

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-9-73-48>

УДК 62-97

Безвесільна О.М.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Петренко О.В., Ільченко М.В.**Публічне акціонерне товариство
«Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики»

ВИЗНАЧЕННЯ СМУГИ ПРОПУСКАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОТАХОМЕТРІВ

Анотація. Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів немає. Збільшити смугу пропускання чутливих елементів стабілізатора, електромеханічних гіротахometrів, не можливо. Огляд технічної літератури наводить приклади розширення зони пропускання. Аналіз технічних характеристик електромеханічних гіротахometrів провідних підприємств надає, як довідковий параметр значення «смуги частот» – 30 Гц. Враховуючи те, що смуга пропускання частот ГТ46 приймалась як довідковий матеріал та не перевірялась раніше, виникла необхідність експериментального підтвердження наведеного значення до проведення робіт щодо її розширення. В роботі надається методика та результати експериментального дослідження смуги пропускання гіротахometrа.

Ключові слова: стабілізатор, смуга частот, гіротахometr, гіроскоп.

Bezvesilna Olena

National Technical University of Ukraine of the "Kyiv Polytechnic Institute"

Petrenko Oleksii, Ilchenko Mykola

Public Joint Stock Company

«Research-and-Production Association «Kyiv Avtomatics Plant»

DETERMINATION OF ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION THRUES GYRO TACHOMETERS

Summary. The current state of domestic production of light armored vehicles is characterized by a significant increase in the requirements for accuracy, speed of control systems and weapon stabilization, including when operating in complex conditions. Modern moving objects have much higher speeds, are subject to much greater overloads and uncontrolled mechanical perturbations (shocks, vibrations). Therefore, the requirements for the accuracy of the means and methods of measuring the above mechanical values of armament stabilizers have become much higher. Scientific and technological progress in the field of weapon stabilizer instrumentation complexes requires the improvement of components, the elemental base of the control system, the use of modern digital instruments for measuring angular velocities to improve the tactical and technical characteristics of weapons stabilizers, which should be replaced by analog devices. An analysis of the instrument composition, structure and dynamic parameters of the known digital stabilizers units revealed that there is no reserve to improve the accuracy of stabilization and performance. The use of electromechanical gyro tachometers as sensitive elements today is in many cases justified due to the low noise level, good dynamic characteristics, satisfactory accuracy characteristics, advanced manufacturing processes. But mechanical gyro tachometers have a number of disadvantages: the ready time to work is determined by the acceleration time of the gyro tachometer, low frequency band, the output signals are given in analog form, unsatisfactory resistance to mechanical shock factors, the need for an additional energy converter to power the gyromotors. To increase the bandwidth of the sensing elements of the stabilizer, electromechanical gyrotachometers, it is not possible, based on the principle of preserving its principle of action – compensation of the gyroscopic moment by the spring of the torsion. Increasing the speed of electromechanical gyro-tachometers is possible when using gyro-tachometers of the compensating type, in which the compensation of gyroscopic torque is performed by a special electric torque sensor – an electric spring. However, a review of the technical literature on the unquestionable assertion that bandwidth extension of electromechanical gyro tachometers is not possible provides examples of bandwidth expansion. Examples include those obtained from patent research, where an electromechanical gyro tachometer covered by an analog negative link that provides stability is further covered by a digital negative feedback link that provides broadening of the bandwidth. Additionally, it is suggested to consider the possibility of widening the bandwidth by increasing the rigidity of the torsion on which the outer frame of the two-stage gyro tachometer is fixed in the device, and to switch from analog to digital output information of the gyro tachometer. Problem analysis and analysis of publications of technical characteristics of electromechanical gyrotachometers GT46 of leading enterprises provides as a reference parameter the value of the "frequency band" – 30 Hz. Considering that the bandwidth of the GT46 was accepted as a reference material and not checked before, there was a need for experimental confirmation of the above value before carrying out works on its extension. The paper presents the methodology and results of an experimental study of the bandwidth of a GT46 gyrotachometer.

Keywords: stabilizer, frequency band, gyro tachometer, gyro.

Постановка проблеми. Сучасний стан вітчизняного виробництва легких броньованих машин характеризується значним підвищенням вимог до точності, швидкодії систем керування та стабілізації озброєння, у тому числі, при експлуатації у складних умовах. Тому вимоги до точності засобів та методів вимірювання визначених вище механічних величин стабілізаторів озброєння стали значно вищими. Науково-технічний прогрес у галузі приладових комплексів стабілізаторів озброєння потребує удосконалення компонентів, елементної бази системи керування, використання сучасних цифрових приладів вимірювання кутових швидкостей для покращення тактико-технічних характеристик системи озброєння (СО).

Швидкодія СО характеризується смугою пропускання частот, часом швидкодії електродвигунів і підсилювачів, моментом навантаження на електроприводи, а також, дискретністю за часом цифрового обчислювача.

Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів [1] показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів немає.

Розширення смуги пропускання частот для чутливих елементів стабілізатора електромеханічних гіротахометрів, не можливо, виходячи з умови збереження його принципу дії – компенсації гіроскопічного моменту пружиною торсіону. Підвищення швидкодії можливо лише при застосуванні гіротахометрів компенсаційного типу, в яких компенсація гіроскопічного моменту виконується спеціальним електричним датчиком моменту – електричною пружиною. З іншого боку використання елементів електромеханічних гіротахометрів, як чутливих елементів на сьогодні, у багатьох випадках виправдано в зв'язку з низьким рівнем шумів, гарними динамічними характеристиками, задовільними характеристиками по точності, напрацьованими технологічними процесами виготовлення. Але механічні гіротахometri мають ряд недоліків: час готовності до роботи ви-значається часом розгону гіромотору, низька смуга частот пропускання, вихідні сигнали видаються в аналоговому вигляді, незадовільна стійкість до механічних ударних факторів, необхідність додаткового перетворювача енергії для живлення гіромоторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Огляд технічної літератури на беззаперечні твердження, що розширення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів не можливо, наводить приклади розширення зони пропускання. До таких прикладів можна віднести дані, що отримані з [2], де електромеханічний гіротахометр охоплений аналоговим негативним зв'язком, який забезпечує стійкість, додатково

охоплюється цифровим негативним зворотнім зв'язком, що забезпечує розширення полоси пропускання та збільшення точності. Додатково пропонується розглянути можливість розширення смуги пропускання за рахунок збільшення жорсткості торсіону, на якому закріплена в приладі зовнішня рамка двоступеневого гіротахометра та виконати перехід з аналогової на цифрову вихідну інформацію гіротахометра.

Проблему статті досліджували та брали активну участь у її вирішенні Возненко В.В., Хазанович Л.А., Сайфетдінов Р.А.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Аналіз поставленої проблеми та аналіз публікацій технічних характеристик електромеханічних гіротахометрів ГТ46 провідних підприємств [3] надає як довідковий параметр значення «смуги частот» – 30 Гц. Враховуючи те, що смуга пропускання частот ГТ46 приймалась, як довідковий матеріал та не перевірялась раніше, виникла необхідність експериментального підтвердження наведеного значення до проведення робіт щодо її розширення.

Мета статті. Мета проведених випробувань – експериментально визначити фактичну полосу пропускання електромеханічних гіротахометрів ГТ46 та навести методуку її визначення.

Викладення основного матеріалу. Роботи щодо експериментального дослідження смуги пропускання виконувались на одному з зразків ГТ46 у два етапи.

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

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

Для отримання параметрів передатної функції гіротахометрів, були записані осцилограми (рис. 1-7) перехідних процесів, які були піддані математичній обробці у відповідності з формулами [4]. За результатами робіт, які виконані на першому етапі отримані передатні функції ГТ46 (формули 1-7).

На другому етапі робіт за передатними функціями побудовані логарифмічні амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики (рис. 1.2–7.2). За амплітудно-частотними та фазово-частотними характеристиками визначили смугу пропускання, яка дорівнює частоті, на якій падіння коефіцієнта підсилення становить 3 Дб.

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

$$\lambda = \frac{2\pi}{T} = 147,6312 \text{ рад} / c; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{41}{16} = 44,21914; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 154,1114; \quad \xi = \frac{\lambda}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,28693.$$

Передатна функція гіротахометра:

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

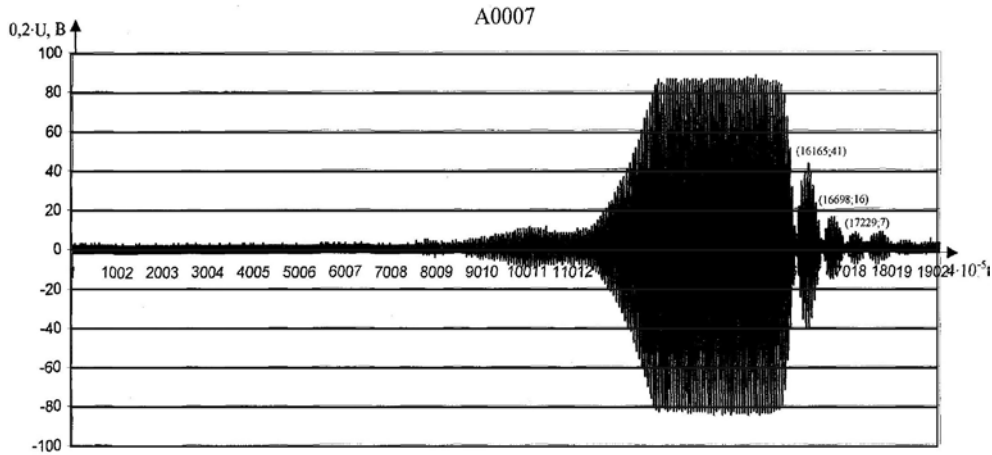


Рис. 1.1. Сигнал ГТ46. Варіант 1

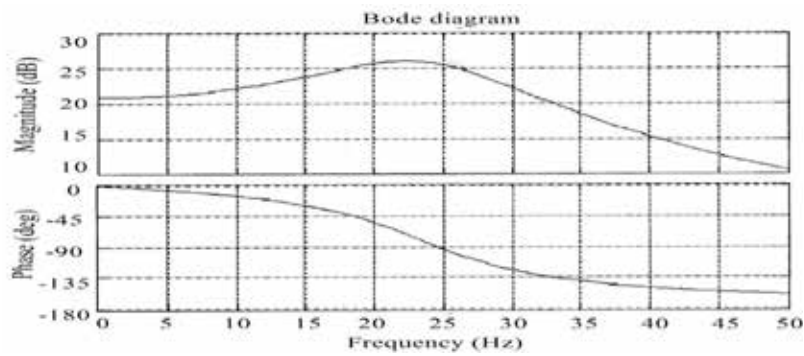


Рис. 1.2. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 по варіанту 1, зі смугою пропускання 35,9 Гц

де: U – вихідна напруга гіротахометра, В;
 ω – вимірювана кутова швидкість, rad / c ;

$$K_{IT} = \frac{H \cdot K_{дв}}{C} = 11,04 \frac{B \cdot c}{rad} \text{ – статичний коефіцієнт передачі;}$$

$$T_0 = \sqrt{\frac{I_n}{C}} = 0,006736c \text{ – постійна часу;}$$

$\xi = 0,5 \div 0,75$ – відносний коефіцієнт демпфірування

$H = 0,359 \text{ Нмс}$ – кінетичний момент;

$C = 7,45 \text{ Нм/рад}$ – жорсткість торсіону;

$K_{дк} = 229,2 \text{ В/рад}$ – крутість вихідної характеристики датчика кута;

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

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

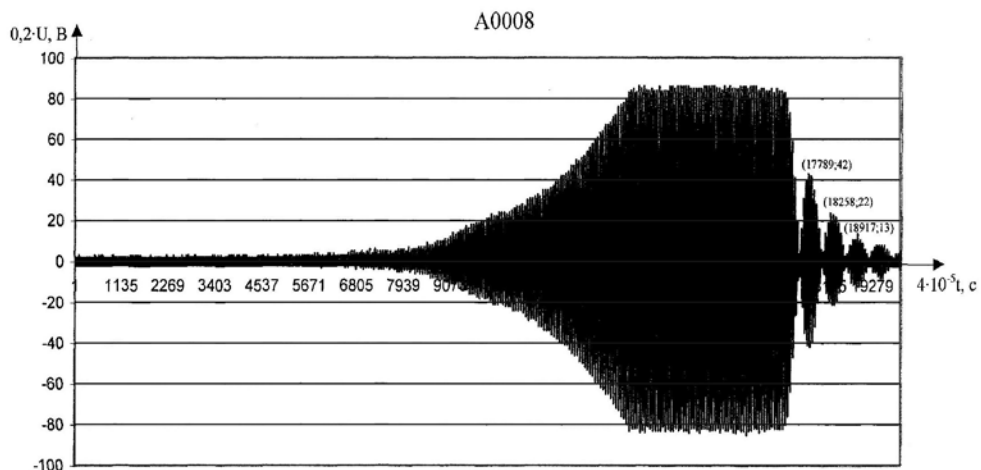


Рис. 2.1. Сигнал ГТ46. Варіант 2

$$T=(18917-177890 \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04512c; \quad f = \frac{1}{T} = 22,16312 \Gamma u;$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{T} = 139,255 \text{ рад} / c; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{41}{42} = 28,66255; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 142,1742; \quad \xi = \frac{\lambda}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,2016;$$

$$W(p) = \frac{K_{\Gamma m}}{1 + \frac{2\xi}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{\Gamma m}}{1 + 0,002836p + 4,94719 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}$$

Передатна функція гіротахметра $W_1(p) = \frac{11,04}{4,947 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,002836p + 1}$ (2)

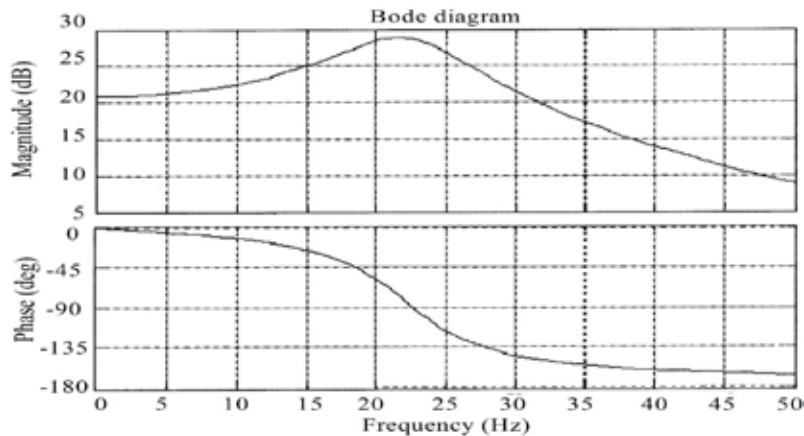


Рис. 2.2. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 по варіанту 2 зі смугою пропускання 33 Гц

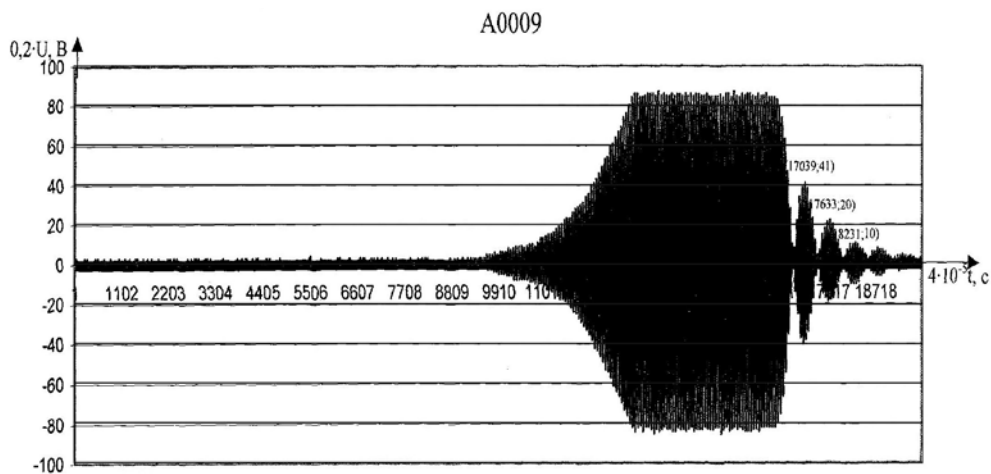


Рис. 3.1. Сигнал ГТ46. Варіант 3

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

$$\lambda = \frac{2\pi}{T} = 131,778 \text{ рад} / c; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{41}{20} = 30,1107; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 135,1745; \quad \xi = \frac{\lambda}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,222754;$$

$$W(p) = \frac{K_{\Gamma T}}{1 + \frac{2\xi}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{\Gamma T}}{1 + 0,003296p + 5,47281 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}$$

Передатна функція гіротахметра $W(p) = \frac{11,04}{5,473 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003296p + 1}$ (3)

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

$$\lambda = \frac{2\pi}{T} = 139,255 \text{ рад} / c; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{43}{21} = 31,7676; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 142,8325; \quad \xi = \frac{\lambda}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,222412;$$

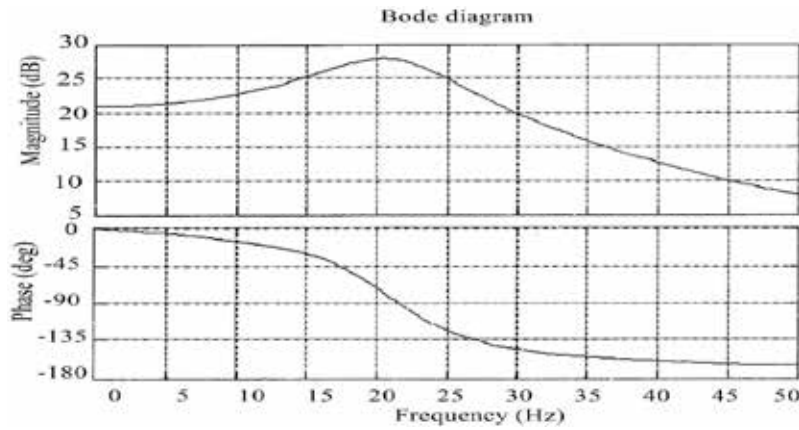


Рис. 3.2. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 по варіанту 3 зі смугою пропускання 32,2 Гц

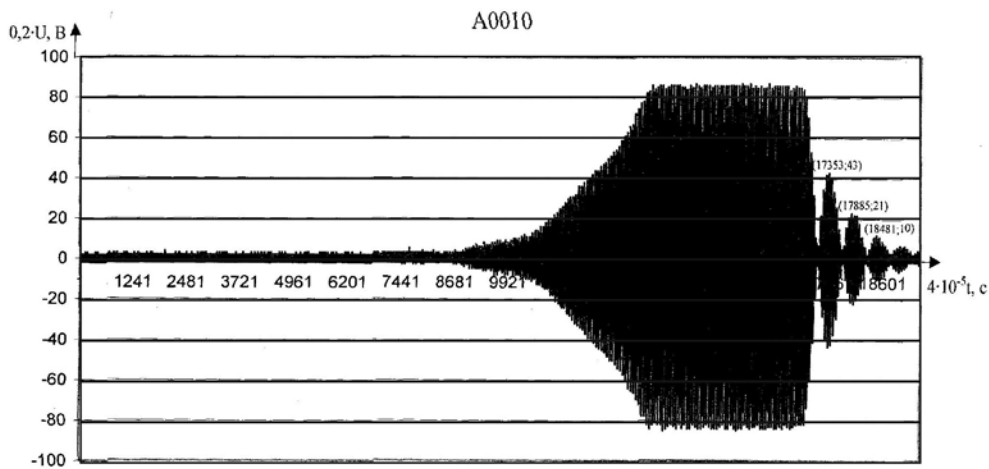


Рис. 4.1. Сигнал ГТ46. Варіант 4

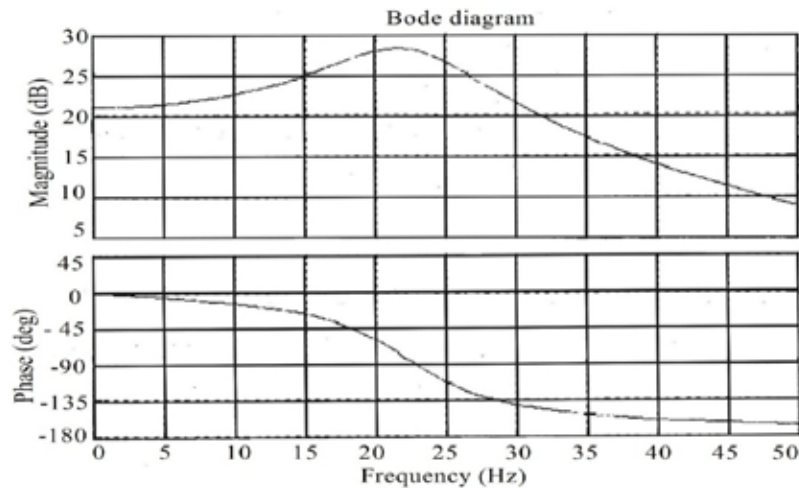


Рис. 4.2. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 по варіанту 4 зі смугою пропускання 34,1 Гц

$$W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\xi}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,0031143p + 4,90169 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}$$

Передатна функція гіротахометра $W(p) = \frac{11,04}{4,902 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003114 p + 1}$ (4)

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

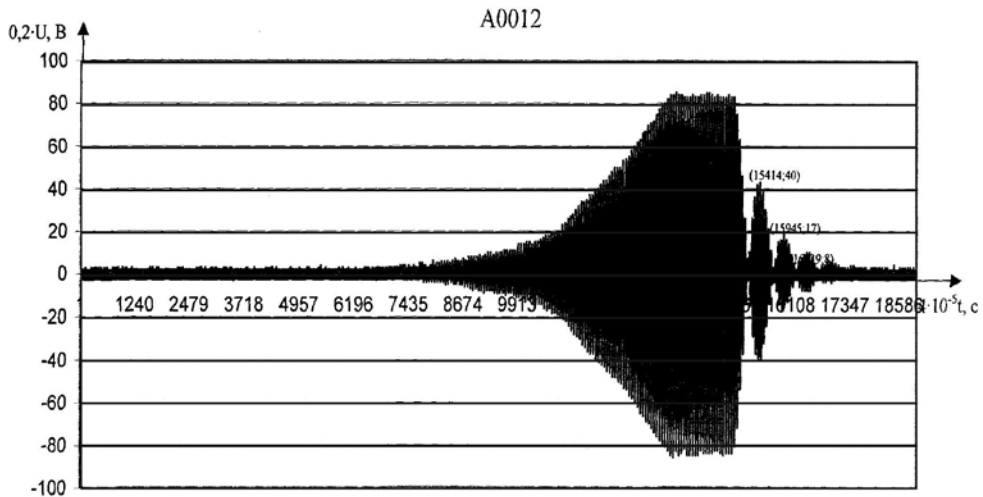


Рис. 5.1. Сигнал ГТ46. Варіант 5

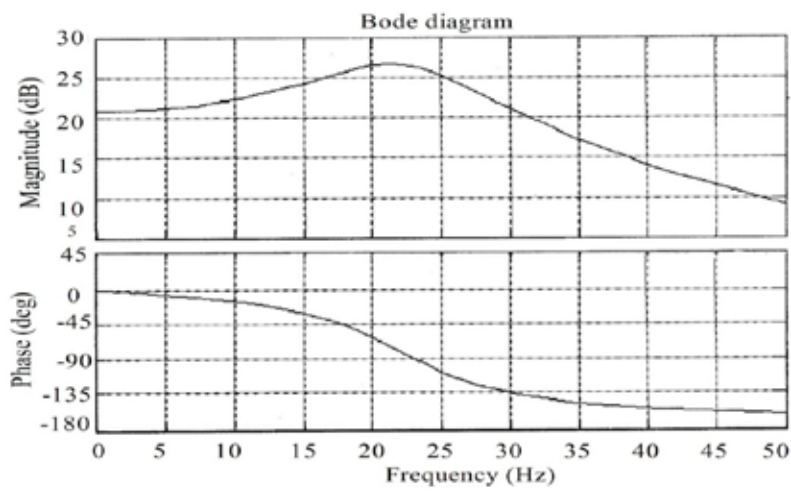


Рис. 5.2. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 по варіанту 5 зі смугою пропускання 34 Гц

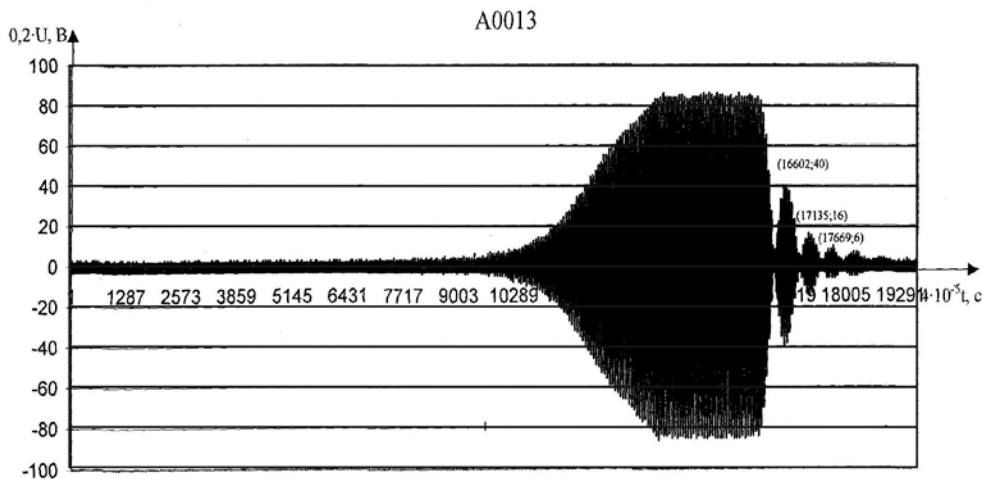


Рис. 6.1. Сигнал ГТ46. Варіант 6

$$\lambda = \frac{2\pi}{T} = 139,6263 \text{ рад / с}; \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{40}{17} = 38,0296; q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 1447127; \xi = \frac{\lambda}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,26279;$$

$$W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\xi}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,0036319p + 4,7752 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}$$

$$\text{Передатна функція гіротахметра } W(p) = \frac{11,04}{4,775 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003632p + 1} \quad (5)$$

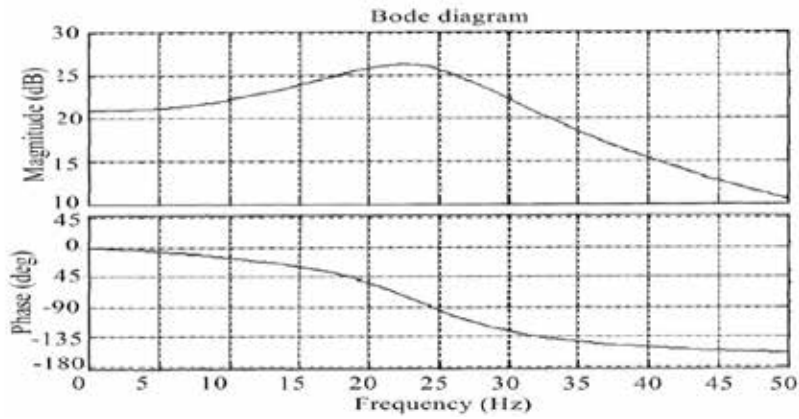


Рис. 6.2. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 по варіанту 6 зі смугою пропускання 35,8 Гц

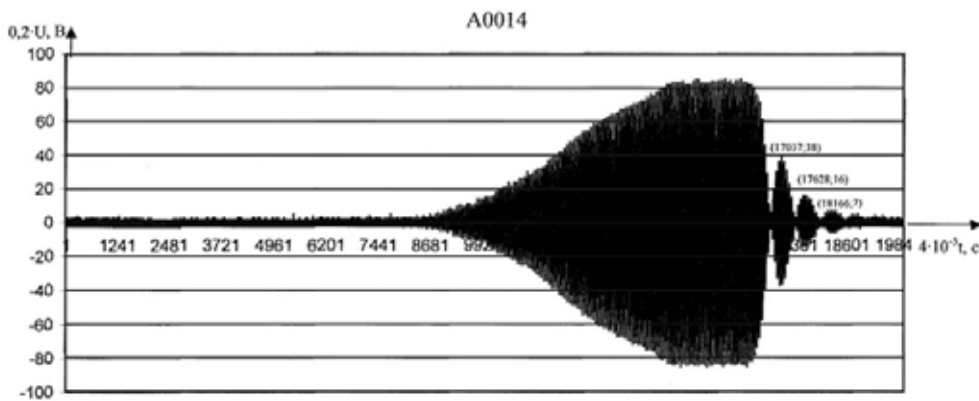


Рис. 7.1. Сигнал ГТ46. Варіант 7

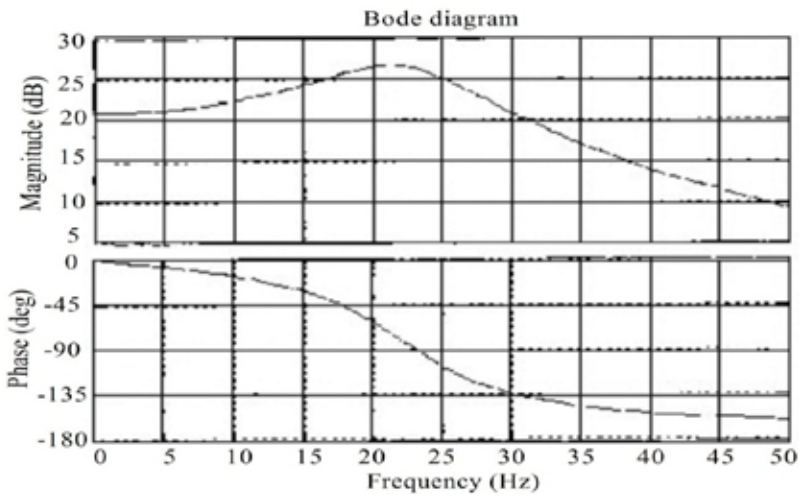


Рис. 7.2. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 по варіанту 7 зі смугою пропускання 33,9 Гц

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

$$\lambda = \frac{2\pi}{T} = 147,2162 \text{ рад} / c; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{40}{16} = 42,93771; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 153,3501; \quad \xi = \frac{\lambda}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,279998;$$

$$W(p) = \frac{K_{IT}}{1 + \frac{2\xi}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{IT}}{1 + 0,0036517p + 4,25238 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}$$

$$\text{Передатна функція гірогахометра } W(p) = \frac{11,04}{4,252 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003652 p + 1} \quad (6)$$

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

$$\lambda = \frac{2\pi}{T} = 139,1316 \text{ рад} / \text{с}; \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{38}{16} = 38,30812; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 144,3091; \quad \xi = \frac{\lambda}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,265459;$$

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

$$\text{Передатна функція гіротахметра } W_7(p) = \frac{11,04}{4,802 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003679 p + 1} \quad (7)$$

Висновки.

1. Смуга пропускання ГТ46 для різних варіантів передатних функцій знаходиться у діапазоні 31-36 Гц. Найбільша смуга пропускання для гіротахметра з передатною функцією (по варіанту 1)

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

2. Результати експериментальних досліджень смуги пропускання ГТ46 фактично підтверджують данні, які наведені у технічних довідниках – 30 Гц.

Список літератури:

1. Безвесільна О.М., Цірук В.Г., Квасников В.П., Чіковані В.В. Системи наведення та стабілізації озброєння : монографія. Київ : ЖДТУ, 2014. 176 с.
2. Кулешов В.В. Использование вращательных гироскопов. Патент. Собственник патента RU2325659. URL: <https://findpatent.ru/patent/232/2325659.html> (дата звернення: 25.09.2019).
3. Гиротахметри ГТ46-01. URL: <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html> (дата звернення: 20.06.2019).
4. Бесекерский В.А., Попов Е.Н. Теория систем автоматического регулирования. Москва : Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1975. 768 с.

References:

1. Bezvesil'na, O.M., Tsiрук, V.H., Kvasnykov, V.P., & Chikovani, V.V. (2014). *Systemy navedennya ta stabilizatsiyi ozbroynennya : monohrafiya* [Systems of aiming and stabilizing of armament : monograph]. Kyiv : ZhDTU. (in Ukrainian)
2. Kuleshov, V.V. *Ispolzovanie vraschatelnyih giroskopov. Patent. Sobstvennik Patenta 2325659* [Use of rotatory gyroscopes. Patent. Owner of patent RU2325659]. URL: <https://findpatent.ru/patent/232/2325659.html> (accessed 25.09.2019).
3. Gyrotakhometry GT46-01 [Gyrotahometers GT46-01]. Available at: <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html> (accessed 20.06.2019).
4. Besekersky, V.A., & Popov, E.N. (1975). *Teoriya sistem avtomaticheskoho rehulyrovannya* [Theory of automatic control systems]. Moscow : «Nauka». (in Russian)