглядається питання вібростійкості гіроприладів з позиції аналізу нелінійних просторових коливань з врахуванням сукупності нелінійних факторів, таких як недовершена пружність конструкції, що проявляється у вигляді тертя гістерезисного типу, нелінійність пружних характеристик елементів конструкції, а також оцінюється ефективність підвищення вібростійкості за допомогою методів автокомпенсації дрейфів гіроскопів.

В той самий час, в 80-90-х роках ХХ сторіччя, приділялась значна увага зменшенню вібраційної похибки наземних гірокомпасів. На кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації НТУУ «КПІ» було розроблено декілька варіантів активних систем віброзахисту [51-53], які мали на меті зменшення або усунення постійної складової вібраційної похибки. Результати проведених досліджень відображено в роботах [54-63]. Зокрема в монографії [62] розглянуто багатовимірні активні віброзахисні системи (ВЗС), побудовані на основі двовісного керованого віброізолятора і двовісного

фізичного маятника, що призначені для автоматичного горизонтування приладів та захисту від поступальних і кутових вібрацій. Поставлена задача проектування динамічних регуляторів багатовимірних ВЗС вирішується шляхом декомпозиції системи до рівня парціальних підсистем, що забезпечує ефективну роботу при розрахункових значеннях формувальних фільтрів. У випадку відсутності достовірної інформації про значення параметрів кінематичних збурень, що змінюються в широкому частотному діапазоні, слід використовувати динамічні регулятори з адаптивними ідентифікаторами стану. Задача відновлення вектору стану ВЗС може бути вирішена в детермінованій і стохастичній постановці. Імовірнісний підхід приводить до ідентифікатору стану у вигляді оптимального фільтра Калмана (ОФК), що більш точно відповідає реальним умовам експлуатації. Однак, як показано в роботі [64], оптимальне придушення шумів досягається за рахунок відносного зниження якості віброзахисту, внаслідок несприятливого розташування полюсів ОФК. Тому для активної ВЗС можливо синтезувати асимптотичний ідентифікатор Люенбергера, характеристики якого співставні з характеристиками ОФК.

Незважаючи на велику увагу до вирішення даної проблеми, такі системи не були доведені до реалізації в реальних приладах, що перш за все обумовлено значним ускладненням конструкції гіротеодоліта.

1.4. Методи підвищення точності гіроскопічних приладів наземного орієнтування

Для підвищення точності гіротеодолітів використовують значну кількість методів, найбільш ефективні з яких можна звести до наступних груп [2]:

- 1) метод створення спеціальних систем і пристроїв захисту від зовнішніх збурень;
- 2) метод конструктивного та технологічного удосконалення приладу для зменшення внутрішніх завад;

- 3) метод комплексування приладів;
- 4) метод компенсації похибок, в тому числі алгоритмічної;
- 5) метод автокомпенсації похибок.

Розглянемо зазначені методи більш детально.

1. Метод створення систем захисту від впливу зовнішніх збурень.

Цей метод широко використовується в приладобудування взагалі, та гіроскопічному приладобудуванні зокрема. Прикладом використання методу є термостатування для зменшення впливу змінювання температури навколишнього середовища, герметизація для зменшення впливу тиску та вологості повітря, екранування для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів (перш за все, магнітного поля Землі) та магнітних або електромагнітних полів розсіювання від елементів самого приладу, амортизація для зменшення передачі від основи кутових та поступальних вібрацій і т. ін.

Прикладом використання цього методу є зменшення похибок ГТ, що виникають внаслідок дії постійних магнітних полів, за допомогою екранування елементів конструкції, найбільш чутливих до цього впливу [65].

Однією з актуальних задач для гіртеодолітів є задача підвищення стійкості до горизонтальної поступальної вібрації основи. Така задача може бути вирішена розглянутим методом в достатньо широкому діапазоні частот вібрації при використанні додаткових активних виконавчих елементів керування типу датчика сили та датчика моменту, які компенсують вплив зовнішніх збурень в області низьких частот.

Приклад конструктивної схеми активної ВЗС типу «амортизатор-маятник» представлено на рис.1.2 [62]. Така система складається з двовісного горизонтального керованого віброізолятора і двовісного керованого фізичного маятника. На схемі позначено: 1 – об’єкт вітрозахисту, 2 – основа, 3, 11, 15, 20 – виконавчі механізми, 4,7 – прямокутні плоскі стрижні, 5, 8 – датчики відносного переміщення, 6 – джерело вібрації, 9 – каретка, 10 –

платформа, 12 – внутрішня рамка, 13 – зовнішня рамка, 14, 21 – датчики відносного кутового переміщення, 16-19 – динамічні регулятори.

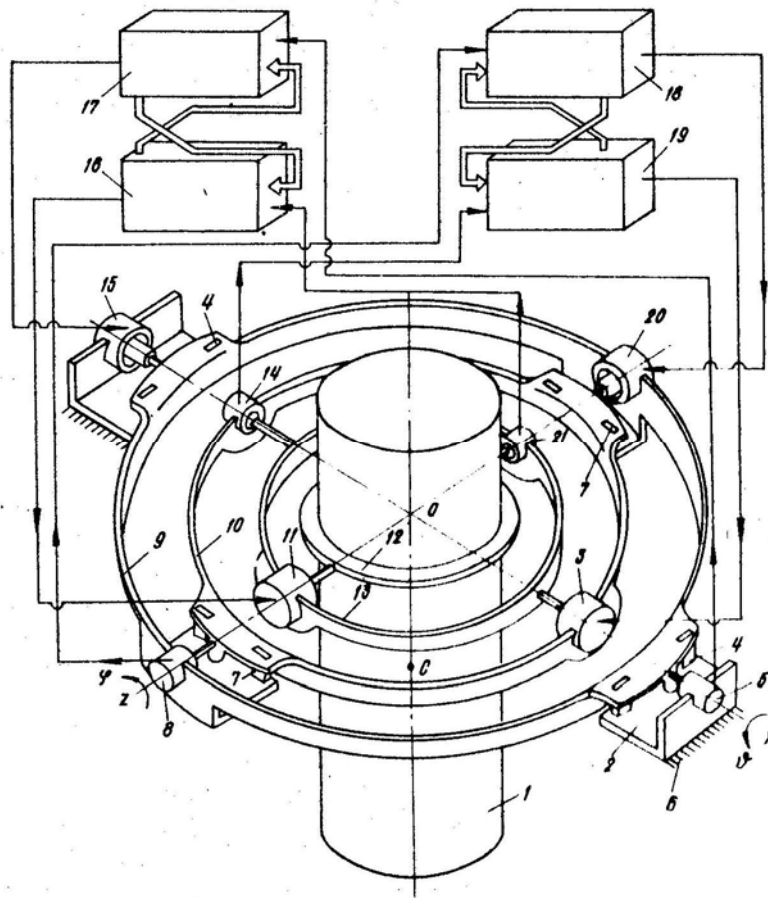


Рис. 1.2. Схема активної ВЗС типу «амортизатор-маятник»

2. Метод конструктивного та технологічного удосконалення приладу для зменшення внутрішніх завад.

Цей метод є найбільш продуктивним за своїми можливостями. Можна стверджувати, що протягом історії розвитку наземних гірокомпасів (а також багатьох інших приладів) цей метод найбільш широко використовувався на практиці. Відносно інших методів підвищення точності цей метод є основним, оскільки не потребує використання додаткових пристроїв. Реалізація можливостей цього метода відбувається достатньо повільно, що пов'язано з досягнутими можливостями науки, техніки та технології. Однак, слід зауважити, що розвиток досягнень цього метода може відбуватись стрибкоподібно відповідно до появи нових ідей та винаходів.

З метою зменшення впливу геометричних похибок систематичного характеру на точність визначення азимуту необхідно забезпечити таке положення відлікового дзеркала ЧЕ, щоб нормаль до цього дзеркала була паралельна до осі власного обертання гіромотора, та стабільність цього положення в часі можливо встановленням відлікового дзеркала ЧЕ безпосередньо на ротор гіромотора у вигляді дзеркального торця [66].

Мінімізувати похибки фотоелектричного автоколіматора, який визначає відхилення ЧЕ, можливо реалізуючи з'єм та передавання інформації про положення в просторі нормалі до відлікового дзеркала ЧЕ за допомогою автоколіматора підвищеної точності, діафрагмування світлового пучка, установку світлофільтрів, що врівноважують світлові потоки. Неідеальність трипель-призми та інших оптичних елементів можна мінімізувати введенням у конструкцію приладу оптичних клинових компенсаторів [67].

Інтенсивний розвиток і удосконалення мікропроцесорної техніки дозволяє побудувати в гіртеодоліті дискретний компенсаційний зворотній зв'язок, який надає системі керування необхідні динамічні характеристики, тобто бажане розташування коренів характеристичного рівняння замкненої системи в z - площині [68].

3. Метод комплексування

Класичний метод комплексування приладів і систем для підвищення точності полягає в одночасному використанні декількох приладів або систем, які базуються на різних фізичних принципах для вимірювання тієї самої величини і подальшою обробкою результатів. Завдяки різним фізичним принципам похибки приладів виявляються в різних областях частотного спектру, тому при одночасній обробці показів існує можливість підвищити точність вимірювання. В гіртеодолітах даний метод практично не використовується, за винятком, наприклад, використання магнітної бусолі для початкової виставки ЧЕ в азимуті. Це можна пояснити тим, що

комплексування буде зменшувати автономність системи в цілому і нівелювати переваги гіроскопічного методу орієнтування.

4. Метод компенсації похибок

Цей метод використовується в багатьох гіроскопічних приладах і системах і потребує додаткових пристроїв для компенсації або власне похибок, або їх наслідків у вихідних сигналах. Наприклад, в морських гірокомпасах використовують коректор для визначення та врахування поправки на швидкісну девіацію, яка залежить від лінійної швидкості судна, курсу та широти місця. В гіротеодолітах цей метод може використовуватись для внесення поправки, яка компенсує систематичну складову вібраційної похибки, що виникає внаслідок вібрації основи [41, 42].

З розвитком обчислювальної техніки можливості метода компенсації суттєво розширюються. По-перше, стає можливо використовувати більш складні математичні моделі приладів, зокрема нестационарні та нелінійні, з великою кількістю параметрів, які спричиняють похибки. По-друге, виникає можливість розробки методів компенсації, які не потребують безпосереднього вимірювання параметрів, необхідних для визначення і врахування похибок. Для цього використовується інформація, яка вимірюється вже існуючими датчиками, а необхідні невідомі параметри обчислюються на основі математичної моделі приладу. По-третє, в сучасних інформаційних системах існує можливість обробки інформації таким чином, щоб визначати безпосереднє значення вихідної величини, очищене від впливу завад.

Різновид методу компенсації похибок, що оснований на раціональній обробці вихідної інформації приладу за допомогою ЕОМ, отримав назву алгоритмічної компенсації похибок.

5. Метод автокомпенсації похибок.

Метод автокомпенсації похибок відрізняється від методу компенсації тим, що не потребує прямого вимірювання чи непрямого визначення параметрів похибок або завад. В більшості випадків практичне використання

методу автокомпенсації в гіроскопічних приладах передбачає створення штучних рухів гіроскопів або елементів підвісу, внаслідок чого зменшується вплив шкідливих моментів і відповідно похибки приладів [69].

В наземних гірокомпасах широкого застосування набула схема автокомпенсації, що полягає в реверсуванні кінетичного моменту гіромотора. Як показали теоретичні та експериментальні дослідження існує можливість суттєвого зменшення невідомого постійного шкідливого моменту, який діє по осі підвісу чутливого елементу ГТ, при вимірюванні азимуту в двох положеннях ЧЕ відносно площини меридіану – при орієнтації приблизно на північ та на південь. Такий спосіб підвищення точності гіротеодоліту було названо способом «північ-південь» [70]. Можна вважати, що цей спосіб є розвитком схеми реверсування кінетичного моменту гіроскопа стосовно наземного гірокомпаса.

Сучасні гіротеодоліти, на відміну від приладів кінця ХХ ст., мають у своєму складі багато датчиків з цифровим виходом, сигнали з яких можуть після обробки використовуватись для підвищення точності визначення азимуту [10, 11]. Мікропроцесорні системи, які розроблені на даний момент, з одного боку є достатньо компактними і, водночас, мають тактові частоти та об'єми ОЗУ прийнятні для обробки отриманої інформації за складними алгоритмами, що було неможливо 5-10 років тому. Отже, існує можливість застосування відомих методів компенсації похибок з використанням досягнень інформаційних технологій шляхом створення нових алгоритмів обробки даних.

В цілому питанням підвищення точності підземних геодезичних робіт присвячується багато уваги, при цьому використовуються більшість розглянутих вище методів [7-10]. Українські розробники наземних гірокомпасів використовують для підвищення точності, найчастіше, різноманітні методи конструктивного та технологічного удосконалення. Зокрема, впроваджується нова елементна база для досягнення більшої швидкодії приладів та зменшення інструментальних похибок [71].

Для створення високоточного наземного гірокомпаса (DMT Gyromat 2000, 3000) німецькі дослідники розробили метод калібровки масштабного коефіцієнту приладу при різних значеннях температури навколишнього середовища для усунення систематичної похибки, що виникає внаслідок зміни температури [72,73]. Даний метод є різновидом методу компенсації похибок.

Останніми роками дослідники не розглядали методи зменшення похибок гіротеодолітів, що виникають внаслідок вібрацій, однак, виходячи з попереднього аналізу актуальною є проблема визначення азимутів при роботі в умовах обмежено рухомої основи. На цей час існують технічні можливості для роботи приладів в таких умовах, але при цьому слід застосовувати певні методи зменшення вібраційної похибки, наприклад, алгоритмічну компенсацію похибки.

1.5. Мета і завдання наукових досліджень

Проблема зменшення вібраційної похибки поки що не розв'язана у відомих гіротеодолітах, тому метою дослідження обрано підвищення точності гіротеодоліта, призначеного для визначення азимутів орієнтирних напрямків, що встановлюється на основі, яка здійснює поступальний рух.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні наукові і прикладні задачі:

- на основі аналізу проблеми в літературі визначити фактори, що впливають на точність гіротеодоліта, встановлюваного на обмежено рухомій основі
- розробити математичну модель наземного маятникового гіротеодоліта, яка враховує поступальну вібрацію основи, а також особливості його роботи в компенсаційному режимі;
- визначити похибки гіротеодоліта, які виникають внаслідок дії поступальної вібрації

- обґрунтувати наукові методи, що застосовуються для вирішення задачі підвищення точності гіротеодоліта під дією поступальної вібрації
- розробити математичну модель алгоритмічної компенсації похибок гіротеодоліта
- розробити комплекс методів, що призначені для визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліта
- провести експериментальні дослідження розроблених методів

Представлені в роботі дослідження та положення, які виносяться на захист, відповідають формулі паспорту спеціальності 05.11.03 – Гіроскопи і навігаційні системи:

- дослідження та вдосконалення наявних методів, приладів, систем автономного вимірювання параметрів руху, орієнтації та навігації, комплексних навігаційних систем і гіроскопів;
- розроблення та дослідження математичних моделей, систем моделювання, навігаційних приладів, систем та їх чутливих елементів;

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІРОТЕОДОЛІТА НА ОБМЕЖЕНО РУХОМІЙ ОСНОВІ

2.1. Математична модель руху маятникового чутливого елемента гіротеодоліта

В якості базової розрахункової моделі прийнято гіротеодоліт з точкою підвісу, нерухомою відносно його корпусу. При цьому фізична сутність похибок, що виникають внаслідок вібрації основи не зміниться, відповідно методи алгоритмічної компенсації можуть бути застосовані і для приладів з загальним випадком підвісу чутливого елемента. Зважаючи на сучасні тенденції створення гіроскопічних засобів наземного орієнтування [5,7,8] можна зауважити, що більшість гіротеодолітів використовують компенсаційний метод вимірювання, тому в подальшому розглянемо особливості приладів, які мають в своєму складі компенсаційний зворотній зв'язок.

2.1.1. Системи координат, що використовуються.

Для розгляду динаміки гіротеодоліту введемо географічну систему координат $\xi\eta\zeta$, центр якої знаходиться в точці підвісу гіроскопу, а осі орієнтовані наступним чином: ξ – лежить в площині горизонту і направлена по дотичній до меридіана на північ, ζ – лежить в площині горизонту і направлена по дотичній до паралелі на схід, η – перпендикулярна до площини горизонту, та утворює з осями ξ , ζ праву систему координат. Положення корпусу приладу, з яким зв'язана система координат $X_C Y_C Z_C$, відносно географічної системи координат визначається кутами ψ , θ , φ , при

цьому центри систем $\xi\eta\zeta$ та $X_C Y_C Z_C$ збігаються, вісь X_C – паралельна площині відлікової системи гіртеодоліту та проходить через її нульовий відлік, вісь Y_C – паралельна площині відлікової системи гіртеодоліту та перпендикулярна осі X_C , вісь Z_C – перпендикулярна до площини відлікової системи, та утворює з осями X_C , Y_C праву систему координат. Відхилення чутливого елементу гіртеодоліта від положення рівноваги всередині корпусу приладу визначається кутами α , β , γ . Кінцевому положенню ЧЕ відповідає система координат XYZ , зв'язана з чутливим елементом.

В реальних конструкціях гіртеодолітів між корпусом та чутливим елементом знаходиться так званий слідкуючий корпус, який обертається відносно осі Z_C за допомогою приводу та редуктора, тобто кут повороту α навколо вертикальної осі складається з послідовних поворотів слідкуючого корпусу та чутливого елементу. Дану особливість в подальшому враховувати не будемо, оскільки під час з'йому інформації слідкуючий корпус жорстко фіксується відносно корпусу, а його положення вимірюється з високою точністю (одиниці кутових секунд) і враховується в показах відлікової системи приладу.

Кінематика поворотів корпусу в географічній системі координат і поворотів чутливого елементу всередині корпусу представлена на рис. 2.1.

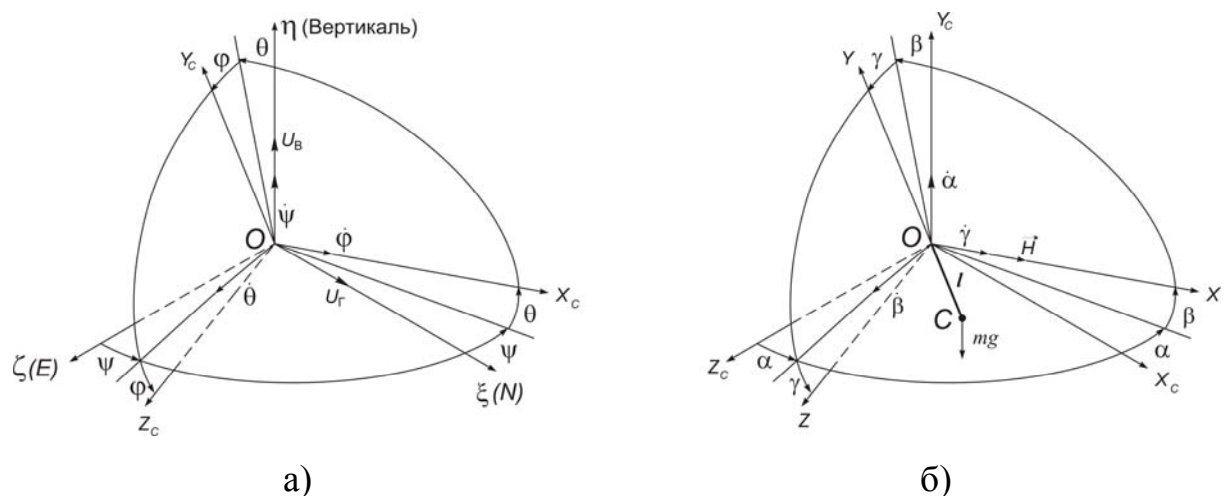


Рис. 2.1. Кінематика поворотів корпусу (а) та чутливого елементу (б).

На рис. 2.1. позначено: O – точка підвісу гіротеодоліта, C – центр мас його чутливого елемента, l – зміщення центру мас відносно точки підвісу, U_H – горизонтальна складова кутової швидкості обертання Землі, U_B – вертикальна складова кутової швидкості обертання Землі, ϕ , θ – кути відхилення корпусу ГТ від площини горизонту, ψ – кут відхилення нуля відлікової системи гіротеодоліта від площини меридіану, α , β , γ – кути відхилення ЧЕ від положення рівноваги.

2.1.2. Повні рівняння руху чутливого елемента ГТ

Повні лінеаризовані рівняння руху чутливого елемента гіротеодоліта із магнітним типом підвісу з врахуванням поступального руху основи в площині горизонту можна представити в наступному вигляді [29, 74, 75]:

$$\begin{cases} J_Y \ddot{\alpha} + f_\alpha \dot{\alpha} + H\omega_3 \cos \phi_g \alpha + C_\alpha \alpha + H\dot{\beta} = M_\alpha \\ -H\dot{\alpha} + (J_Z \ddot{\beta} + ml^2 \ddot{\beta} + f_\beta \dot{\beta} + mgl\beta) + ml\ddot{x} + f_x \dot{x} = M_\beta ; \\ ml\ddot{\beta} + \frac{f_\beta}{l} \dot{\beta} + m\ddot{x} + \frac{f_x}{l} \dot{x} + C_x x = F_x \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} (J_X + ml^2) \ddot{\gamma} + f_\gamma \dot{\gamma} + mgl\gamma - ml\ddot{z} - f_z \dot{z} = M_\gamma \\ ml\ddot{\gamma} + \frac{f_\gamma}{l} \dot{\gamma} - \left(m\ddot{z} + \frac{f_z}{l} \dot{z} + C_z z \right) = F_z \end{cases} ; \quad (2.2)$$

де $M_\alpha = ml[(W_E + \ddot{z})\beta + (W_N + \ddot{x})\gamma]$, $M_\beta = -mlW_N$, $M_\gamma = mlW_E$ – складові зовнішніх моментних збурень, що виникають внаслідок поступальної вібрації, $F_x = -mW_N$, $F_z = mW_E$ – складові зовнішніх силових збурень, що виникають внаслідок поступальної вібрації, J_X, J_Y, J_Z – моменти інерції чутливого елемента відносно відповідних осей, H – кінетичний момент гіроскопа, ω_3 – кутова швидкість власного обертання Землі, ϕ_g – географічна широта місця встановлення приладу, m – маса чутливого

елемента; l – зміщення центру мас ЧЕ відносно точки підвісу; C_α – кутова жорсткість підвісу відносно осі Y ; C_x , C_z – лінійні жорсткості підвісу відносно осей X , Z , $f_\alpha, f_\beta, f_\gamma$ – коефіцієнти кутового демпфірування, f_x, f_z – коефіцієнти лінійного демпфірування.

В більшості випадків зовнішні вібраційні прискорення, що виникають внаслідок руху основи, зручно розглядати як перевантаження точки підвісу, тобто:

$$\vec{n}(t) = \frac{\vec{W}(t)}{g}.$$

Тоді відповідні проекції:

$$M_\alpha = mgl \left[\left(n_E + \frac{1}{g} \ddot{z} \right) \beta + \left(n_N + \frac{1}{g} \ddot{x} \right) \gamma \right], \quad M_\beta = -mgl \cdot n_N, \quad M_\gamma = mgl \cdot n_E,$$

$$F_x = -mg \cdot n_N, \quad F_z = mg \cdot n_E.$$

З аналізу систем рівнянь (2.1) та (2.2) видно, що рух ЧЕ гіротеодоліта в першому лінійному наближенні розпадається на незалежні рухи – в гіростабілізованій площині XOY по координатах α , β , x , та в негіростабілізованій площині YOZ по координатах γ , z . При цьому нелінійний момент M_α , який призводить до появи вібраційної похибки залежатиме від обох цих рухів. Рівняння у формі (2.1) та (2.2) є досить складними для подальшого аналізу, крім того наявність інерційних моментів обумовлює необхідність врахування нутаційних коливань при їх інтегруванні. В такому випадку необхідно зменшувати крок інтегрування, що негативно позначається на загальному часі інтегрування.

2.1.3. Рівняння руху чутливого елемента ГТ

Для спрощення подальших розрахунків приймемо як основну модель – гіротеодоліт з точкою підвісу, нерухомою відносно його корпусу. При цьому отримані результати можуть бути розповсюджені на прилади з загальним

випадком підвісу чутливого елементу, зокрема у випадку аналізу даних експериментальних досліджень.

Якщо знехтувати моментами сил інерції обертального прискорення, прецесійні рівняння руху чутливого елементу гіртеодоліта можна представити в наступному вигляді [76]:

а) за координатою α :

$$\begin{aligned} H(\dot{\beta} \cos \beta + U_{Zc} \cos \alpha + U_{Xc} \sin \alpha) \cos \beta = & -K_{KC} \alpha - F_{KC} \dot{\alpha} - f_{\alpha} \dot{\alpha} + \\ & + ml[(w_{Xc} - g_{Xc})(\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \sin \beta) + \\ & + (w_{Zc} - g_{Zc})(-\sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta)] \end{aligned} \quad (2.3)$$

б) за координатою β :

$$\begin{aligned} H[(\dot{\alpha} + U_{Yc}) \cos \beta - (U_{Xc} \cos \alpha - U_{Zc} \sin \alpha) \sin \beta] = & -f_{\beta} \dot{\beta} + \\ & + ml[-(w_{Xc} - g_{Xc}) \cos \alpha \cos \beta - (w_{Yc} - g_{Yc}) \sin \beta + (w_{Zc} - g_{Zc}) \sin \alpha \cos \beta] \cos \gamma \end{aligned} \quad (2.4)$$

в) за координатою γ :

$$\begin{aligned} J_X \ddot{\gamma} + f_{\gamma} \dot{\gamma} = & ml[(w_{Xc} - g_{Xc})(\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \sin \beta) - \\ & - (w_{Yc} - g_{Yc}) \cos \beta \sin \gamma + (w_{Zc} - g_{Zc})(\cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma \sin \beta)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

В рівняннях (2.3)-(2.5) позначено: m – маса чутливого елементу, H – кінетичний момент гіроскопа; K_{KC} – коефіцієнт компенсаційного зв'язку;

f_{α} , f_{β} , f_{γ} – коефіцієнти в'язкого тертя; F_{KC} – коефіцієнт демпфірування, пропорційний коефіцієнту компенсаційного зв'язку;

w_{Xc} , w_{Yc} , w_{Zc} – проекції вектора \vec{w} прискорення точки підвісу на вісі зв'язаної системи координат $X_C Y_C Z_C$;

g_{Xc} , g_{Yc} , g_{Zc} – проекції вектора \vec{g} прискорення сили тяжіння на вісі зв'язаної системи координат $X_C Y_C Z_C$;

U_{Xc} , U_{Yc} , U_{Zc} – проекції вектора \vec{U} абсолютної кутової швидкості основи на вісі зв'язаної системи координат $X_C Y_C Z_C$.

Проекції вектора кутової швидкості \vec{U} визначаються виразами [76]:

$$\begin{cases} U_{Xc} = \dot{\varphi} + (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \phi_g) \sin \theta + \omega_3 \cos \phi_g \cos \theta \cos \varphi \\ U_{Yc} = (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \phi_g) \cos \theta \cos \varphi + \\ + \omega_3 \cos \phi_g (\sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) + \dot{\theta} \sin \varphi \\ U_{Zc} = -(\dot{\psi} + \omega_3 \sin \phi_g) \cos \theta \sin \varphi + \\ + \omega_3 \cos \phi_g (\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi \sin \theta) + \dot{\theta} \cos \varphi \end{cases} ;$$

де ω_3 – кутова швидкість власного обертання Землі, ϕ_g – географічна широта місця встановлення приладу.

Проекції вектора прискорень $(\vec{w} - \vec{g})$ визначаються виразами [76]:

$$\begin{cases} w_{Xc} - g_{Xc} = g[\sin \theta + (n_N \cos \psi - n_E \sin \psi) \cos \theta] \\ w_{Yc} - g_{Yc} = g[\cos \theta \cos \varphi + n_N (\sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) + \\ + n_E (\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \cos \varphi \sin \theta)] \\ w_{Zc} - g_{Zc} = g[-\cos \theta \sin \varphi + n_N (\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi \sin \theta) + \\ + n_E (\cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \sin \theta)] \end{cases} ;$$

де n_N , n_E – північна і східна складові перевантаження точки підвісу ГТ відповідно.

2.1.4. Модель вихідного сигналу.

В стані спокою ($\dot{\alpha} = \dot{\beta} = \dot{\gamma} = \dot{\psi} = \dot{\theta} = \dot{\varphi} = 0$), якщо вертикальна вісь симетрії корпусу приладу збігається з напрямом вертикалі місця ($\vartheta = \varphi = 0$), значення кута відхилення α^* головної осі ГТ від положення динамічної рівноваги, відповідно до рівняння (2.1), визначається виразом [76]:

$$\alpha^* = -\frac{\omega_3 \cos \phi_g}{k_{KC}} \sin(\psi + \alpha^*) = -\frac{1}{\kappa} \sin(\psi + \alpha^*),$$

$$\text{де позначено } \kappa = \frac{k_{KC}}{\omega_3 \cos \phi_g} = \frac{K_{KC}}{H \omega_3 \cos \phi_g}.$$

Звідси випливає, що в якості «виходу» гіртеодоліту зручно використовувати величину $\psi_{вим}$, пов'язану з вимірюваним кутом α

залежністю $\psi_{вим} = -\alpha + \arcsin(-k\alpha)$. Тоді, у разі відсутності збурень, вихідна величина співпадає з вимірюваним кутом ψ : $\psi_{вим.ід} = \psi$ [76].

2.2. Інформаційна модель гіртеодоліту на обмежено рухомій основі

Отримана динамічна модель руху чутливого елементу ГТ складається з рівнянь по відповідним узагальненим координатам. В той же час сам об'єкт дослідження має в своєму складі додаткові елементи та системи, інформація з яких може бути використана для підвищення точності при вібраційних збуреннях основи. Тому доцільним є складання інформаційної моделі ГТ на обмежено рухомій основі, яка включатиме динамічні рівняння руху ЧЕ, зовнішні збурення, що діють на об'єкт дослідження, сигнали, які формуються в допоміжних системах керування, надлишкова інформація, яка наявна в самому приладі.

2.2.1. Складання інформаційної моделі.

Виходячи з попереднього аналізу стану проблеми та отриманих математичних моделей можна запропонувати таку структуру інформаційної моделі гіртеодоліту:

1. Імітатор руху основи
2. Модель чутливого елементу ГТ
3. Модель компенсаційного зворотного зв'язку
4. Підсистема стабілізації обертів гіромотору
5. Блок оцінювання параметрів руху чутливого елементу
6. Блок обчислення вібраційної похибки
7. Блок алгоритмічної компенсації вібраційної похибки

Взаємозв'язок між елементами інформаційної моделі показано на рис. 2.2.

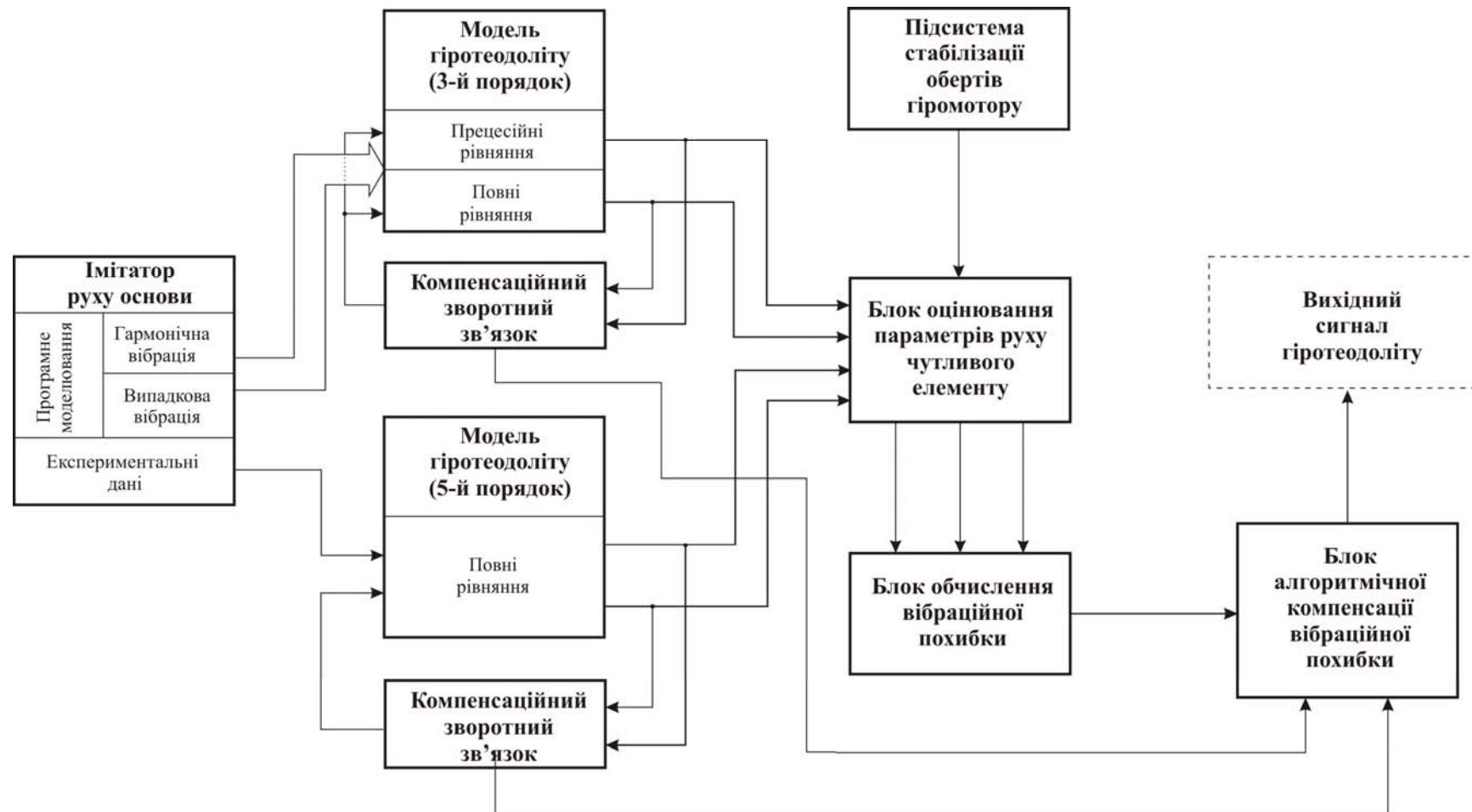


Рис. 2.2. Структура інформаційної моделі ГТ

2.2.2. Програмна модель гіротеодоліта.

Для моделювання руху ЧЕ ГТ відповідно до отриманої математичної моделі розроблено програмну модель в середовищі MATLAB, структура якої складається з наступних частин:

GT_upr.m – керувальна програма,

GT_pr.m – процедура обчислення правих частин диференціальних рівнянь (2.1)-(2.3),

rk4.m – процедура чисельного інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта 4-го порядку

Pr_UgSkObj.m – процедура обчислення параметрів руху об'єкта в правій частині диференціальних рівнянь (2.3)-(2.5),

UgDvigObj.m – процедура обчислення параметрів кутового руху об'єкта,

UskorObj.m – процедура обчислення лінійних прискорень об'єкта.

Керувальна програма *GT_upr.m* задає початкові умови і параметри моделі, реалізує процес чисельного інтегрування рівнянь руху ГТ (2.3) – (2.5) та виконує зв'язок окремих процедур і виводить результат у вигляді графічних залежностей кутових координат, що визначають положення чутливого елемента, від часу.

Тексти програм для моделювання роботи гіротеодоліту наведено в додатку 3.

2.2.3. Перевірка адекватності інформаційної моделі об'єкта дослідження.

Розглянемо вільний рух чутливого елемента ГТ, задавши в програмній моделі початкові відхилення ЧЕ по кутах β і γ нульовими, по куту $\alpha_0 = 0.17^\circ$, а також кутові швидкості $\dot{\alpha} = \dot{\beta} = \dot{\gamma} = \dot{\psi} = \dot{\theta} = \dot{\phi} = 0$ і кути нахилу

корпусу приладу $\vartheta = \varphi = 0$. Параметри приладу вибрано на основі оцінки відомих конструкцій ГТ компенсаційного типу [11].

Таблиця 2.1. Параметри гіротеодоліту

Назва	Значення, одиниці вимірювання
Кінетичний момент гіроскопа	$H = 0.4 \text{ Нмс}$
Маса чутливого елемента	$m = 1 \text{ кг}$
Відстань від точки підвісу до центра мас ЧЕ	$l = 0.1 \text{ м}$
Момент інерції ЧЕ відносно осі X	$J_x = 1.13 \cdot 10^{-2} \text{ кгм}^2$
Момент інерції ЧЕ відносно осі Y	$J_y = 4 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$
Момент інерції ЧЕ відносно осі Z	$J_z = 1.13 \cdot 10^{-2} \text{ кгм}^2$

На рис. 2.3 представлено графіки вільних коливань ЧЕ гіротеодоліта в азимуті за умови відсутності компенсаційного зв'язку $\kappa = 0$, при цьому початкове відхилення ЧЕ від положення рівноваги задане рівним $\alpha_0 = 10''$. На рис. 2.4 – графіки вільних коливань при $\kappa = 10$ та аналогічним попередньому початковим відхиленням ЧЕ, а на рис 2.5 коефіцієнт передачі компенсаційного зв'язку збільшено до $\kappa = 100$.

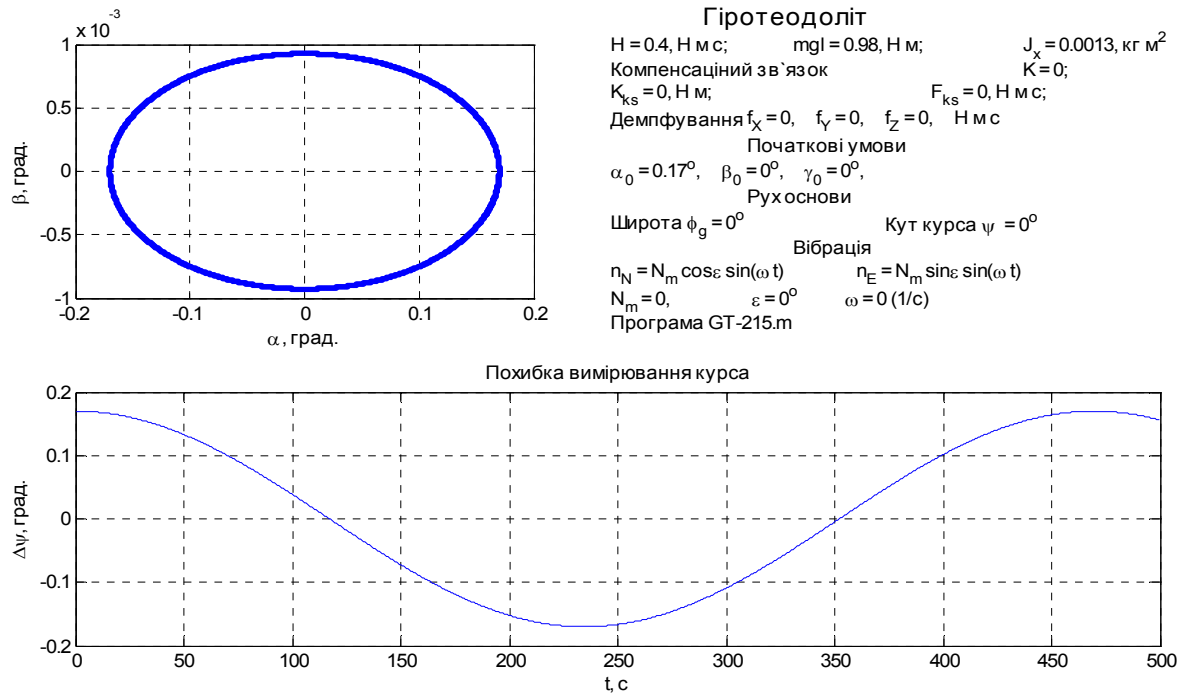


Рис. 2.3. Вільні коливання ЧЕ гіротеодоліта в азимуті за умови відсутності компенсаційного зв'язку $\kappa = 0$.

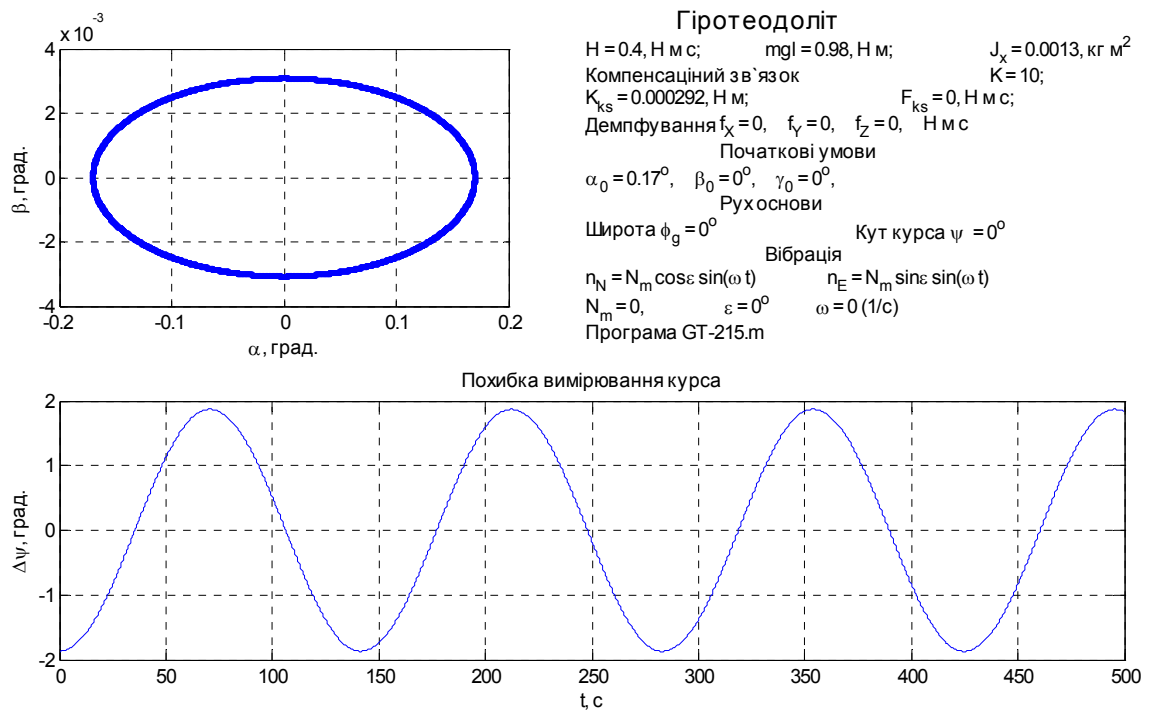


Рис. 2.4. Вільні коливання ЧЕ гіротеодоліта в азимуті при коефіцієнті компенсаційного зв'язку $\kappa = 10$.

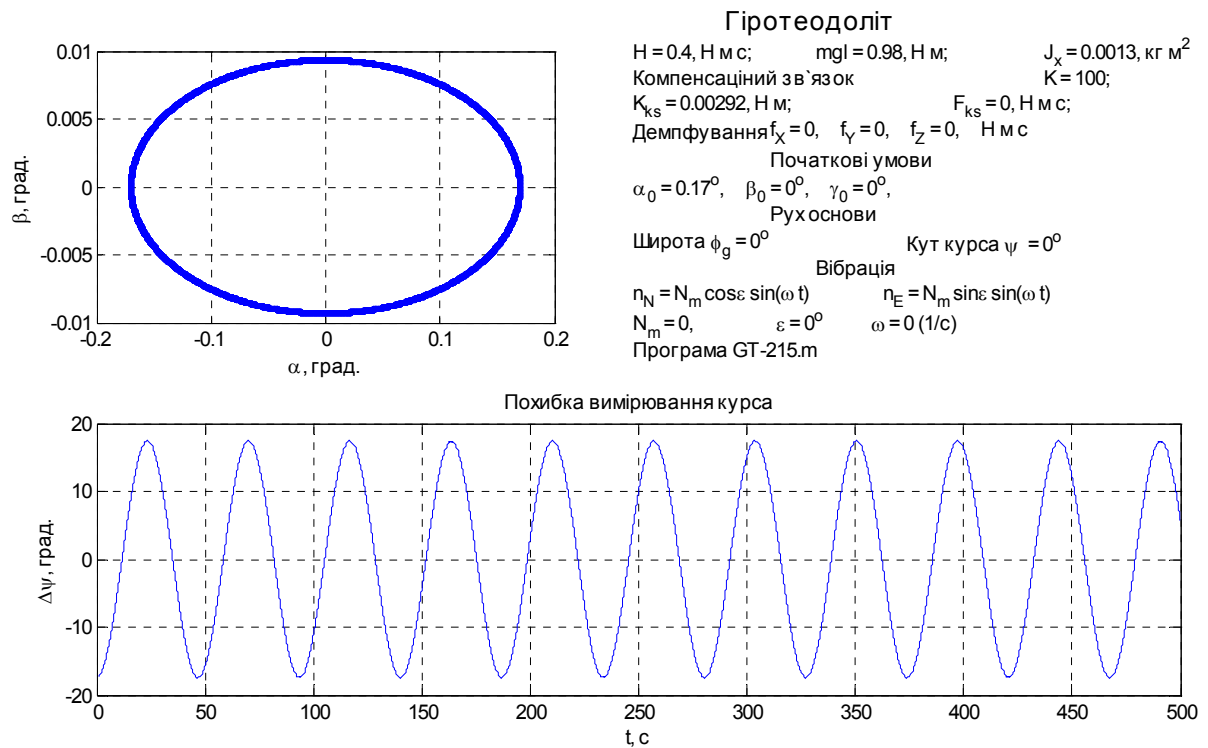


Рис. 2.5. Вільні коливання ЧЕ гіротеодоліта в азимуті за умови відсутності компенсаційного зв'язку $\kappa = 100$.

Розглядаючи графіки вільних коливань ЧЕ представлені на рис. 2.3 – рис. 2.5 можна зробити висновок, що збільшення коефіцієнта компенсаційного зв'язку призводить з одного боку до зменшення періоду коливань, а з іншого – до збільшення амплітуди коливань вихідного сигналу гіротеодоліта, тому при використанні компенсаційного режиму вимірювання забезпечують демпфування коливань ЧЕ за допомогою введення в контур керування додаткових ланок.

Для порівняння результатів моделювання знайдемо частоту та період коливань ЧЕ за кутами α і β виходячи з рівнянь (2.3)-(2.5) з врахуванням попередніх припущень:

$$\begin{cases} H\ddot{\beta} + H\omega_3 \cos \varphi_g \cos \psi_0 \cdot \alpha = -k_{KC}\alpha \\ H\ddot{\alpha} - mgI\beta = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Характеристичне рівняння системи (2.6):

$$H^2 p^2 + H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa) mgI = 0. \quad (2.7)$$

Період власних коливань:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0},$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa) mgl}{H}}$ – частота власних незгасаючих коливань ЧЕ за кутами α і β , що визначається розв’язком характеристичного рівняння (2.7).

Порівняння розрахованих аналітично значень періоду коливань з отриманими в результаті моделювання наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Порівняння результатів моделювання

Величина коефіцієнту κ	Період коливань T_0 , розрахований теоретично, с	Період коливань T_0 , визначений за результатами моделювання, с
0	469,8	470,0
10	141,6	141,7
100	46,7	46,7

Отже розроблена програмна модель відповідає розглянутій вище математичній і може бути використана для моделювання роботи ГТ, та аналізу похибок, що виникають внаслідок вібраційних збурень.

2.3. Аналіз впливу вібрації основи на точність гіртеодоліта

Для аналізу точності гіртеодоліта при вібрації основи, доцільно використовувати частотні передатні функції, амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики, а також математичний апарат кореляційного та спектрального аналізу при випадкових вібраційних збуреннях. Оскільки вихідна система рівнянь, що описують динаміку ГТ, є нелінійною, то для використання відповідних методів дослідження частотних характеристик необхідно перетворити рівняння (2.3)-(2.5) в систему лінійних рівнянь [76].

2.3.1. Лінеаризовані рівняння руху маятникового ЧЕ ГТ.

Для дослідження вібраційної похибки ГТ зробимо такі припущення:

1) будемо вважати, що корпус гіротеодоліта здійснює тільки поступальний рух, причому вертикальну вісь приладу будемо вважати такою, що протягом часу вимірювання співпадає з напрямом місцевої вертикалі, а нульове значення відлікової системи приладу нерухомим відносно Землі [76]:

$$\dot{\psi} \equiv \dot{\theta} \equiv \dot{\phi} \equiv 0; \vartheta \equiv \varphi \equiv 0; \psi = \psi_0 = \text{const}.$$

2) північна і східна складові перевантаження точки підвісу ГТ змінюються за законом [76]:

$$n_N = \cos \varepsilon \cdot n(t); n_E = \sin \varepsilon \cdot n(t); \quad (2.8)$$

де $n(t)$ – перевантаження точки підвісу, яке може бути як детермінованим, так і випадковим, ε – кут в горизонтальній площині між напрямком вібрації та напрямком географічної півночі (див. рис. 2.6).

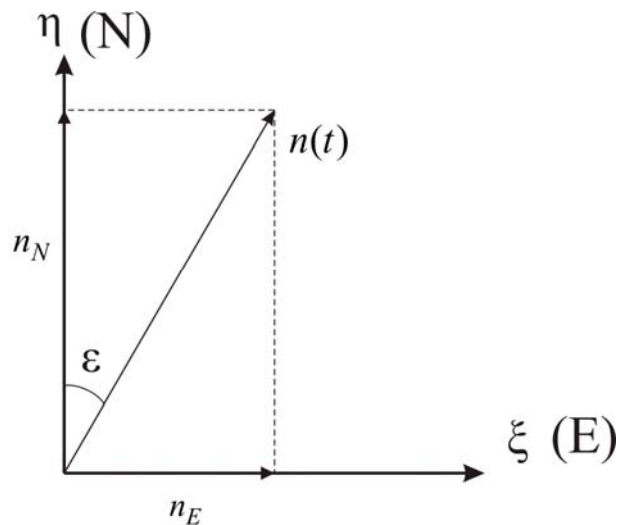


Рис. 2.6. Розташування вектора перевантаження в горизонтальній площині.

Отже, точка підвісу здійснює в площині горизонту коливання вздовж відрізка прямої, нахиленої до площини меридіана під кутом ε [76];

3) всі три кути повороту ЧЕ гіротеодоліту є малими.

За таких припущень проекції вектора кутової швидкості \vec{U} визначаються виразами [76]:

$$\begin{cases} U_{Xc} = \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0 \\ U_{Yc} = \omega_3 \sin \phi_g \\ U_{Zc} = \omega_3 \cos \phi_g \sin \psi_0 \end{cases};$$

а проєкції вектора прискорень $(\vec{w} - \vec{g})$ визначаються [76]:

$$\begin{cases} w_{Xc} - g_{Xc} = g(n_N \cos \psi_0 - n_E \sin \psi_0) \\ w_{Yc} - g_{Yc} = g \\ w_{Zc} - g_{Zc} = g(n_N \sin \psi_0 + n_E \cos \psi_0) \end{cases}. \quad (2.9)$$

За таких умов лінеаризовані рівняння набувають вигляду [76]:

$$\begin{aligned} \dot{\beta} + \omega_3 \cos \phi_g \sin \psi_0 + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0 \cdot \alpha = \\ = \omega_{pr}[\gamma \cdot n_X(t) + \beta \cdot n_Z(t)] - k_{KC} \alpha - (p_{KC} + p_\alpha) \dot{\alpha}; \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} + \omega_3 \sin \phi_g - (\omega_{pr} + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0) \beta = \\ = \omega_{pr}[n_X(t) - \alpha \cdot n_Z(t)] + p_\beta \dot{\beta} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\ddot{\gamma} + 2\mu_\gamma \dot{\gamma} + \omega_\gamma^2 \gamma = \omega_\gamma^2 [n_Z(t) + \alpha \cdot n_X(t)] \quad (2.12)$$

де позначено:

$$\omega_{pr} = \frac{mgl}{H}; \quad \omega_\gamma = \sqrt{\frac{mgl}{J_X}};$$

$$\mu_\gamma = \frac{f_\gamma}{2J_X}; \quad p_\alpha = \frac{f_\alpha}{H}; \quad p_\beta = \frac{f_\beta}{H}; \quad p_{KC} = \frac{F_{KC}}{H};$$

$$n_X(t) = \cos(\varepsilon + \psi_0)n(t);$$

$$n_Z(t) = \sin(\varepsilon + \psi_0)n(t).$$

Рівнянням (2.10)-(2.12) відповідають рівняння першого наближення, в яких не враховуються члени другого порядку мализни в правій частині [76]:

$$\begin{cases} \dot{\beta} + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0 \cdot \alpha = -k_{KC} \alpha - (p_{KC} + p_\alpha) \dot{\alpha}; \\ \dot{\alpha} - (\omega_{pr} + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0) \beta = \omega_{pr} n_X(t) + p_\beta \dot{\beta}; \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\ddot{\gamma} + 2\mu_\gamma \dot{\gamma} + \omega_\gamma^2 \gamma = \omega_\gamma^2 n_Z(t) \quad (2.14)$$

2.3.2. Аналіз вібраційної похибки при гармонічній поступальній вібрації основи.

Відповідно до аналізу відомих літературних джерел [40-42], в багатьох випадках перевантаження точки підвісу можна вважати періодичною функцією, що змінюється за гармонічним законом [76]:

$$n(t) = n_m \sin \omega t ,$$

де n_m – амплітуда перевантаження, ω – частота вібраційного збурення.

Проекції віброперевантаження, з врахуванням (2.9), мають вигляд [76]:

$$n_X(t) = n_m \cos(\varepsilon + \psi_0) \sin \omega t ;$$

$$n_Z(t) = n_m \sin(\varepsilon + \psi_0) \sin \omega t .$$

Тоді, розв'язки рівнянь першого наближення (2.13), (2.14), відповідні сталим вимушеним коливанням можна представити у вигляді [76]:

$$\beta(t) = N_\beta(\omega) \cdot n_X(t) ,$$

$$\gamma(t) = N_\gamma(\omega) \cdot n_Z(t) ;$$

$$\text{де } N_\beta(\omega) = -\omega_{pr} \frac{b_0(a_0 - a_2\omega^2) + a_1b_1\omega^2}{(a_0 - a_2\omega^2)^2 + a_1^2\omega^2} ; \quad N_\gamma(\omega) = \frac{\omega_\gamma^2(\omega_\gamma^2 - \omega^2)}{(\omega_\gamma^2 - \omega^2)^2 + 4\mu_\gamma^2\omega^2} ;$$

$$b_0 = k_{KC} + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0 ; b_1 = (1 + \kappa) p_\alpha ; a_0 = \omega_3 \cos \phi_g (\kappa + \cos \psi_0) \omega_{pr} ;$$

$$a_1 = (1 + \kappa) p_\alpha \omega_{pr} + \omega_3 \cos \phi_g (\kappa + \cos \psi_0) p_\beta ; a_2 = 1 + (1 + \kappa) p_\alpha p_\beta .$$

У наведених виразах $N_\beta(\omega)$ та $N_\gamma(\omega)$ записані тільки розв'язки, що пропорційні $\sin \omega t$, оскільки при подальшому знаходженні середнього значення вібраційної похибки лише вони будуть спричинювати появу постійної складової [76].

Підставляючи розв'язки рівнянь першого наближення до першого рівняння системи (2.13), після усереднення отримаємо [76]:

$$\sin \langle \alpha \rangle = \frac{\omega_g n_m^2}{4\omega_3 \cos \phi_g} [N_\gamma(\omega) + N_\beta(\omega)] \sin 2(\varepsilon + \psi_0) . \quad (2.15)$$

Отже, вібраційна похибка залежить від параметрів приладу: кінетичного моменту, маси та маятниковості ЧЕ; напрямку вібрації і положення головної осі гіроскопа відносно площини меридіану, амплітудно-частотних характеристик приладу, а також амплітуди і частоти перевантаження точки підвісу [76]. Порівняно з відомими залежностями вібраційної похибки [41, 42] формула (2.15) включає кут початкового відхилення ЧЕ в азимуті ψ_0 .

На рис. 2.7 – рис.2.10 в графічній формі представлені результати обчислень за формулою (2.15) постійної складової вібраційної похибки в залежності від частоти поступальної вібрації основи гіротеодоліта, параметри якого наведено в таблиці 2.1. Рис. 2.7, 2.9 відображають динамічні властивості гіротеодоліта при відсутності демпфірування, а рис. 2.8, 2.10 – при наявності демпфірування з коефіцієнтами $f_\alpha = 0,04$, $f_\beta = 0,04$, $f_\gamma = 0,04$. При розрахунках прийнято до уваги, що амплітуда переміщення точки підвісу (x_m) не перевищує 1 мм.

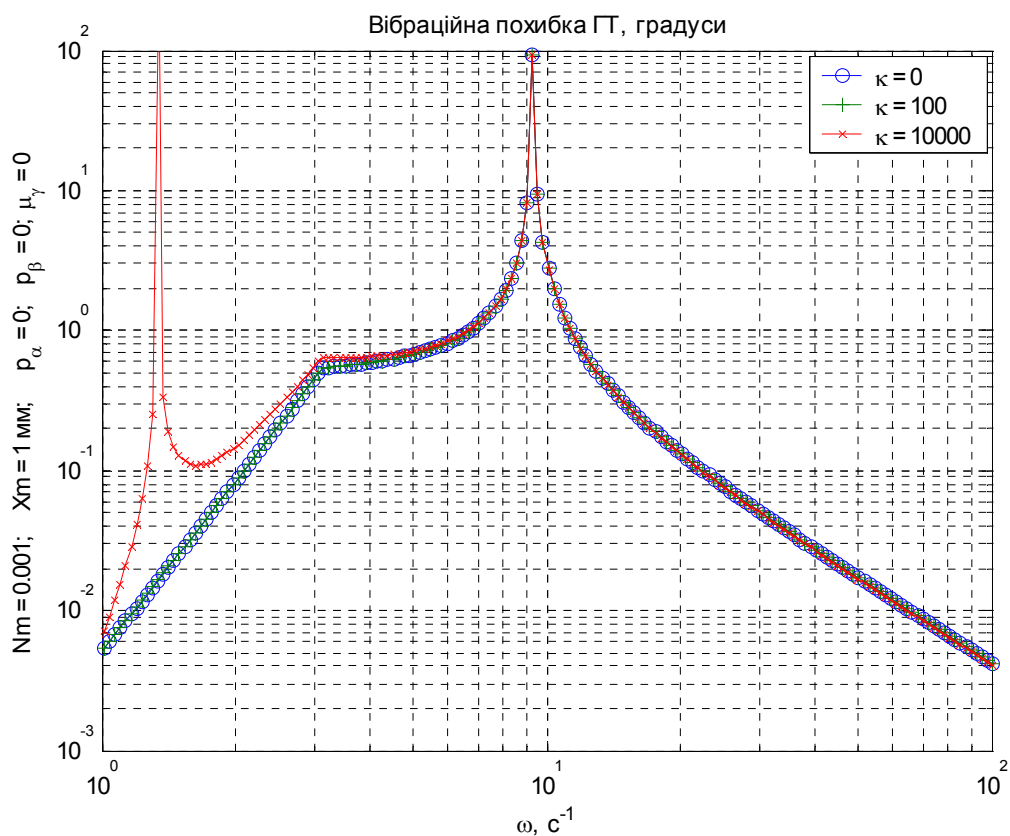


Рис. 2.7. Вібраційна похибка при $n_m = 0,001$ у відсутності демпфірування.

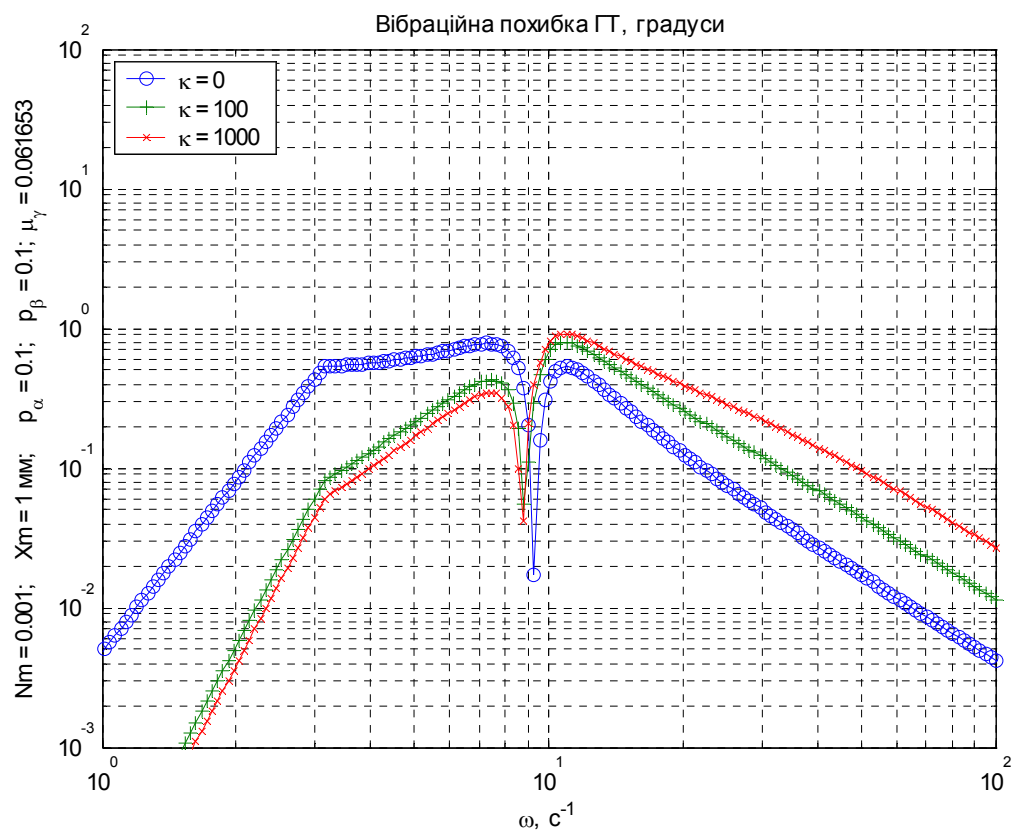


Рис. 2.8. Вібраційна похибка при $n_m = 0,001$ за наявності демпфірування.

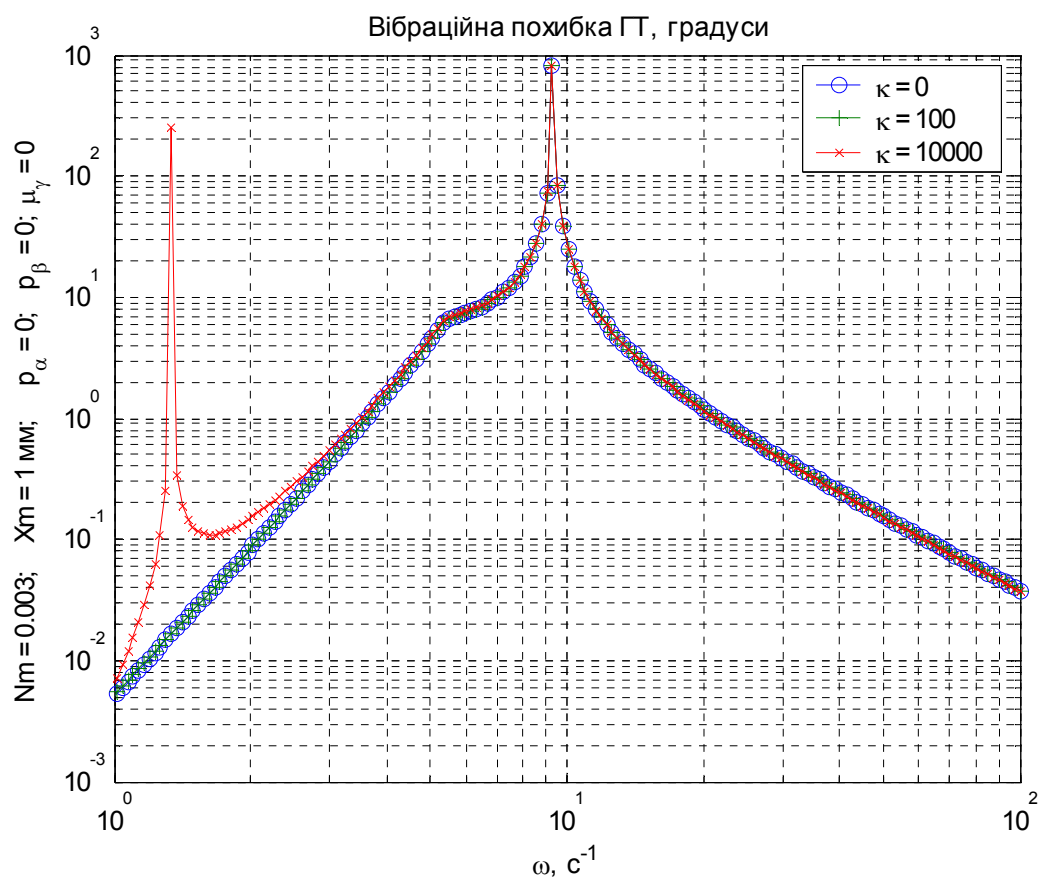


Рис. 2.9. Вібраційна похибка при $n_m = 0,003$ у відсутності демпфірування.

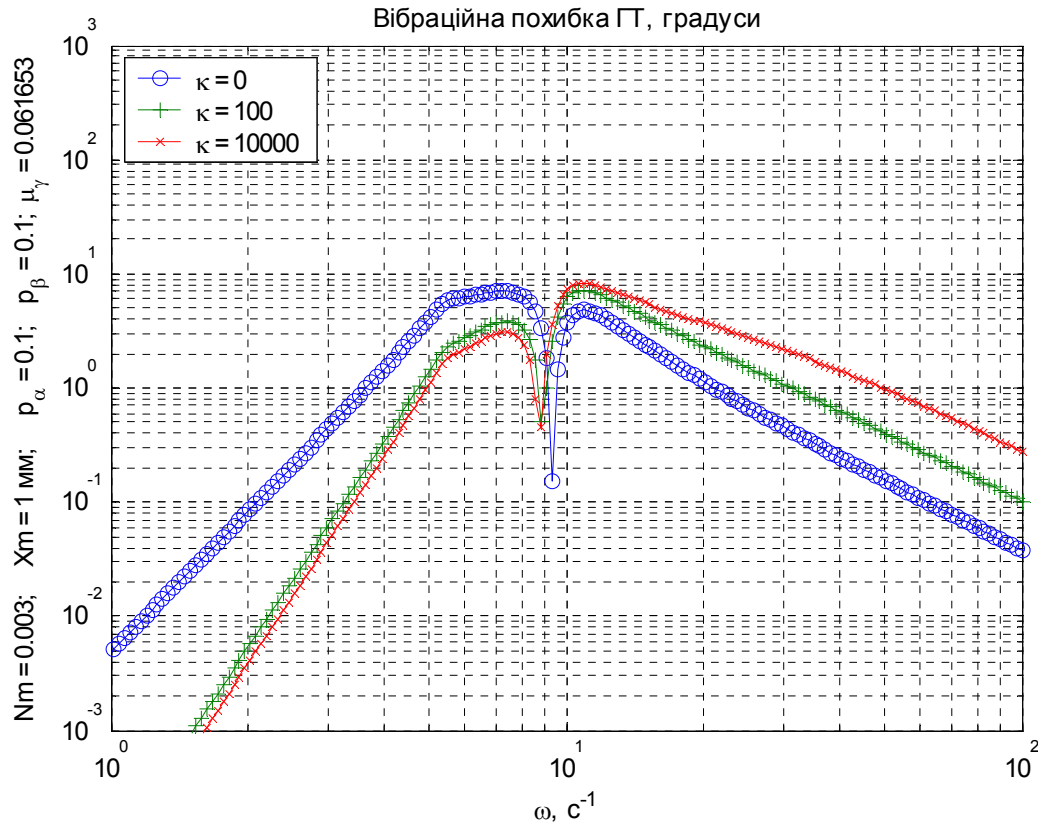


Рис. 2.10. Вібраційна похибка при $n_m = 0,003$ за наявності демпфірування.

Як видно з наведених графіків, компенсаційний зв'язок суттєво змінює динамічні властивості ГТ, впливаючи, насамперед, на частоти власних його коливань (відповідно і на величину резонансних піків в системі). Проте рівень вібраційної похибки при цьому змінюється мало. Деякого зменшення вібраційної похибки можна досягти, вводячи істотне демпфірування (наприклад, пропорційне коефіцієнту компенсаційного зв'язку). Проте рівень похибки в більш високочастотній області при цьому дещо зростає, але не перевищує максимального рівня на частотах, близьких до резонансу маятника чутливого елемента [76].

2.3.3. Аналіз вібраційної похибки при випадковій вібрації основи в площині горизонту.

Розглянемо динаміку гіротеодоліту при випадковій поступальній вібрації основи, а також визначимо загальні аналітичні залежності, що

визначають вібраційну похибку. Запишемо рівняння руху (2.10) – (2.12) у вигляді системи, знехтувавши складовими другого порядку мализни $(\alpha \cdot n_Z(t), \alpha \cdot n_X(t))$ в рівняннях руху за координатами β та γ [85]:

$$\begin{cases} H\dot{\beta} + (F_{KC} + f_\alpha)\dot{\alpha} + H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa) \cdot \alpha = mgl[\gamma \cdot n_X(t) + \beta \cdot n_Z(t)] \\ -H\dot{\alpha} + f_\beta \dot{\beta} + mgl\beta = -mgl \cdot n_X(t) + H\omega_3 \sin \varphi_g \\ T_\gamma^2 \ddot{\gamma} + 2\xi_\gamma T_\gamma \dot{\gamma} + \gamma = n_Z(t) \end{cases}, \quad (2.16)$$

де: T_γ , ξ_γ – стала часу та відносний коефіцієнт загасання коливань по куту γ :

$$T_\gamma = \frac{1}{\omega_\gamma} = \sqrt{\frac{J_X}{mgl}}, \quad \xi_\gamma = \mu_\gamma T_\gamma = \frac{f_\gamma}{2\sqrt{J_X mgl}}.$$

Перевантаження точки підвісу чутливого елементу гіртеодоліту $n(t)$ будемо вважати стаціонарним випадковим процесом. Експериментальні дослідження [93] доводять, що можна також вважати процес поступальної вібрації близьким до нормального, який повністю визначається математичним очікуванням $M[n(t)]$ і кореляційною функцією $K_n(\tau)$ [85]:

$$\begin{aligned} M[n(t)] &= 0, \\ K_n(\tau) &= \sigma_n^2 e^{-\mu_n |\tau|} \left(\cos \lambda_n \tau + \frac{\mu_n}{\lambda_n} \sin \lambda_n |\tau| \right), \end{aligned} \quad (2.17)$$

де σ_n^2 – дисперсія амплітуди перевантаження, λ_n – переважна частота поступальної вібрації, μ_n – коефіцієнт кореляційної функції, що характеризує нерегулярність вібрації.

Математичне очікування $M[n(t)]$ обрано рівним нулю виходячи з очевидного фізичного змісту вібраційного перевантаження. Кореляційній функції (2.17) відповідає спектральна щільність, яка характеризує розподіл інтенсивності коливань за частотою [85]:

$$S_n(\omega) = \frac{2\mu_n \sigma_n^2}{\pi} \frac{b_n^2}{\omega^4 + 2a_n \omega^2 + b_n^4}, \quad (2.18)$$

де $a_n = \mu_n^2 - \lambda_n^2$, $b_n^2 = \mu_n^2 + \lambda_n^2$.

Для визначення похибки гіртеодоліту в усталеному режимі при дії випадкової вібрації визначимо математичне очікування від першого рівняння системи (2.16) [85]:

$$M[\alpha(t)] = \frac{mgl}{H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa)} (M[\gamma(t) \cdot n_X(t)] + M[\beta(t) \cdot n_Z(t)]) \quad (2.19)$$

Відтак, вібраційна похибка буде пропорційна сумі кореляційних моментів, які визначають ступінь взаємозв'язку між проекціями перевантаження точки підвісу гіртеодоліту та коливаннями чутливого елемента по кутах β і γ [85].

Розглянемо першу складову в дужках в правій частині виразу (2.18):

$$M[\gamma(t) \cdot n_X(t)] = \cos(\varepsilon + \psi_0) M[\gamma(t) \cdot n(t)].$$

З третього рівняння системи (2.16), враховуючи $n_Z(t) = \sin(\varepsilon + \psi_0)n(t)$, отримаємо передатну функцію гіртеодоліту по куту γ [85]:

$$T_\gamma^2 p^2 \gamma(p) + 2\xi_\gamma T_\gamma p \gamma(p) + \gamma(p) = \sin(\varepsilon + \psi_0) n(p);$$

$$W_\gamma(p) = \frac{\gamma(p)}{n(p)} = \frac{\sin(\varepsilon + \psi_0)}{T_\gamma^2 p^2 + 2\xi_\gamma T_\gamma p + 1} \quad (2.20)$$

Отже, вихідна величина $\gamma(t)$, яка характеризує коливання чутливого елемента відносно головної осі гіроскопа, буде корельована з вхідною випадковою поступальною вібрацією $n(t)$. Для характеристики кореляційного зв'язку між $\gamma(t)$ і $n(t)$ введемо взаємну кореляційну функцію вихідного і вхідного сигналів [85]:

$$K_{\gamma n}(\tau) = M[\gamma(t) \cdot n(t + \tau)].$$

Для лінійної стаціонарної системи, з передатною функцією (2.20), взаємну спектральну щільність вихідної і вхідної змінної можна визначити через співвідношення [94]:

$$S_{\gamma n}(\omega) = W_\gamma(-j\omega) S_n(\omega),$$

де $W_\gamma(-j\omega) = \frac{\sin(\varepsilon + \psi_0)}{-T_\gamma^2 \omega^2 - j2\xi_\gamma T_\gamma \omega + 1}$ – комплексно-спряжена частотна передатна функція, $S_n(\omega)$ – спектральна щільність відповідно до (2.18)

Взаємна кореляційна функція $K_{\gamma n}(\tau)$ визначається за відомою взаємною спектральною щільністю $S_{\gamma n}(\omega)$ [85]:

$$K_{\gamma n}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\gamma n}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} W_\gamma(-j\omega) S_n(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega.$$

Якщо у виразі $K_{\gamma n}(\tau)$ покласти $\tau = 0$, отримаємо [85]:

$$M[\gamma(t) \cdot n(t)] = \sin(\varepsilon + \psi_0) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S_n(\omega)}{-T_\gamma^2 \omega^2 - j2\xi_\gamma T_\gamma \omega + 1} d\omega.$$

Таким чином [85]:

$$\begin{aligned} M[\gamma(t) \cdot n_X(t)] &= \frac{\sin 2(\varepsilon + \psi_0)}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{-T_\gamma^2 \omega^2 - j2\xi_\gamma T_\gamma \omega + 1} \cdot \frac{2\mu_n \sigma_n^2}{\pi} \cdot \frac{b_n^2}{\omega^4 + 2a_n \omega^2 + b_n^4} d\omega = \\ &= \frac{1}{2} \sin 2(\varepsilon + \psi_0) \frac{\omega_\gamma^2 (b_n^2 + \omega_\gamma^2 + 4\mu_n \mu_\gamma + 2a_n)}{(b_n^2 + \omega_\gamma^2 + 2\mu_n \mu_\gamma)^2 - 4\lambda_n^2 \omega_\gamma^2 (1 - \xi_\gamma^2)} \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

де $\omega_\gamma = \frac{1}{T_\gamma}$ – власна частота по куту γ , $\mu_\gamma = \frac{\xi_\gamma}{T_\gamma}$ – коефіцієнт загасання

коливань по куту γ .

Розглянемо другу складову в правій частині виразу (2.19) [85]:

$$M[\beta(t) \cdot n_Z(t)] = \sin(\varepsilon + \psi_0) M[\beta(t) \cdot n(t)].$$

Для визначення кореляційного зв'язку між вхідним вібраційним перевантаженням $n(t)$ та коливаннями чутливого елемента гіротеодоліта з кута $\beta(t)$ запишемо перші два рівняння з системи (2.16) в першому наближенні [85]:

$$\begin{cases} H\dot{\beta} + (F_{KC} + f_\alpha)\dot{\alpha} + H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa) \cdot \alpha = 0 \\ -H\dot{\alpha} + f_\beta \dot{\beta} + mgl\beta = -mgl \cos(\varepsilon + \psi_0) \cdot n(t) \end{cases}.$$

Звідки отримаємо передатну функцію [85]:

$$W_{\beta}(p) = \frac{\beta(p)}{n(p)} = \frac{-\cos(\varepsilon + \psi_0)(T_1 p + 1)}{T_{\alpha\beta}^2 p^2 + 2\xi_{\alpha\beta} T_{\alpha\beta} p + 1},$$

$$\text{де } T_1 = \frac{F_{KC} + f_{\alpha}}{k_{\alpha}}, \quad \xi_{\alpha\beta} = \frac{k_{\alpha} f_{\beta} + f_{\beta} \cdot mgl}{2T_{\alpha\beta}}, \quad T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{(F_{KC} + f_{\alpha})f_{\beta} + H^2}{k_{\alpha} mgl}},$$

$$k_{\alpha} = H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa).$$

Аналогічно як для кореляційного зв'язку між $n(t)$ і $\gamma(t)$, можна визначити взаємну кореляційну функцію для вхідного перевантаження $n(t)$ та кута $\beta(t)$ [85]:

$$K_{\beta n}(\tau) = M[\beta(t) \cdot n(t + \tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\beta n}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} W_{\beta}(-j\omega) S_n(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega.$$

Звідки при $\tau = 0$, отримаємо [85]:

$$M[\beta(t) \cdot n(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} W_{\beta}(-j\omega) S_n(\omega) d\omega = -\cos(\varepsilon + \psi_0) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(-jT_1\omega + 1)S_n(\omega)}{-T_{\alpha\beta}^2\omega^2 - j2\xi_{\alpha\beta}T_{\alpha\beta}\omega + 1} d\omega.$$

Тоді,

$$\begin{aligned} M[\beta(t) \cdot n_Z(t)] &= \\ &= -\frac{1}{2} \sin 2(\varepsilon + \psi_0) \frac{2d_1 b_n^2 (\mu_n + \mu_{\alpha\beta}) + \omega_{\alpha\beta}^2 (\omega_{\alpha\beta}^2 + b_n^2 + 4\mu_n \mu_{\alpha\beta} + 2a_n)}{(b_n^2 + \omega_{\alpha\beta}^2 + 2\mu_n \mu_{\alpha\beta})^2 - 4\lambda_n^2 \omega_{\alpha\beta}^2 (1 - \xi_{\alpha\beta}^2)} \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

де $\omega_{\alpha\beta} = \frac{1}{T_{\alpha\beta}}$ – частота і $\mu_{\alpha\beta} = \frac{\xi_{\alpha\beta}}{T_{\alpha\beta}}$ – коефіцієнт загасання прецесійних

коливань.

Підставимо вирази (2.21) і (2.22) у рівняння (2.19) [85]:

$$M[\alpha(t)] = \frac{1}{2} \frac{mgl \cdot \sigma_n^2}{H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa)} [N_{\gamma} + N_{\beta}] \sin 2(\varepsilon + \psi_0), \quad (2.23)$$

$$\text{де } N_{\gamma} = \frac{\omega_{\gamma}^2 (b_n^2 + \omega_{\gamma}^2 + 4\mu_n \mu_{\gamma} + 2a_n)}{(b_n^2 + \omega_{\gamma}^2 + 2\mu_n \mu_{\gamma})^2 - 4\lambda_n^2 \omega_{\gamma}^2 (1 - \xi_{\gamma}^2)},$$

$$N_{\beta} = -\frac{2T_1 b_n^2 (\mu_n + \mu_{\alpha\beta}) + \omega_{\alpha\beta}^2 (\omega_{\alpha\beta}^2 + b_n^2 + 4\mu_n \mu_{\alpha\beta} + 2a_n)}{(b_n^2 + \omega_{\alpha\beta}^2 + 2\mu_n \mu_{\alpha\beta})^2 - 4\lambda_n^2 \omega_{\alpha\beta}^2 (1 - \xi_{\alpha\beta}^2)}.$$

Отже, математичне очікування вібраційної похибки гіротеодоліту при випадковій вібрації $M[\alpha(t)]$ буде залежати від багатьох факторів. По-перше, за аналогією з регулярною вібрацією (див. (2.15)), середнє значення залежатиме від напрямку поступальної випадкової вібрації, і буде досягати максимуму при $\varepsilon + \psi_0 = 45^\circ$. По-друге, математичне очікування $M[\alpha(t)]$ залежатиме від дисперсії амплітуди перевантаження σ_n^2 , аналогічно квадрату амплітуди регулярної вібрації. Нарешті, воно буде також залежати від переважної частоти та ступеня нерегулярності вхідної випадкової вібрації, а також від характеристик гіротеодоліту, як динамічної системи. Слід зауважити, що при розрахунку похибки на практиці в більшості випадків можна знехтувати складовою N_β у порівнянні з N_γ , оскільки вони відрізняються на два порядки, при переважній частоті випадкової вібрації λ_n більше 1 Гц [85].

2.4. Обґрунтування шляхів підвищення точності гіротеодоліта

2.4.1. Аналіз можливостей застосування методів підвищення точності

Розглянемо можливості застосування методів підвищення точності гіротеодолітів для зменшення вібраційної похибки. Аналіз виразів (2.15) і (2.23) показує, що можна виділити наступні групи факторів, що будуть впливати на величину вібраційної похибки.

1. Конструктивні параметри приладу, до яких відносяться маса ЧЕ, маятниковість, моменти інерції ЧЕ, кінетичний момент гіроскопа, коефіцієнти демпфірування коливань, коефіцієнт компенсаційного зворотного зв'язку. Параметри даної групи можна вважати відомими з високою точністю, крім того існує можливість їх зміни для зменшення вібраційної похибки. Наприклад, якщо відомі власні частоти об'єкту, на

якому планується встановлювати гіротеодоліт, можна підібрати постійні часу $T_{\alpha\beta}$ і T_γ таким чином, щоб зменшити вплив резонансних піків амплітудно-частотних характеристик на власних частотах коливань, що будуть збуджуватись внаслідок вібрації основи.

Виходячи з аналізу формул (2.15) і (2.23) очевидно, що для підвищення точності необхідно збільшувати кінетичний момент гіроскопа H , а також коефіцієнт передачі компенсаційного зворотного зв'язку. Збільшення H буде приводити до збільшення маси та габаритів ЧЕ та приладу в цілому, що значно ускладнює конструкцію, а, з іншого боку, наявність в чисельнику тих самих формул маси чутливого елементу m , означає, що досягти суттєвого зменшення похибки таким шляхом неможливо. Крім того при проектуванні гіротеодолітів як правило використовуються стандартні гіромотори з кінетичними моментами 0.1 Нмс, 0.4 Нмс та 1 Нмс. Збільшення коефіцієнту передачі зворотного зв'язку обмежується, в основному, крутизною характеристики датчика моменту, який використовується для створення компенсуючого моменту, тобто для збільшення k також необхідно збільшувати габарити і масу приладу.

2. Параметри руху основи, на якій встановлено прилад – амплітуда і частота перевантаження точки підвісу, або середнє квадратичне відхилення і переважна частота для випадкової вібрації. Параметри даної групи є невідомими, але можуть бути виміряні за допомогою встановлення додаткових датчиків, наприклад акселерометрів, інформація з яких може використовуватись при роботі систем активного віброзахисту.

3. Взаємне розташування напрямку вібрації основи та напрямку на північ. Параметри ε та ψ_0 є невідомими, та не можуть бути виміряні, оскільки пов'язані з вихідним сигналом гіротеодоліта. Функція $\sin 2(\varepsilon + \psi_0)$ є обмеженою, отже з точки зору методів автокомпенсації та конструктивного і технологічного вдосконалення приладу можна розглядати її максимальне значення у формулах (2.15) і (2.23). Водночас саме ці параметри обмежують

використання отриманих залежностей вібраційної похибки для методу алгоритмічної компенсації.

З аналізу літературних джерел відомо, що існують інші форми подання вібраційної похибки [41, 42], які є більш зручними для реалізації методів компенсації похибок:

$$\sin\langle\alpha\rangle = \frac{\langle\dot{\alpha}\gamma\rangle}{\omega_3 \cos\varphi_g}, \quad (2.24)$$

$$\sin\langle\alpha\rangle = \frac{-\langle\alpha\dot{\gamma}\rangle}{\omega_3 \cos\varphi_g}. \quad (2.25)$$

Тобто, якщо відомі значення $\dot{\alpha}$ і γ , або $\dot{\gamma}$ та α можливо обчислити вібраційну похибку за відповідною формулою та врахувати її у вихідному сигналі приладу як поправку. Величина кутового відхилення ЧЕ від площини меридіану як правило є відомою, оскільки кут α безпосередньо вимірюється за допомогою оптичного датчика, що встановлюється на слідкуючому корпусі приладу. Кутову швидкість обертання ЧЕ в азимуті $\dot{\alpha}$ можна визначити за відомим кутом α . Знаходження інших необхідних параметрів руху чутливого елементу є набагато більш складною задачею, оскільки рух чутливого елементу навколо головної осі гіроскопічно не пов'язані з коливаннями по кутах α і β .

2.4.2. Моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за умов гармонічної вібрації основи.

Проаналізуємо залежність вібраційної похибки від величини коефіцієнту передачі компенсаційного зворотного зв'язку, оскільки в більшості попередніх досліджень вібраційної стійкості гірокомпасів та гіртеодолітів [40-44] розглядались прилади з безпосереднім вимірюванням азимуту.

Для моделювання будемо використовувати програмну модель, яка описана в п. 2.1.4. Виходячи з аналізу амплітудно-частотних характеристик,

найбільші величини вібраційної похибки будуть спостерігатись на частотах, близьких до частоти маятникових коливань чутливого елементу, яка, для прийнятих параметрів приладу $m=1$ кг, $l=0.1$ м, $J_x=1.13 \cdot 10^{-2}$ кгм², складає:

$$\omega_\gamma = \sqrt{\frac{mgl}{J_X}} = 9,3 \text{ с}^{-1}.$$

Отже найбільш несприятливими для роботи гіротеодоліта будуть вібрації з частотами 1–2 Гц, тому приймемо для моделювання значення амплітуди перевантаження $n_m=0.001$, а частоту $\omega=9 \text{ с}^{-1}$. Для спрощення аналізу та інтерпретації результатів моделювання вважатимемо відхилення нуля відлікової системи приладу $\psi_0=0$. В такому випадку кут α визначатиме похибку вимірювання азимуту. Кут нахилу лінії вібрації до площини меридіану оберемо $\varepsilon=45^\circ$, тобто візьмемо максимальне значення функції $\sin 2(\varepsilon + \psi_0)$. Окрім вказаних параметрів приладу задамо в моделі $H=0.4$ Нмс, $J_z=1.13 \cdot 10^{-2}$ кгм², $J_Y=4 \cdot 10^{-4}$ кгм², $f_\alpha=0.004$ Нмс, $f_\beta=0$, $f_\gamma=0$.

На рис. 2.11 наведено результати моделювання при $\kappa=0$. Розраховане значення вібраційної похибки за формулою (2.15) складає $\langle \alpha \rangle_p = 7.30136^\circ$, а значення отримане в результаті моделювання $\langle \alpha \rangle_m = 7.04919^\circ$.

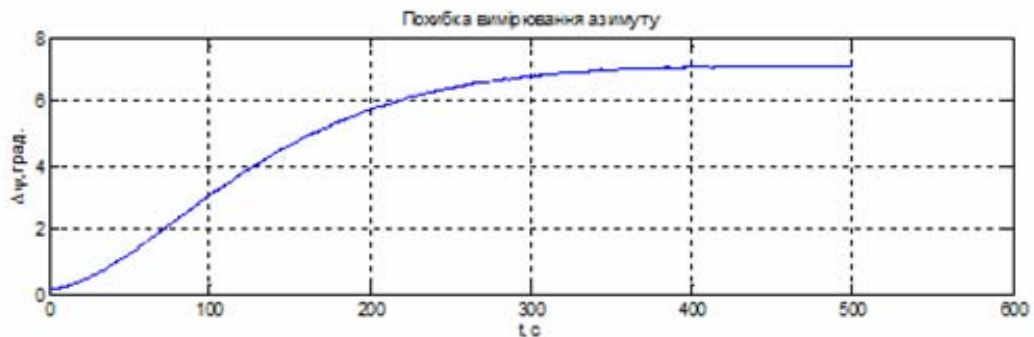


Рис. 2.11. Моделювання вібраційної похибки при $\kappa=0$.

На рис. 2.12 подано результати моделювання при $\kappa = 10$. Розраховане значення вібраційної похибки за формулою (2.15) складає $\langle \alpha \rangle_p = 7.30136^\circ$, а значення отримане в результаті моделювання $\langle \alpha \rangle_m = 7.30375^\circ$.

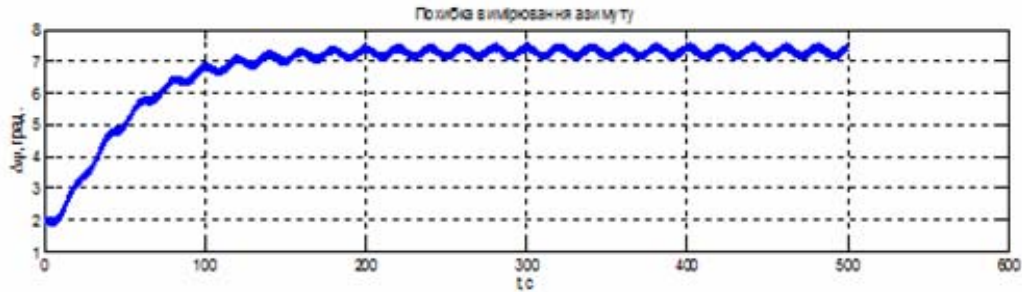


Рис. 2.12. Моделювання вібраційної похибки при $\kappa = 10$.

На рис. 2.13 представлено результати моделювання при $\kappa = 100$. Розраховане значення вібраційної похибки за формулою (2.15) складає $\langle \alpha \rangle_p = 7.30136^\circ$, а значення отримане в результаті моделювання $\langle \alpha \rangle_m = 7.31246^\circ$.

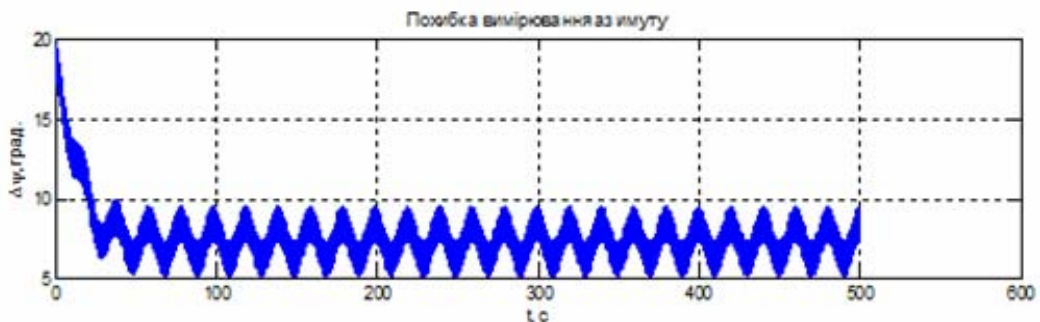


Рис. 2.13. Моделювання вібраційної похибки при $\kappa = 100$.

Результати моделювання представлені на рис 2.11 - рис. 2.13 свідчать про відповідність програмної моделі при гармонічній вібрації основи даним аналітичних розрахунків вібраційної похибки, що може досягати значної величини (одиниць-десятків градусів) в частотній області, яка близька до резонансної частоти маятникових коливань ЧЕ.

Розглянемо можливості використання методу алгоритмічної компенсації для зменшення вібраційної похибки ГТ за формулами (2.24) та

(2.25) шляхом обчислення постійної складової похибки за результатами моделювання по останнім точкам та врахування отриманих значень у вихідному сигналу приладу.

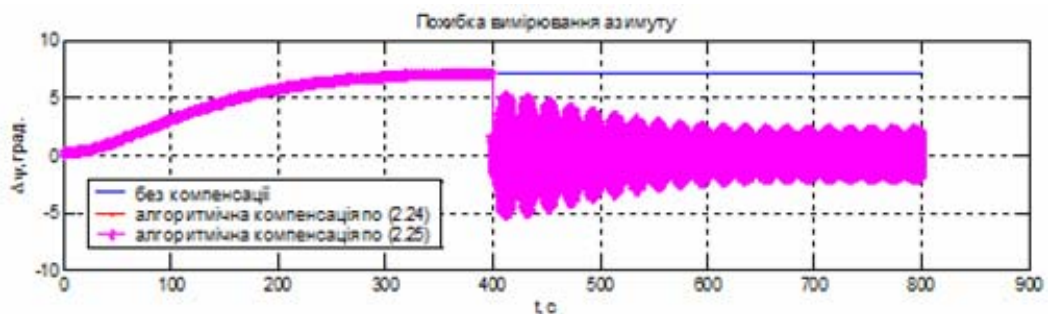
Врахуємо також, що при роботі гіртеодоліта в реальних умовах експлуатації вихідний сигнал, який знімається у вигляді напруги на обмотках датчика моменту компенсаційного зворотного зв'язку, пропускають через аперіодичний фільтр другого порядку з великою постійною часу:

$$W(p) = \frac{1}{(T_{\phi}p + 1)^2}, \quad (2.26)$$

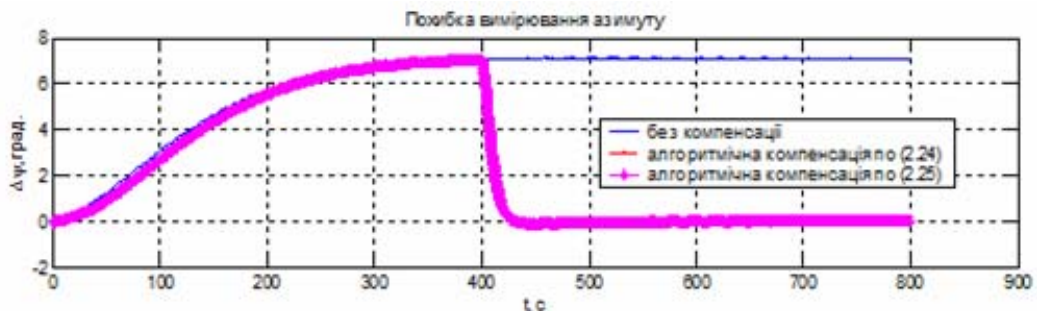
де постійна часу фільтра $T_{\phi} = 1..5$ с.

При моделюванні компенсації вібраційної похибки ГТ параметри приладу та поступальної вібрації основи залишимо незмінними, та розглянемо різні значення коефіцієнта компенсаційного зв'язку.

Результати моделювання алгоритмічної компенсації при використанні формул (2.24) та (2.25) для випадку $\kappa = 0$ представлені на рис. 2.13, $\kappa = 10$ - на рис. 2.14, та $\kappa = 100$ - на рис. 2.15

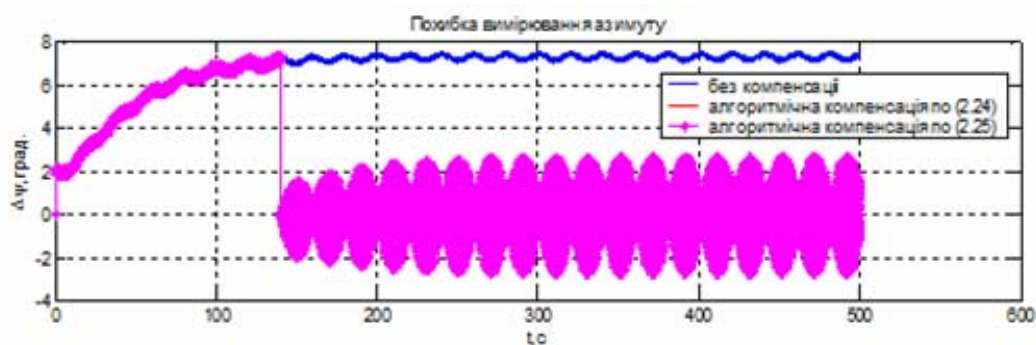


а) без використання фільтра

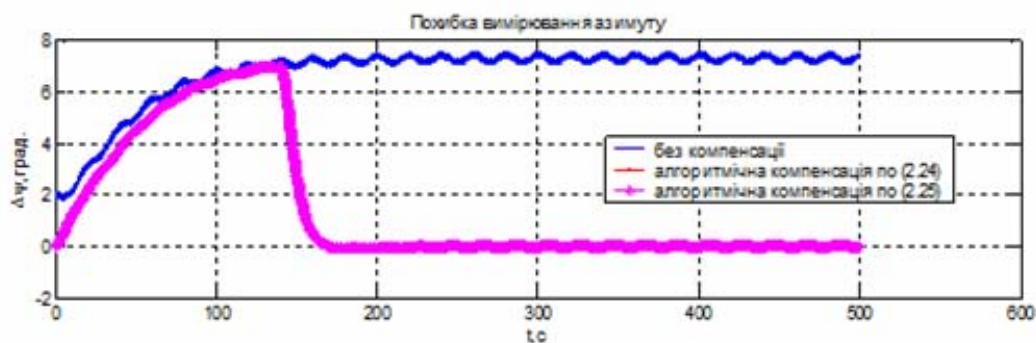
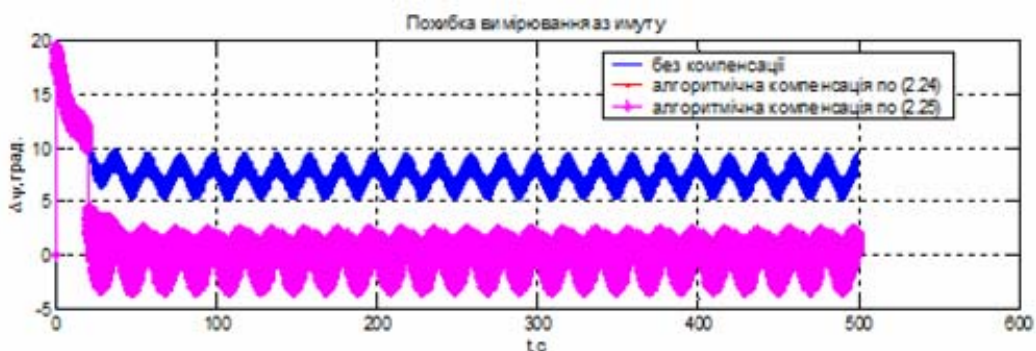


б) з фільтром (2.26) $T_{\phi} = 5$ с.

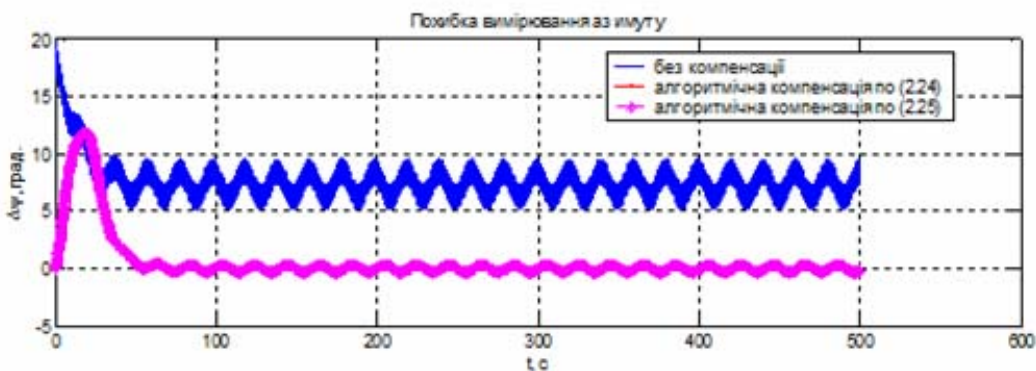
Рис. 2.14. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 0$.



а) без використання фільтра

б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5$ с.Рис. 2.15. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 10$.

а) без використання фільтра,

б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5$ с.Рис. 2.16. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 100$.

Відповідно до отриманих результатів (рис. 2.14 - 2.16) використання фільтра (2.26) дозволяє значно зменшити амплітуду вихідного сигналу до величин одиниць кутових хвилин. Також можна відзначити, що за результатами моделювання при алгоритмічній компенсації похибки, що виникає при гармонічній поступальній вібрації, за різними формулами (2.24) та (2.25) результати повністю збігаються (графіки накладаються).

Результати моделювання показують, що при використанні фільтрації вихідного сигналу результати алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за формулами (2.24) та (2.25) мають приблизно однакову точність.

2.4.3. Моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за умов випадкової вібрації основи.

При моделюванні динаміки гіротеодоліту за умов випадкової вібрації, перш за все необхідно сформулювати випадковий процес $n(t)$, який має нульове середнє значення та кореляційну функцію, що описується виразом (2.17). В нашому випадку використаємо формувальний фільтр, який описується диференціальним рівнянням [85]:

$$\frac{d^2 n(t)}{dt^2} + 2\mu_n \frac{dn(t)}{dt} + b_n^2 n(t) = \sqrt{\frac{2\mu_n b_n^2}{\pi}} \sigma_\zeta \zeta(t), \quad (2.27)$$

де σ_ζ – середньоквадратичне відхилення білого шуму $\zeta(t)$, $b_n^2 = \mu_n^2 + \lambda_n^2$, λ_n – переважна частота поступальної вібрації, μ_n – коефіцієнт кореляційної функції, що характеризує нерегулярність вібрації

Для моделювання використовуватимемо програмну модель в якій реалізовано систему рівнянь (2.16), що доповнена рівнянням формуального фільтра (2.27). Вихідний сигнал ГТ будемо як і в п. 2.3.2 пропускати через фільтр (2.26), Simulink-модель якого представлена на рис. 2.17.

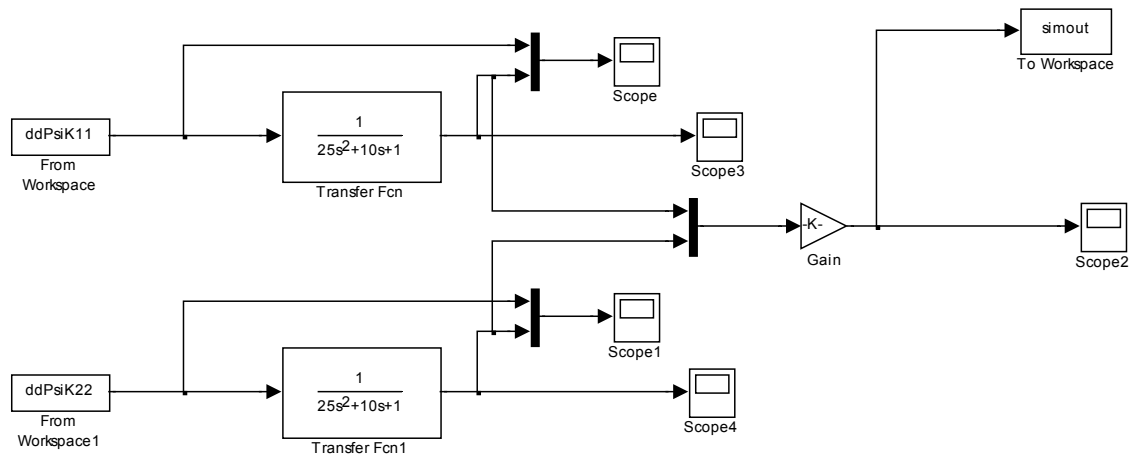
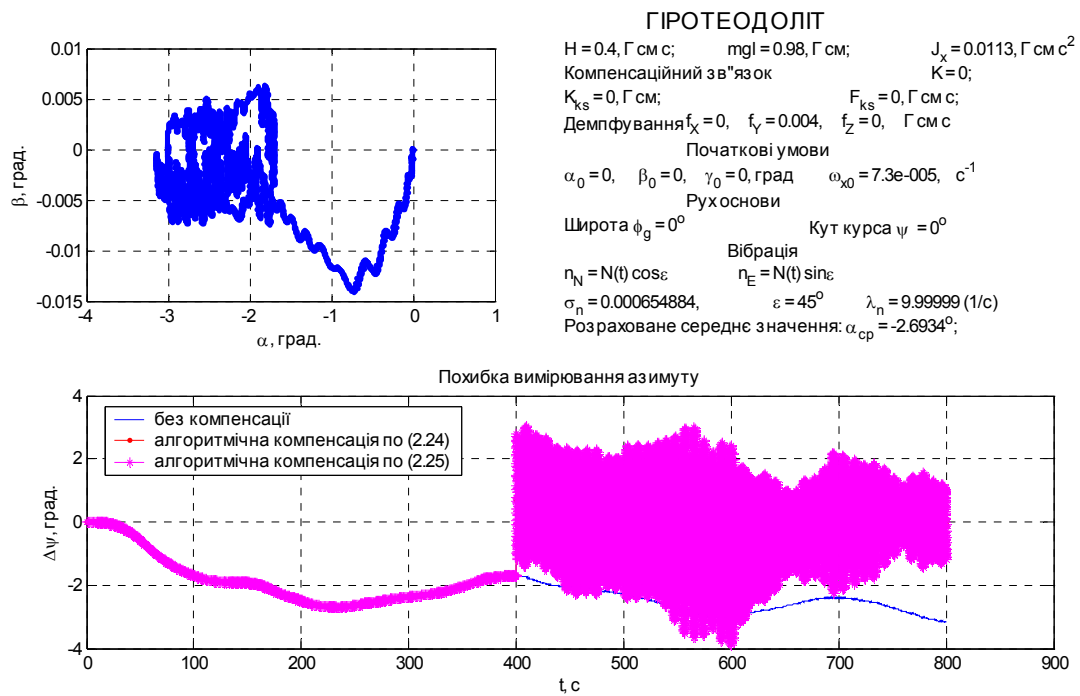


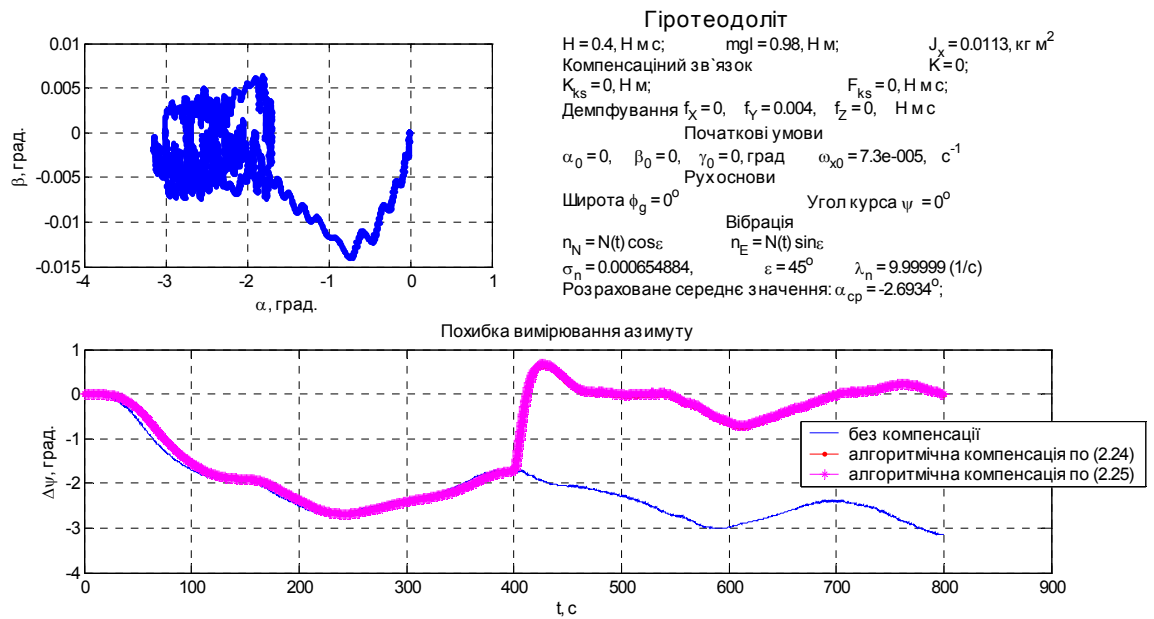
Рис. 2.17. Simulink-модель фільтра вихідного сигналу (2.27).

Результати моделювання алгоритмічної компенсації представлені на рис. 2.18-2.20. Параметри приладу залишені незмінними (див. п.2.3.2).



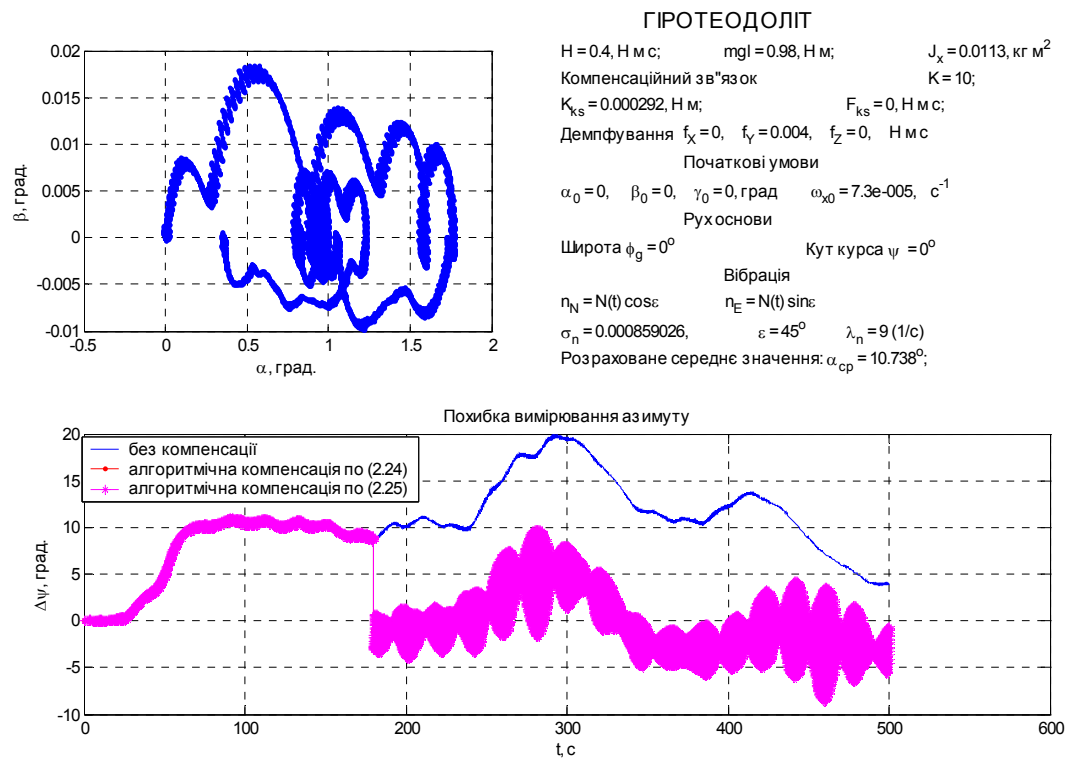
а) без використання фільтра

Рис. 2.18. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 0$.



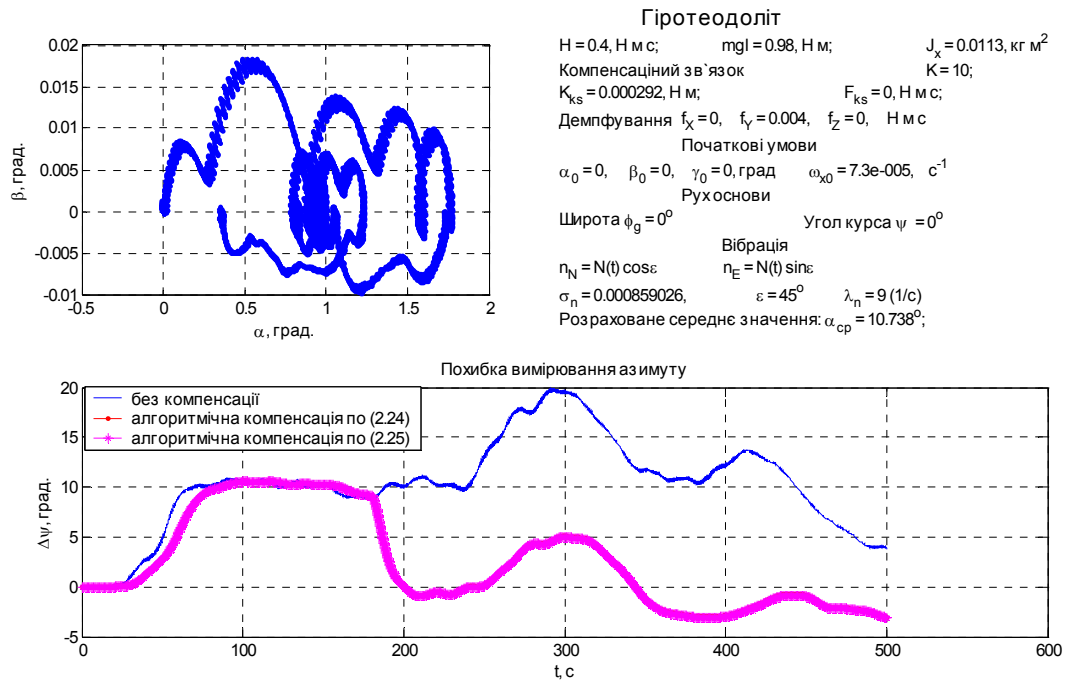
б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5 \text{ с.}$

Рис. 2.18. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 0$.



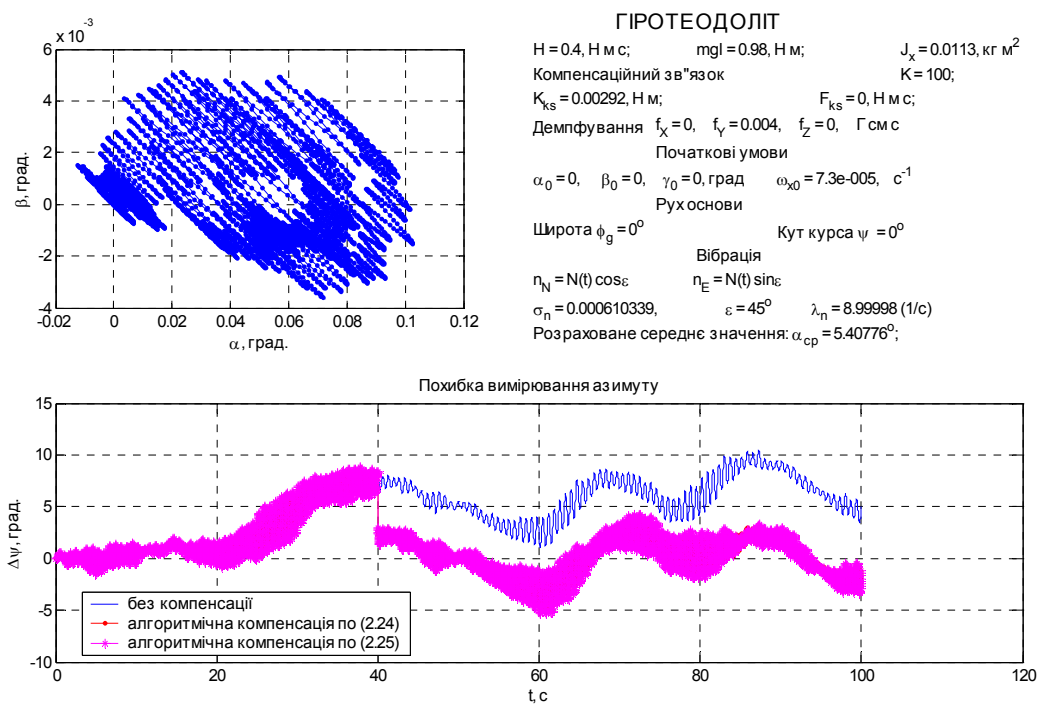
а) без використання фільтра

Рис. 2.19. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 10$.



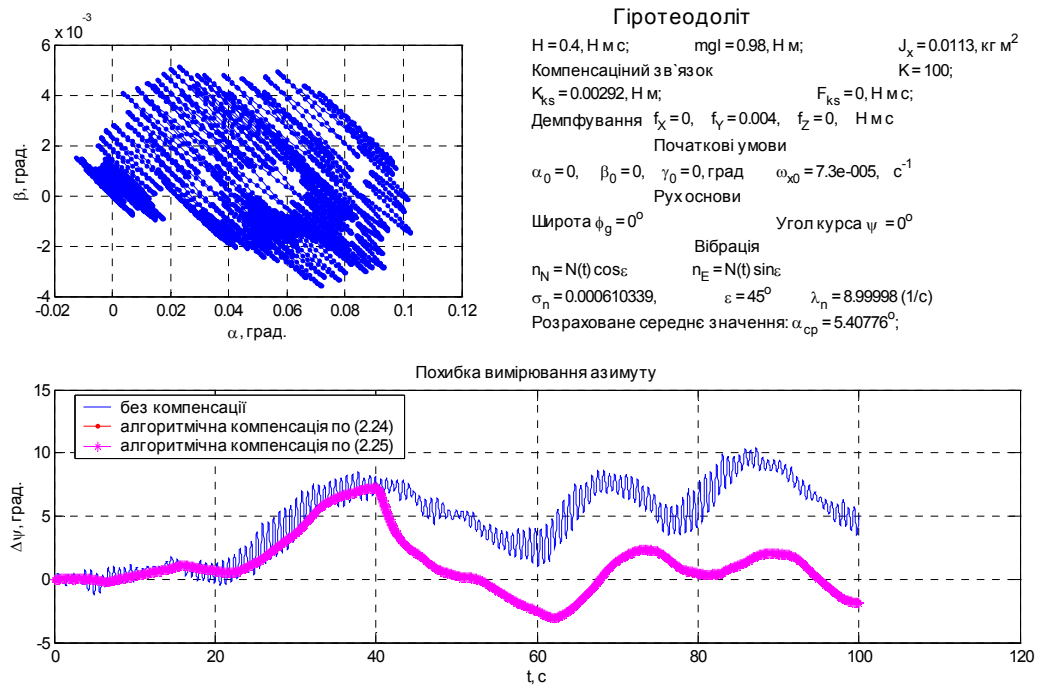
б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5 \text{ с}.$

Рис. 2.19. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 10$.



а) без використання фільтра

Рис. 2.20. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 100$.



б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5 \text{ с}.$

Рис. 2.20. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 100$.

Як показали результати моделювання при випадковій вібрації у вихідному сигналі ГТ присутня значна за величиною низькочастотна складова, яка проходить через фільтр (2.26). Незважаючи на цей факт слід відзначити, що метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки і в такому випадку зменшує сталу складову вібраційної похибки.

Отримані в даному розділі результати опубліковані в роботах [75, 76, 80-82].

Висновки до розділу 2

1. Розроблено і перевірено на адекватність комплекс комп'ютерних програмних засобів для моделювання руху чутливого елементу гіротеодоліту, який дозволяє дослідити вплив різного виду поступальної вібрації основи та особливості роботи приладу в компенсаційному режимі.

2. Проведено моделювання (за створеним програмним комплексом) роботи приладу при гармонічно змінюваній та випадковій поступальній

вібрації основи. Результати моделювання показали повну їх відповідність теоретично відомим особливостям руху гіротеодоліту за аналогічних умов.

3. Запропоновано шляхи здійснення алгоритмічної компенсації вібраційної похибки ГТ.

4. За допомогою програмного комп'ютерного моделювання доведено, що алгоритмічна компенсація є одним з ефективних і перспективних засобів підвищення точності ГТ за вібрації основи.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОМПЕНСАЦІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ПОХИБКИ

3.1. Метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки по додатковій інформації про рух чутливого елемента гіротеодоліта в азимуті

Як показано в попередньому розділі за допомогою методів компенсації похибок можна досягти суттєвого зменшення величини вібраційної похибки, що виникає внаслідок поступальних вібрацій основи. Для реалізації алгоритмічної компенсації відповідно до виразів (2.25) та (2.26) необхідно вимірювати коливання чутливого елемента навколо головної осі гіроскопа і кутову швидкість чутливого елемента навколо вертикальної осі. Розглянемо методи та засоби, що можуть бути використані для визначення додаткових параметрів руху чутливого елемента гіротеодоліта.

3.1.1. Чисельне диференціювання вихідного сигналу датчика кута

В сучасних конструкціях гіротеодолітів і гірокомпасів зазвичай реалізується компенсаційний метод вимірювання, який передбачає вимірювання відхилення ЧЕ в азимуті з високою точністю [3, 10, 11]. Для цього використовують фотоелектричні датчики кута автоколіматорного типу, які встановлюються на слідкуючому корпусі і вісь чутливості яких спрямована по нормалі до дзеркала, встановленого на ЧЕ. При повороті чутливого елемента навколо вертикальної осі на кут α на виході датчика з'являється напруга, пропорційна куту відхилення, яка подається до блоку керування, де формується сигнал зворотного зв'язку, що подається у вигляді напруги на датчик моменту.

Якщо відомі значення залежності $\alpha(t)$ в моменти часу t_i , що знімаються на виході датчика кута, то можна визначити значення похідної функції $\dot{\alpha}(t)$ за відомою формулою [95]:

$$\dot{\alpha}(t_i) = \frac{\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}.$$

Отже для алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за формулою (2.25) можна використати дані чисельного диференціювання $\dot{\alpha}(t_i)$ вимірних значень кута $\alpha(t_i)$. В попередньому розділі для моделювання використовувались дані, які взяті безпосередньо з моделі ГТ після інтегрування рівнянь.

На рис. 3.1 і 3.2 представлено результати моделювання компенсації похибки за даними чисельного диференціювання у порівнянні з компенсацією за точними значеннями $\dot{\alpha}(t)$ для випадків регулярної вібрації з амплітудою $n_m = 0.001$ і частотою $\omega = 9 \text{ c}^{-1}$ (рис.3.1), і випадкової – з СКВ $\sigma_n = 0.0006$ і переважною частотою $\lambda_n = 9 \text{ c}^{-1}$ (рис.3.2). Параметри приладу взяті такими самими, як описані в п.2.3.2, коефіцієнт компенсаційного зв'язку прийнятий $\kappa = 10$.

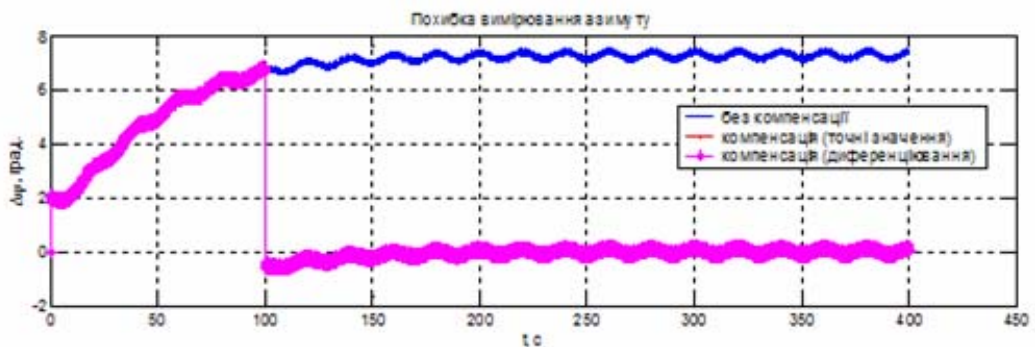


Рис. 3.1. Моделювання компенсації похибки при гармонічній вібрації основи.

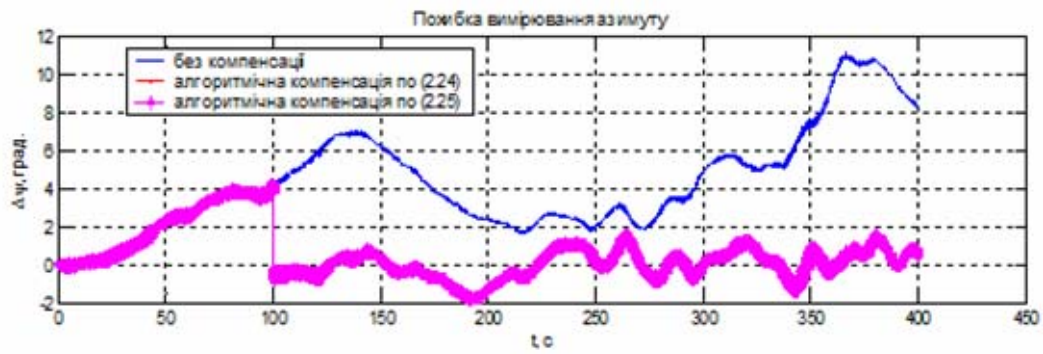


Рис. 3.2. Моделювання компенсації похибки при випадковій вібрації основи.

Як видно з наведених результатів моделювання при гармонічній вібрації з амплітудою $n_m = 0.001$ і частотою $\omega = 9 \text{ с}^{-1}$ середнє значення вібраційної похибки складає $\langle \alpha \rangle = 7.3^\circ$, після компенсації середнє значення залишкової похибки $\langle \alpha \rangle_K = 2.3'$, тобто вплив вібраційної похибки на точність ГТ зменшився приблизно на два порядки.

3.1.2. Визначення оцінок додаткових параметрів руху ЧЕ

Розглянемо можливості визначення оцінки кутової швидкості чутливого елемента навколо вертикальної осі, шляхом синтезу спостережувача.

В якості вимірюваної величини приймаємо кут α відхилення головної осі гіроскопа від нуля відлікової системи приладу. Математичну модель гіртеодоліта запишемо на підставі лінеаризованих рівнянь руху за координатами α і β (2.13), додавши у рівняння моменти сил інерції обертального прискорення чутливого елемента ГТ [77]:

$$\begin{cases} J_Y \ddot{\alpha} + H \dot{\beta} + (F_{KC} + f_\alpha) \dot{\alpha} + H \omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa) \cdot \alpha = \\ = mgl[\gamma \cdot n_X(t) + \beta \cdot n_Z(t)] \\ J_Z \ddot{\beta} - H \dot{\alpha} + f_\beta \dot{\beta} + mgl\beta = mgl \cdot n_X(t) + H \omega_3 \sin \varphi_g \end{cases} \quad (3.1)$$

де J_Y, J_Z – моменти інерції чутливого елемента відносно відповідних осей.

В рівняннях (3.1) припускається, що $\psi_0 = 0$, $\omega_{pr} \gg \omega_3 \cos \varphi_g$.

Позначимо змінні стану [77]:

$$\begin{cases} x_1 = \alpha \\ x_2 = \dot{\alpha} \\ x_3 = \beta \\ x_4 = \dot{\beta} \end{cases},$$

та запишемо систему рівнянь вільного руху ЧЕ, що відповідає рівнянням (3.1) у формі простору станів [77],

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases}, \quad (3.2)$$

де \mathbf{X} – вектор стану, \mathbf{A} – матриця стану, \mathbf{Y} – вектор вимірювання, \mathbf{C} – матриця вимірювання:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_\alpha}{J_y} & -\frac{f_\alpha + F_{KC}}{J_y} & 0 & -\frac{H}{J_y} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{H}{J_z} & -\frac{mgl}{J_z} & -\frac{f_\beta}{J_z} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Отже, вектор вимірювання \mathbf{Y} складається з одного елемента – вимірюваного кута α . Запишемо матрицю спостережуваності [77]:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T : \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^2 \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^3 \mathbf{C}^T \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{k_\alpha}{J_y} & \frac{k_\alpha(f_\alpha + F_{KC})}{J_y^2} \\ 0 & 1 & -\frac{f_\alpha + F_{KC}}{J_y} & \left(-\frac{k_\alpha}{J_y} + \frac{(f_\alpha + F_{KC})^2}{J_y^2} - \frac{H^2}{J_y J_z} \right) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{mgl \cdot H}{J_y J_z} \\ 0 & 0 & -\frac{H}{J_y} & \frac{H(f_\alpha + F_{KC})}{J_y^2} \end{bmatrix}.$$

Очевидно, що визначник $\det \mathbf{Q} \neq 0$, і, відповідно, ранг матриці спостережуваності дорівнює кількості змінних стану об'єкта $\text{rank} \mathbf{Q} = 4$, отже, за виміряним вихідним вектором \mathbf{Y} можна оцінити всі змінні стану. Спостережувач при відсутності зовнішніх збурень описується рівнянням [96]:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{Y}, \quad (3.3)$$

де $\hat{\mathbf{X}}$ – вектор оцінок змінних стану, \mathbf{K} – матриця коефіцієнтів спостережувача:

$$\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \hat{x}_3 \quad \hat{x}_4]^T;$$

$$\mathbf{K} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4]^T.$$

Коефіцієнти матриці \mathbf{K} вибираються таким чином, щоб власні значення спостережувача, який описується рівнянням (3.3), розташовувалися в заданих точках на комплексній площині. Характеристичне рівняння спостережувача має вигляд [77]:

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C}) = 0;$$

де \mathbf{E} – одинична матриця розмірності, що відповідає розмірності матриці стану \mathbf{A} , p – оператор Лапласа.

Отже, задача синтезу спостережувача зводиться до визначення матриці коефіцієнтів \mathbf{K} [77].

3.1.3. Синтез спостережувача

Оберемо біноміальний розподіл коренів характеристичного рівняння [96], тоді повинна виконуватися рівність:

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C}) = (p + \omega_0)^4, \quad (3.4)$$

тобто характеристичне рівняння спостережувача буде мати один від'ємний дійсний корінь $p = -\omega_0$ кратності 4. Підставляючи матриці \mathbf{A} , \mathbf{K} , \mathbf{E} та \mathbf{C} в ліву частину рівняння (3.4) отримаємо [77]:

$$\begin{aligned} \det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C}) = & p^4 + \left(\frac{(F_{KC} + f_\alpha)J_z + f_\beta J_y}{J_y J_z} + k_1 \right) p^3 + \\ & + \left(\frac{(F_{KC} + f_\alpha)f_\beta + J_y mgl + k_\alpha J_z + H^2 + k_1((F_{KC} + f_\alpha)J_z + f_\beta J_y)}{J_y J_z} + k_2 \right) p^2 + \\ & + \frac{(F_{KC} + f_\alpha)mgl + k_\alpha f_\beta + k_1((F_{KC} + f_\alpha)f_\beta + H^2 + J_y mgl) + k_2 f_\beta J_y - k_4 J_z H}{J_y J_z} p + \\ & + \frac{k_\alpha mgl + k_1(F_{KC} + f_\alpha)mgl + k_2 J_y mgl + k_3 H \cdot mgl}{J_y J_z}. \end{aligned}$$

Права частина виразу (3.4):

$$(p + \omega_0)^4 = p^4 + 4\omega_0 p^3 + 6\omega_0^2 p^2 + 4\omega_0^3 p + \omega_0^4.$$

Прирівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях p в лівій і правій частині виразу (3.4), можна визначити коефіцієнти матриці \mathbf{K} [77]:

$$\begin{aligned} k_1 = & 4\omega_0 - \frac{(F_{KC} + f_\alpha)}{J_y} - \frac{f_\beta}{J_z}; \\ k_2 = & 6\omega_0^2 - 4\omega_0 \frac{(F_{KC} + f_\alpha)}{J_y} + \frac{(F_{KC} + f_\alpha)^2}{J_y^2} - \frac{4\omega_0 f_\beta}{J_z} + \frac{f_\beta^2}{J_z^2} + \frac{(F_{KC} + f_\alpha)f_\beta}{J_y J_z} - \\ & - \frac{mgl}{J_z} - \frac{k_\alpha}{J_y} - \frac{H^2}{J_y J_z} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_3 &= -6\omega_0^2 \frac{J_y}{H} + 4\omega_0 \frac{f_\beta J_y}{J_z H} + \omega_0^4 \frac{J_y}{H \cdot mgl} + \frac{H}{J_z} - \frac{J_y f_\beta^2}{J_z^2 H} + \frac{J_y mgl}{J_z H}; \\
k_4 &= 6\omega_0^2 \frac{f_\beta J_y}{H} + 4\omega_0 \left(H + \frac{J_y mgl}{H} - \frac{J_y f_\beta^2}{J_z H} \right) - 4\omega_0^3 \frac{J_y}{H} - \frac{2f_\beta H}{J_z} + \frac{J_y f_\beta^3}{J_z^2 H} - \\
&\quad - \frac{2J_y f_\beta mgl}{J_z H} - \frac{H(F_{KC} + f_\alpha)}{J_y}
\end{aligned}$$

Отримані вирази для коефіцієнтів спостережувача включають задані параметри об'єкта (гіротеодоліта), а також значення власної частоти спостережувана – ω_0 , яке, в загальному випадку, можна обирати довільно, але з врахуванням того, що величина ω_0 визначатиме точність і швидкодію спостережувача [77].

Синтез проведено для випадку відсутності зовнішніх збурень, проте на гіротеодоліт діють поступальні вібраційні перевантаження $n_X(t)$, $n_Z(t)$, тому спостережувач буде оцінювати змінні стану з деякою похибкою. На точність гіротеодоліта також впливатиме амплітуда коливань чутливого елементу в азимуті, яку при випадковій вібрації основи можна охарактеризувати середньоквадратичним відхиленням σ_α , або дисперсією $D[\alpha(t)] = \sigma_\alpha^2$. З аналізу рівнянь системи (3.1) видно, що середньоквадратичне відхилення вихідної величини $\alpha(t)$ буде залежати від середньоквадратичних відхилень вхідних величин $n_X(t)$ та $m(t) = \gamma \cdot n_X(t) + \beta \cdot n_Z(t)$, а також від амплітудно-частотних характеристик гіротеодоліта, які представлені на рис. 3.3 [77, 91].

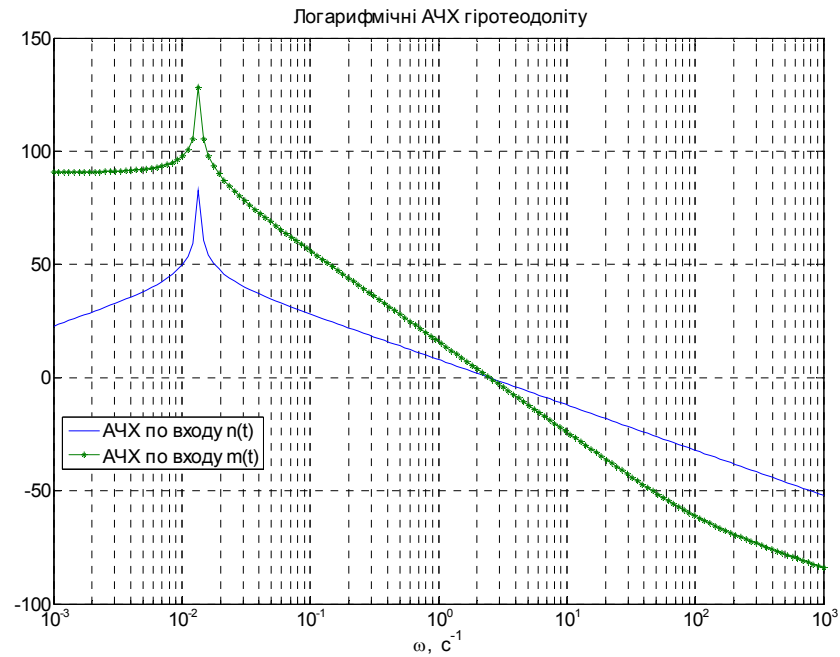


Рис. 3.3. Графіки АЧХ гіртеодоліта по вихідній величині $\alpha(t)$.

Виходячи з наведених графіків АЧХ, можна зробити висновок, що в області частот від 1 до 10 с^{-1} , які є найбільш небезпечними для приладу, вплив обох чинників $n_X(t)$ і $m(t)$ буде визначатися лише їх дисперсіями, оскільки частотні характеристики в даному діапазоні мало відрізняються. Тому, враховуючи, що величина $m(t)$ має другий порядок малості, нею можна знехтувати у порівнянні з $n_X(t)$, і надалі для визначення $D[\alpha(t)]$ використовувати рівняння першого наближення, з яких визначається передатна функція гіртеодоліта за вхідним перевантаженням $n_X(t)$ та кутом $\alpha(t)$ [91]:

$$W_\alpha(p) = \frac{\alpha(p)}{n(p)} = \frac{\cos(\varepsilon + \psi_0)H \cdot p}{k_\alpha (T_{\alpha\beta}^2 p^2 + 2\xi_{\alpha\beta} T_{\alpha\beta} p + 1)},$$

$$\text{де } T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{(F_{KC} + f_\alpha)f_\beta + H^2}{k_\alpha mgl}}, \quad \xi_{\alpha\beta} = \frac{k_\alpha f_\beta + f_\beta \cdot mgl}{2T_{\alpha\beta}}, \quad k_\alpha = H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa).$$

Для визначення дисперсії скористаємось відомою залежністю між спектральними щільностями вхідної та вихідної величин [94]:

$$S_\alpha(\omega) = |W_\alpha(j\omega)|^2 S_n(\omega),$$

де $|W_\alpha(j\omega)|^2 = \frac{\cos^2(\varepsilon + \psi_0)H^2\omega^2}{k_\alpha^2((1 - T_{\alpha\beta}^2\omega^2)^2 + 4\xi_{\alpha\beta}^2 T_{\alpha\beta}^2\omega^2)}$ – квадрат амплітудно-частотної характеристики, що відповідає передатній функції $W_\alpha(p)$.

Тоді дисперсія вихідної величини $\alpha(t)$ [91]:

$$\begin{aligned} D[\alpha(t)] &= \int_{-\infty}^{+\infty} |W_\alpha(j\omega)|^2 S_n(\omega) d\omega = \\ &= \frac{2\mu_n\sigma_n^2}{k_\alpha^2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos^2(\varepsilon + \psi_0)H^2\omega^2}{(1 - T_{\alpha\beta}^2\omega^2)^2 + 4\xi_{\alpha\beta}^2 T_{\alpha\beta}^2\omega^2} \cdot \frac{b_n^2}{\omega^4 + 2a_n\omega^2 + b_n^4} d\omega = \\ &= \frac{\cos^2(\varepsilon + \psi_0)H^2\sigma_n^2\omega_{\alpha\beta}^2 b_n^2 (\mu_n + \mu_{\alpha\beta})}{k_\alpha^2\mu_{\alpha\beta}((\lambda_n - \lambda_{\alpha\beta})^2 + (\mu_n + \mu_{\alpha\beta})^2)((\lambda_n + \lambda_{\alpha\beta})^2 + (\mu_n + \mu_{\alpha\beta})^2)}, \end{aligned}$$

$$\text{де } \omega_{\alpha\beta} = \frac{1}{T_{\alpha\beta}}, \lambda_{\alpha\beta} = \omega_{\alpha\beta} \sqrt{1 - \xi_{\alpha\beta}^2}, \mu_{\alpha\beta} = \frac{\xi_{\alpha\beta}}{T_{\alpha\beta}}.$$

Для аналізу похибок оцінювання розглянемо частотні характеристики об'єкта і спостережувача. Для визначення частотних характеристик гіротеодоліта запишемо систему рівнянь (3.2) у формі простору станів, при цьому будемо враховувати зовнішні збурення не вище першого порядку малості [77].

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\Xi \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases}, \quad (3.5)$$

де $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{mgl}{J_z} \end{bmatrix}^T$ – матриця передачі збурень, Ξ – вектор збурень (в нашому випадку складається з одного елемента $n_X(t)$).

Переходячи від оригіналів до зображень Лапласа, з першого рівняння системи (3.5) отримаємо матричну передатну функцію гіротеодоліта [77]:

$$\mathbf{W}_{IT}(p) = \frac{\mathbf{X}(p)}{n_X(p)} = (p\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{G} = \begin{bmatrix} W_{IT1}(p) \\ W_{IT2}(p) \\ W_{IT3}(p) \\ W_{IT4}(p) \end{bmatrix}.$$

Матрична передатна функція $\mathbf{W}_{IT}(p)$ складається з чотирьох передатних функцій для кожної змінної стану [77]:

$$W_{IT1}(p) = \frac{\alpha(p)}{n_X(p)} = \frac{-Hmgl \cdot p}{D(p)}; \quad (3.6)$$

$$W_{IT2}(p) = \frac{p\alpha(p)}{n_X(p)} = \frac{-Hmgl \cdot p^2}{D(p)}; \quad (3.7)$$

$$W_{IT3}(p) = \frac{\beta(p)}{n_X(p)} = \frac{(J_y p^2 + (f_\alpha + F_{KC})p + k_\alpha)mgl}{D(p)}; \quad (3.8)$$

$$W_{IT4}(p) = \frac{p\beta(p)}{n_X(p)} = \frac{(J_y p^2 + (f_\alpha + F_{KC})p + k_\alpha)mgl \cdot p}{D(p)}. \quad (3.9)$$

В передатних функціях (3.6) – (3.9) через $D(p)$ позначено характеристичний поліном, що відповідає визначнику матриці $(p\mathbf{E} - \mathbf{A})$ [77]:

$$D(p) = a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0,$$

$$\text{де} \quad a_0 = k_\alpha mgl, \quad a_1 = (F_{KC} + f_\alpha)mgl + k_\alpha f_\beta, \quad a_3 = (F_{KC} + f_\alpha)J_z + f_\beta J_y, \\ a_2 = (F_{KC} + f_\alpha)f_\beta + J_y mgl + k_\alpha J_z + H^2, \quad a_4 = J_y J_z.$$

Для аналізу похибки оцінювання кутової швидкості $\dot{\alpha}$ при дії поступальної вібрації визначимо частотні характеристики гіротеодоліта за вихідними змінними стану x_1, x_2 і вхідній змінній $n_X(t)$ [77]:

$$N_{IT1}(\omega) = |W_{IT1}(j\omega)| = \frac{mgl \cdot H \cdot \omega}{\sqrt{(\omega^4 - a_2 \omega^2 + a_0)^2 + (a_1 \omega - a_3 \omega^3)^2}};$$

$$\varphi_{IT1}(\omega) = \arg W_{IT1}(j\omega) = 90^\circ - \arctg \frac{-a_3 \omega^3 + a_1 \omega}{\omega^4 - a_2 \omega^2 + a_0};$$

$$N_{IT2}(\omega) = |W_{IT2}(j\omega)| = \frac{mgl \cdot H \cdot \omega^2}{\sqrt{(\omega^4 - a_2 \omega^2 + a_0)^2 + (a_1 \omega - a_3 \omega^3)^2}};$$

$$\varphi_{IT2}(\omega) = \arg W_{IT2}(j\omega) = -\arctg \frac{-a_3 \omega^3 + a_1 \omega}{\omega^4 - a_2 \omega^2 + a_0}.$$

Розглянемо тепер частотні характеристики спостережувача, на вхід якого подається виміряна величина α . Запишемо рівняння (3.3) в операторній формі [77]:

$$(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C})\hat{\mathbf{X}}(p) = \mathbf{K}\alpha(p).$$

Звідки матрична передатна функція спостережувача буде мати вигляд [77]:

$$\mathbf{W}_C(p) = \frac{\hat{\mathbf{X}}(p)}{\alpha(p)} = (p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C})^{-1} \mathbf{K}.$$

З передатної функції $\mathbf{W}_C(p)$ виділимо передатну функцію $W_{C2}(p)$ що характеризує вхідну величину $\alpha(t)$ і вихідну величину $\hat{\alpha}(t)$ [77]:

$$W_{C2}(p) = \frac{\hat{x}_2(p)}{\alpha(p)} = \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{p^4 + 4\omega_0 p^3 + 6\omega_0^2 p^2 + 4\omega_0^3 p + \omega_0^4}, \quad (3.10)$$

$$\text{де } b_3 = k_2; \quad b_2 = \frac{-k_1 k_\alpha J_z + k_2 J_y f_\beta - k_4 J_z H}{J_y J_z};$$

$$b_1 = \frac{-k_1 k_\alpha f_\beta + k_2 J_y mgl + k_3 mgl H}{J_y J_z}; \quad b_0 = \frac{-k_1 k_\alpha mgl}{J_y J_z}.$$

Відповідні передатній функції (3.10) частотні характеристики спостережувача по входу $\alpha(t)$ і виходу $\hat{\alpha}(t)$ матимуть вигляд [77]:

$$N_2(\omega) = \frac{\sqrt{(-b_2 \omega^2 + b_0)^2 + (b_1 \omega - b_3 \omega^3)^2}}{(\omega^2 + \omega_0^2)^2}; \quad (3.11)$$

$$\varphi_2(\omega) = \arctg \frac{b_1 \omega - b_3 \omega^3}{b_0 - b_2 \omega^2} - 4 \arctg \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (3.12)$$

Необхідно зазначити, що частотні характеристики (3.11), (3.12) мають особливості внаслідок складного характеру залежності коефіцієнтів b_i чисельника передатної функції (3.10) від власної частоти спостережувача – ω_0 , яка, в свою чергу, входить у коефіцієнти k_1, k_2, k_3, k_4 . При зміні величини ω_0 коефіцієнти можуть змінювати знаки, за рахунок чого в чисельнику передатної функції з'являються немінімально-фазові ланки.

Розглянемо, наприклад, нулі передатної функції (3.10) при зміні частоти ω_0 від 0,1 до 30 с^{-1} . Один з коренів буде дійсним, причому буде змінювати знак з додатного на від'ємний на частоті $\omega_0 = 0,69 \text{ с}^{-1}$. Два інших кореня при частотах від 0,1 до 10 с^{-1} утворюють комплексно-спряжену пару з від'ємною дійсною частиною, а на частотах від 10 до 26 с^{-1} – з додатною, після частоти $\omega_0 = 26 \text{ с}^{-1}$ пара розпадається на два різні додатні дійсні корені (рис.1). При подальшій зміні частоти ω_0 відбувається неодноразова зміна як характеру коренів, так і їх знаків.

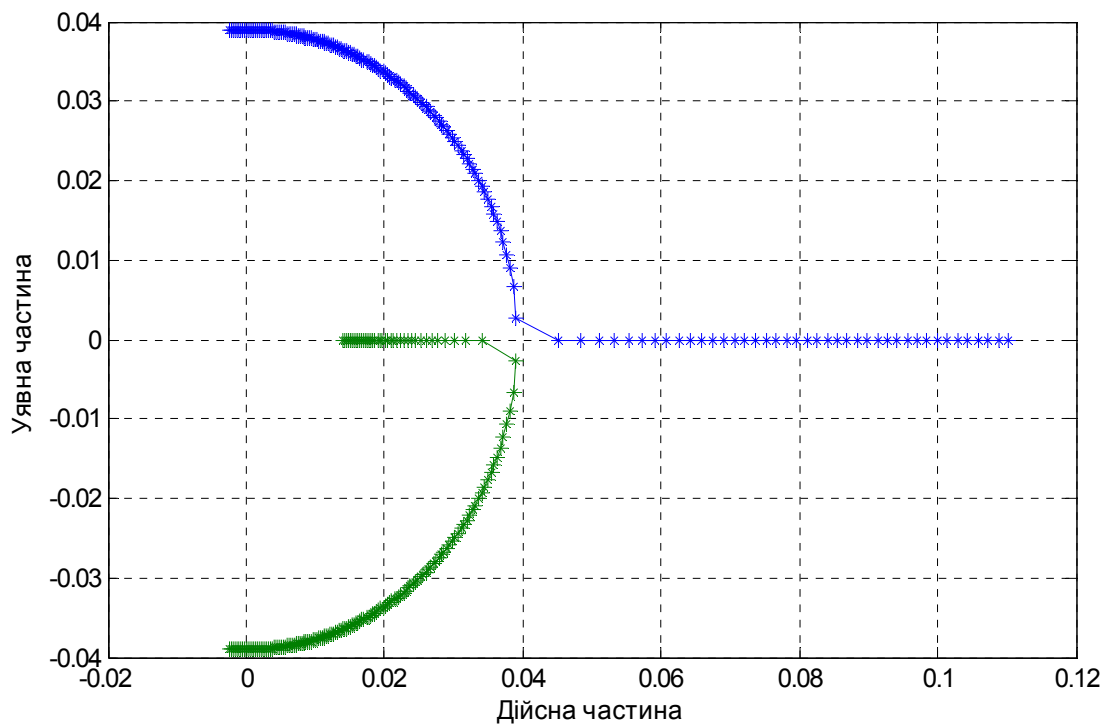


Рис.3.4. Годограф нулів передатної функції спостережувача.

Помноживши передатні функції (3.6) та (3.10) отримаємо передатну функцію спостережувача по входу $n_X(t)$ і виходу $\hat{\alpha}(t)$:

$$\begin{aligned} \Phi_C(p) &= W_{GT1}(p)W_{C2}(p) = \frac{\hat{x}_2(p)}{n_X(p)} = \frac{-Hmgl \cdot p}{D(p)} \cdot \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{(p + \omega_0)^4} = \\ &= \frac{-Hmgl \cdot p(b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0)}{(a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0)(p + \omega_0)^4}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

На основі передатної функції (3.13) запишемо частотні характеристики:

$$N_C(\omega) = \frac{mgl \cdot H \cdot \omega \sqrt{(-b_2\omega^2 + b_0)^2 + (b_1\omega - b_3\omega^3)^2}}{(\omega^2 + \omega_0^2)^2 \sqrt{(\omega^4 - a_2\omega^2 + a_0)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2}}; \quad (3.14)$$

$$\varphi_C(\omega) = -90^\circ - \arctg \frac{-a_3\omega^3 + a_1\omega}{\omega^4 - a_2\omega^2 + a_0} + \arctg \frac{b_1\omega - b_3\omega^3}{b_0 - b_2\omega^2} - 4\arctg \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (3.15)$$

На рис. 3.5-3.8 представлені графіки частотних характеристик гіротеодоліта (3.7) і спостережувача (3.14), (3.15) побудовані для різних значень ω_0 при коефіцієнтах компенсаційного зв'язку $\kappa = 0, 10, 100, 1000$.

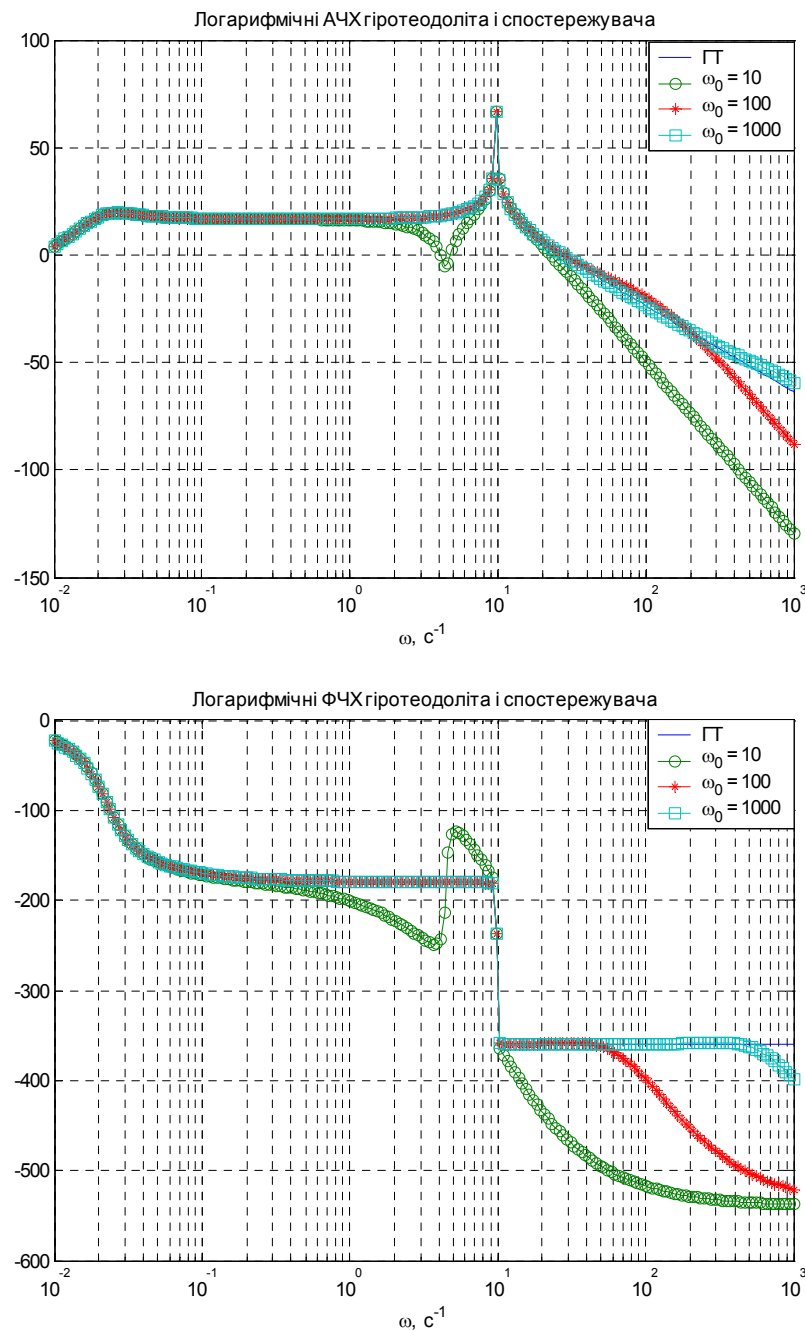


Рис. 3.5. Графіки частотних характеристик при $\kappa = 0$.

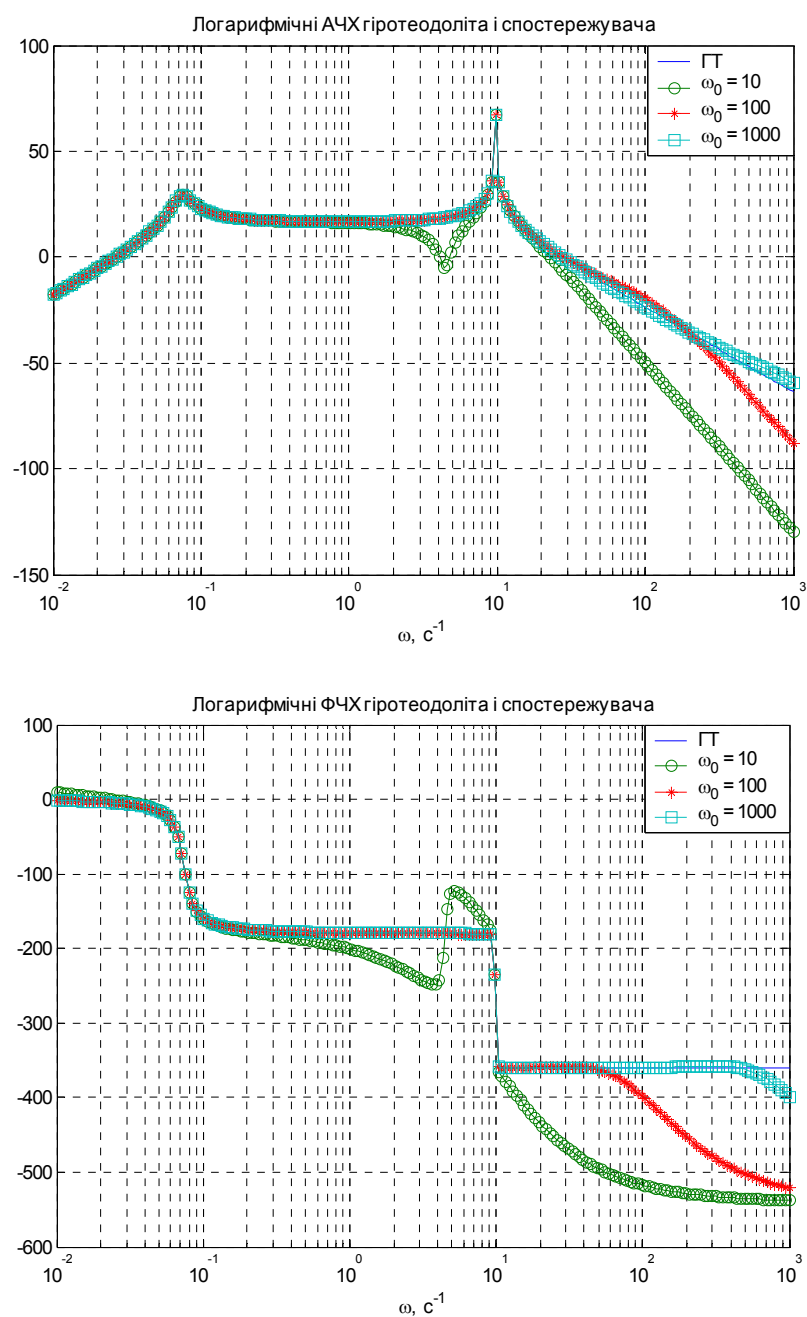


Рис. 3.6. Графики частотних характеристик при $\kappa = 10$.

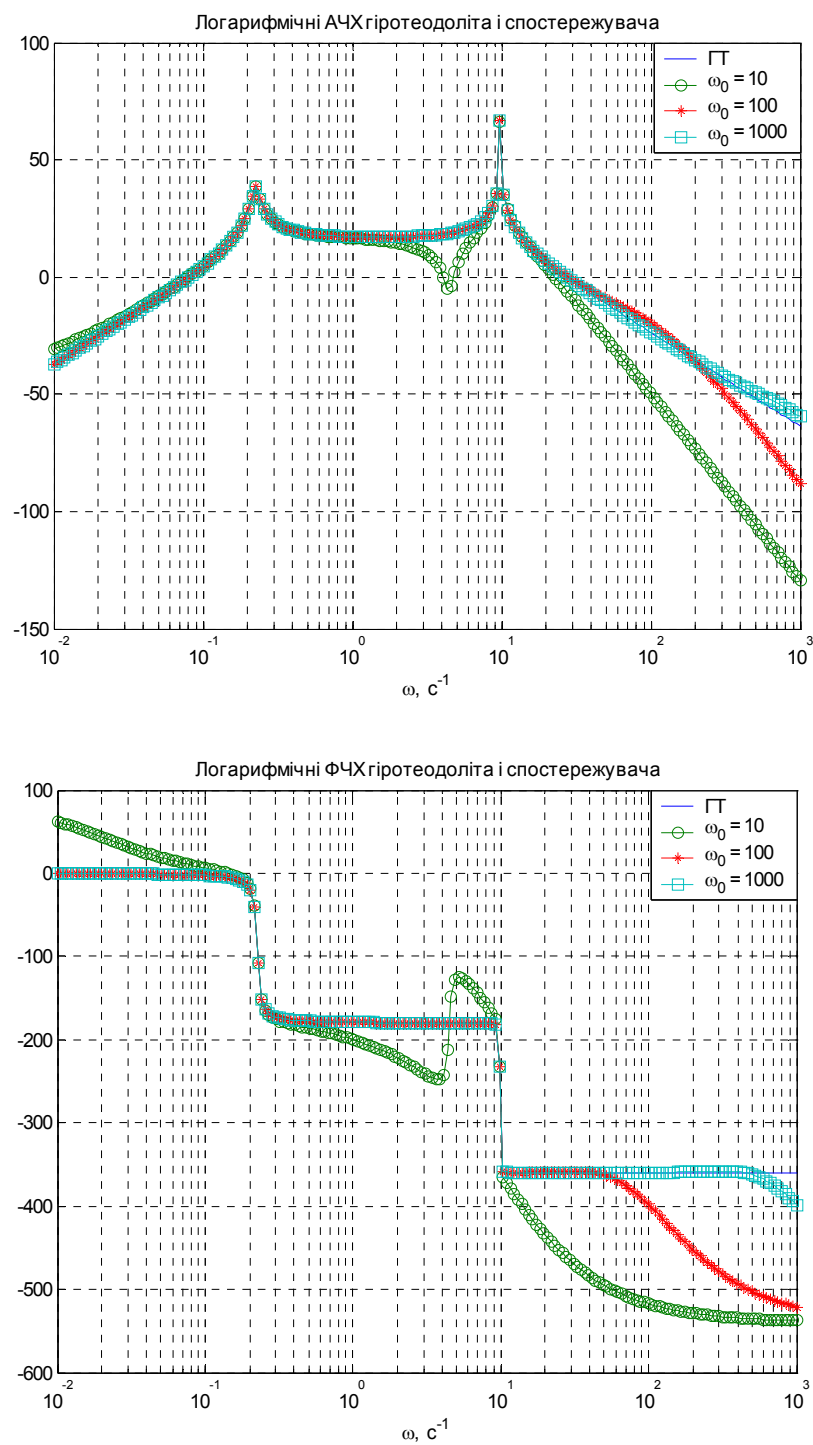


Рис. 3.7. Графики частотних характеристик при $\kappa = 100$.

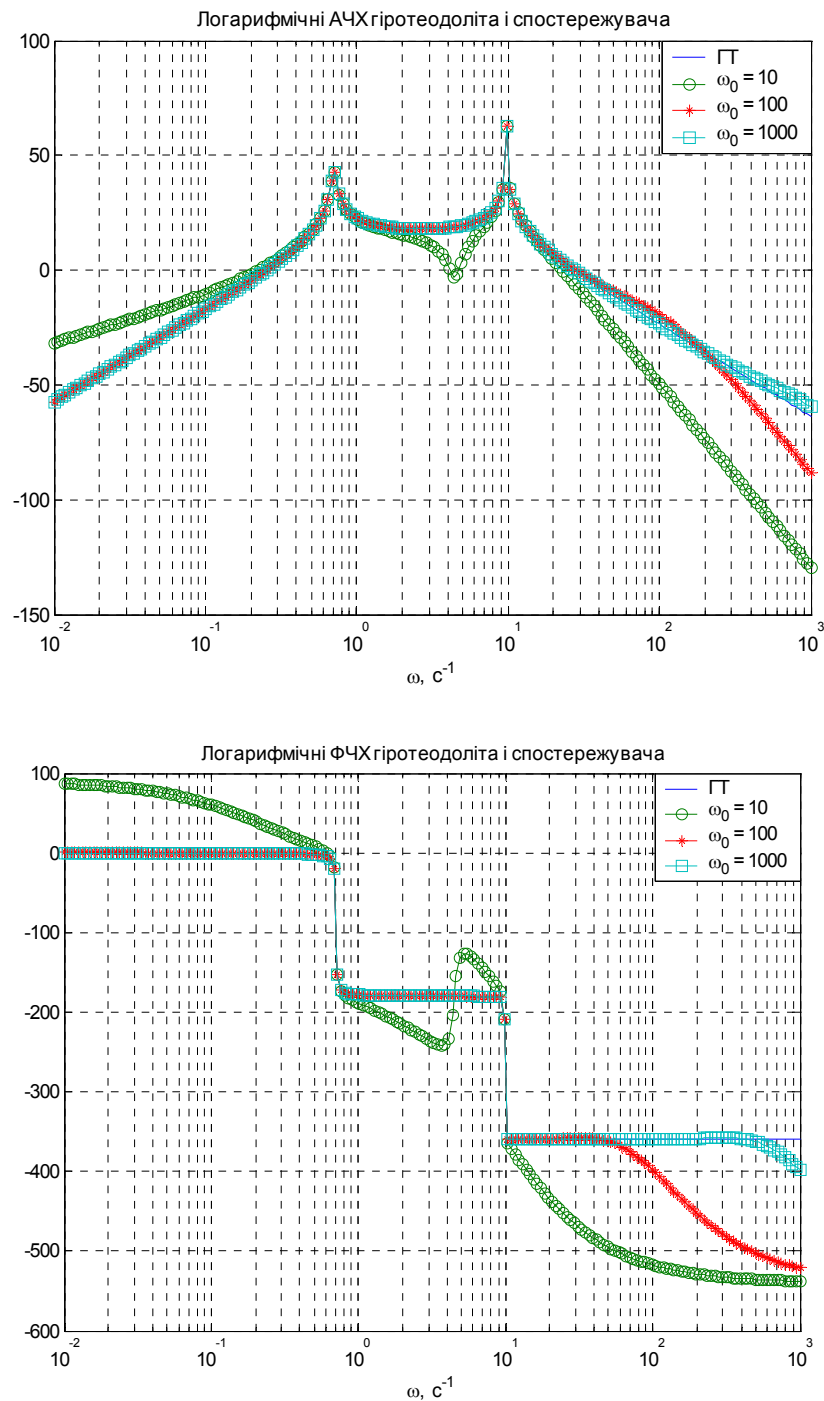


Рис.3.8. Графики частотних характеристик при $\kappa = 1000$.

З отриманих графіків видно, що за малих значень кореня полінома спостережувача ($\omega_0 = 10 \text{ c}^{-1}$) мають місце значні амплітудні і фазові спотворення оцінки кутової швидкості $\hat{\dot{\alpha}}$ відносно точного значення $\dot{\alpha}$, як в області низьких частот, так і в області високих частот. При збільшенні $\omega_0 = 100 \text{ c}^{-1}$ в області низьких частот амплітудних і фазових спотворень вже не спостерігається, а в області високих частот присутні спотворення по фазі і

по амплітуді, починаючи з частоти $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$. При $\omega_0 = 1000 \text{ с}^{-1}$ графіки АЧХ і ФЧХ гіротеодоліта і спостережувача практично збігаються до частоти $\omega = 500 \text{ с}^{-1}$ [77].

Отже, можна зробити висновок, що для зменшення похибки оцінювання, при впливі на об'єкт поступальних вібрацій необхідно збільшувати абсолютні значення коренів полінома спостережувача. Однак слід зазначити, що таке збільшення власних значень призводить до помітного збільшення обчислювальної складності визначення оцінки кутової швидкості $\hat{\alpha}$, оскільки в цьому випадку необхідно зменшувати крок при інтегруванні рівняння (3.3) [77].

На розроблений метод визначення $\hat{\alpha}$ отримано патент України на корисну модель №73373 [97].

3.1.4. Моделювання компенсації похибки за оцінкою $\hat{\alpha}$

Змоделюємо роботу приладу при оцінювання кутової швидкості чутливого елемента в азимуті. При моделюванні алгоритмічної компенсації використано співвідношення:

$$\sin\langle\alpha\rangle = \frac{\langle\hat{\alpha}\gamma\rangle}{\omega_z \cos\varphi_g},$$

тобто замість точного значення кутової швидкості обертання ЧЕ навколо вертикальної осі – α у формулі (2.25) підставлено її оцінку $\hat{\alpha}$. Значення кута γ при цьому береться безпосередньо з програмної моделі після інтегрування рівняння (2.14).

На рис. 3.9 представлено результати моделювання для випадку регулярної вібрації з амплітудою $n_m = 0.001$ і частотою $\omega = 9 \text{ с}^{-1}$, коефіцієнт компенсаційного зв'язку прийнятий $\kappa = 100$, інші параметри приладу залишені незмінними. Для зменшення амплітуди високочастотних складових

вихідного сигналу було використано фільтр (2.26), після якого результат стає більш наочним (рис. 3.10).

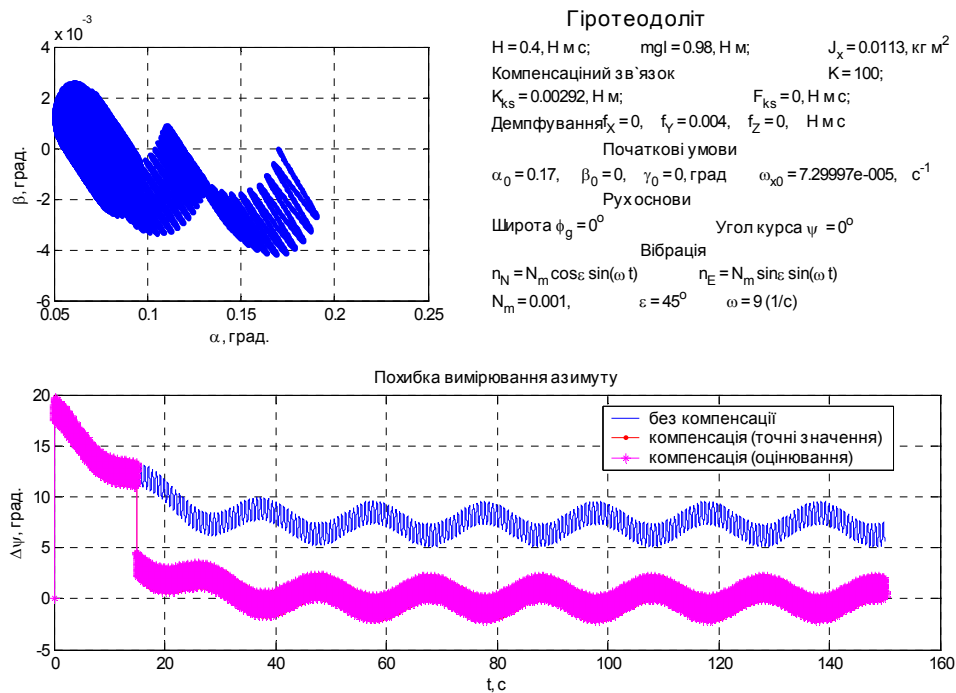


Рис. 3.9. Моделювання компенсації за оцінкою кутової швидкості $\hat{\alpha}$ при регулярній вібрації.

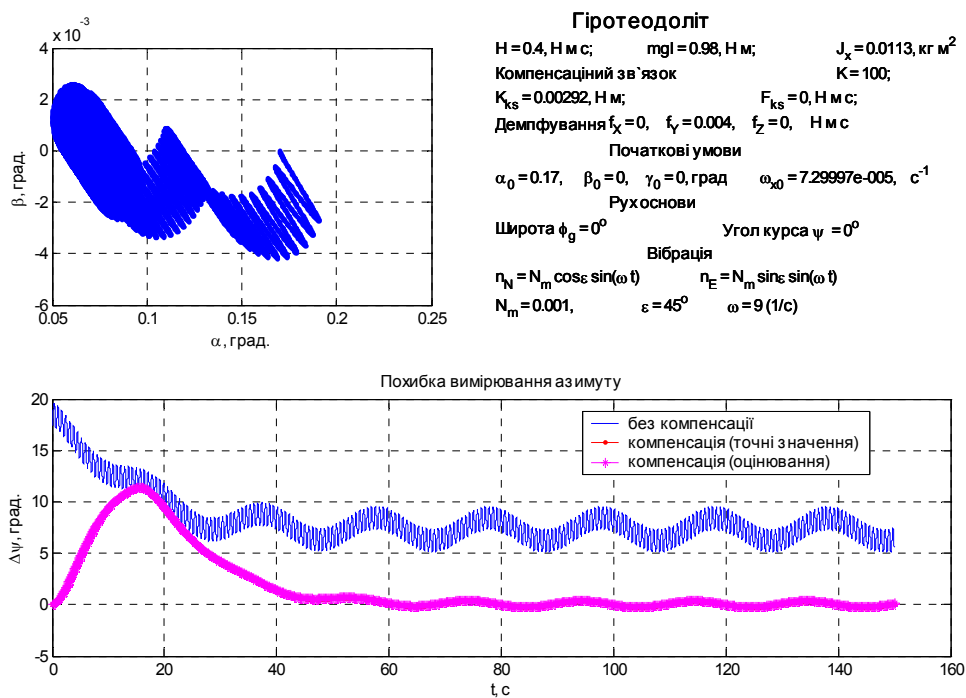


Рис. 3.10. Моделювання компенсації за оцінкою кутової швидкості $\hat{\alpha}$ при регулярній вібрації (з використанням фільтру).

На рис. 3.11 представлено результати моделювання для випадкової вібрації з середнім квадратичним відхиленням $\sigma_n = 0.0006$ і переважною частотою $\lambda_n = 9 \text{ c}^{-1}$ без фільтрації вихідного сигналу, а на рис 3.12 – результати з використанням фільтру (2.26)

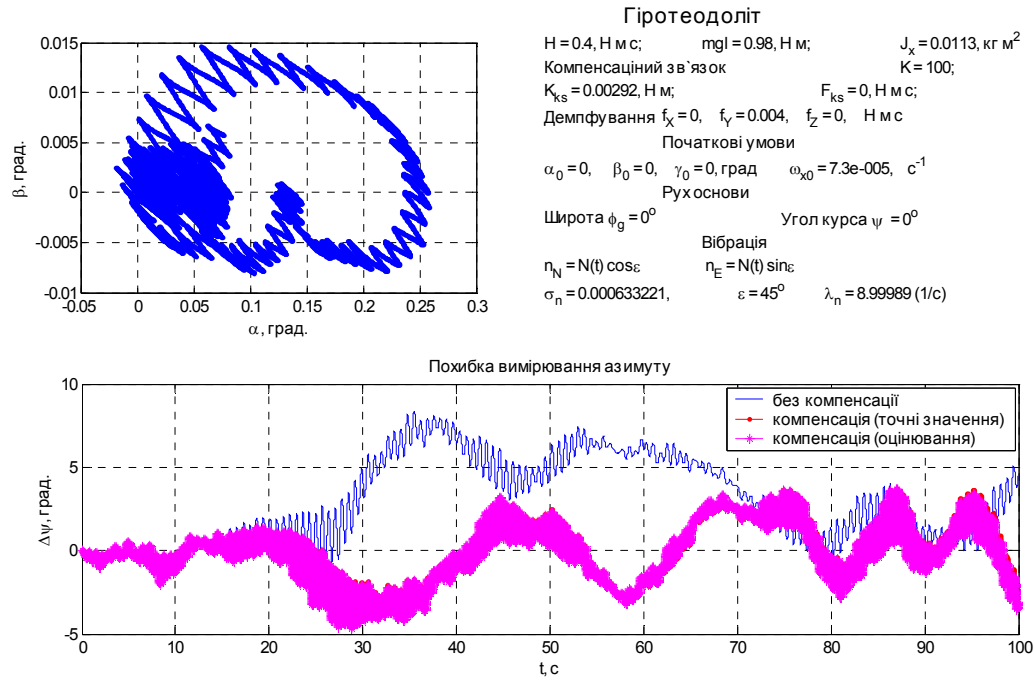


Рис. 3.11. Моделювання компенсації за оцінкою кутової швидкості $\hat{\alpha}$ при випадковій вібрації.

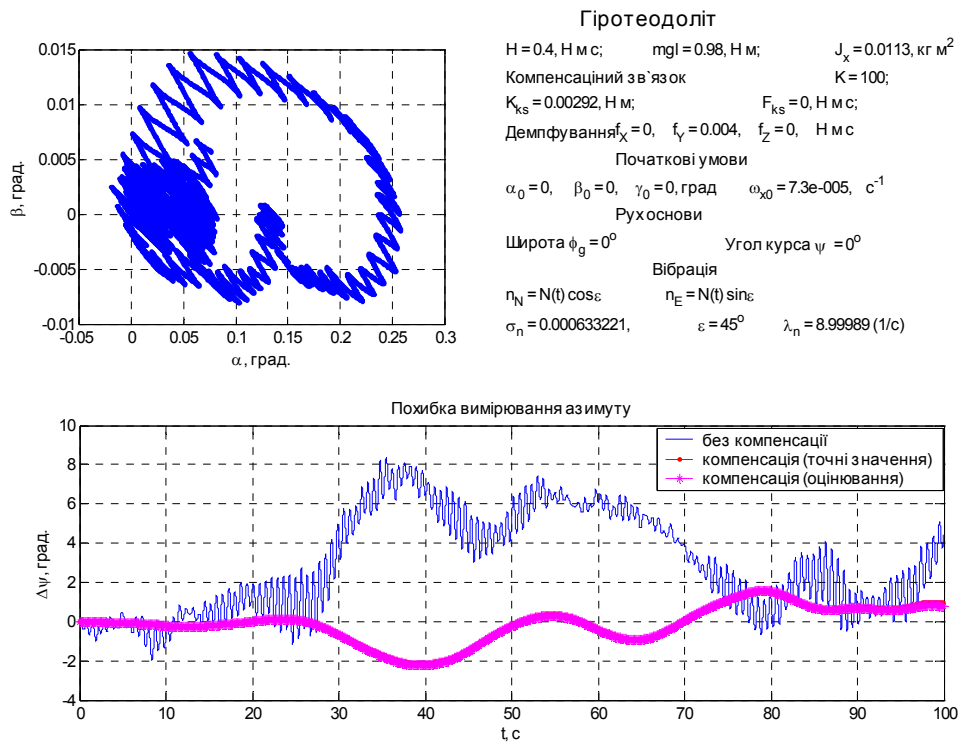


Рис. 3.12. Моделювання компенсації за оцінкою кутової швидкості $\hat{\alpha}$ при випадковій вібрації (з використанням фільтру).

Як видно з результатів моделювання використання оцінки кутової швидкості $\hat{\alpha}$ цілком можливе для реалізації алгоритмічної компенсації вібраційної похибки. Крім того на виході спостережувача можна знімати оцінки кута $\hat{\beta}$ та кутової швидкості $\hat{\beta}$, які також можуть бути використані для підвищення точності гіротеодоліту, наприклад, при визначенні величини флуктуацій кінетичного моменту. Таким чином, запропоновано два можливі шляхи отримання інформації про кутову швидкість обертання ЧЕ в азимуті.

3.2. Метод визначення кута та кутової швидкості чутливого елемента в негіростабілізованій площині

3.2.1. Система стабілізації обертів гіромотора

Безпосереднє вимірювання параметрів кутового руху ЧЕ ГТ в негіростабілізованій площині являє собою досить складну задачу і пов'язано

зі значним ускладненням конструкції, оскільки в цьому випадку необхідно встановлювати додатковий датчик кута. У той же час в існуючих конструкціях ГТ присутні системи стабілізації оборотів гіромотора, інформація з яких може бути використана для визначення кута і кутової швидкості коливань ЧЕ відносно головної осі [78].

В якості гіромотора (ГМ) в гіртеодолітах як правило використовується асинхронний двигун, швидкість обертання якого залежить від зміни параметрів живлення і моменту тертя в опорах ротора. Для зменшення впливу флуктуацій кутової швидкості гіромотора на точність гіртеодоліта застосовуються спеціальні системи стабілізації. Спрощена функціональна схема такої системи представлена на рис. 3.13 [78].

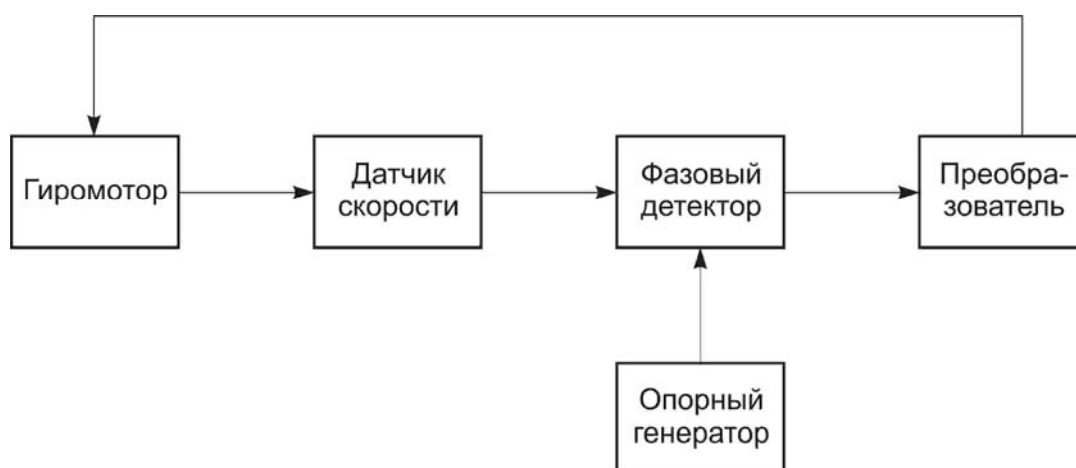


Рис. 3.13. Функціональна схема системи стабілізації.

Датчик, закріплений на осі двигуна, виробляє пропорційний швидкості обертання ротора сигнал, що надходить на один з входів фазового детектора. На другий його вхід надходить сигнал з опорного генератора. Напруга на виході фазового детектора, що залежить від фазового зсуву між цими сигналами, подається на перетворювач, що формує керуючий вплив. При зміні частоти обертання ротора на обмотки ГМ надходить напруга для усунення неузгодженості [98, 99].

3.2.2. Математична модель руху чутливого елемента.

Математичну модель коливань ЧЄ гіротеодоліта в негіростабілізований площині можна представити у вигляді [78]:

$$\begin{cases} J_x \ddot{\gamma} + f_\gamma \dot{\gamma} + mgl\gamma = -\dot{H} + mgl \cdot n_Z(t) \\ T_{ГМ} \ddot{\omega} + T_{ГМ} \Delta \dot{\omega} + \Delta \omega = K_U \Delta U \end{cases}, \quad (3.16)$$

$$\Delta U = -W_{cc}(p)\Delta \omega,$$

$$W_{cc}(p) = \frac{K_{CC}(T_1 p + 1)}{p(T_2 p + 1)},$$

де J_x – момент інерції ЧЄ відносно головної осі, γ – кут повороту ЧЄ відносно корпусу навколо головної осі, f_γ – коефіцієнт в'язкого тертя, m – маса чутливого елемента; l – зміщення центру мас ЧЄ відносно точки підвісу, $H = J_p(\omega_0 + \Delta \omega)$ – кінетичний момент гіроскопа, J_p – осьовий момент інерції ротора ГМ, ω_0 – номінальна кутова швидкість ГМ, $\Delta \omega$ – зміна кутової швидкості ГМ, $T_{ГМ}$ – постійна часу гіромотора, K_U – коефіцієнт передачі ГМ по напрузі, ΔU – коригуюча напруга, що прикладається до гіромотора, $W(p)$ – передатна функція системи стабілізації, K_{CC} – коефіцієнт передачі системи стабілізації, T_1, T_2 – постійні часу, $n_Z(t) = n_m \sin(\varepsilon + \psi_0) \sin \omega t$ – перевантаження точки підвісу ГТ.

Як вимірювану величину приймемо сигнал $\Delta \omega$, що формується в системі стабілізації. Перепишемо систему рівнянь (3.16) у формі простору станів, позначивши змінні стану [78]: $x_1 = \gamma$, $x_2 = \dot{\gamma}$, $x_3 = \Delta \omega$, $x_4 = \Delta U$, $x_5 = \Delta \dot{U}$.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_H = \mathbf{A}_H \mathbf{X}_H \\ \mathbf{Y}_H = \mathbf{C}_H \mathbf{X}_H \end{cases}, \quad (3.17)$$

де \mathbf{X}_H – вектор стану, \mathbf{A}_H – матриця стану, \mathbf{Y}_H – вектор вимірювання, \mathbf{C}_H – матриця вимірювання:

$$\mathbf{A}_H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{mgl}{J_x - J_p} & -\frac{f_\gamma}{J_x - J_p} & \frac{J_p}{T_{GM}(J_x - J_p)} & -\frac{K_U J_p}{T_{GM}(J_x - J_p)} & 0 \\ \frac{mgl}{J_x - J_p} & \frac{f_\gamma}{J_x - J_p} & -\frac{J_x}{T_{GM}(J_x - J_p)} & \frac{K_U J_x}{T_{GM}(J_x - J_p)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_{CC} T_1 mgl}{T_2(J_x - J_p)} & -\frac{K_{CC} T_1 f_\gamma}{T_2(J_x - J_p)} & \frac{K_{CC} T_1 J_x}{T_{GM}(J_x - J_p)} - K_{CC} & \frac{K_U K_{CC} T_1 J_x}{T_{GM} T_2(J_x - J_p)} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{X}_H = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T;$$

$$\mathbf{C}_H = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0].$$

Система матричних рівнянь (3.17) записана без врахування зовнішнього вібраційного впливу. Матриця спостережуваності має вигляд [78]:

$$\mathbf{Q}_H = \left[\mathbf{C}^T : \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^2 \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^3 \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^4 \mathbf{C}^T \right]. \quad (3.18)$$

Ранг матриці (3.18) дорівнює порядку об'єкта $rank \mathbf{Q}_H = 5$, отже, за вимірюваним вихідним вектором \mathbf{Y}_H можна оцінити всі змінні стану об'єкта [78].

3.2.3. Визначення оцінок кута та кутової швидкості чутливого елемента в негiростабiлiзованiй площинi

Для оцінювання необхідних параметрів руху ЧЕ (γ , $\dot{\gamma}$) будемо використовувати матричне рівняння [78]:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_H = (\mathbf{A}_H - \mathbf{K}_H \mathbf{C}_H) \hat{\mathbf{X}}_H + \mathbf{K}_H \mathbf{Y}_H, \quad (3.19)$$

де $\hat{\mathbf{X}}_H$ - вектор оцінок змінних стану, \mathbf{K}_H - матриця коефіцієнтів спостережувача [78]:

$$\hat{\mathbf{X}}_H = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2 \ \hat{x}_3 \ \hat{x}_4 \ \hat{x}_5]^T;$$

$$\mathbf{K}_H = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5]^T.$$

Коефіцієнти матриці \mathbf{K}_H також оберемо за біноміальним розподілом [78]:

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A}_H + \mathbf{K}_H \mathbf{C}_H) = (p + \omega_H)^5. \quad (3.20)$$

З рівняння (3.20) неважко визначити невідомі коефіцієнти матриці \mathbf{K}_H , прирівнявши відповідні степені p [78].

Для визначення похибок оцінювання розглянемо частотні характеристики гіротеодоліта. Запишемо систему рівнянь (3.17) в формі простору станів, з урахуванням зовнішніх збурень [78]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_H = \mathbf{A}_H \mathbf{X}_H + \mathbf{G}_H \Xi_H, \\ \mathbf{Y}_H = \mathbf{C}_H \mathbf{X}_H \end{cases}, \quad (3.21)$$

де $\mathbf{G}_H = \begin{bmatrix} 0 & \frac{mgl}{J_x - J_p} & -\frac{mgl}{J_x - J_p} & 0 & \frac{K_{CC}T_1mgl}{T_2(J_x - J_p)} \end{bmatrix}^T$ – матриця передачі збурень, $\Xi_H = n_Z(t)$ – збурення.

Переходячи від оригіналів до зображень Лапласа, з першого рівняння системи (6) отримаємо матричну передатну функцію гіротеодоліта [78]:

$$\mathbf{W}_H(p) = \frac{\mathbf{X}_H(p)}{n_Z(p)} = (p\mathbf{E} - \mathbf{A}_H)^{-1} \mathbf{G}_H = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{H1}(p) \\ \mathbf{W}_{H2}(p) \\ \mathbf{W}_{H3}(p) \\ \mathbf{W}_{H4}(p) \\ \mathbf{W}_{H5}(p) \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

де

$$\begin{aligned} W_{H1}(p) &= \frac{\gamma(p)}{n_Z(p)} = \frac{(T_2 T_{GM} p^3 + (T_2 + T_{GM}) p^2 + (1 + K_{CC} K_U T_1) p + K_{CC} K_U) mgl}{D_H(p)}; \\ W_{H2}(p) &= \frac{\dot{\gamma}(p)}{n_Z(p)} = \frac{(T_2 T_{GM} p^3 + (T_2 + T_{GM}) p^2 + (1 + K_{CC} K_U T_1) p + K_{CC} K_U) mgl p}{D_H(p)}; \\ W_{H3}(p) &= \frac{\Delta\omega(p)}{n_Z(p)} = -\frac{(T_2 p + 1) T_{GM} mgl p^3}{D_H(p)}; \end{aligned}$$

$$W_{h4}(p) = \frac{\Delta U(p)}{n_Z(p)} = \frac{(T_1 p + 1) T_{\Gamma M} K_{cc} mgl p^2}{D_h(p)};$$

$$W_{h5}(p) = \frac{\Delta \dot{U}(p)}{n_Z(p)} = \frac{(T_1 p + 1) T_{\Gamma M} K_{cc} mgl p^3}{D_h(p)}.$$

В передатних функціях $W_{hi}(p)$ через $D_h(p)$ позначено характеристичний поліном, що відповідає визначнику матриці $(p\mathbf{E} - \mathbf{A}_h)$ [78]:

$$D_h(p) = d_5 p^5 + d_4 p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0,$$

$$d_0 = K_{cc} K_U mgl,$$

$$d_1 = T_1 K_{cc} K_U mgl + f_x K_{cc} K_U + mgl,$$

$$d_2 = K_{cc} K_U J_x + T_1 K_{cc} K_U f_x + (T_{\Gamma M} + T_2) mgl + f_x,$$

$$d_3 = T_{\Gamma M} T_2 mgl + T_1 K_{cc} K_U J_x + (T_{\Gamma M} + T_2) f_x + J_x,$$

$$d_4 = T_{\Gamma M} (J_x - J_p) + T_2 J_x + T_{\Gamma M} T_2 f_x,$$

$$d_5 = T_{\Gamma M} T_2 (J_x - J_p).$$

Аналогічним чином запишемо матричну передатну функцію спостережувача, для якого входною величиною є сигнал $\Delta\omega$, що формується в системі стабілізації [78]:

$$\mathbf{W}_{nn}(p) = \frac{\hat{\mathbf{X}}_n(p)}{\Delta\omega(p)} = (p\mathbf{E} - \mathbf{A}_n + \mathbf{K}_n \mathbf{C}_n)^{-1} \mathbf{K}_n. \quad (3.23)$$

Для аналізу динамічних властивостей спостережувача в частотній області побудуємо логарифмічні частотні характеристики (рис.3.14) гіротеодоліта і системи гіротеодоліт-спостережувач за входом $n_Z(t)$ та виходом γ , на підставі виразів (3.22) и (3.23) [78].

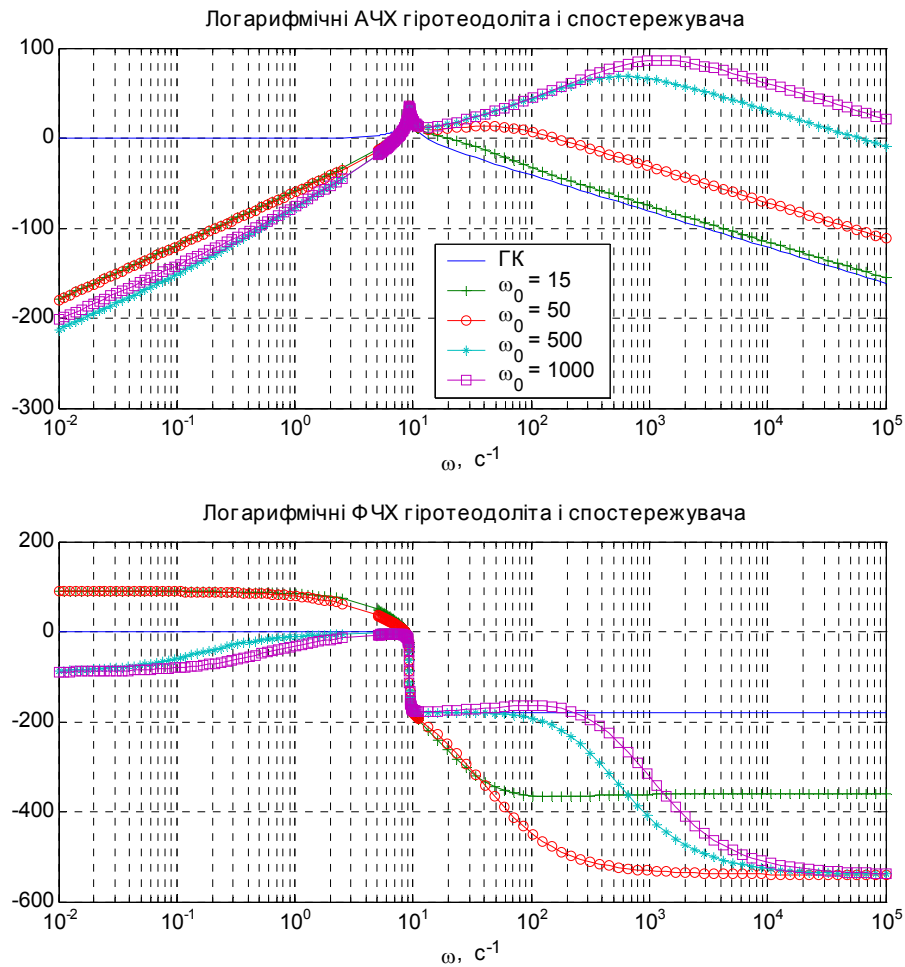


Рис. 3.14. Частотні характеристики за входом $n_Z(t)$ та виходом γ .

З отриманих графіків (рис 3.14) видно, що АЧХ системи гіротеодоліт-спостережувач значно відрізняються від необхідної АЧХ ГТ при будь-яких значеннях власної частоти полінома спостережувача. Аналіз ФЧХ показує, що мінімальних фазових спотворень можна досягти при $\omega_i = 500 \text{ c}^{-1}$, в цьому випадку в частотному діапазоні від $0,1$ до 100 c^{-1} фази сигналів на виході ГТ і спостережувача будуть практично збігатися. Початковий нахил графіка амплітудно-частотної характеристики при $\omega_H = 500 \text{ c}^{-1}$ складає $+80 \text{ дБ}$ на декаду, що пов'язано, очевидно, з наявністю диференційної ланки в чисельнику $W_{n3}(p)$. Отже, для зменшення амплітудних спотворень можна запропонувати послідовну корекцію сигналу на виході спостережувача за допомогою ланки з передатною функцією [78]:

$$W_{\text{кл}}(p) = \frac{K_{\text{кл}}(T_{\text{кл}}p + 1)}{p^4}. \quad (3.24)$$

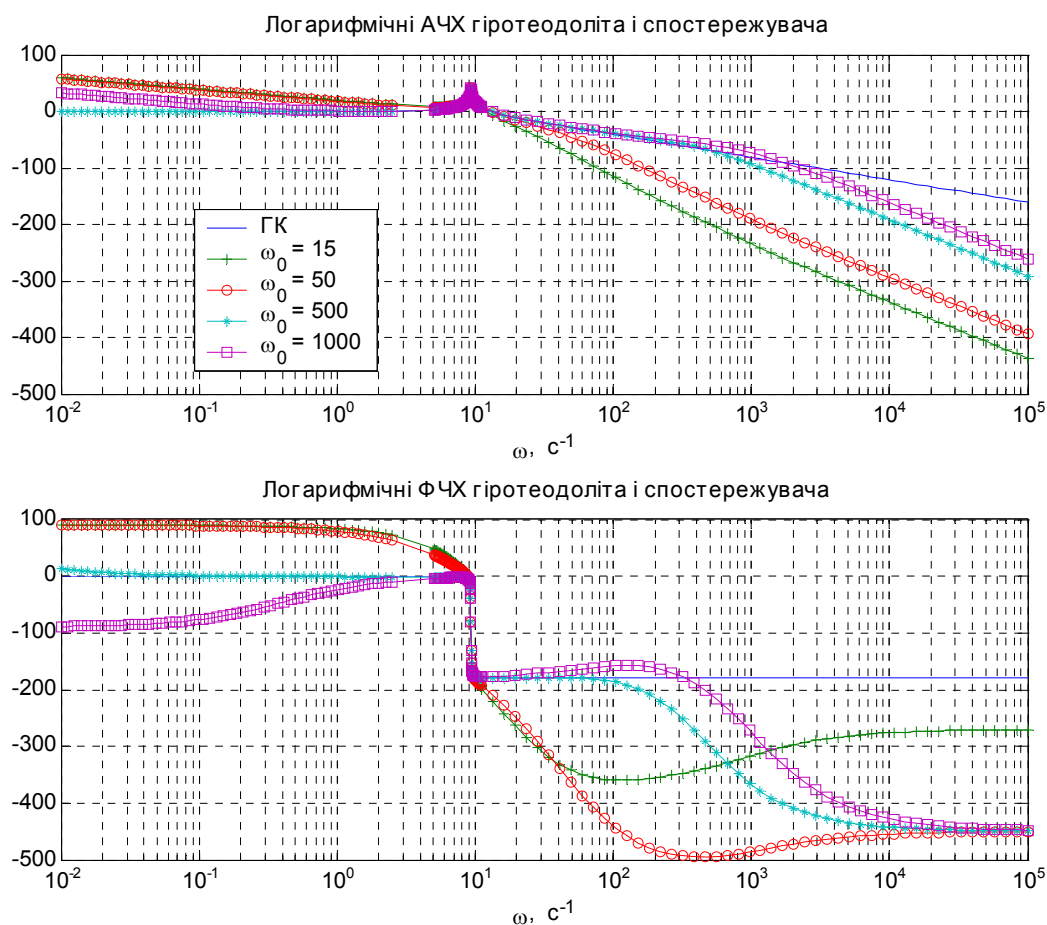


Рис. 3.15. Графіки частотних характеристик з корекцією.

Отже, при $\omega_0 = 500 \text{ с}^{-1}$ і використанні корегувальної ланки основні амплітудні спотворення усуваються. ФЧХ змінюється несуттєво, при цьому наявність ланки, що форсує, в передатній функції (3.24) покращує фазову частотну характеристику в області високих частот, що досягається вибором відповідного значення постійної часу $T_{\text{кл}}$ [78].

3.2.4. Моделювання оцінювання кута γ та кутової швидкості $\dot{\gamma}$.

Для моделювання оцінювання додаткових параметрів руху ЧЕ гіротеодоліта відповідно до математичної моделі (3.16) розроблено окрему

програмну модель в середовищі MATLAB, структура якої представлена на рис. 3.16.

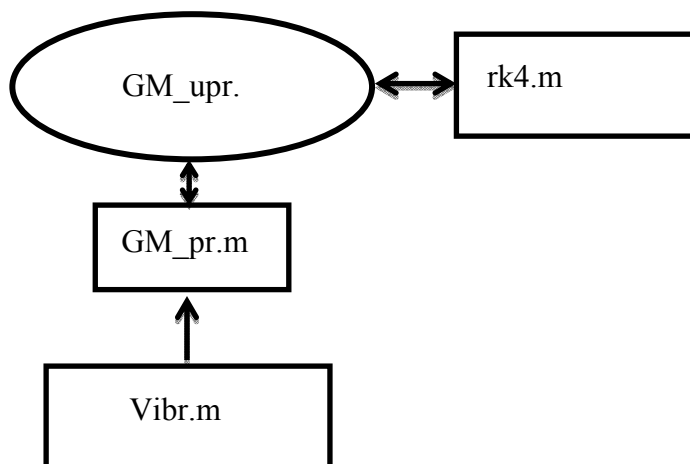


Рис. 3.16. Структура програмної моделі.

На рис. 3.16 позначені складові програмної моделі:

GM_upr.m – керувальна програма;

GM_pr.m – процедура обчислення правих частин системи диференціальних рівнянь (3.16) та матричного рівняння (3.19);

rk4.m – процедура чисельного інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта 4-го порядку;

Vibr.m – процедура обчислення лінійних вібраційних прискорень об'єкта.

Для моделювання будемо використовувати параметри приладу зазначенні в попередніх розділах, а також параметри системи стабілізації обрані з відомих конструкцій ГТ [11]: $T_{GM} = 32$ с, $T_1 = 0.5$ с, $T_2 = 0.01$ с, $K_U = 24$ с⁻¹/В, $K_{cc} = 50$ В/с⁻¹. Зовнішнє збурення $n_Z(t)$ задається у вигляді регулярної вібрації з частотою $\omega = 9$ с⁻¹ та амплітудою перевантаження $n_m = 0.001$.

Результати моделювання наведено на рис. 3.17 у вигляді графіків $\gamma(t)$ та $\hat{\gamma}(t)$, а також $\dot{\gamma}(t)$ та $\hat{\dot{\gamma}}(t)$.

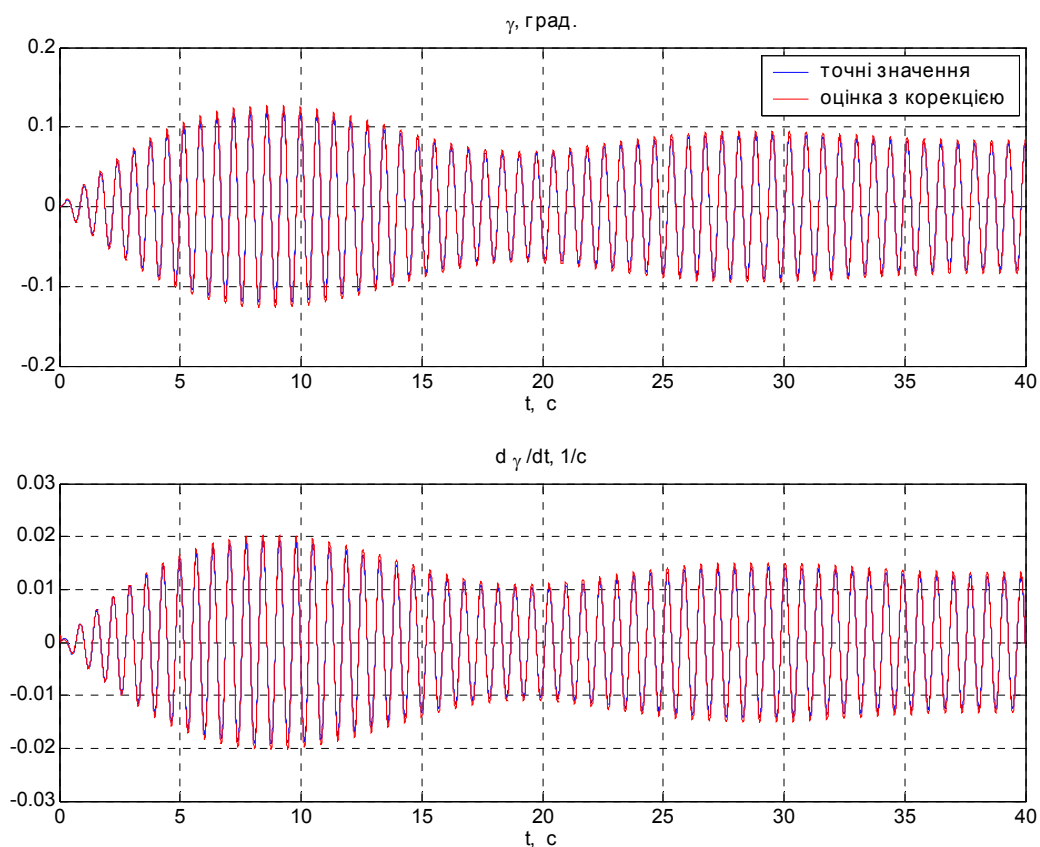


Рис. 3.17. Точні значення $\gamma(t)$, $\dot{\gamma}(t)$ та оцінки $\hat{\gamma}(t)$, $\hat{\dot{\gamma}}(t)$.

Крім того, на рис. 3.18 наведено залежності від часу похибок оцінювання:

$$\delta\gamma = \gamma(t) - \hat{\gamma}(t) ,$$

$$\delta\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(t) - \hat{\dot{\gamma}}(t) .$$

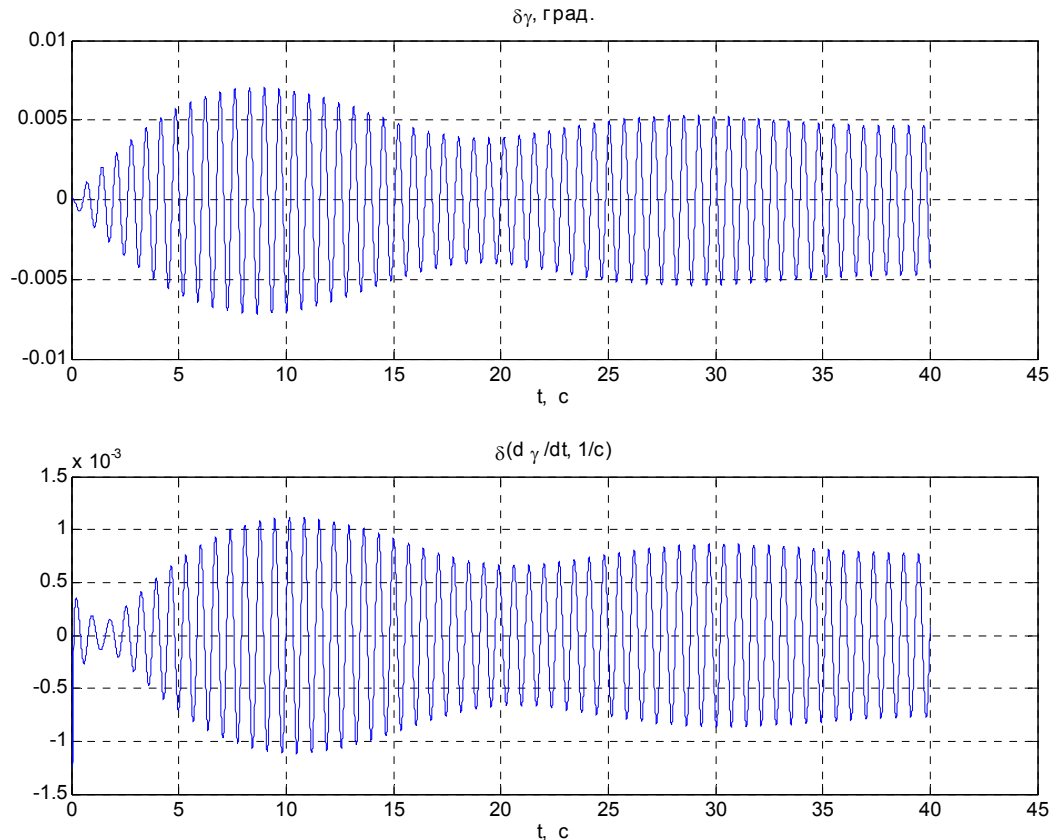


Рис. 3.18. Похибки оцінювання $\delta\gamma$, $\delta\dot{\gamma}$.

Наведені результати свідчать про високу точність оцінювання кутових параметрів руху ЧЕ, при цьому похибки оцінювання змінюються за тим самим законом, що і відповідні координати, і з часом зменшуються.

3.3. Моделювання алгоритмічної компенсації з використанням розроблених методів визначення додаткових параметрів руху ЧЕ

3.3.1. Розширена програмна модель

Для підтвердження результатів необхідно суттєво розширити вихідну програмну модель ГТ (п. 2.1.4) з врахуванням в ній отриманих результатів, що також є диференціальними залежностями, які необхідно інтегрувати разом з рівняннями (2.3)-(2.5). Тобто об'єднати програми моделювання, що описані в розділах 2.1.4 та 3.2.4. В підпрограму правих частин слід додати

скалярне подання рівнянь (3.3), (3.16), (3.19), а також врахувати передатну функцію:

$$W_{KL}(p) = \frac{K_{KL}(T_{KL}p + 1)}{p^4}.$$

В основну програму також додано розрахунок коефіцієнтів спостережувача відповідно до залежностей (3.4), (3.20).

Параметри розширеної програмної моделі наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Параметри програмної моделі

Назва	Значення, одиниці вимірювання
Кінетичний момент гіроскопа (номінальний)	$H = 0.4$ Нмс
Маса чутливого елемента	$m = 1$ кг
Відстань від точки підвісу до центра мас ЧЕ	$l = 0.1$ м
Момент інерції ЧЕ відносно осі X	$J_x = 1.13 \cdot 10^{-2}$ кгм ²
Момент інерції ЧЕ відносно осі Y	$J_Y = 4 \cdot 10^{-4}$ кгм ²
Момент інерції ЧЕ відносно осі Z	$J_Z = 1.13 \cdot 10^{-2}$ кгм ²
Коефіцієнт демпфування відносно осі X	$f_x = 10^{-3}$ Нмс
Коефіцієнт демпфування відносно осі Y	$f_Y = 4 \cdot 10^{-3}$ Нмс
Постійна часу гіромотора по швидкості	$T_{GM} = 32$ с
Постійні часу системи стабілізації	$T_1 = 0.5$ с $T_2 = 0.01$ с
Коефіцієнт передачі гіромотора по напрузі	$K_U = 24$ с ⁻¹ /В
Коефіцієнт передачі системи стабілізації	$K_{cc} = 50$ В/с ⁻¹
Постійна часу корегувальної ланки	$T_{KL} = 0.001$ с
Коефіцієнт передачі корегувальної ланки	$K_{KL} = 8 \cdot 10^3$

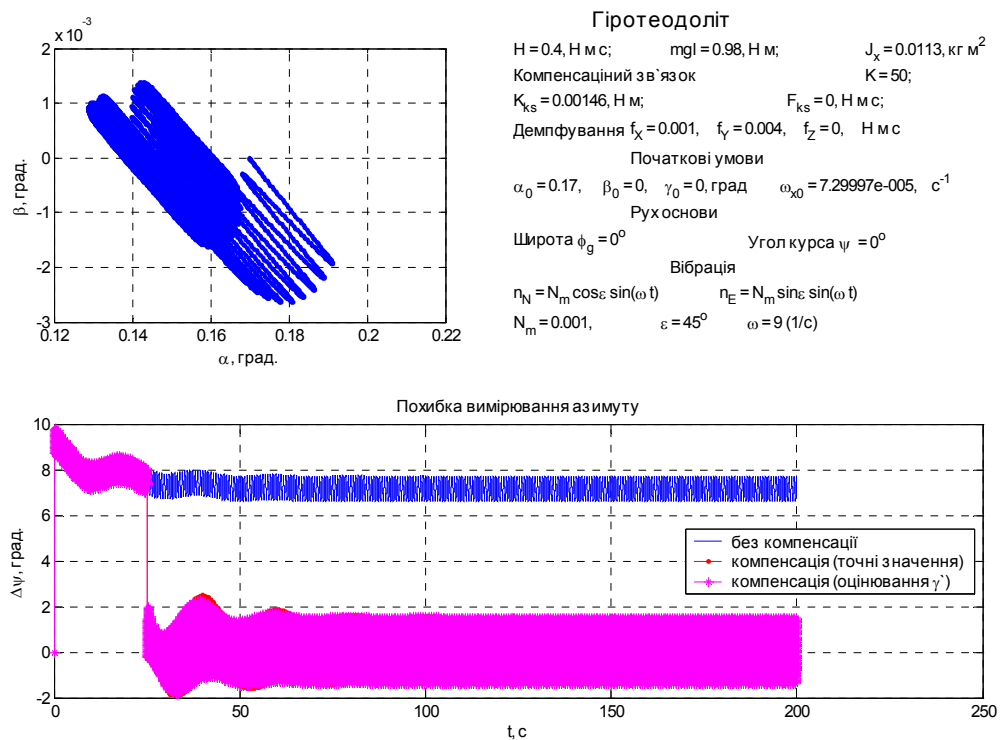
3.3.2. Моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за умов гармонійної вібрації основи з використанням розроблених методів визначення додаткових параметрів руху ЧЕ

Для моделювання регулярної вібрації розглянемо вібраційний сигнал виду:

$$n(t) = n_m \sin \omega t,$$

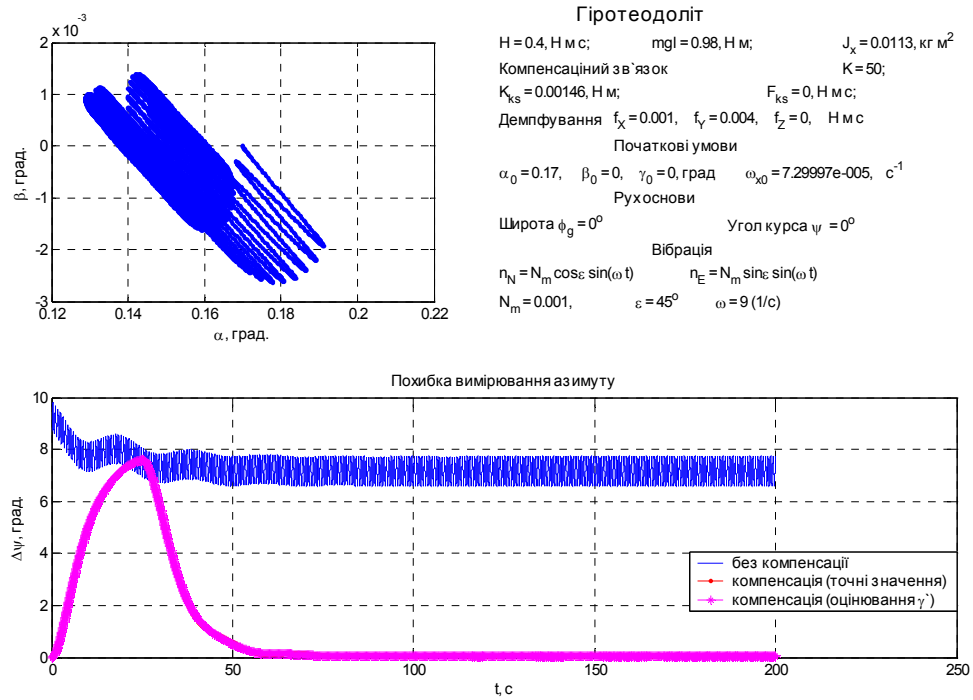
де n_m - амплітуда перевантаження, ω - частота вібраційного збурення.

Для наочності результатів візьмемо значення амплітуди перевантаження $n_m = 0.001$, а частоту $\omega = 9 \text{ с}^{-1}$.



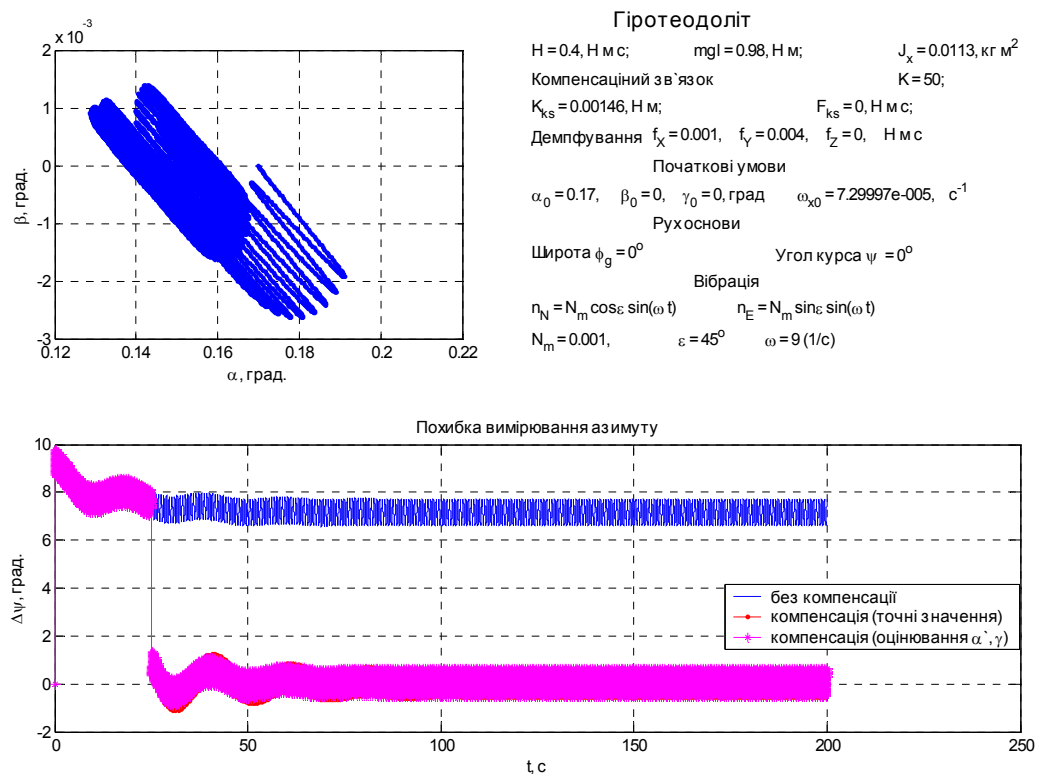
а) без використання фільтра

Рис. 3.19. Моделювання алгоритмічної компенсації за формулою (2.24).



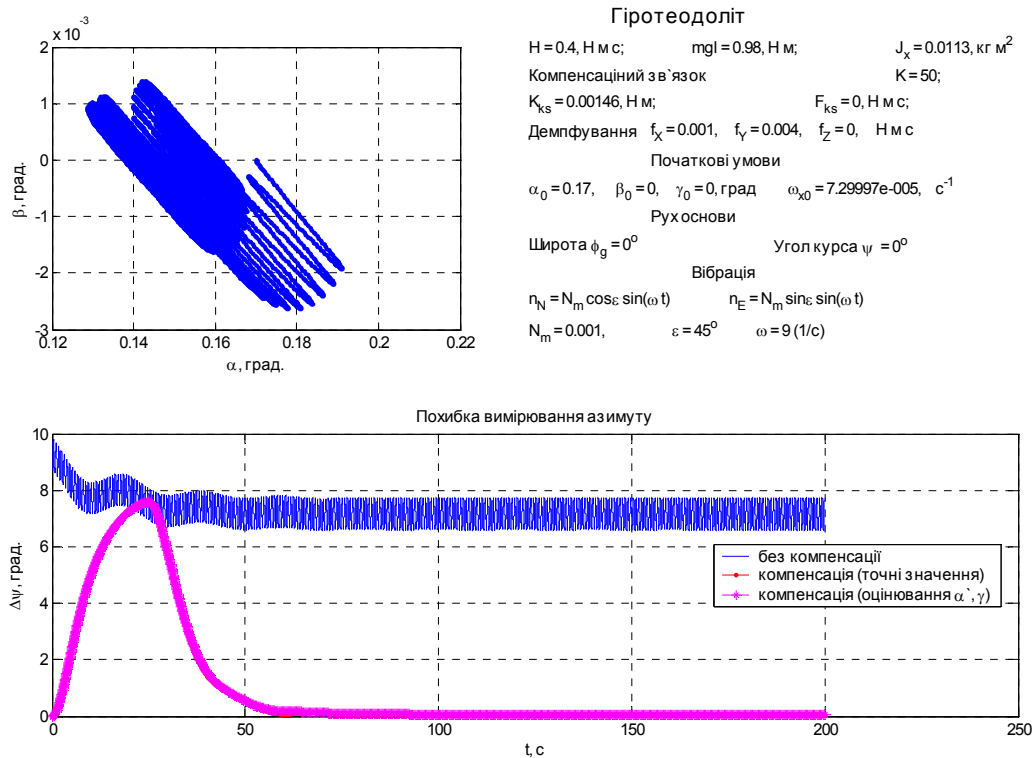
б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5 \text{ с.}$

Рис. 3.19. Моделювання алгоритмічної компенсації за формулою (2.24).



а) без використання фільтра

Рис. 3.20. Моделювання алгоритмічної компенсації за формулою (2.25).



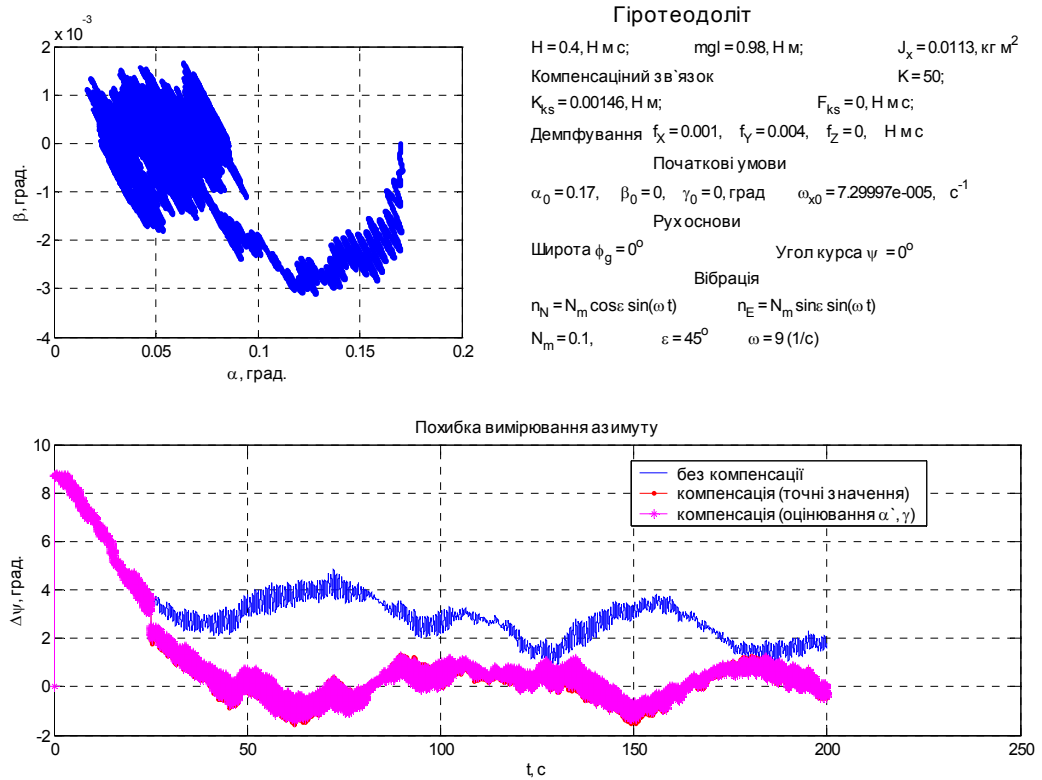
б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5 \text{ с.}$

Рис. 3.20. Моделювання алгоритмічної компенсації за формулою (2.25).

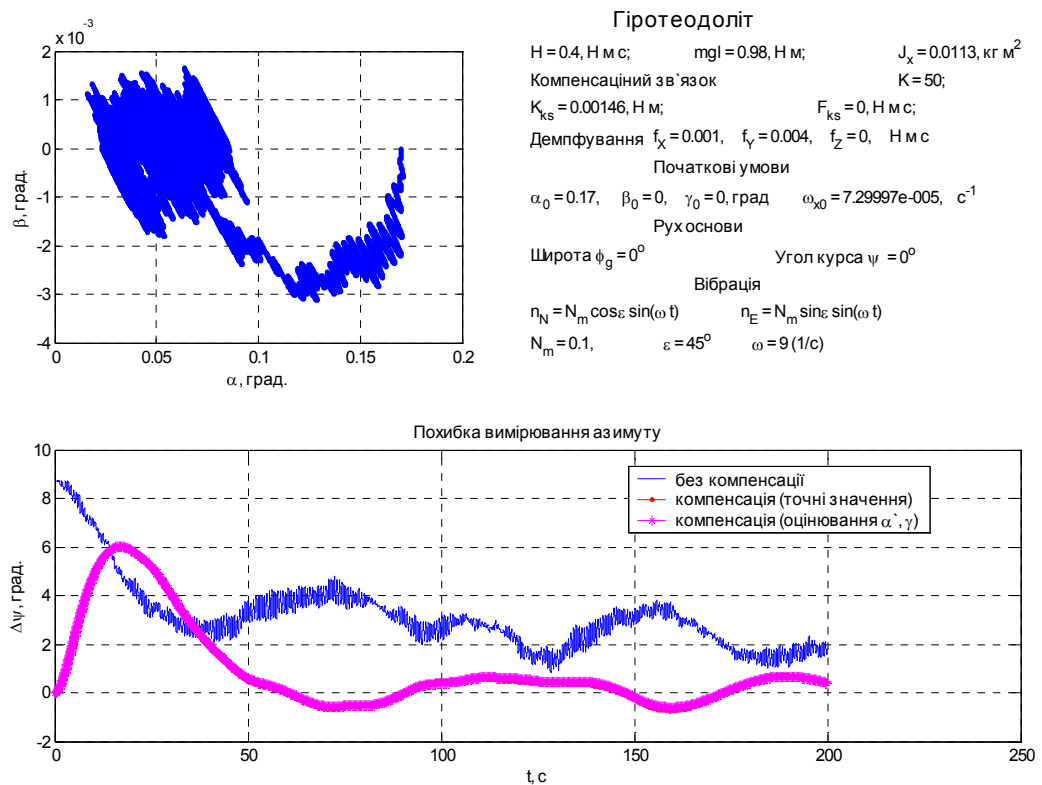
Як свідчать результати моделювання, представлені на рис. 3.19, 3.20 при регулярній вібрації основи з заданими параметрами середнє значення вібраційної похибки досягає 7° . Алгоритмічна компенсація за формулами (2.24) та (2.25) на рис. 3.17 та на рис. 3.18 відповідно дозволяє зменшити середнє значення похибки до рівня $5'$.

3.3.3. Моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за умов випадкової вібрації основи з використанням розроблених методів визначення додаткових параметрів руху ЧЕ

При моделюванні випадкової вібрації скористаємось залежностями (2.17) та (2.18), які визначають кореляційну функцію та спектральну щільність перевантаження точки підвісу чутливого елементу гіротеодоліту $n(t)$, яку можна вважати стаціонарним випадковим процесом.

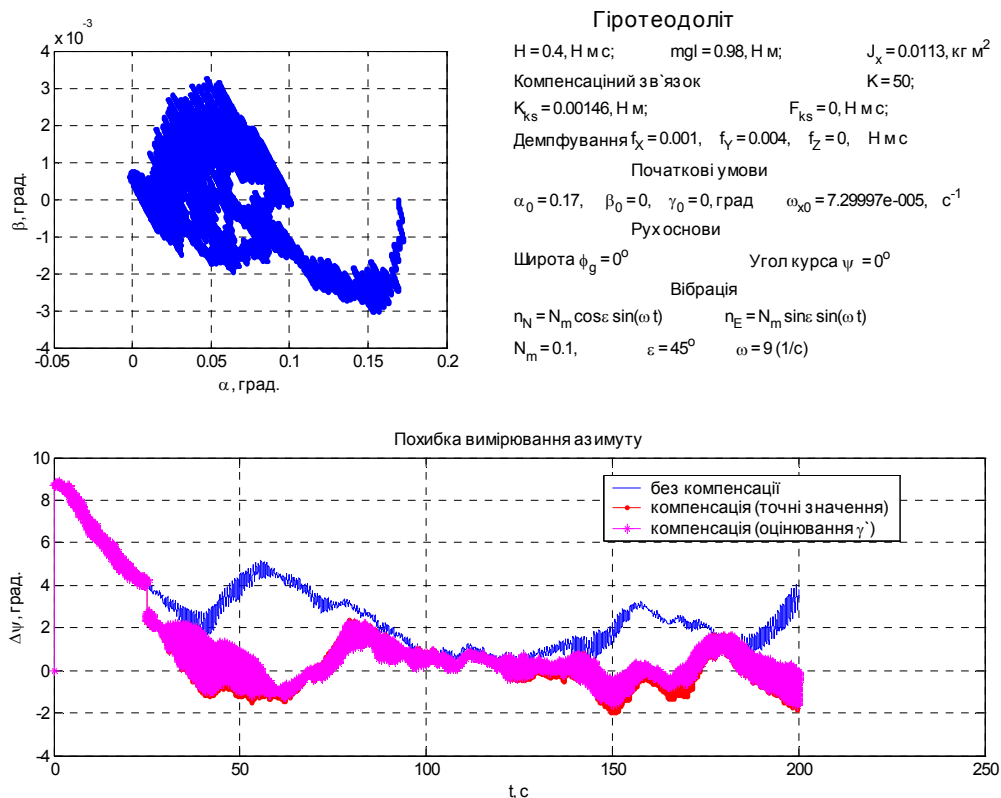


а) без фільтрації

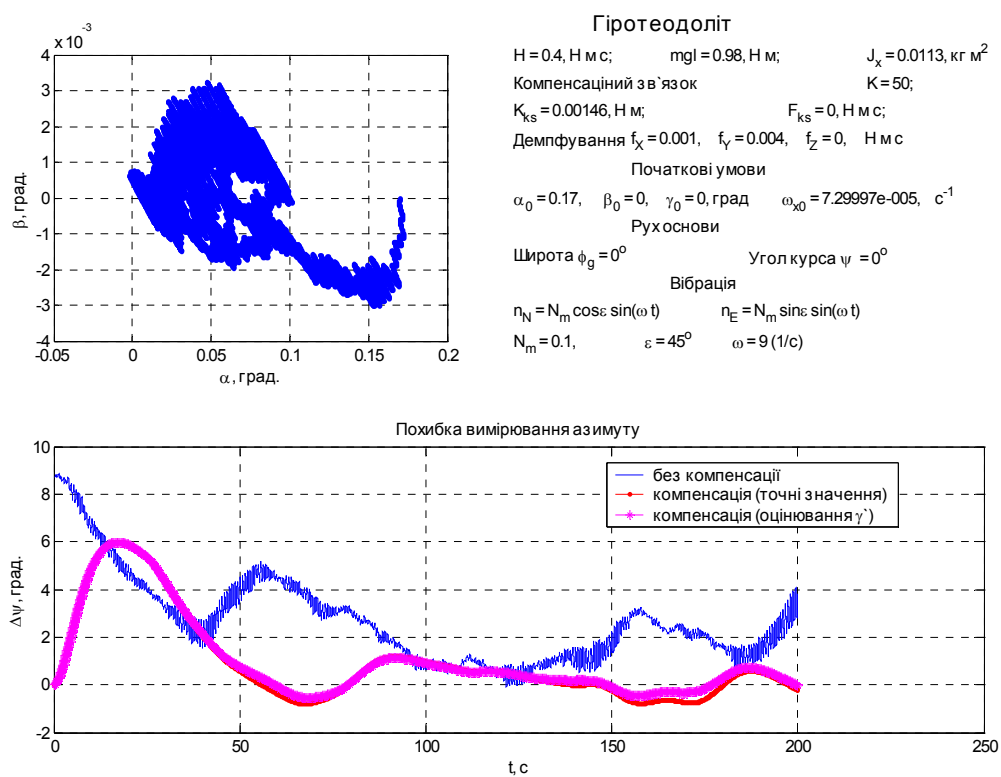


б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5 \text{ с.}$

Рис. 3.19. Моделювання алгоритмічної компенсації за формулою (2.24).



а) без фільтрації.



б) з фільтром (2.26) $T_\phi = 5 \text{ с}.$

Рис. 3.20. Моделювання алгоритмічної компенсації за формулою (2.24).

Як свідчать результати моделювання, представлені на рис. 3.19, 3.20 при регулярній вібрації основи з заданими параметрами середнє значення вібраційної похибки досягає 3° . Алгоритмічна компенсація за формулами (2.24) та (2.25) на рис. 3.19 та на рис. 3.20 відповідно дозволяє зменшити середнє значення похибки до рівня $15'$.

Наведені графічні залежності дають змогу стверджувати, що розроблені методи дозволяють отримати додаткову інформацію про рух чутливого елементу, використання якої для алгоритмічної компенсації вібраційної похибки може підвищити точність приладу в умовах збурень основи. Відносні похибки оцінювання кутових параметрів $\hat{\alpha}$, $\hat{\gamma}$, $\hat{\dot{\gamma}}$ при раціональному виборі коефіцієнтів спостережувача складають не більше 5%, тому графіки вихідного сигналу ГТ з компенсацією вібраційної похибки за точними значеннями і за оцінками в більшості випадків збігаються.

Отримані результати опубліковані в роботах [77,78,83,84].

Висновки до розділу 3

1. Розроблено методи визначення кутової швидкості чутливого елемента в азимуті на основі чисельного диференціювання та оцінювання спостережувачем. Проведене моделювання показало високу точність визначення кутової швидкості $\dot{\alpha}$, що дозволяє використовувати отриману додаткову інформацію для задач компенсації вібраційної похибки.

2. Проведено аналіз можливості визначення параметрів кутового руху ЧЕ ГТ в негіростабілізований площині γ та $\dot{\gamma}$, та розроблено метод оцінювання на основі інформації, що формується в системі стабілізації обертів гіромотора.

3. Проведено моделювання оцінювання додаткових параметрів руху чутливого елемента, яке показало високу точність оцінювання, що дозволяє використовувати такий сигнал в подальшому для алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

4. Проведено моделювання компенсації вібраційної похибки за отриманою розширеною математичною моделлю. Відносні похибки оцінювання складають не більше 5%, тому інформаційна модель, що включає систему стабілізації обертів гіромотора дозволяє зменшити вібраційну похибку шляхом її алгоритмічної компенсації.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГТ З АЛГОРИТМІЧНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ВІБРАЦІЙНОЇ ПОХИБКИ

4.1. Визначення прискорень, що спричиняють вібраційну похибку ГТ

В попередніх розділах показано, що поступальні вібрації основи, на якій встановлено ГТ, спричиняють появу у вихідному сигналі приладу додаткової вібраційної похибки вимірювання. Для оцінки реальних значень вібраційної похибки можна запропонувати вимірювання прискорень за допомогою спеціальних датчиків, наприклад акселерометрів, та подальшу обробку отриманої інформації на основі імітаційного моделювання. Такий підхід дозволяє вирішити одразу декілька задач: з одного боку визначити значення вібраційної похибки та перевірити достовірність отриманих теоретичних залежностей, а іншого – є можливість перевірити розроблені методи алгоритмічної компенсації зазначеної похибки.

4.1.1. Апаратурне та програмне забезпечення

Для визначення віброприскорень, які діють в місцях встановлення приладів типу гірокомпас та гіртеодоліт, було проведено їх вимірювання за допомогою датчиків типу ДА-11. Вимірювання проводились в приміщеннях складального цеху, дослідної лабораторії та випробувального полігону (2 приміщення) КП СПБ "Арсенал". На основі проведених експериментів було отримано великий масив експериментальних даних, результати обробки якого представлено в роботі [92, 93].

Експерименти проводились за допомогою спеціального вимірювального комплексу, до якого входять:

- 1) комплект з 2-х вимірювачів вібраційних прискорень (лінійних акселерометрів ДА-11) в одному корпусі;
- 2) комплект з 3-х вимірювачів вібраційних прискорень (лінійних акселерометрів ДА-11);
- 3) блок живлення і керування вимірювачів;
- 4) пристрій зв'язку АЦП L761;
- 5) персональний комп'ютер з програмним забезпеченням реєстрації та індикації.

На початковому етапі експериментів було проведено порівняльний аналіз спектрального складу шуму каналів АЦП в різних діапазонах вимірювань, який показав практично ідентичні результати по спектральному складу сигналів в діапазонах ± 5 В, $\pm 2,5$ В, $\pm 0,312$ В. Тому в подальшому в якості основного в АЦП використовувався вимірювальний діапазон ± 5 В як найбільш прийнятний в умовах неточного горизонтування вимірювачів, який може спричиняти появу значних за величиною (до 1 ... 1,5 В) постійних складових в сигналах вимірювачів [92].

4.1.2. Методика проведення вимірювань

Вимірювання проводилися в декількох точках по черзі двома комплектами вимірювачів (без жорсткого закріплення вимірювачів) при різних їх орієнтації. Час реєстрації – не менше 40 сек. Реєстрація в кожному випадку проводилося двічі [93].

В ході експериментів проводилася реєстрація сигналів вимірювачів з ортогонально орієнтованими вимірювальними осями: вимірювальні осі двох вимірювачів з комплекту 1 встановлювалися горизонтально, а вимірювальні осі трьох вимірників з комплекту 2 встановлювалися ортогонально в оправках кубічних, які, в свою чергу, закріплювали на платформі інсталяційний з трьома посадочними місцями [93].

Порядок вимірювання складався з наступних етапів.

1. Встановити блок вимірювачів в обрану точку робочого місця або виробничого приміщення.
2. Ввімкнути електроживлення персонального комп'ютера і вимірювальної системи.
3. Завантажити програмне забезпечення реєстрації сигналів вимірювачів.
4. Встановити значення коефіцієнтів передачі вимірювачів відповідно до використовуваним комплектом вимірювачів.
5. Установити значення діапазону вимірювань АЦП.
6. Запустивши програму реєстрації, перевірити наявність сигналів вимірювачів, за необхідності компенсувати апаратними та програмними засобами постійні складові сигналів, відповідні залишковим нахилам вимірювачів.
7. Запустити програму реєстрації.
8. Контролюючи на моніторі комп'ютера поточні значення сигналів вимірювачів в реальному часі, провести синхронну реєстрацію сигналів вимірювачів протягом 35 ... 40 сек.
9. Зупинити програму реєстрації.
10. Оцінити часові залежності зареєстрованої реалізації на відсутність збоїв реєстрації, у випадку наявності збоїв повторити пп. 6 - 9
11. Зберегти зареєстровану реалізацію в пам'яті комп'ютера, присвоївши файлу ім'я, коротко характеризує умови проведення реєстрації.
12. Зберігаючи незмінними умови проведення вимірювань, повторити пп. 6 – 11 не менше трьох разів.

В результаті вимірювань отримано залежності вібраційних прискорень від часу в місцях встановлення гіротеодолітів в приміщеннях складального цеху, дослідної лабораторії та випробувального полігону (2 приміщення) КП СПБ "Арсенал".

4.1.3. Спектральний аналіз отриманих експериментальних даних

Безпосередній аналіз даних, отриманих з вимірювачів віброприскорень в часовій області ускладнений наявністю багатьох складових в записаному сигналі, тому для аналізу спектрів використано алгоритм швидкого перетворення Фур'є. В результаті було отримано спектри сигналів вібраційних прискорень з 2-х ортогонально розташованих датчиків типу ДА-11, графіки яких, наприклад, представлені на рис. 4.1, 4.2 [92].

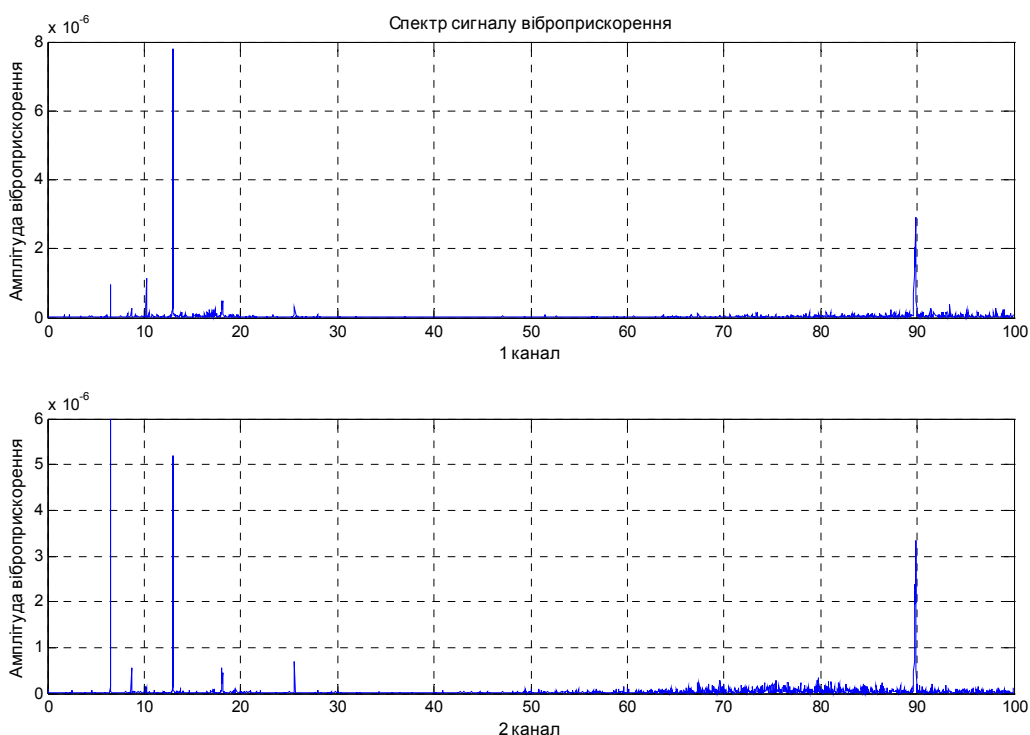


Рис. 4.1 Вимірювання вібраційного фону в приміщенні випробувального полігону (приміщення 1).

На отриманому графіку спектру (рис. 4.1) наявні складові в області 10 Гц, а також близько 90 Гц. З врахуванням АЧХ досліджуваного приладу типу гіротеодоліт складова 90 Гц не буде суттєво впливати на точність, а складові близько 10 Гц можуть призвести до виникнення вібраційної похибки, однак, враховуючи малу амплітуду віброприскорення біля $6 \cdot 10^{-6}$ м/с², фактично при випробуваннях приладів ця похибка не проявляється [92].

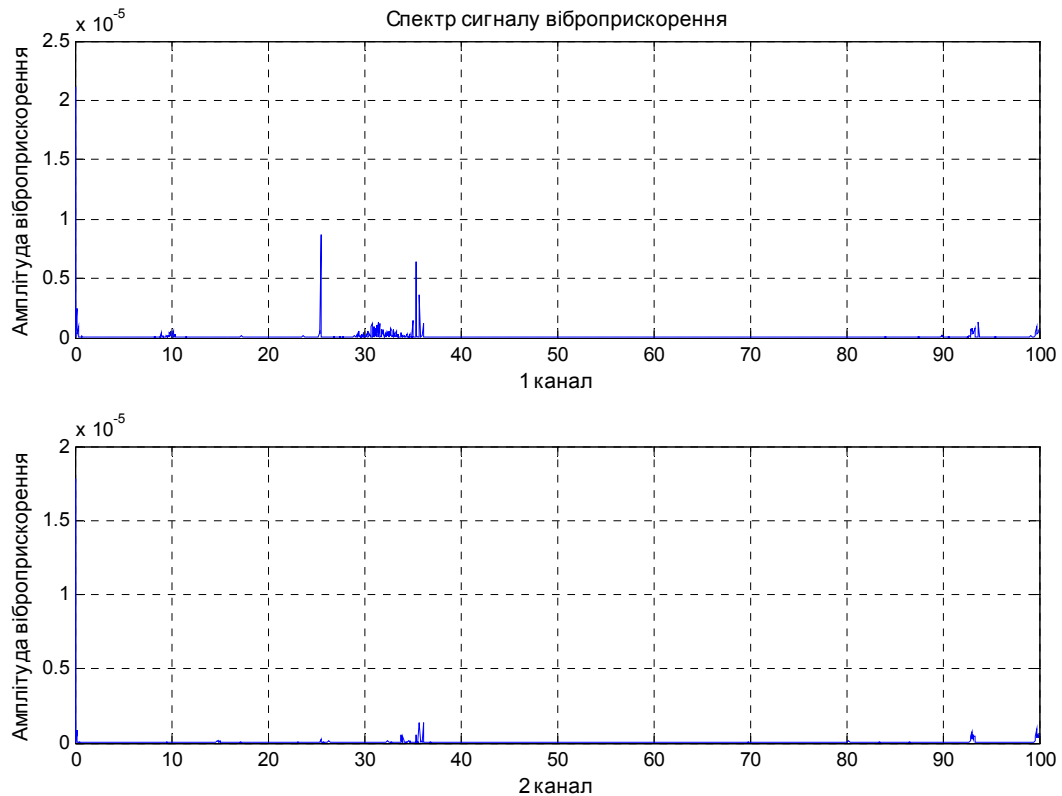


Рис. 4.2 Вимірювання вібраційного фону в приміщенні випробувального полігону (приміщення 2).

У другому приміщенні випробувального полігону вібраційний фон суттєво відрізняється (рис. 4.2): присутня смугова складова в області 30-40 Гц, крім того амплітуди віброприскорень суттєво менші порівняно з першим приміщенням [92].

Наступні графіки демонструють спектри віброприскорень, виміряних в приміщеннях дослідної лабораторії на 4 поверсі будівлі ЦКБ (рис. 4.3) та складального цеху (рис. 4.4).

В спектрі віброприскорення, виміряного в приміщенні дослідної лабораторії (рис. 4.3), присутня низькочастотна складова на частоті близько 2 Гц, яка близька до однієї з власних частот коливань ЧЕ. Такий характер спектру можливо пов'язаний з коливаннями будівлі на одній з власних частот [92]. Отже, у випадку встановлення ГТ в цьому приміщенні ймовірна поява значної вібраційної похибки, відповідно до АЧХ, наведеної на рис. 2.6.

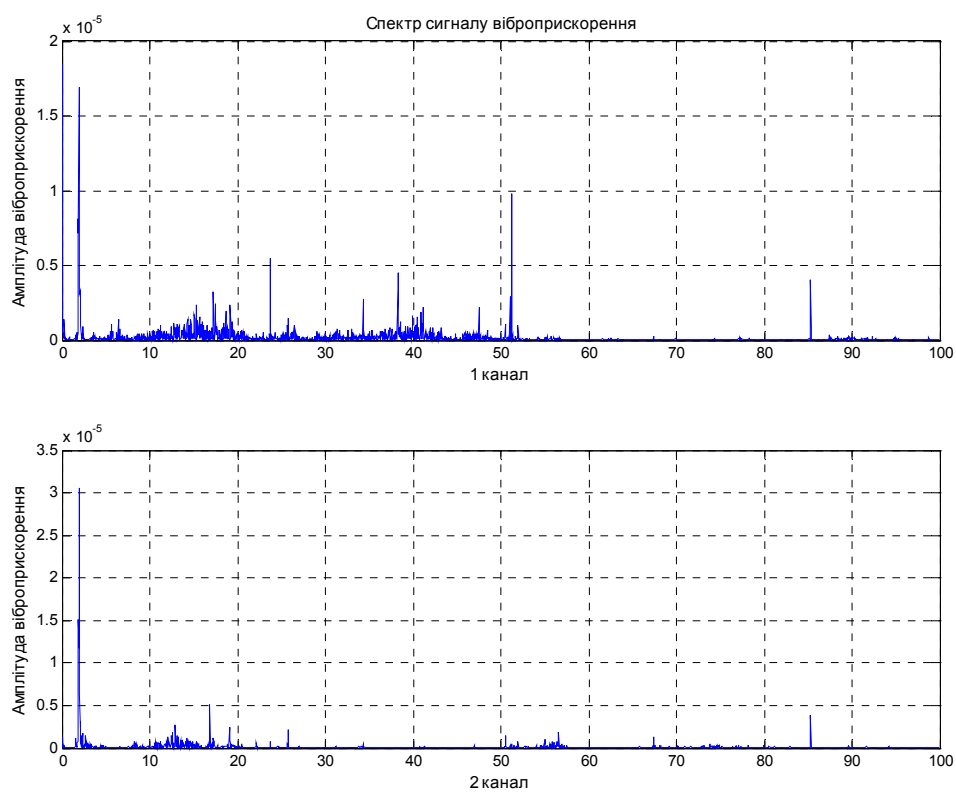


Рис. 4.3 Вимірювання вібраційного фону в приміщенні дослідної лабораторії на 4 поверсі будівлі ЦКБ

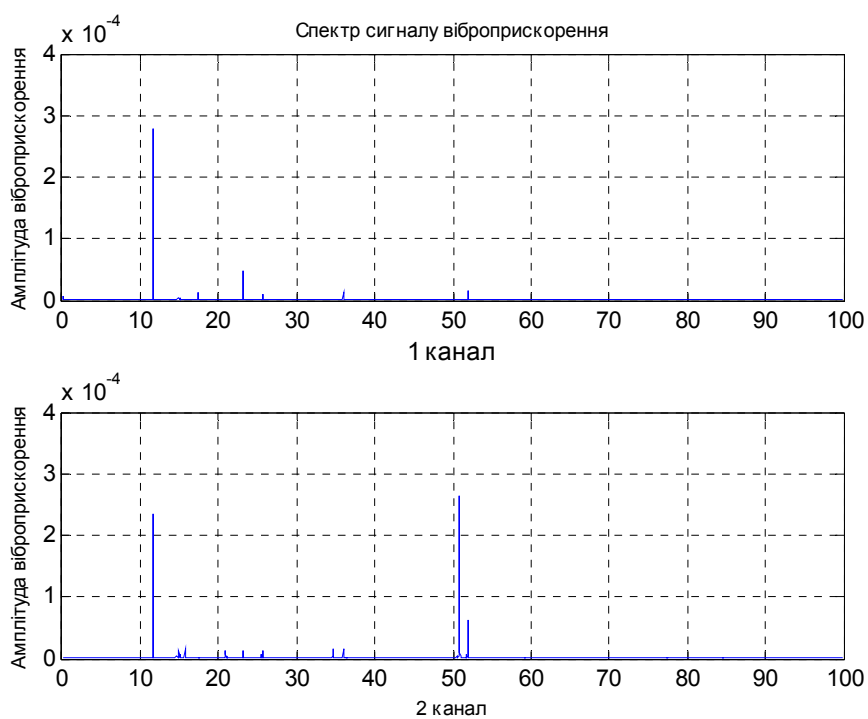


Рис. 4.4 Вимірювання вібраційного фону в приміщенні складального цеху.

Вібраційні прискорення, виміряні в приміщенні складального цеху (рис. 4.4) мають найбільшу складову на частоті 12 Гц в обох вимірювальних каналах з амплітудою $2.5 \cdot 10^{-4}$ м/с². Крім того, в одному з каналів присутня складова на частоті близько 50 Гц, яка може пояснюватись наведенням мережі живлення. Незважаючи на достатньо велику амплітуду низькочастотної складової 12 Гц при тестуванні гіртеодолітів в даному приміщенні вібраційна похибка не проявляється [92].

4.1.4. Імітаційне моделювання впливу віброприскорень на точність гіртеодоліту.

Розглянемо вплив реальних даних прискорень на модель описану в розділі 2, тобто замість тестових моделей синусоїдального та випадкового сигналів подамо в розрахункову модель ГТ значення вібраційних прискорень, отримані в результаті експерименту. Частота дискретизації АЦП в процесі вимірювань складала 2000 Гц (період $T_0 = 0.0005$ с) [92]. Для зменшення обсягу обчислень при моделюванні замість методу Рунге-Кутта 4 порядку інтегрування рівнянь моделі проводилось методом Хойна [69].

Для імітаційного моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки обрано експериментальний сигнал, знятий у приміщенні дослідної лабораторії, спектр якого представлений на рис.4.3 [92].

На рис. 4.5 представлено результати імітаційного моделювання впливу віброприскорень на ГТ та алгоритмічної компенсації вібраційної похибки відповідно до формул (2.25), (2.26).

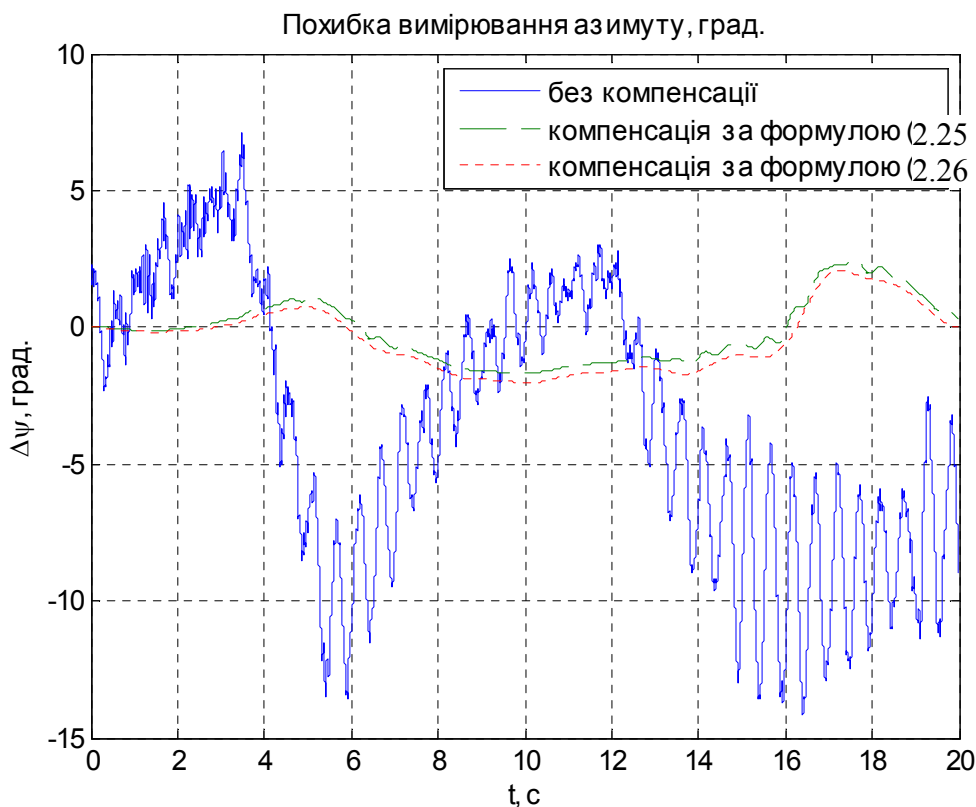


Рис. 4.5. Результати імітаційного моделювання.

Як видно з наведеного графіка (рис. 4.5) частота вимушених коливань відповідає низькочастотній компоненті спектру вібрації основи близько 2 Гц. Середнє значення вібраційної похибки, отримане за результатами імітаційного моделювання складає $\langle\alpha\rangle_m = -3.5266^\circ$. При моделюванні алгоритмічної компенсації вихідний сигнал пропускався через аперіодичний фільтр другого порядку з постійною часу $T_\phi = 2$ с. Середнє значення вібраційної похибки, після її компенсації складає в середньому 0.3214° , отже запропонований метод алгоритмічної компенсації дозволяє підвищити точність визначення азимуту гіротеодолітом за умови обмежено рухомої основи [92].

4.2. Експериментальні дослідження методу алгоритмічної компенсації

Відповідно до формул (2.25), (2.26) алгоритмічна компенсація вібраційної похибки ГТ можлива за відомими $\dot{\alpha}$ і γ , або $\dot{\gamma}$ та α . В більшості гіротеодолітів вихідним сигналом приладу є кут α , тобто для компенсації необхідно визначати кутову швидкість $\dot{\gamma}$, або диференціювати сигнал α та визначати γ . Як показано в попередньому розділі існує можливість використання інформації з системи керування частотою обертів ГМ для визначення γ та $\dot{\gamma}$. Розглянемо реалізацію такого способу визначення додаткових параметрів руху ЧЕ у наявних приладах вітчизняної розробки.

4.2.1. Опис конструктивної схеми гіротеодоліта

Для експериментальних досліджень було обрано автоматизований гіротеодоліт розробки КП СПБ «Арсенал», який реалізує компенсаційний метод визначення азимуту – за величиною каліброваного моменту, що врівноважує напругний момент гіроскопу поблизу стійкого та нестійкого положень динамічної рівноваги чутливого елемента [100-102]. Загальний вигляд такого приладу, у двох варіантах виконання, що встановлюється на штативі, наведено на рис. 4.6.

Склад комплекту приладу:

- 1) гіроблок;
- 2) блок керування;
- 3) штатив;
- 4) кабель з'єднувальний.

Виробником також передбачено можливість передачі даних через інтерфейс RS 422 на персональний комп'ютер.



Рис.4.6. Зовнішній вигляд двох комплектів приладу

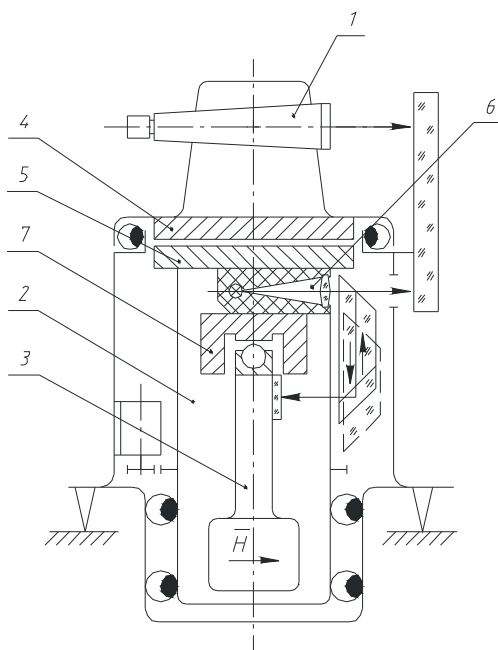


Рис. 4.7. Узагальнена конструктивна схема ГТ.

Головною особливістю конструктивної схеми даного ГТ (рис. 4.7) є наявність двох вертикальних осьових систем: осі повороту зорової труби 1 та осі повороту гіроблоку 2 з підвішеному в ньому чутливим елементом 3. При цьому ротор 4 і статор 5 автоматичного кодового датчика кута зв'язані, відповідно, з зоровою трубою та поворотним гіроблоком. На корпусі

гіроблоку розміщений фотоелектричний автоколіматор 6 в якості датчика кута розузгодження з чутливим елементом. В якості підвісу чутливого елементу застосовується магнітний підвіс 7. На нерухомому корпусі ГТ розміщується статор датчика моменту 8, ротор якого нерухомо закріплено на чутливому елементі 3.

Така схема побудови гіротеодоліту дозволяє скоротити час та спростити процес визначення азимуту, оскільки зорова труба в процесі визначення азимуту нерухома та узгоджена з орієнтирним напрямом.

Однією з основних вимог, що висувається до ГТ такого типу є забезпечення нерухомої основи при вимірюванні азимуту. На цей час гірокомпаси та гіротеодоліти, які побудовані з використанням цієї конструктивної схеми та реалізують компенсаційний метод, забезпечують визначення азимуту з середньою квадратичною похибкою $\delta = 20...30''$ за час $t = 8...12$ хв. Точність визначення азимуту такими приладами обмежується таким фактором, як похибка через неточність калібровки системи вимірювання компенсаційного моменту.

Такій схемі побудови ГТ притаманний ряд інструментальних моментних та геометричних похибок, які можуть мати як випадковий, так і систематичний характер. Моментні похибки виникають в результаті дії зовнішніх та внутрішніх шкідливих моментів, що впливають на положення власної осі обертання гіродвигуна в просторі. Геометричні похибки визначаються неточністю визначення цього положення та передачі цієї інформації споживачу.

4.2.2. Характеристики системи стабілізації обертів гіромотора.

Система стабілізації обертів гіромотора реалізована як підсистема блоку розгону і стабілізації (БРіС), що є функціональною складовою блоку керування гіротеодоліта. БРіС призначений для перетворення напруги постійного струму в змінну напругу синусоїдальної форми з коефіцієнтом

нелінійних спотворень до 32%. БРiС забезпечує форсований розгін гіромотора до номінальної частоти обертання ротора з подальшою її стабілізацією.

БРiС складається з трьох частин:

- 1) інвертора;
- 2) перетворювача;
- 3) пристрою керування.

Склад блоку розгону та стабілізації БРiС наведено на функціональній схемі (рис. 4.8).

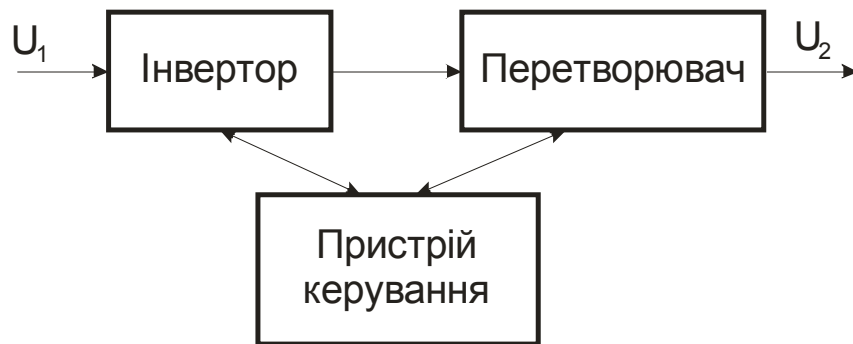


Рис. 4.8. Функціональна схема БРiС.

Для оптимізації часу форсованого розгону ГМ до номінальної частоти обертання ротора застосований амплітудно-частотний метод управління розгоном, при якому, частота напруги живлення ГМ змінюється по заданому закону, а лінійні струми живлення ГМ утримуються в заданому діапазоні. Стабілізація частоти обертання ГМ (після досягнення номінальної частоти) забезпечується регулюванням амплітуди напруги, що подається на ГМ при стабільній частоті напруги живлення.

При наявності напруги живлення, яка регулюється регулятором напруги, здійснюється управління транзисторами трифазного інвертора, який тактується імпульсами напруги керування, частота яких змінюється ступінчасто по заданому для розгону ГМ закону. Пристрій керування забезпечує синхронну роботу однофазних інверторів. При цьому на виході

встановлюється трифазна напруга зі взаємним фазовим зсувом в 120° та частотою в шість разів менше частоти сигналу $f_{кер}$.

При обертанні ГМ з наявного в ньому датчика швидкості через формувач сигналів на БРiС поступають імпульси напруги частотою, пропорційною частоті обертання ротора ГМ. В дільнику частоти сигналу датчика частоти обертання ГМ відбувається ділення частоти на 6 і отриманий сигнал $f_{\partial\partial}$ подається до входу імпульсного частотно-фазового дискримінатора (ІФД). Одночасно на інший вхід ІФД надходить сигнал опорної частоти f_{on} :

$$f_{on} = \frac{f_{кер} - 0,1f_{кер}}{6}.$$

Принцип роботи ІФД заснований на логічній обробці порядку проходження в часі імпульсів вхідних сигналів - опорного f_{on} і контрольованого $f_{\partial\partial}$. У режимі частотного порівняння при рівності частот сигналів $f_{on} = f_{\partial\partial}$ в ІФД формується донесення, що видається в пристрій керування (ПК). ПК видає команду на перемикання між двома сигналами частот $f_{кер}$ і f_{on} на наступну сходинку, що призводить до збільшення частоти і вихідної напруги. По мірі збільшення частоти і вихідної напруги відбувається форсований розгін ГМ.

При включенні сигналу $f_{кер}$ найбільшого рівня змінюється вхідний дільник напруги підсилювача, після чого розгін ГМ триває при зниженому струмі в фазах. При досягненні номінального значення частоти обертання ротора ГМ ІФД автоматично переходить з режиму частотного порівняння сигналів в режим порівняння по фазі. На виході ІФД формуються імпульси тривалістю, пропорційній фазовому зсуву між сигналами f_{on} і $f_{\partial\partial}$, після чого імпульси перетворюються в аналоговий сигнал, амплітуда якого пропорційна тривалості імпульсів. Таким чином на виході встановлюється трифазна напруга, при якій забезпечується стабілізація частоти обертання ротора ГМ за рахунок автоматичного регулювання напруги живлення при стабільній

частоті $f_{кер}$. БРiС переходить з режиму форсованого амплітудно-частотного розгону ГМ в режим стабілізації частоти обертання ротора ГМ.

4.2.3. Результати визначення додаткових параметрів руху ЧЕ ГТ на основі вимірювань вихідного сигналу ІФД.

ІФД включений в систему фазового автопідстроювання частоти обертання ротора ГМ. У режимі фазового порівняння (стабілізації обертів ГМ) на виході ІФД формується широтно-модульований сигнал пропорційний різниці фаз порівнюваних сигналів f_{on} і $f_{до}$, що передається до керуючого мікроконтролера (МК) та до пристрою керування трифазним інвертором, який формує трифазну напругу живлення ГМ необхідної амплітуди. МК також контролює напругу, що формується інвертором, та може передавати отримані дані на зовнішню ЕОМ через інтерфейс RS-422 (рис. 4.8). Результати вимірювань фазового зсуву між сигналами f_{on} і $f_{до}$ на виході ІФД представлено на рис. 4.9.

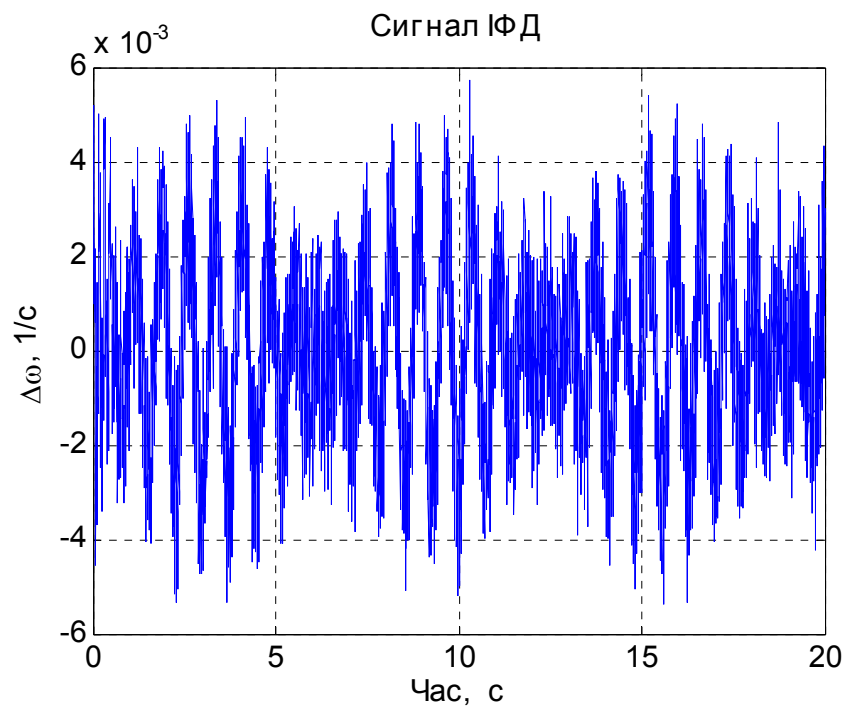


Рис. 4.9. Виміряний сигнал на виході фазового дискримінатора.

Як видно з представленого графіка (рис. 4.9) сигнал має значну за амплітудою випадкову складову, тому для аналізу спектру даного сигналу використано перетворення Фур'є.

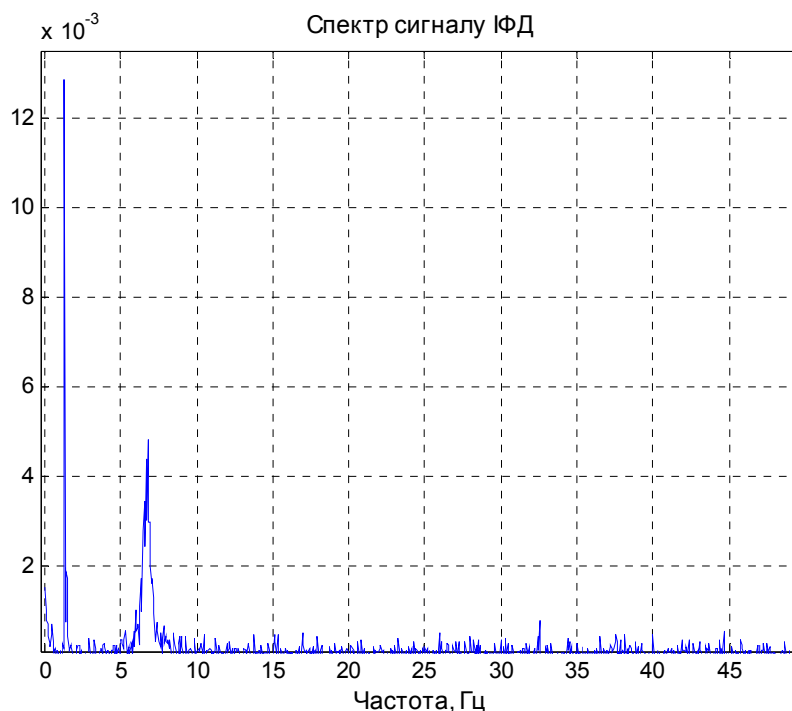


Рис. 4.10. Спектр сигналу на виході фазового дискримінатора.

З аналізу спектру (рис. 4.10) видно, що у вихідному сигналі ІФД присутні складові, які відповідають частотам власних коливань ЧЕ в негiростабілізованій площині: $f_1 = 1.2$ Гц, $f_2 = 6.4$ Гц, що узгоджується з раніше наведеною (3.16) математичною моделлю руху чутливого елементу ГТ.

Розглянемо можливості застосування розроблених методів оцінювання параметрів кутового руху ЧЕ γ та $\dot{\gamma}$ на основі експериментальних сигналів, отриманих з блоку розгону та стабілізації обертів ГМ. В цьому випадку в матричному рівнянні оцінювання (3.19) вектор вимірювань Y складатиметься з одного сигналу – вимірюної різниці фаз між f_{on} і $f_{\partial o}$, що приведена до зміни кутової швидкості обертання ГМ. Похибки оцінювання змінних $\hat{\gamma}(t)$ та $\hat{\dot{\gamma}}(t)$, отримані в результаті інтегрування рівняння оцінювання з експериментальним сигналом ІФД наведено на рис. 4.11.

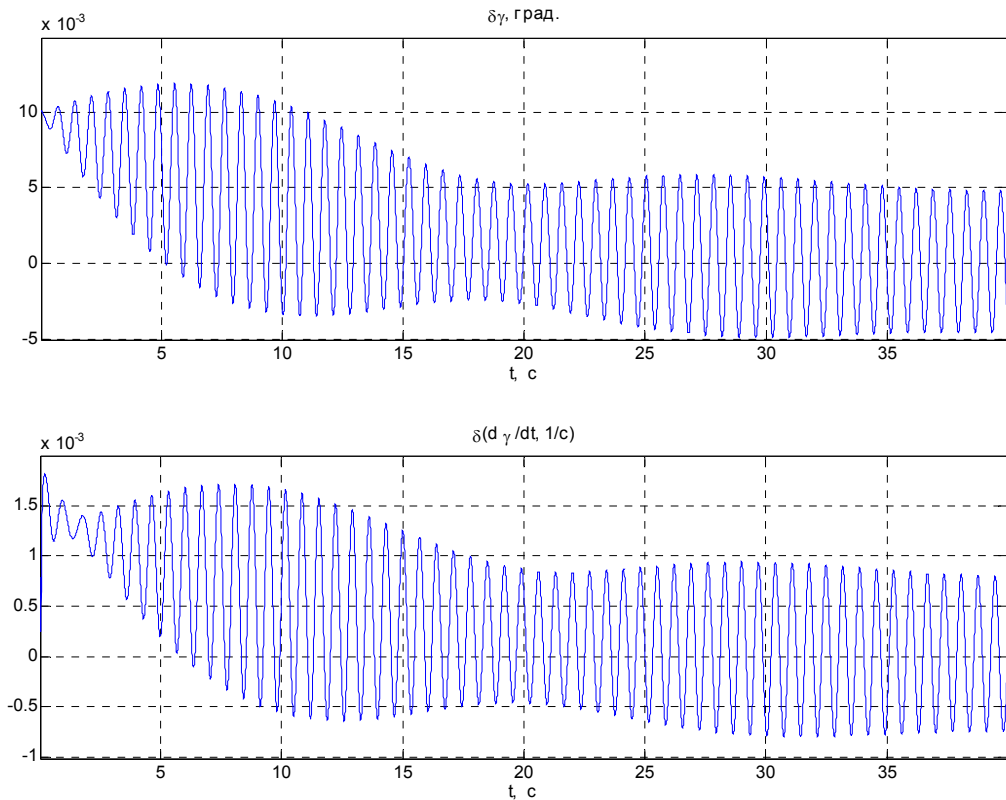


Рис. 4.11. Результати оцінювання змінних $\hat{\gamma}(t)$ та $\hat{\dot{\gamma}}(t)$.

Як видно з поданих на рис 4.11 результатів оцінки додаткових параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту відповідають результатам моделювання, отже їх можна використовувати для підвищення точності гіротеодоліту.

4.2.4. Результати обчислень вібраційної похибки за експериментальними даними. Порівняльний аналіз отриманих результатів з вимірюваннями азимуту гіротеодолітом.

Обчислення похибки проводилось на основі експериментальних даних, які були отримані на виході імпульсного частотно-фазового дискримінатора. За отриманими даними проводилось оцінювання кутової швидкості $\dot{\gamma}$, та кута γ та обчислювалась вібраційна похибка, яка віднімалась від виміряного значення азимуту. Результати подані на рис. 4.9.

При обчисленнях використані числові значення параметрів приладу, які наведені в табл. 4.1

Таблиця 4.1. Параметри гіротеодоліту

Назва	Значення, одиниці вимірювання
Кінетичний момент гіроскопа (номінальний)	$H = 0.4$ Нмс
Маса чутливого елемента	$m = 1$ кг
Відстань від точки підвісу до центра мас ЧЕ	$l = 0.1$ м
Момент інерції ЧЕ відносно осі X	$J_x = 1.13 \cdot 10^{-2}$ кгм ²
Момент інерції ЧЕ відносно осі Y	$J_Y = 4 \cdot 10^{-4}$ кгм ²
Момент інерції ЧЕ відносно осі Z	$J_Z = 1.13 \cdot 10^{-2}$ кгм ²
Постійна часу гіромотора по швидкості	$T_{GM} = 32$ с
Постійні часу системи стабілізації	$T_1 = 0.5$ с, $T_2 = 0.01$ с
Коефіцієнт передачі гіромотора по напрузі	$K_U = 24$ с ⁻¹ /В
Коефіцієнт передачі системи стабілізації	$K_{cc} = 50$ В/с ⁻¹
Постійна часу корегувальної ланки	$T_{кл} = 0.001$ с
Коефіцієнт передачі корегувальної ланки	$K_{кл} = 8 \cdot 10^3$

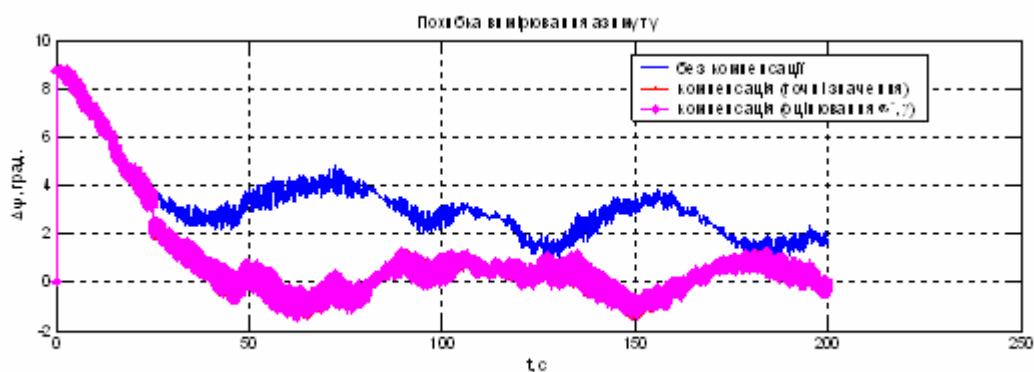


Рис. 4.12. Результати вимірювання азимуту з компенсацією вібраційної похибки.

З аналізу графіка (рис. 4.12) видно, що визначення оцінок параметрів руху чутливого елементу в негіростабілізованій площині за інформацією з блоку розгону та стабілізації ГМ може використовуватись для обчислення вібраційної похибки та її суттєвого зменшення шляхом алгоритмічної компенсації.

Отримані результати опубліковані в роботах [88,92].

Висновки до розділу 4

1. Проведено експериментальні дослідження характеристик вібраційного фону в місцях встановлення приладів типу гіротеодоліт. Показано, що у спектрах вібраційних сигналів наявні низькочастотні складові, які можуть спричинити появу вібраційної похибки ГТ.

2. Розроблено програмну модель на основі динамічних рівнянь руху чутливого елементу ГТ, проведено імітаційне моделювання впливу гармонічної вібрації для підтвердження адекватності моделі.

3. Проведено аналіз експериментальних сигналів, отриманих з блоку розгону та стабілізації обертів ГМ. Оцінки змінних $\hat{\gamma}(t)$ та $\hat{\dot{\gamma}}(t)$, отримані в результаті інтегрування рівняння оцінювання можуть бути застосовані для алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту.

ВИСНОВКИ

Головний науковий результат роботи полягає в підвищенні точності гіротеодоліта в умовах обмежено рухомої основи, розробці та вдосконаленні комплексу методів визначення додаткових параметрів руху чутливого елемента ГТ, що дозволяють використання методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту.

1. Розроблено і перевірено на адекватність комплекс комп'ютерних програмних засобів для моделювання руху чутливого елемента гіротеодоліту, який дозволяє враховувати вплив різного виду поступальної вібрації основи та особливості роботи приладу в компенсаційному режимі.

2. Проведено моделювання (за створеним програмним комплексом) роботи приладу при гармонічно змінюваній та випадковій поступальній вібрації основи. Результати моделювання показали повну їх відповідність теоретично відомим особливостям руху гіротеодоліту за аналогічних умов.

3. Запропоновано шляхи здійснення алгоритмічної компенсації вібраційної похибки ГТ. За допомогою програмного комп'ютерного моделювання доведено, що алгоритмічна компенсація є одним з ефективних і перспективних засобів підвищення точності ГТ за вібрації основи.

4. Розроблено методи визначення кутової швидкості чутливого елемента в азимуті на основі чисельного диференціювання та оцінювання спостережувачем. Проведене моделювання показало високу точність визначення кутової швидкості $\dot{\alpha}$, що дозволяє використовувати отриману додаткову інформацію для задач компенсації вібраційної похибки.

5. Проведено аналіз можливості визначення параметрів кутового руху ЧЕ ГТ в негіростабілізований площині γ та $\dot{\gamma}$, та розроблено метод оцінювання на основі інформації, що формується в системі стабілізації обертів гіромотора.

6. Проведено моделювання компенсації вібраційної похибки за отриманою розширеною математичною моделлю. Відносні похибки

оцінювання складають не більше 5%, тому інформаційна модель, що включає систему стабілізації обертів гіромотора дозволяє зменшити вібраційну похибку шляхом її алгоритмічної компенсації.

7. Проведено експериментальні дослідження характеристик вібраційного фону в місцях встановлення приладів типу гіротеодоліт. Показано, що у спектрах вібраційних сигналів наявні низькочастотні складові, які можуть спричинити появу вібраційної похибки ГТ.

8. Проведено аналіз експериментальних сигналів, отриманих з блоку розгону та стабілізації обертів ГМ. Оцінки змінних $\hat{\gamma}(t)$ та $\hat{\dot{\gamma}}(t)$, отримані в результаті інтегрування рівняння оцінювання можуть бути застосовані для алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту.

9. Розроблені методи визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту захищено патентами України на корисну модель. Результати досліджень були використані при випробуваннях гіротеодолітів в КП СПБ “Арсенал”. Теоретична частина результатів роботи також впроваджена в учбовому процесі кафедри приладів і систем орієнтації та навігації приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського для організації занять студентів з дисципліни “Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Торочков В. Ю. Гиротеодолиты / В. Ю. Торочков. – М.: Недра, 1970. – 136 с.
2. Воронков Н. Н. Гироскопическое ориентирование / Н. Н. Воронков, В. В. Кутырев, Н. А. Ашимов. – М.: Недра, 1980. – 296 с.
3. Голованов В. А. Гироскопическое ориентирование / В. А. Голованов. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2004. – 92 с.
4. Торочков В. Ю. Гироскопы в геодезии и аэросъемке / В. Ю. Торочков. – М.: Недра, 1969. – 136 с.
5. Сербин В. В. Современные принципы и технологии в топогеодезической подготовке местности / В. В. Сербин, В. П. Фролов // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». 21-23 квітня 2003 р. Збірник доповідей. Ч.2. – К., 2003. – С. 232.
6. Wetherelt A. Underground Azimuth Determinations Using an Adapted Wild GAK1 [Електронний ресурс] / A. Wetherelt, P. Hunt // FIG XXII International Congress. Washington, D.C. USA, April 19-26 2002 – Режим доступу до ресурсу: http://www.fig.net/resources/proceedings/before_2005/fig_2002/fig_2002_abs/TS6-1/TS6_1_wetherelt_hunt_abs.pdf
7. Kebbieh Y. Precise method gyrotheodolite azimuth determination [Електронний ресурс] / Y. Kebbieh // 11th FIG Symposium on Deformation Measurement, Santorini (Thera) Island, Greece, 25-28 May 2003 – Режим доступу до ресурсу: <http://www.fig.net/commission6/santorini/D-Instrumentation & New Tech/D8.pdf>
8. Lam, S. W. Y. Engineering Surveying for the Construction of Railway Tunnels in Hong Kong / S. W. Y. Lam, A.P.C. Chan // Geomatica. – Vol. 65, – No. 2, – 2010 – pp. 167 – 174

9. Lewen, I. Use of gyrotheodolite in underground control network, Master's of Science Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden. – 2006
10. Голик М.Н. Наземные гирокомпасы и гиротеодолиты разработки КП «ЦКБ «Арсенал» / М.Н. Голик, А.М. Шостак, Г.Г. Кильдышов // V Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». 21-23 квітня 2005 р. Збірник доповідей. Ч.1. – К., 2005. – С. 83-95.
11. Юр'єв Ю.Ю. Сучасні гіроскопічні засоби азимутального орієнтування / Ю.Ю. Юр'єв // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 24-25 квітня 2007 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2007 – с. 24-25
12. Ліхоткін О.М. Історія розвитку і перспективи створення засобів азимутального орієнтування розробки ЦКБ «Арсенал» / О.М. Ліхоткін, Ю.Ю. Юр'єв // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». 26-27 квітня 2007 р. Збірник доповідей. Ч.1. – К., 2007. – С. 333-338.
13. GYROMAT 3000. Fully Automatic Precision Gyroscope [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: http://www.dmt.de/fileadmin/PDF/Broschueren/Produkte/GYROMAT3000_e.pdf
14. GYROMAT 5000. The Most Accurate Precision-Surveying Gyroscope in the World [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: http://www.dmt.de/fileadmin/PDF/Broschueren/Produkte/GYROMAT5000_e.pdf
15. Automated Gyro Stations. GYRO X II [Електронний ресурс]. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: http://www.topcon.co.jp/en/positioning/sokkia/products/pdf/GyroXII_E.pdf
16. GYROMAX™ Gyroscopes [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.gmt-heger.com/index.php?id=8&lang=en>

17. Одинцов А. А. Теория и расчет гироскопических приборов / А. А. Одинцов. – К.: Вища школа, 1985.
18. Юр'єв Ю.Ю. Малогабаритний пристрій для азимутального орієнтування напрямків. Перспективи розвитку / Ю.Ю. Юр'єв, Е.С. Машиністов, О.М. Ліхоткін // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 28-29 квітня 2009 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2009 – с. 23-24
19. Боярчук А.А. Начальная выставка БИНС с помощью гирокомпаса с функцией определения вертикали / А.А. Боярчук, А.Ю. Дмитриев, Э.С. Машиністов. // VII науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 22-23 квітня 2008 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2008 – с. 27
20. Патент 75648 Україна. МПК G01C 19/00. Гіротеодоліт / Баснін Б. О.; Бузанов В. І.; Вірко В. Д.; Голік М. М.; Дітюк-Сніцаренко П. С.; Єсипенко С. І.; Копитько В. П.; Ніжник І. І.; Сидоренко Ю. З.; Сичиков О. О.; Сосуновський О. С.; Шуть В. П.; заявник казенне підприємство "Центральне конструкторське бюро "Арсенал". – № 20031110201; заявл. 12.11.2003; опубл. 15.05.2006, бюл. № 5, 2006 р.
21. Патент 77177 Україна. МПК G01C 19/00. Гіроскопічний пристрій для азимутального орієнтування напрямків / Баснін Б. О.; Бузанов В. І.; Вірко В. Д.; Голік М. М.; Дітюк-Сніцаренко П. С.; Єсипенко С. І.; Копитько В. П.; Ніжник І. І.; Сидоренко Ю. З.; Сичиков О. О.; Сосуновський О. С.; Шуть В. П.; заявник казенне підприємство "Центральне конструкторське бюро "Арсенал". – № 20031110202; заявл. 12.11.2003; опубл. 15.11.2006, бюл. № 11, 2006 р.
22. Патент 83114 Україна. МПК G01C 19/00. Гірокомпас / Бузанов В. І.; Голік М. М.; Дмитрієв О.Ю.; Копитько В. П.; Машиністов Е. С.; Сидоренко Ю. З.; Сичиков О. О.; Сосуновський О. С.; Шуть В. П.; заявник казенне підприємство "Центральне конструкторське бюро "Арсенал". – № а200609336; заявл. 28.08.2006; опубл. 10.06.2008, бюл. № 11, 2008 р.

23. Патент 83608 Україна. МПК G01C 19/00. Гіроскопічний пристрій для азимутального орієнтування напрямків / Машиністов Е. С.; Юр'єв Ю. Ю.; Ліхоткін О. М.; Горєлов Є. М.; Пригода Н. В.; заявник казенне підприємство "Центральне конструкторське бюро "Арсенал". – № а200711530; заявл. 18.10.2007; опубл. 25.07.2008, бюл. № 14, 2008 р.
24. Кашеваров Ю. Б. Гирскопическое ориентирование / Ю. Б. Кашеваров. – М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1964. – 80 с.
25. Комплекты гирокомаса 1Г17 и 1Г17-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – К., 1982. – 186 с.
26. Ганиев Р. Ф. Резонансные колебания гирскопических систем / Р. Ф. Ганиев, В. М. Воробьев, А. И. Лютый. – К.: Наукова думка, 1979. – 188 с.
27. Гиротеодолит ГТ-3. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – К., 1986. – 169 с.
28. Урман Ю. М. Уводящие моменты, вызываемые несферичностью ротора, в подвесе с аксиально-симметричным полем / Ю. М. Урман. // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1973. – №1. – С. 24–31.
29. Сергеев М. А. Наземные гирокомпасы / М. А. Сергеев. – Л.: Машиностроение, 1969. – 232 с.
30. Малогабаритный гирокомпас на квазичетырехчастотном лазерном гироскопе / [Ю. Д. Голяев, И. В. Дронов, Ю. Ю. Колбас та ін.]. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". – 2012. – №3. – С. 112–125.
31. Михеев А. В. Исследование погрешностей бесплатформенного инерциального гирокомаса на основе трех гирскопических измерителей угловой скорости и трех измерителей кажущегося ускорения : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.03 "Приборы навигации" / Михеев А. В. – Саратов, 2012. – 20 с.
32. Andrew R. Spielvogel; Louis L. Whitcomb A stable adaptive attitude estimator on $SO(3)$ for true-North seeking gyrocompass systems: Theory and

- preliminary simulation evaluation / 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 29 2017-June 3 2017. pp. 3231 – 3236.
33. Szabó, G. Inertialmesstechnische Richtungsübertragung in einem Vertikalschacht mit der Hilfe von Laserkreisel-Zeitreihenanalyse / Beiträge zum 15 Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, 2007. – pp. 383–394.
 34. Li Guodong; Wang Xiangjin; Wang Jia; Su Peng Design and Analysis of North-seeking Method by Time Differencing Method of Gyro-theodolite / 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 8-10 December 2012. – pp: 313 – 317
 35. Мелешко В. В. Самоориентирующий указатель курса / В. В. Мелешко, В. В. Корнейчук, О. В. Скуднева. // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Приладобудування". – 2008. – №36. – С. 5–12.
 36. Мелешко В. В. Гироскоп направления с интегрально-позиционной горизонтальной коррекцией на вираже / В. В. Мелешко, О. В. Скуднева. // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Приладобудування". – 2009. – №37. – С. 5–13.
 37. Мелешко В. В. Гироскоп направления с интегрально-позиционной горизонтальной коррекцией на качке / В. В. Мелешко, А. Ю. Янчевский, О. В. Скуднева. // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Приладобудування". – 2010. – №39. – С. 14–20.
 38. Мелешко В. В. Гіроскоп напрямку з супутниковою корекцією / В. В. Мелешко, С. А. Мураховський. // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Приладобудування". – 2015. – №49. – С. 26–32.
 39. Мелешко В. В. Двухрежимный корректируемый гироскоп направления / В. В. Мелешко, С.А. Мураховский // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 22-23 квітня 2015 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2015 – с. 28-29
 40. Бублик Г. Ф. Об интеркардинальной девиации наземного гирокомпаса с магнитным подвесом чувствительного элемента / Г. Ф. Бублик, А. В.

- Королев. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение. – 1984. – №14. – С. 19–21.
41. Бондарь П. М. Обобщенная формула девиации маятникового слабодемпфированного гирокомаса на подвижном основании / П. М. Бондарь, В. И. Коваль. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение. – 1987. – №17. – С. 33–35.
42. Лазарев Ю. Ф. Обобщенная форма представления систематической погрешности наземного гирокомаса, обусловленной вибрацией / Ю. Ф. Лазарев, П. С. Мироненко. // Механика гироскопических систем. – 1987. – №6. – С. 23–27.
43. Лазарев Ю. Ф. К расчету вибрационной погрешности гирокомаса с центрированием чувствительного элемента на шпиле / Ю. Ф. Лазарев, П. С. Мироненко. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1981. – №11. – С. 11–14.
44. Довгопольный А. С. Исследование влияния случайных возмущений основания на маркшейдерский гирокомпас / А. С. Довгопольный. // Механика гироскопических систем. – 1984. – №3. – С. 49–53.
45. Павловский М. А. Об устойчивости гироскопа на амортизаторах / М. А. Павловский. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение. – 1976. – №6. – С. 7–12.
46. Павловский М. А. Виброустойчивость гироприборов / М. А. Павловский, В. Е. Петренко. – К.: Вища школа, 1982. – 172 с.
47. Рыжков Л. М. Исследование уходов трехстепенного гироскопа при случайном возмущении / Л. М. Рыжков, В. С. Дидковский, В. В. Аврутов. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1984. – №14. – С. 15–19.
48. Лазарев Ю. Ф. Влияние упругости подвеса двухстепенного гирокомаса на точность его показаний при вибрации / Ю. Ф. Лазарев. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1987. – №17. – С. 5–9.

49. Орлов В. О. О погрешности однороторного корректируемого гирокомаса при вибрации основания / В. О. Орлов, И. М. Дидыченко. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1981. – №11. – С. 16–18.
50. Бублик Г. Ф. Об изоляции гироскопических приборов от поступательных вибраций / Г. Ф. Бублик, Е. К. Кундеревич. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1979. – №9. – С. 9–12.
51. А.с. 678286 СССР. МПК G01C 9/12 Маятниковый кренодифференциметр / Бублик Г.Ф., Глазунов И.Е., Слюсарь В.М., Федоров В.Н.; заявник Киевский политехнический институт. – № 2527742/18-10; заявл. 20.09.1977; опубл. 15.08.1979, бюл. № 29, 1979 р.
52. А.с. 896279 СССР. МПК F16F 15/03 Активное виброзащитное устройство / Г. Ф. Бублик, М. Н. Голик, П. С. Дитюк-Сницаренко, А. В. Королев, Е. К. Кундеревич, В. Н. Лариончик. В. М. Слюсарь, В. В. Шервашидзе; заявник Киевский политехнический институт. – № 2926994/25-28; заявл. 21.05.1980; опубл. 07.01.1982, бюл. № 1, 1982 р.
53. А.с. 1352114 СССР. МПК F16F 15/08 Виброизолирующее устройство / Г. Ф. Бублик, А. В. Королев, Е. К. Кундеревич, В. Н. Лариончик. В. П. Хоролец; заявник Киевский политехнический институт. – № 4034781/25-28; заявл. 14.01.1986; опубл. 15.11.1987, бюл. № 42, 1987 р.
54. Бублик Г. Ф. Методика расчета параметров гиromаятникового стабилизатора / Г. Ф. Бублик, А. В. Королев, В. М. Слюсарь. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1981. – №11. – С. 8–11.
55. Бублик Г. Ф. О влиянии перекрестных связей на собственные частоты системы с двумя степенями свободы / Г. Ф. Бублик, Е. К. Кундеревич, В. Н. Лариончик. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1981. – №11. – С. 38–40.

56. Бублик Г. Ф. . Управляемый амортизатор в условиях поступательных и угловых колебаний основания / Г. Ф. Бублик, А. В. Королев, Е. К. Кундереvич. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1983. – №13. – С. 14–16.
57. Бублик Г. Ф. Наблюдаемость колебательных систем с двумя степенями свободы в условиях случайных возмущений / Г. Ф. Бублик, В. В. Цисарж. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1983. – №13. – С. 3–9.
58. Бублик Г. Ф. Принципы управления активными виброзащитными системами при неполной информации. Одномерные системы электродинамического типа / Г. Ф. Бублик. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1985. – №15. – С. 3–9.
59. Лариончик В. Н. О выборе параметров безрезонансной виброзащитной системой / В. Н. Лариончик, Б. Ф. Кочмар. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1984. – №14. – С. 23–28.
60. Кундереvич Е. К. К определению параметров управляемого амортизатора / Е. К. Кундереvич, В. П. Хоролец. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1984. – №14. – С. 28–30.
61. Бублик Г. Ф. Декомпозиция индентификаторов состояния многомерных колебательных систем / Г. Ф. Бублик. // Вестник Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1986. – №16. – С. 3–8.
62. Бублик Г. Ф. Проектирование многомерных активных виброзащитных систем / Г. Ф. Бублик. – К.: Вища школа, 1986. – 86 с.
63. Иванов Ю. Е. К синтезу оптимальной структуры системы виброизоляции наземного гирокомпаса / Ю. Е. Иванов, Г. Ф. Бублик. // Вестник

- Киевского политехнического института. Серия Приборостроение.. – 1995. – №24. – С. 33–44.
64. Гераимчук М. Д. О синтезе динамических регуляторов виброзащитных и виброизмерительных систем / М. Д. Гераимчук, Ю. Е. Иванов, Г. Ф. Бублик. – К.: Випол, 1995. – 72 с.
 65. Бондар В. О. Установка для дослідження та контролю полів розсіювання та залишкової намагніченості деталей і вузлів приладів / В. О. Бондар, Г. Г. Кільдишов. // Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування.. – 2002. – №24. – С. 41–45.
 66. Юр'єв Ю. Ю. Наземна маятникова автоматизована гіроскопічна насадка до теодоліту / Ю. Ю. Юр'єв. // Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування.. – 2003. – №25. – С. 21–25.
 67. Юр'єв Ю. Ю. Методи компенсації похибок наземного маятникового прецизійного гірокомпасу / Ю. Ю. Юр'єв, О. М. Лихоткін. // Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування.. – 2005. – №29. – С. 24–29.
 68. Бурау Н. И. Синтез дискретной компенсационной обратной связи маятникового гироскомпаса / Н. И. Бурау. // Вестник Киевского политехнического института. Приборостроение. – 1990. – №20. – С. 28–30.
 69. Автокомпенсация инструментальных погрешностей гиросистем / С. М. Зельдович, М. И. Малтинский, И. М. Окон, Я. Г. Остромухов. – Л.: Судостроение, 1976. – 256 с.
 70. Лихоткин А. М. Метод «север-юг» для повышения точности гиротеодолита / А. М. Лихоткин, Ю. Ю. Юрьев. // Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування. – 2005. – №29. – С. 29–33.
 71. Юр'єв Ю.Ю. Сучасні гіроскопічні засоби азимутального орієнтування / Ю.Ю. Юр'єв, // VI науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 24-25 квітня 2007 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2007 – с. 24-25.

72. Grillmayer E. Untersuchungen systematischer fehlerinflüsse bei messungen mit dem kreisel DMT Gyromat 2000 / E. Grillmayer. – Aachen: Shaker Verlag, 2003. – 182 s.
73. Brunner F.K. On the Temperature Dependence of Gyroscopic Measurements Using the GYROMAT 2000 [Електронний ресурс] / F.K Brunner, E. Grillmayer // FIG XXII International Congress. Washington, D.C. USA, April 19-26 2002 – Режим доступу до ресурсу: http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2002/TS6-1/TS6_1_brunner_grillmayer.pdf
74. Василенко В.П. К теории гирокомаса на торсионном подвесе / В.П. Василенко, М.Е. Темченко // Инженерный журнал. Механика твердого тела, - 1966, - №1 - С.6-13.
75. Мураховский С.А. Наземный маятниковый гирокомпас на ограниченно возмущаемом основании / С.А. Мураховский, О.Д. Чуракова, А.М. Шостак // V науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 25-26 квітня 2006 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2006 – с. 42
76. Мураховский С.А. Динамика наземного компенсационного маятникового гирокомаса / С.А. Мураховский, Ю.Ф. Лазарев, П.С. Мироненко // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – №2. – С. 125-130.
77. Мураховский С.А. Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховский, А.А. Хоца // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – №1. – С. 151-156.
78. Мураховский С.А. Метод определения дополнительных параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховский, // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – №2. – С. 106-109.
79. Мураховский С.А. Выбор параметров контура управления наземного маятникового гирокомаса с магнитным подвесом чувствительного

- елемента / С.А. Мураховский // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 22-23 квітня 2008 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2008 – с. 24-25
80. Мураховский С.А. Уменьшение влияния пространственной вибрации на точность наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 28-29 квітня 2009 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2009 – с. 22-23
81. Мураховский С.А. Моделирование алгоритмической компенсации вибрационной погрешности наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 27-28 квітня 2010 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2010 – с. 24-25
82. Лазарев Ю.Ф. Моделирование динамики наземного маятникового гироскопа / Ю.Ф. Лазарев, С.А. Мураховский // Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті, економіці». 15-17 квітня 2010 р. м.Луганськ, Україна. – Луганськ, 2010 – с. 51-52
83. Мураховский С.А. Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // X Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 19-20 квітня 2011 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2011 – с. 27
84. Мураховский С.А. Метод визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту навколо головної осі / С.А. Мураховский, А.А. Хоца // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 24-25 квітня 2012 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2012 – с. 24-25

85. Мураховский С.А. Визначення похибки гіротеодоліта при дії випадкової вібрації / С.А. Мураховский // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 24-25 квітня 2012 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2012 – с. 29-30
86. Мураховский С.А. Метод измерения параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховский, А.Н. Сапегин // Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в системах управления и вооружения» 13 ноября 2012 р. г.Ковров, Российская Федерация. – Ковров, 2012 – с. 18-19
87. Мураховский С.А. Застосування фільтра Калмана в гіротеодоліті / С.А. Мураховский, О.М. Сапегін // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 23-24 квітня 2013 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2013 – с. 34
88. Мураховский С.А. Експериментальні дослідження методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту / С.А. Мураховский // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». 23-24 квітня 2014 р. м.Київ, Україна. Збірник тез доповідей – К.: НТУУ «КПІ», 2014 – с. 27-28
89. Мураховский С.А. Оптимальное оценивание параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита с помощью фильтра Калмана / С.А. Мураховский // VII Международная научно-техническая конференция «Вооружение. Технология. Безопасность. Управление» 21-23 апреля 2015 р. г.Ковров, Российская Федерация. – Ковров, 2015 – с. 208-211
90. Мураховський С.А. Визначення похибки гіротеодоліта при дії випадкової вібрації / С.А. Мураховський // Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування. – 2013. – №45. – С. 24–30.
91. Мироненко П.С. Оцінювання параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту з використанням фільтра Калмана / П. С.Мироненко, С. А.

- Мураховський, О. М. Сапегін, А. О. Боярчук. // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – №4. – С. 129–133.
92. Мироненко П.С. Імітаційне моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту / П. С.Мироненко, С. А. Мураховський, О. М. Сапегін // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2018. – №2. – С. 70–76
 93. Аврутова І. В. Вібраційний моніторинг елементів конструкцій складних інженерних споруд : дис. канд. техн. наук : 05.11.13 / Аврутова І. В. – Київ, 2008. – 159 с.
 94. Ривкин С. С. Статистический синтез гироскопических устройств / С. С. Ривкин. – Л.: Судостроение, 1970. – 422 с.
 95. Самарский А. А. Численные методы / А. А. Самарский, В. А. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
 96. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
 97. Патент на корисну модель 73373 Україна, МПК G01C 19/00 Гіртеодоліт / Мураховський С.А., Хоца А.А.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – № U201201830; заявл. 17.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18/2012.
 98. Воробьев В.М. О влиянии качаний ротора гиродвигателя на устойчивость движения гироскопа. / В.М. Воробьев // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2011. – вып. 6. – С. 34-58.
 99. Танский Е. А. Прецизионные системы стабилизации скорости двигателей / Е. А. Танский. – Л.: Энергия, 1975. – 252 с.
 100. Гірокомпаси та гіртеодоліти. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: http://arsenalcdb.com.ua/images/pdfs/ua/3_2_1.pdf
 101. КП СРБ "Арсенал". – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://voenprom.info/ukraine/575-kp-spb-arsenal.html>
 102. Лихоліт М. І. Гіроскопічні засоби азимутального орієнтування / М. І. Лихоліт, В. П. Копитько, Ю. Ю. Юр'єв. // Перспективи розвитку ракетних військ і артилерії сухопутних військ. м. Львів – 2014. – С. 163–164.

ДОДАТОК А

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
КАЗЕННЕ ПІДПРИЄМСТВО
СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ «АРСЕНАЛ»
КП СПБ «АРСЕНАЛ»

вул. Московська, 8, м. Київ, Україна, 01010, тел./факс (044) 288-94-29, тел. 253-00-62

E-mail: info@arsenalcdb.com.ua

Код ЄДРПОУ 14307357

18.06.2018 № 943/70-12/1

на № _____ від _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор-Головний конструктор

КП СПБ «Арсенал»

М.І. Лихоліт
« 07 » 06 2018 р.



АКТ

Впровадження результатів наукових досліджень

Ми, що нижче підписалися, начальник НТК-1 Сладкий Анатолій Михайлович та начальник відділу 15 НТК-1 Юр'єв Юрій Юрійович, склали цей акт про те, що результати наукових досліджень Мураховського Сергія Анатолійовича, отримані в дисертаційній роботі «Алгоритмічні засоби підвищення точності гіротеодолітів на обмежено рухомій основі», а саме, метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту та метод оцінювання кутової швидкості чутливого елемента використані на етапі лабораторних досліджень та можуть знайти застосування при створенні перспективних високоточних гіротеодолітів.

Начальник НТК-1

А.М. Сладкий
А.М. Сладкий

Начальник відділу 15 НТК-1

Ю.Ю. Юр'єв
Ю.Ю. Юр'єв

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан приладобудівного факультету
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Г.С. Тимчик

“15” 06 2018 р.


АКТ

впровадження результатів дисертаційних досліджень в навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ми, що підписалися нижче, заступник декана з навчально-методичної роботи к.т.н., доцент Філіппова М.В., к.т.н., доцент Павловський О.М., к.т.н., доцент Аврутов В.В. склали цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень за темою «Алгоритмічні засоби підвищення точності гіртеодолітів на обмежено рухомій основі» здобувача Мураховського Сергія Анатолійовича, використовуються в навчальному процесі кафедри приладів і систем орієнтації і навігації приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

А саме, що результати теоретичних досліджень були використані в лекційному курсі дисципліни «Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації».

Заст. декана
з навчально-методичної роботи

 М.В. Філіппова

Доцент каф. ПСОН

 О.М. Павловський

Доцент каф. ПСОН

 В.В. Аврутов

«15» 06 2018 р.

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

За темою дисертації опубліковано 19 робіт, серед яких 6 статей у провідних фахових виданнях, з них 2 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, 2 патенти України на корисну модель та 11 тез доповідей.

1. Мураховский С.А. Динамика наземного компенсационного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский, Ю.Ф. Лазарев, П.С. Мироненко // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – №2. – С. 125-130.

Здобувачем проаналізовано залежність вібраційної похибки від амплітуди та частоти вібрації, виконано моделювання динаміки чутливого елемента гіроскопа.

2. Мураховский С.А. Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховский, А.А. Хоца // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – №1. – С. 151-156.

Здобувачем розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елемента гиротеодолита в азимуті на основі синтезу ідентифікатору стану.

3. Мураховский С.А. Метод определения дополнительных параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховський // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – №2. – С. 106-109.

Здобувачем розроблено метод визначення параметрів руху чутливого елемента гиротеодолита в негіростабілізованій площині на основі інформації з системи стабілізації обертів гіромотора, проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

4. Мураховський С.А. Визначення похибки гіротеодоліта при дії випадкової вібрації / С.А. Мураховський // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – 2013. - Вип.45 – С.24-30 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).

Здобувачем проаналізовано вплив випадкової вібрації на вібраційну похибку гіротеодоліта, отримано залежності похибки від зовнішніх та внутрішніх факторів.

5. Мироненко П.С. Оцінювання параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту з використанням фільтра Калмана / П. С.Мироненко, С. А. Мураховський, О. М. Сапегін, А. О. Боярчук. // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – №4. – С. 129–133.

Здобувачем виконано синтез фільтра Калмана, проведено моделювання визначення оцінок параметрів руху чутливого елементу.

6. Мироненко П.С. Імітаційне моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту / П. С.Мироненко, С. А. Мураховський, О. М. Сапегін // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2018. – №2. – С. 70–76 (Входить до WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, РИНЦ та EBSCO).

Здобувачем виконано імітаційне моделювання впливу поступальної вібрації на точність гіротеодоліту на основі експериментальних даних, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для використання методів алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

7. Патент на корисну модель 73373 Україна, МПК G01C 19/00 Гіртеодоліт / Мураховський С.А., Хоца А.А.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – № U201201830; заявл. 17.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18/2012.

Здобувачем запропоновано метод визначення кутової швидкості чутливого елементу.

8. Патент на корисну модель 81188 Україна, МПК G01C 19/00 Гіртеодоліт / Мураховський С.А., Сапегін О.М.; заявники та

патентовласники Мураховський С.А., Сапегін О.М. – № U 201214568; заявл. 19.12.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл. №12/2013.

Здобувачем запропоновано метод визначення додаткових параметрів руху чутливого елементу.

9. Мураховський С.А. Наземний маятниковий гірокомпас на обмежено збурюваному основанні / С.А. Мураховський, О.Д. Чуракова, А.М. Шостак // Приладобудування - 2006: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2006. – С.42.

Здобувачем проведено моделювання динаміки наземного маятникового гірокомпаса компенсаційного типу при поступальній вібрації основи.

10. Мураховський С.А. Вибір параметрів контура управління наземного маятникового гірокомпаса з магнітним підвесом чутливого елемента / С.А. Мураховський // Приладобудування - 2008: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008. – С.24-25.

Здобувачем запропоновано контур керування компенсаційним зворотним зв'язком в наземному гірокомпасі.

11. Мураховський С.А. Уменьшение влияния пространственной вибрации на точность наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховський // Приладобудування - 2009: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2009. – С.22-23.

Здобувачем проаналізовано вплив просторової вібрації на точність маятникового гірокомпаса.

12. Лазарев Ю.Ф. Моделирование динамики наземного маятникового гироскопа / Ю.Ф. Лазарев, С.А. Мураховський // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті, економіці: міжнар. наук.-практ. конф. : Зб. матер. – Луганськ: ЛНУ ім. Тараса Шевченка, 2010. – С.51-52.

Здобувачем проведено моделювання динаміки гірокомпаса при дії поступальної вібрації.

13. Мураховский С.А. Моделирование алгоритмической компенсации вибрационной погрешности наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2010: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2010. – С.34-35.

Здобувачем проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

14. Мураховский С.А., Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2011: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – С.27.

Здобувачем проведено синтез спостережувача для визначення оцінки кутової швидкості чутливого елементу гіротеодоліта в азимуті.

15. Мураховський С.А. Метод визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту навколо головної осі / С.А. Мураховський, А.А. Хоца // Приладобудування - 2012: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – С.24-25.

Здобувачем запропоновано метод визначення параметрів кутового руху чутливого елементу гіротеодоліта в негіростабілізованій площині.

16. Мураховський С.А. Визначення похибки гіротеодоліту при дії випадкової вібрації / С.А. Мураховський // Приладобудування - 2012: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – С.29-30.

Здобувачем проведено моделювання динаміки гіротеодоліта, що встановлено на основу, яка здійснює поступальну випадкову вібрацію.

17. Мураховський С.А. Використання фільтра Калмана в гіротеодоліті / С.А. Мураховський, О.М. Сапегін // Приладобудування - 2013: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2013. – С.29-30.

Здобувачем запропоновано використання фільтра Калмана для визначення оцінок кутового руху чутливого елемента гіротеодоліту.

18. Мураховский С.А. Метод измерения параметров движения чувствительного элемента гироскопа / С.А. Мураховский, А.Н. Сапегин // Современные технологии в системах управления и вооружения: межд. науч.-техн. конф.: Сб. матер. – Ковров: ФГБОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", 2013. – С.18-19.

Здобувачем запропоновано вибір параметрів ідентифікатора стану на основі аналізу частотних характеристик гіротеодоліту.

19. Мураховський С.А., Експериментальні дослідження методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту / С.А. Мураховський // Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2014. – С.27-28.

Здобувачем проведено аналіз експериментальних даних для використання методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на наступних конференціях, конгресах, з'їздах, семінарах, нарадах:

- міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування : стан і перспективи", м. Київ, 2006 р., 2008 – 2014рр.;
- міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні технології в системах керування і озброєнь", м. Ковров, 2012р.;
- всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті, економіці», м. Луганськ, 2010 р.;

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «КПІ».

ДОДАТОК В

Тексти програм моделювання.

1. **GT_u_{pr}.m** – керувальна програма.

```
clear all, clc
global mgl H fx fy fz
global omz fig
global nNm nEm nN0 nE0 omN omE eN eE vN0 vE0 g tgfi omG omV Rz
global ps0 te0 fit0 psm tem fitm Eps Ete Efit omps omte omfit
global Kks kpr Jx Jy Jz Mnapr Fkc
global k1 k2 k3 k4 K11 K12
omz = 7.3e-5;
fig = 0*pi/180;    tgfi=tan(fig);
g=9.8;            Rz=6.4e6;
omG=omz*cos(fig);    omV=omz*sin(fig);
H = 0.4;
mgl = 1*9.8*0.1;
Jx = 13e-4+1*0.1*0.;    Jy = 4e-4;    Jz = 13e-4+1*0.1*0.1;
fx =0;    fy = 0;    fz = 0;
kpr=10;
Mnapr=H*omz*cos(fig)*(1+kpr);
Kks=kpr*(H*omz*cos(fig));
Fkc=0; %kpr=Kks/(H*omz*cos(fig));
    % Розрахунок вібраційної похибки за теорією
K2 = omg/omG*(Nm)^2/4;    nug=om/omgm
alsr = asin(K2/(1-nug^2));
disp(sprintf('Розрахована похибка alsr = %g ',alsr*180/pi))
fi= 0; %pi/4-alsr%+30*pi/180;
vN0=0;
vE0=0;
nN0=0;
```

```

nE0=0;
nNm=Nm*cos(fi);
nEm=Nm*sin(fi);
omN=om;
omE=om;
eN=0;
eE=0;
%      - інтегрування -
ntk=2;
ni=30;
nk=20;
al0=0.17*pi/180%-ps0+0.975*alsr%-10*pi/180;
bt0=0*pi/180; gm0=0; gmt0=0;
alt0=0;
[OM, N]=Pr_UgSkObj(0)
omx0=(OM(1)*cos(al0)-OM(3)*sin(al0))*cos(bt0)+(OM(2)+alt0)*sin(bt0)+gmt0;
OM01=sqrt(mgl*cos(fig)*omz/H);
OMO3=sqrt(mgl/Jx);
TK=500-0.02;  hi=0.02;
TnK = hi*1000;
t=0; k=1; ts=0;
y = [al0 bt0 gm0 0 0 0 0 0 0 0];
y00 = [al0 bt0 gm0 0 0 0 0 0 0 0];
alfa(k)=y(1); beta(k)=y(2); gamma(k)=y(3); tt(k)=t;
alfaK(k)=y(5); betaK(k)=y(7); % gammaK(k)=y(9);
alfaTK(k)=y(6); betaTK(k)=y(8); % gammaTK(k)=y(10);
% dPsi(k)=asin(Kks/Mnapr*alfa(k))+alfa(k)+ps0;
dPsi(k)=-asin(kpr*alfa(k))-alfa(k);
while t<=TK
    [tout, yout, z]=rko4m('MGK_KR_pr_filtr24',hi,t,y);

```

```

y=yout; t=tout; k=k+1
alfa(k)=y(1); beta(k)=y(2); gamma(k)=y(3); gammat(k)=y(4);
alfaK(k)=y(5); betaK(k)=y(7); gammaK(k)=y(9);
alfaTK(k)=y(6); betaTK(k)=y(8); gammaTK(k)=y(10);
tt(k)=t;
alt(k)=z(1);
D_alfa(k)=alfa(k)-alfaK(k);
D_alfaT(k)=alt(k)-alfaTK(k);
dPsi(k)=-asin(kpr*alfa(k))-alfa(k)-ps0;
if k>1000
    alr=alt(k-1000:k).*gamma(k-1000:k)/omG;
    alrsr=mean(alr); alsr*180/pi ;
    dPsiK(k)=dPsi(k)-alrsr;
end
disp(sprintf('Частота маятникових коливань omgm = %g ',omgm))
disp(sprintf('Частота прецесійних коливань omab = %g ',omab))
disp(sprintf('Розрахункове середнє значення кута alfa: alrsr = %g, град
',alrsr*180/pi))
disp(sprintf('Розрахункове середнє значення кута alfa: alrsr2 = %g, град
',alrsr2*180/pi))
disp(sprintf('Кут між лінією вібрації і площиною меридіана fі = %g, град
',fі*180/pi))

```

2. **GT_pr.m** – процедура обчислення правих частин.

```

function z=GT_pr(t,y)
global mgl H Jx fx fy fz omz Kks Mnapr
ca=cos(y(1)); sa=sin(y(1));
cb=cos(y(2)); sb=sin(y(2)); tb=tan(y(2));
cg=cos(y(3)); sg=sin(y(3));

```

```

[OM,N]=Pr_UgSkObj(t);
omxc=OM(1);  omyc= OM(2);  omzc=OM(3);
nxc= N(1);   nyc= N(2);   nzc= N(3);
MpotAl = mgl*(nxc*(ca*sg + sa*cg*sb) + nzc*(-sa*sg + ca*cg*sb));
MpotBt = - mgl*(nxc*ca*cg*cb + nyc*cg*sb - nzc*sa*cg*cb);
MpotGa = mgl*(nxc*(sa*cg + ca*sg*sb) - nyc*sg*cb + nzc*(ca*cg - sa*sg*sb));
A = -(omxc*sa +omzc*ca) + (-Kks*y(1) + MpotAl)/(H*cb);
B = -omyc + (omxc*ca -omzc*sa)*tb - MpotBt/(H*cb);
kfz = fz/(H*cb);    kfy = fy*(1+sqrt(Kks/Mnapr))/(H*cb);   zn=1+kfz*kfy;
z(1) = (A*kfz+B)/zn;
z(2) = (A - B*kfy)/zn;
z(3)= y(4)-(z(1)+omyc)*sb-omxc*ca*cb+omzc*sa*cb;
z(4) = (MpotGa- fx*z(3))/Jx;

```

3. **rk4.m** – метод Рунге-Кутта 4-го порядка.

```

function [tout,yout,z] = rko4m(ypfun,h,t,y)
s1 = feval(ypfun, t, y);  s2 = feval(ypfun, t+h/2, y+h/2*s1);
s3 = feval(ypfun, t+h/2, y+h/2*s2);  s4 = feval(ypfun, t+h, y+h*s3);
tout = t + h;    z=(s1 + 2*s2 + 2*s3 + s4)/6;
yout = y + h*z;

```

4. **Pr_UgSkObj.m** – процедура обчислення параметрів руху об'єкта.

```

function [OM, N]=Pr_UgSkObj(t)
global omG omV
UN=omG; Uv=omV;
[ps, pst, te, tet, fit, fitt]=UgDvigObj(t);
cp=cos(ps); sp=sin(ps); ct=cos(te); st=sin(te); cf=cos(fit); sf=sin(fit);
omxc = (pst+ Uv)*st + fitt + UN*cp*ct;

```



```

omyc = tet*sf + (pst+Uv)*ct*cf + UN*(sp*sf - cf*cp*st);
omzc = tet*cf - (pst+Uv)*ct*sf + UN*(sp*cf + sf*cp*st);
OM=[omxc,omyc,omzc]; [nN, nE]=UskorObj(t);
ngxc = -st;   ngyc = -ct*cf;   ngzc = ct*sf;
nxc = -nE*sp*ct + nN*ct*cp -ngxc;
nyc = nE*(cp*sf + cf*sp*st) + nN*(sp*sf - cf*cp*st) - ngyc;
nzc = nE*(cp*cf - sf*sp*st) + nN*(sp*cf + sf*cp*st) - ngzc;
N=[nxc,nyc,nzc];

```

5. ***UgDvigObj.m*** – процедура обчислення параметрів кутового руху об'єкта.

```

function [ps, pst, te, tet, fit, fitt]=UgDvigObj(t)
global ps0 te0 fit0 psm tem fitm Eps Ete Efit omps omte omfit
ps=ps0+psm*sin(omps*t+Eps);
te=te0+tem*sin(omte*t+Ete);
fit=fit0+fitm*sin(omfit*t+Efit);
pst=psm*omps*cos(omps*t+Eps);
tet=tem*omte*cos(omte*t+Ete);
fitt=fitm*omfit*cos(omfit*t+Efit);

```

6. ***UskorObj.m*** – процедура обчислення лінійних прискорень об'єкта.

```

function [nN, nE]=UskorObj(t)
global nNm nEm nN0 nE0 omN omE eN eE vN0 vE0 g
nN=nN0+nNm*sin(omN*t+eN);
nE=nE0+nEm*sin(omE*t+eE);

```