

УДК 629.7.054

В.В. КАРАЧУН, В.Ю. ШИБЕЦЬКИЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ВПЛИВ ПОТУЖНОЇ N-ХВИЛІ НА ІНЕРЦІАЛЬНІ ПРИЛАДИ АВТОНОМНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ. ТРИВИМІРНА ЗАДАЧА

Розглянуто тривимірну модель опису явища взаємодії потужної N-хвилі з приладами інерціального позиціонування. Побудовано програму розрахунків у середовищі MathCad для визначення систематичної складової похибки, що виникає внаслідок дії потужної ударної хвилі на підвіс поплавкового гіроскопа. Проведено чисельний аналіз для промислового зразка датчика куткової швидкості. Дані розрахунків порівняно з експериментальними даними, отриманими при стендових дослідженнях. Проаналізовано причини розбіжностей між експериментальними і теоретичними даними, та зроблено висновки стосовно можливості використання отриманих результатів.

**Ключові слова:** N-хвиля, гіперзвукові літальні апарати, систематичний дрейф, поплавковий гіроскоп, акустичне поле, хибна кутова швидкість.

### Вступ

Дослідження відносяться до області прикладної механіки і присвячені вивченню явища взаємодії потужної ударної хвилі з підвісом сенсора гіростабілізованої платформи (ГСП) в жорстких умовах експлуатації гіперзвукових літальних апаратів (ЛА). Незаперечний інтерес представляють математична модель процесу і комп'ютерна програма розрахунків, які дозволяють проводити аналіз поведінки підвісу гіроскопа в залежності від зовнішніх факторів і конфігурації самого підвісу, що в свою чергу дозволить відійти від дорогих стендових досліджень, і перейти до досліджень віртуальних моделей, тобто з використанням лише персонального комп'ютера.

### Аналіз стану проблеми і постановка задачі дослідження

На теперішній час існує думка щодо перспективності розробки гіперзвукових систем озброєння, незаперечної спроможності гіперзвукових технологій у формуванні військового домінування держави в сфері вирішення загальнонаціональних задач безпеки [1].

Можливість досягнення гіперзвуковими літальними апаратами швидкості у 20 М робить їх невразливими для сучасних систем ППО і дає можливість доставити БЧ за одну годину до будь-якої точки планети [2].

Існує п'ять магістральних напрямків досліджень гіперзвукових технологій: *аеродинаміка; теплозахист; наведення; навігація і керування рухом; обладнання і двигуни* [3]. Доведення рівня технологій гіперзвукового польоту до серійного виробництва,

перетворить на існуючі реалії перспективну зброю глобального удару з неймовірною дальністю стрільби у 37 тисяч кілометрів [4].

Слід звернути увагу на одну важливу ознаку льотної експлуатації. При швидкості 20 М літак з гіперзвуковим прямооточним повітряно-реактивним двигуном (ГППРД) нагрівається до температури доменної печі, тобто вище за 2000 °С [5, 6]. В сукупності з іншими негативними проявами, цей чинник окреслює коло екстремальних умов, породжуючих позаштатні ситуації.

Приймаючи до уваги надзорські експлуатаційні умови гіперзвуковиків, надзвичайно **актуальними** постають задачі аналізу впливу зовнішніх збудуючих чинників, а саме, ударної N-хвилі, вібрації, градієнта тепла, повітряного потоку на виході повітрозабірника тощо, на тактико-технічні характеристики апаратів в цілому. В роботі передбачається докладний аналіз першого чинника і його вплив на інерціальні засоби автономного виявлення, класифікації і визначення місцезнаходження рухомої цілі.

**Метою** дослідження слугує побудова розрахункових моделей пружної взаємодії потужної ударної N-хвилі з приладами автономного інерціального позиціонування.

### Підвіс інерціального сенсора ГСП з нульовою гаусовою кривизною

Визначаючи похибку інерціальних сенсорів ГСП при льотній експлуатації, будемо розглядати синхронні та асинхронні коливання. Точніше, проведемо кількісний аналіз тільки систематичної складової похибки вимірювань двостепеневого диференційного гіроскопа з рідиннотатичним підвісом,

яка представляє найбільший практичний інтерес, так як, на відміну від періодичної складової, для її зменшення ще не існує апробованих технічних рішень. Обчислення проведемо відповідно до формули (1) [7]. В ній враховано вплив *хибної* кутової швидкості на вхідній осі приладу і *хибного* кутового прискорення на вихідній осі, осі підвісу:

$$\Delta\omega^a = \frac{4vhI_z \cos \varepsilon_{11}}{3R[H(1+N_1)+B(N_2+N_3)]} \times \\ \times \left[ \rho_\theta \left( -6\omega_1 a_1^{(1)} + \frac{B}{H} \omega_1^2 c_1^{(1)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 b_1^{(1)} \right) + \right. \\ \left. + \rho_\varphi \left( -6\omega_1 a_1^{(2)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 c_1^{(2)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 b_1^{(2)} \right) - \right. \\ \left. - 3\rho_\psi \omega_1' c_1^{(2)} \right],$$

де  $\omega_1 = v + \ell_1 \pi$ ,  $\ell_1 = 0, 1, 2, \dots$ ;

$$\omega_1' = v + (-1 + \ell_2) \frac{\pi}{2}, \quad (\ell_2 = 0, 2, 4, 6, \dots);$$

$$N_1 = \frac{4\pi I_z \omega_1}{HR} a_1^{(2)} z^2 (1-z)^2 \sin z;$$

$$N_2 = \frac{8I_z \omega_1^2}{3HR} c_1^{(1)} z^4 (1-z)^4 \cos z;$$

$$N_3 = \frac{8I_z \omega_1^2}{3HR} b_1^{(2)} z^2 (1-z)^2 \sin z.$$

Прийmemo для конкретності наступні числові значення величин, що входять в робочу формулу (1):  $c = 0,12 \text{ Нм}$ ;  $v = 0,32$ ;  $B = 1,01 \cdot 10^{-4} \text{ Нмс}^2$ ;  $H = 0,2093 \text{ Нмс}$ ;  $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ;  $h = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ;  $L = 0,06 \text{ м}$ ;  $R_0 = 0,02 \text{ м}$ ;  $v_1 = 0,5 \text{ с}^{-1}$ ;  $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ ;  $P_{10} = 0,7 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$ ;  $I_z = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Нмс}^2$ ;  $A = 0,7$ ;  $B = 0,3$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{\pi}{6} \text{ рад}$ ;  $\rho_\varphi = \rho_\theta = \rho_\psi = \frac{\pi}{36} \text{ рад}$ ;  $n = 34,5$ .

Таким чином, спочатку припускаємо наявність синхронної хитавиці фюзеляжу, потім асинхронної. Строго кажучи, таке спрощення привнесе певну похибку при порівняльному аналізі стендових випробувань з числовими, але не настільки, щоб не забезпечити достовірності результатів реаліям льотній експлуатації.

Для кількісного аналізу побудовано програму обчислень похибок поплавкового диференціуючого гіроскопа у середовищі MathCad.

Числовий аналіз показує, що при частоті хитавиці ЛА 300 Гц систематична похибка приладу складає  $0,24 \text{ град с}^{-1}$ , а на частоті 500 Гц –  $0,35 \text{ град с}^{-1}$  (рис. 1, а, б). На частоті 600 Гц –

$(-0,38 \text{ град с}^{-1})$ , на частоті 800 Гц –  $(-0,48 \text{ град с}^{-1})$ , на 960 Гц –  $(-0,39 \text{ град с}^{-1})$ .

Результати стендових випробувань промислових зразків ДУСУ довели, що на частоті 300 Гц систематична похибка становить  $0,24 \text{ град с}^{-1}$ , на частоті 500 Гц –  $0,31 \text{ град с}^{-1}$ , на частоті 800 Гц –  $(-0,6 \text{ град с}^{-1})$ , а на частоті 960 Гц –  $(-0,13 \text{ град с}^{-1})$  (рис. 1, в).

Таким чином, за результатами стендових випробувань *максимальні* значення похибки поплавкового гіроскопа мають місце на частотах акустичного випромінювання 300 Гц, 500 Гц, 700 Гц, 800 Гц, 960 Гц. Чисельний аналіз виявив *максимальні* значення похибок приладу, для умов експерименту, також на частотах 300 Гц, 500 Гц, 800 Гц. Причому, вони практично збіглися не лише за величиною, а й за знаком.

Деякі невідповідності мають місце на частотах 700 Гц і 960 Гц. Стендові випробування на частоті 700 Гц виявляють похибку приладу в  $(-0,27 \text{ град с}^{-1})$ , а теоретичні – похибку в  $(-0,35 \text{ град с}^{-1})$  на частоті 580 Гц, тобто трохи ліше по осі частот. Різниця становить  $0,08 \text{ град с}^{-1}$ . При порозі чутливості в  $0,09 \text{ град с}^{-1}$ , тобто нею можна знехтувати. Стендові випробування на частоті 960 Гц показують похибку  $(-0,14 \text{ град с}^{-1})$ , а теоретичні встановлюють її значення в  $(-0,38 \text{ град с}^{-1})$ .

Ці невідповідності насамперед цілком припустимі, по-друге, мають досить переконливе пояснення. На стенді прилад розташовується на пружних розтяжках, які завдяки великому коефіцієнту поглинання нейтралізують вплив стін і підлоги на прилад, з одного боку, з іншого – розтяжки формують полігармонічну хитавицю приладу, в той час як теоретичні розрахунки припускають наявність синхронної хитавиці фюзеляжу.

Має місце ефект вибіркості кутовим рухом корпусу ЛА частот, що генеруються акустичним випромінюванням. Коливання поверхні поплавкового підвісу породжують пружно-напружений стан підвісу гіроскопа і, як наслідок, слугують появі *хибної* кутової швидкості на вхідній осі і *хибного* кутового прискорення на вихідній осі. Це призводить до більш насиченого спектру похибки вздовж осі частот.

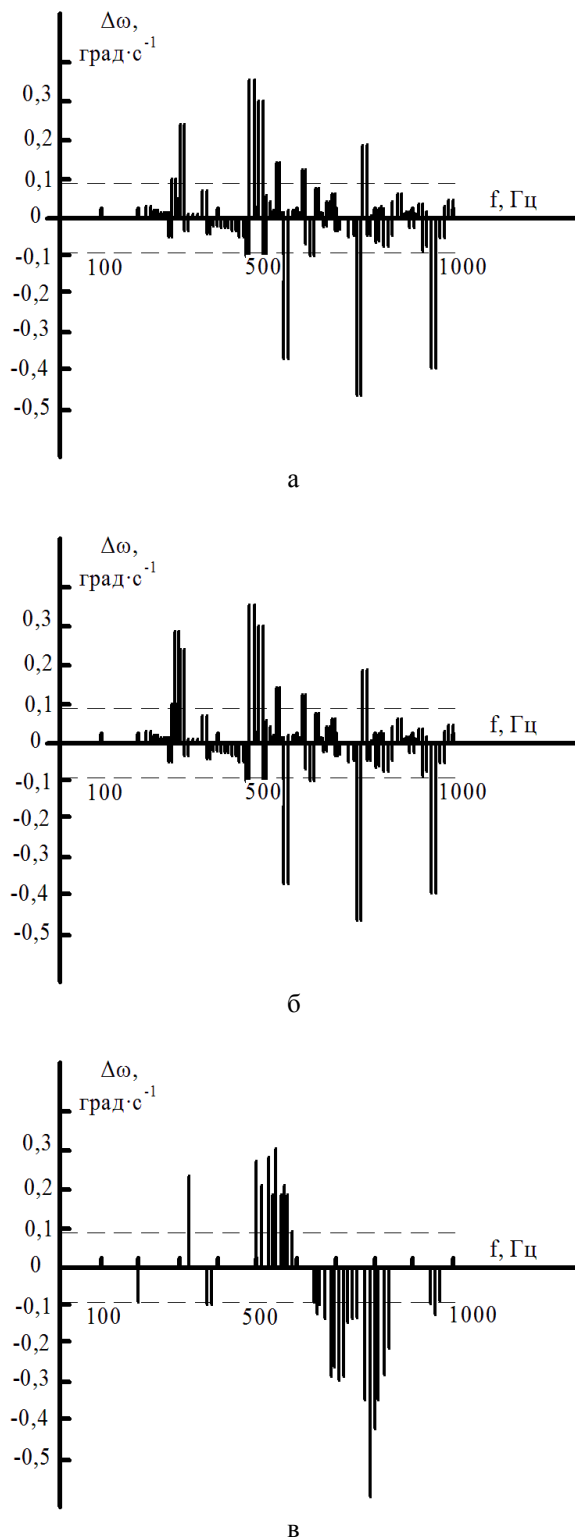


Рис. 1. Похибка ДУСУ в акустичному полі:  
 а - розрахункова, при синхронній хитавиці;  
 б - розрахункова при асинхронній хитавиці;  
 в - стендова, в акустичній камері. Пунктирна лінія  
 відмічає поріг чутливості приладу

Чисельний аналіз з фіксацією параметрів синхронної качки корпусу, природно, збіднив спектр

похибки. Разом з тим, збіг максимальних значень, похибок на стенді і в розрахунках задовільно підтвердився.

Відносно осей стабілізації платформа буде здійснювати не тільки коливальний рух, а й мати додатковий **систематичний дрейф**, обумовлений дифракцією ударної *N*-хвилі на підвісі чутливих елементів – двоступеневих гіроскопів (рис. 2).

Нарешті, тривимірна розрахункова модель не враховувала нелінійних коливань торців підвісу в акустичному полі, справедливо вважаючи, що оболонкова частина більшою мірою схильна до впливу проникаючого випромінювання і є найбільш вразливою в світлі задач, що вирішуються. На торцях же поплавка мають місце комплектуючі, які цей вплив суттєво послаблять – сільфон, датчик моментів, упори і т.п.

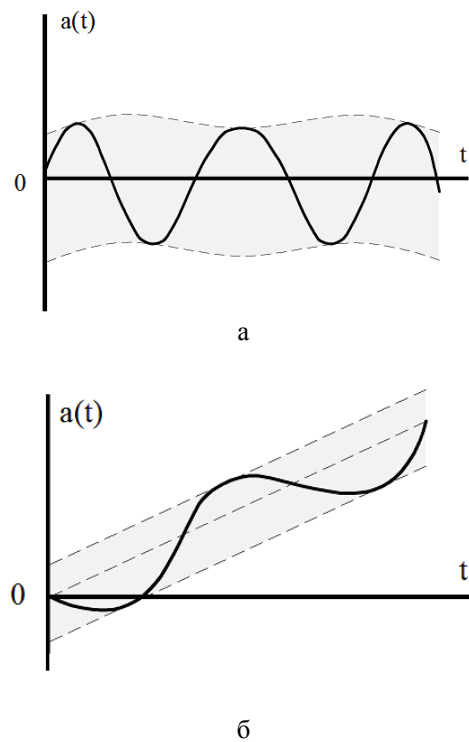


Рис. 2. Дрейф платформи під дією ударної *N*-хвилі:  
 а - періодичні складові;  
 б - систематична і періодична складові

Цілком зрозуміло, що подальше уточнення розрахункової моделі дозволить істотно наблизити теорію до експерименту, створить умови для аналізу впливу особливостей резонансного типу в рідинно-фазній частині підвісу, характеру розсіювання енергії акустичного випромінювання в елементній базі, причин виникнення зон каустик, а також прояви інших факторів. Нарешті, дозволить вибрати технічні рішення для зменшення впливу цих збурень на похибку приладу.

## Висновки

Тривимірна модель переконливо доводить необхідність врахування пружних переміщень вздовж протяжності підвісу на тій підставі, що вони вносять суттєву частку у формування хибної кутової швидкості і, як наслідок, слугують появі похибки двостепеневого гіроскопа в акустичних полях. Тому, незважаючи на значно меншу їх величину, у порівнянні з двома іншими координатами, треба все ж приймати цей факт до уваги, не довіряючи в повній мірі двовимірній моделі. Побудована програма розрахунку дає можливість аналізувати стан підвісу гіроскопа під дією збурюючих факторів різної структури.

## Литература

1. Kistler, A.L. *The fluctuating pressure field in a supersonic turbulent boundary layer [Текст] / A.L. Kistler, W.S. Chen // Jet Propulsion Laboratory Technical Repor. – 1962. – № 32. – 277 p.*
2. Карачун, В.В. *Волновые задачи поплавоквого гироскопа [Текст] / В.В. Карачун, Я.Ф. Каюк, В.Н. Мельник. – К. : «Корнейчук». – 2007. – 228 с.*

3. Ишлинский, А. Ю. *Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация [Текст] / А. Ю. Ишлинский; Ин-т проблем механики Российской акад. наук. – М. : Наука, 1976. – 671 с. – Библиогр.: – С. 661-666.*

4. Карачун, В.В. *Дифракция звуковых волн на подвесе гироскопа [Текст] / В.В. Карачун, В.Г. Лозовик, В.Н. Мельник ; Нац. техн. ун-т Укр. «КПИ». – К. : «Корнейчук», 2000. – 176 с. – Библиогр.: – С. 153-155.*

5. Шендеров, Е.Л. *Прохождение звуковой волны через упругую цилиндрическую оболочку [Текст] / Е.Л. Шендеров // Акустический журнал. – 1963. – 9, вып. 2. – С. 47-49.*

6. Карачун, В.В. *Задачи супроводу та маскування рухомих об'єктів [Текст] / В.В. Карачун, В.Н. Мельник; Нац. техн. ун-т Укр. «КПИ». – К.: «Корнейчук», 2011. – 263 с. – Библиогр.: – С. 261-263.*

7. Карачун, В.В. *Пассивные методы уменьшения погрешностей поплавоквого гироскопа при действии N-волны [Текст] / В.В. Карачун, В.Ю. Шибецкий // «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». – 2012. – №5/7 (59). – С. 8-10.*

*Поступила в редакцію 22.03.2013, рассмотрена на редколлегии 29.05.2013*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой биотехники и инженерии В.М. Мельник, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина.

## ВЛИЯНИЕ МОЩНОЙ N-ВОЛНЫ НА ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ АВТОНОМНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ. ТРЕХМЕРНАЯ ЗАДАЧА

*В.В. Карачун, В.Ю. Шибецкий*

Рассмотрена трехмерная модель описания явления взаимодействия мощной N-волны с приборами инерциального позиционирования. Построена программа расчетов в среде MathCad для определения систематической составляющей погрешности, возникающей вследствие действия мощной ударной волны на подвес поплавоквого гироскопа. Проведен численный анализ для промышленного образца датчика угловой скорости. Данные расчетов сравнивались с экспериментальными данными, полученными при стендовых исследованиях. Проанализированы причины расхождений между экспериментальными и теоретическими данными, и сделаны выводы относительно возможности использования полученных результатов.

**Ключевые слова:** N-волна, гиперзвуковые летательные аппараты, систематический дрейф, поплавоквый гироскоп, акустическое поле, ложная угловая скорость.

## INFLUENCE OF POWERFUL N-WAVE ON INERTIAL AUTONOMOUS POSITIONING DEVICES. THREE-DIMENSIONAL PROBLEM

*V.V. Karachun, V.Yu. Shybetkij*

Considered a three-dimensional model is describing the interaction of powerful N-waves with inertial positioning devices. The program for calculations were built in MathCad to determine the systematic component of the error that arises from action of a strong shock waves in suspension float gyroscope. The numerical analyses were made for the industrial designed of the angular velocity sensor. These calculations were compared with experimental data obtained at bench trials. The reasons of the differences between experimental and theoretical data were given, and conclusions regarding the possibility of using the results.

**Key words:** N-wave hypersonic aircraft systematic drift, float gyroscope acoustic field, false angular velocity.

**Карачун Володимир Володимирович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри біотехніки та інженерії факультету біотехнології і біотехніки, Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна.

**Шибецкий Владислав Юрійович** – асистент кафедри біотехніки та інженерії факультету біотехнології і біотехніки, Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна, e-mail: sjavva@mail.ru