

СЕКЦІЯ №1
ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ ТА
СИСТЕМ

УДК 531.383

Бабич О. О., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ЛАГА ЯК ОСНОВНІ ВИМІРЮВАЧІ ШВИДКОСТІ СУДЕН

Для визначення основної задачі навігації в першу чергу необхідно знання курсу та поточної швидкості руху об'єкту і заданою точністю.

Вимоги до точності вирахування швидкості руху судна за допомогою цих приладів визначаються завданнями які потрібно вирішити. При плаванні судів у відкритому морі, далеко від навігаційних властивостей, не потрібно високоточного знання поточної швидкості. Помилки в швидкості руху судна і викликані ними помилки в поточних координатах можуть бути скомпенсовані періодичними обсерваціями. Точно знати швидкість необхідно для утримання судна на рекомендованому курсі, маневрування відносно навігаційних небезпек, досягнення максимальної точності числення.

В роботі проаналізовані основні методи і засоби вимірювання швидкості суден, дана класифікація лагів методу і точності вимірювань. Наведена коротка історична довідка про методи вимірювання швидкості, відомості про перші вимірювальні прилади такі, як ручний лаг, який дозволяє проводити вимірювання швидкості в дискретному режимі та вертушечний лаг, що працює в неперервному режимі.

Основна увага приділена розгляду сучасних гідроакустичних, гідродинамічних, індукційних, геомагнітних та радіодопплерівських лагів.

Проведений порівняльний аналіз схем і принципів роботи цих вимірювачів, а також методи підвищення точності вимірювань.

Сформовані вимоги до точності вимірювання швидкості в залежності від характеру руху судна, показано, що для виконання навіть дуже складних маневрів корабля, таких як швартування, коли потрібне постійне знання точного значення швидкості не судна в цілому як матеріальної точки, а окремих його частин (носа, корми) похибка вимірювань не повинна перевищувати 0,01-0,02%.

Ключові слова: лаг, лагліній, гідроакустичний доплерівський лаг, гідродинамічний лаг, радіодопплерівський лаг.

Науковий керівник: Бондар П. М., к. т. н., доцент

УДК 004.032.26

*Бірюкова А. О., студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

БІОДАТЧИКИ

Дослідження органів чуття людини й тварин виявили певне протиріччя в їхніх властивостях: з одного боку, отримані експериментальні дані, що підтверджують високу інерційність чутливих елементів біодатчиків; з іншого боку, відомо, що швидкодія аналізаторів тварин визначається тільки складністю обробки інформації у вищих відділах головного мозку й мало залежить від динамічних властивостей їхніх чутливих елементів.

Компенсація динамічних погрішностей вимірювань у біодатчиках є життєво важливим завданням живих істот. Експериментальні дані підтверджують, що вирішується це завдання безпосередньо в їхніх нейронних структурах у процесі первинної обробки сигналів.

У даній доповіді як приклад розглядається інформаційне поле вестибулярного вимірювача кутових прискорень (полукружжя), які включають як підсилювальні, так і адаптивні механорецептори; їхні вихідні волокна в різній пропорції направляються у два нейронних вузли.

Наявність у вестибулярному вимірнику множини механорецепторів, що мають різні передатні властивості, дозволяє реалізувати особливий спосіб первинної обробки інформації, що дає можливість вимірювати не тільки кутове прискорення, але й кутову швидкість. При цьому обидва параметри можна отримувати з більшою швидкістю.

Даний механізм нейронних ланцюгів надає змогу не тільки коректувати динамічні властивості чутливого елемента вимірювача, а й забезпечує інтегрування вимірюваного сигналу. Як наслідок, полукружжя набуває здібності достатньо точно вимірювати кутові швидкості та кутові прискорення. Крім того, в результаті первинної обробки інформації в нейронних вузлах біодатчика розширюється діапазон вимірювань.

Розглянутий спосіб первинної обробки інформації на рівні рецепторних кліток дозволяє по-іншому трактувати їхню адаптацію до постійного сигналу, а саме: під адаптацією чуттєвих органів типу «звикання» приховується попередня обробка інформації з метою поліпшення передатних властивостей усього аналізатора. У результаті обробки біодатчик передає в мозок інформацію не тільки про величину й напрямок сигналу, але й про різні види його операційних перетворень.

Ключові слова: біодатчики, механорецептор, нейронні ланцюги.
Науковий керівник: Степанковський Ю. В., к. т. н., доцент

УДК 621.3

*Багрій В. О., студент, Кузнецов О. В., студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

МІКРОАКТЮАТОРИ

Найважливіша складова частина більшості MEMS – мікроактюатор. Зазвичай даний пристрій перетворює енергію в керований рух. Розміри мікроактюаторів можуть досить сильно відрізнятися. Діапазон застосування цих пристроїв надзвичайно широкий і при цьому постійно зростає. Вони використовуються в робототехніці, в керуючих пристроях, в космічній галузі та ін.

В роботі дається оцінка ефективності використання мікроактюаторів по енергетичним, функціональним і ціновим характеристикам. Для найбільш поширених пристроїв перетворення енергії приведені типові значення її основних параметрів: густини енергії, величини генеруючої сили, постійної часу і к.к.д.

Всі методи отримання активації у таких пристроях коротко зведені до наступних: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний і тепловий. Найбільш перспективними методами вважаються п'єзоелектричний і електростатичний, хоч і інші мають широке застосування.

Електростатична активація застосовується приблизно в одній третині актюаторів і, ймовірно, це найбільш ефективний і добре розроблений метод.

Магнітні актюатори зазвичай вимагають відносно великий електричний струм. На мікроскопічному рівні при використанні електростатичних методів активації одержуваний вихідний сигнал на відносну одиницю розміру більший, ніж при використанні магнітних методів. Тобто при одному і тому ж розмірі електростатичний перетворювач енергії більш ефективний.

Теплові актюатори теж споживають відносно велику кількість електричної енергії. Головний їхній недолік полягає в тому, що тепло, яке генерується, повинно бути розсіяне, що ускладнює конструкцію. Для оцінки якості мікроактюаторів приведені наступні критерії: лінійність, точність, похибка, повторюваність, гістерезис і граничне значення.

Серед основних недоліків п'єзоелектричних мікроактюаторів є злипання та примерзання частин між собою, оскільки використовуються дуже гладкі поверхні. Типова густина енергії для основних принципів перетворення, які використовуються сьогодні, знаходяться в діапазоні $w=10^5-10^6$ Вт·с/м³.

Ключові слова: мікроактюатор, MEMS, активація.

Науковий керівник: Мироненко П. С., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Бондаренко С. О., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДАТЧИКІВ МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ПРОТИЗСУВНИХ СПОРУД

Одним із видів захисту територій і споруд, що розташовані на них, від розповсюдження та наслідків зсувів ґрунту є побудова анкерних споруд. Але проблемою є те, що після повного встановлення такої споруди, візуально не можна оцінити її робочий стан. Дослідним шляхом було встановлено, що часто під дією мікропереміщень породи, в якій закріплений стержень анкера, він втрачає свій натяг та більше не виконує поставлене завдання стримування зсувів. Тому для перевірки стану цих споруд необхідно проводити діагностику для визначення поточного натягу анкера та попередження зсувних процесів. Послаблення натягу анкера призводить до появи та зростання мікропереміщень на підпірній стінці протизсувної споруди. Ця стінка є єдиним елементом протизсувної споруди, який доступний для вимірювань. Тому для діагностики стану анкера можна використовувати інформацію про мікропереміщення підпірної стінки.

Для побудови системи діагностики можуть бути використані різноманітні перетворювачі мікропереміщень. Оскільки не можна заздалегідь сказати, котрий з існуючих датчиків зможе якнайкраще працювати в заданих умовах, то необхідно для початку вибрати той, що є найпростішим у будові та має високу точність. Потрібно проаналізувати характеристики датчиків, які працюють на різних фізичних принципах та мають різну будову.

В даній роботі проведено порівняльний теоретичний аналіз таких типів датчиків мікропереміщень: сейсмічний; ємнісний, на польовому ефекті; магніторезистивний; оптоелектронний; інтегральний балочний тензоперетворювач. Такий аналіз дозволить зробити вибір найбільш ефективного датчика для побудови системи діагностики протизсувних споруд.

Ключові слова: датчики мікропереміщень, система діагностики, протизсувні споруди.

Науковий керівник: Бурау Н. І., д. т. н., проф., завідувач кафедри ПСОН

УДК 621.941

*Головачук А. Ю., студент
Национальный технический университет Украины
«Киевський политехнічний інститут», г. Киев, Україна*

МЕХАНИЧЕСКИЕ МИКРОЗЕРКАЛА

На сьогоднішній день мікродзеркала з електростатическою активацією знаходять широке застосування в мініатюрних робототехнічних системах (як оптичні ключі) і системах аналізу і обробки зображень (для відхилення лазерного променя і/або світлового потоку). Їх використовують в новітніх проекторах, де кількість в матриці рівно бажаному роздільному здатності, а один елемент має розміри порядку 10х10 мікрон.

Система мікродзеркал, що складається з 4 мільйонів незалежних мікродзеркал, буде встановлена на майбутньому телескопі JWST. Така матриця дзеркал буде дуже чутлива до інфрачервоного випромінювання і, в результаті, зможе детектувати дуже слабкі сигнали, що пройшли мільярди світлових років. Такі спостереження дозволять краще зрозуміти процес формування Всесвіту.

Найбільш широке поширення отримали двошарові мікродзеркала, виготовлені за технологією об'ємної мікрообробки, з використанням операції мікросборки і з гребенчастими електростатическими актюаторами.

В доповіді розглянуто модель мікродзеркал з електростатическою активацією, а також методику їх виготовлення. В основі управління лежить електростатическа сила, що створюється структурою мікродзеркала і двома електродами, розташованими під нею.

Представлено модель інтегрального двошарового мікродзеркала, виготовляемого з використанням технології самосборки з допомогою електростатических мікродвигачів. Дане мікромеханіческе пристрій виготовляється в межах MUMPs-технології, що докладно розглянуто в доповіді. Ці мікродзеркала дозволяють отримати великі кути відхилення, яких неможливо отримати в інших пристроях.

Показано доцільність використання гребенчастих структур, що мають більшу ємність порівняно з плоскими, що дозволяє зменшити енергопотреблення електростатических актюаторів, що входять до складу мікродзеркал.

Ключевые слова: мікродзеркала, актюатор, MUMPs-технологія.

Научный руководитель: Мироненко П. С., к. т. н., доцент

УДК 629.7.05

Гуриненко С. О., студент

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

ОСОБЕННОСТИ НАВИГАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КИБЕР-НОЖЕЙ

С 2000 года в нейрохирургии активно начали использовать кибер-ножи или, как их еще называют, лазерные скальпели.

Навигация и стабилизация в использование лазерных ножей играет важную роль, поскольку малейшее отклонение от заданной траектории может стоить жизни пациента. Управление кибер-ножом осуществляется с помощью компьютеризованной навигационной системы, улавливающей малейшие изменения положения пациента при дыхании, движении брюшной стенки и т.п. Подобная система исключает необходимость фиксации пациента. Но возникает проблема, вызванная произвольными движениями объекта. Отчасти эта проблема была решена путем применения специальных маркеров, так называемых «золотых семечек». Но использование таких маркеров является неудобным, поскольку увеличивается время подготовки к лечению.

Предлагается решить эту проблему помощью гиросtabilизации. Обозначим наклон руки-робота, т.е. отклонение ее нормальной оси от вертикали, через φ , а угол поворота кожуха гироскопа через β . Считая эти углы малыми, можем записать линеаризованные уравнения движения системы в виде :

$$\begin{aligned} A\ddot{\varphi} - c\varphi + H\dot{\beta} &= 0, \\ B\ddot{\beta} + d\dot{\beta} + q\beta - H\dot{\varphi} - k\varphi &= 0 \end{aligned}$$

где A – момент инерции руки-робота относительно оси, лежащей на поверхности линии действия луча и параллельной лучу, а B – момент инерции кожуха вместе с ротором относительно горизонтальной оси, $q\beta$ - момент сил, вызванный статически неуравновешенным гироскопом, $d\dot{\beta}$ - демпфирующий момент и $k\varphi$ - момент двигателя, который управляется по углу φ .

Решение этой системы может быть найдено известными методами.

Ключевые слова: Кибер-нож, гиросtabilизатор.

Научный руководитель: Аврутов В. В., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Демьяненко Т. В., студент
Национальный технический университет Украины
“Киевський политехнічний інститут”, г. Киев, Україна
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЯ

Приведен обзор различных схем интегральных датчиков ускорения, которые находят широкое применение в последнее время. Даны основные аналитические зависимости для расчета характеристик упругого подвеса и демпфирования чувствительного элемента.

Приводится обобщенная структурная схема компенсационного датчика линейного ускорения, имеющего подвижный узел с двумя степенями свободы.

Изучение динамических характеристик показывает, что если узел подвеса рассматривать как балки переменного сечения с поверхностями малой кривизны, то отношения приведенной осевой жесткости к угловой может служить критерием перехода от полной динамической модели к маятниковой с одной степенью свободы.

Если это отношение больше 10, то частоты максимумов амплитудно-частотной характеристики обеих моделей практически совпадают, а показатели колебательности отличаются несущественно.

Подвесы с поверхностями большой кривизны обеспечивают такое отношение, следовательно, модуль датчика линейного ускорения является маятниковой, а порядок передаточной функции на 2 ниже, чем у полной модели, что дает возможность синтезировать характеристики аналитическими методами.

Из полной математической модели общего вида получены частотные модели для датчика линейного ускорения осевого типа и маятникового с угловым движением подвижного узла.

Изучения динамических характеристик выполнялась с помощью программы Matlab.

Изучается проблема оптимизации соотношения сигнала/шум для датчика линейного ускорения с емкостным преобразователь перемещений .

Целью оптимизации является поиск рационального размещения демпфирующих отверстий по плоскости чувствительного элемента, дающий максимально возможное снижение коэффициента демпфирования при минимальных потерях емкости преобразователь перемещений.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр, оптимизация характеристик.

Научный руководитель: Мироненко П. С., к. т. н, доцент

УДК 531.383

Житник Т. С., студент

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПІДВІСУ НА ТОЧНІСТЬ ДИСКОВОГО МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА

У роботі розглянуто особливості побудови дискових мікромеханічних гіроскопів. Показано, що в залежності від співвідношення параметрів підвісу ММГ може бути як двостепеневими так і трьохстепеневими, тобто вимірювати одну або дві складові кутової швидкості. Складена математична модель, яка має вид:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} + 2h_3\dot{\alpha} + \left[\frac{c_3}{I_3} + d_3(-U_{yc}^2 + U_{zc}^2)\right]\alpha + q_{23}U_{zc}\dot{\beta} + q_{13}U_{yc}\dot{\gamma} &= M_3^{\text{II}}; \\ \ddot{\beta} + 2h_2\dot{\beta} + \left[\frac{c_2}{I_2} + d_2(U_{zc}^2 - U_{xc}^2)\right]\beta + q_{32}U_{zc}\dot{\alpha} + q_{12}U_{xc}\dot{\gamma} &= M_2^{\text{II}}; \\ \ddot{\gamma} + 2h_1\dot{\gamma} + \left[\frac{c_1}{I_1} + d_1(U_{yc}^2 - U_{xc}^2)\right]\gamma - q_{31}U_{yc}\dot{\alpha} + q_{21}U_{xc}\dot{\beta} &= M_1^{\text{II}} \end{aligned} \quad (1)$$

де α – кут повороту диска ММГ, викликаний кінцевою жорсткістю; γ, β – сигнал збудження та інформаційний сигнал; U_{xc}, U_{yc}, U_{zc} дві перехресні та вимірювана кутові швидкості відповідно; c_i жорсткості підвісу.

Оцінені похибки, викликані дією перехресних кутових швидкостей та прискорень навколо осей підвісу та навколо осі первинних коливань. Показано, що у випадку рознесення жорсткостей підвісу по двом осям взаємовплив каналів значно зменшується. Кінцева жорсткість підвісу по координаті α обумовлює вплив гіроскопічного члену $q_{32}U_{zc}\dot{\alpha}$ на вихідний сигнал навіть при відсутності інформаційного сигналу ($q_{12}U_{xc}\dot{\gamma}$). Для зменшення цього впливу необхідно збільшувати жорсткість підвісу c_3 що найменше на порядок порівняно з жорсткістю c_2 . Дослідження показали, що зі збільшенням жорсткості по каналу α рівень похибки знижується. При виконанні умови $c_3 \geq 10c_2$ цей вплив стає несуттєвим.

Метою роботи є дослідження впливу кінцевої жорсткості підвісу ММГ на характер вихідних сигналів.

Ключові слова: дисковий мікромеханічний гіроскоп, жорсткість підвісу, перехресна кутова швидкість.

Науковий керівник: Бондар П. М., к. т. н., доцент

УДК 629.12.053

Кліштя А. В., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ІМПУЛЬСНЕ КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМИ ОРГАНАМИ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ

Істотним достоїнством активних магнітних систем орієнтації (МСО) штучних супутників Землі є те, що їх маса не залежить від часу функціонування, при цьому до всього бортового обладнання пред'являються підвищені вимоги по масі та енергоспоживанню.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) МСО визначається, в першу чергу, ККД підсилювача, навантаженого на виконавчий орган, в якості якого зазвичай використовують електромагніти або котушки без сердечника. Робота будь-якого пристрою, призначеного для посилення потужності електричних сигналів, заснована на регулюванні кількості енергії, що надходить в навантаження від джерела живлення. У аналогових підсилювачах потужності здійснюється перерозподіл енергії від джерела живлення між навантаженням і ланкою керування. В якості активних елементів останніх використовуються транзистори.

У даній роботі розглянуто МСО з використанням ключового підсилювача з широтно-імпульсною модуляцією. У такому випадку енергія надходить в котушку дискретними порціями в ті інтервали часу, коли транзистор насичений. Потужність, що виділяється в котушці, визначається співвідношенням часу замкненого й розімкнутого ключа. Напруга на навантаженні має, в цьому випадку, форму прямокутних імпульсів, тривалість яких змінюється пропорційно величині аналогового сигналу керування, а частота проходження імпульсів постійна.

Проведено розрахунки для визначення характеру зміни струму (в режимі неперервного струму) у котушці МСО. Для підтвердження теоретичних результатів було проведено моделювання системи в пакеті Simulink.

Імпульсне керування котушками моментного магнітоприводу для режиму безперервного струму може використовуватися для апаратів, які виконують політ по орбіті супутника Землі та дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії системи орієнтації.

Ключові слова: магнітна система орієнтації, коефіцієнт корисної дії, підсилювач, широтно-імпульсна модуляція

Науковий керівник: Степанковський Ю. В., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Костенко М. С., студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна
КОМПЕНСАЦІЙНИЙ ГІРОТАХОМЕТР

В даній доповіді розглядається гіротахометр компенсаційного типу. Особливу увагу приділено конструкторським нюансам, з якими стикається інженер-початківець при проектуванні гіротахометру даного типу.

В загальному розумінні гіротахометр (або ж датчик кутової швидкості) – це гіроскопічний прилад для вимірювання кутової швидкості руху основи. Його використовують в якості візуальних приладів та чутливих елементів (датчиків) в системах автоматичного керування і стабілізації.

Гіротахометр компенсаційного типу створюється на основі двохступеневого гіроскопа. Метод вимірювання гіроскопічного моменту полягає в підборі рівного йому компенсуючого моменту.

Гіротахометри відрізняються від вимірювачів кутової швидкості інших типів (в тому числі й відцентрових тахометрів) низьким порогом чутливості. Ця особливість дає змогу використовувати їх для вимірювання дуже малих кутових швидкостей.

Мотивується вибір конструктивної схеми в порівнянні з поширеною схемою ГТ з пружним зв'язком. Особливі переваги компенсаційного типу ГТ перед ГТ з пружним зв'язком полягають в усуненні впливу нестабільності нульового положення пружних елементів, не ідеальності їх властивостей, в досягненні малих похибок при перехресних швидкостях та в можливості зниження динамічних похибок.

Перевага компенсаційного методу по відношенню до ГТ полягає в тому, що зрівнювати гіроскопічний момент компенсаційним можна при нульовому чи майже нульовому значенні кута повороту головної вісі гіроскопу.

На прикладі реально спроектованого ГТ проводиться аналіз розроблених елементів пристрою.

У даному випадку йдеться мова про використання кам'яних опор, переваги яких полягають в підвищеній зносостійкості та стабільності фрикційного зв'язку.

Замість потенціометричного датчика кута, який має певні недоліки у вимірюванні величини, використаний датчик індукційного типу, головною перевагою якого є відсутність тертя у рухомих частинах.

Ключові слова: компенсаційний гіротахометр, проектування.

Науковий керівник: Дем'яненко В. В., к. т. н., доцент

УДК 531.7

Костюк А. Ю., студент

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ МЕТОДАМИ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Преимуществом методов параметрической идентификации является возможность использования рекуррентных алгоритмов, позволяющих проводить текущую идентификацию в реальном времени при номинальных режимах работы объекта.

Эти преимущества определили широкое использование методов параметрической идентификации в задачах калибровки бесплатформенных инерциальных систем (БИНС). К таким методам относится рекуррентный метод наименьших квадратов, с помощью которого можно получить оценки выходных сигналов датчиков первичной информации БИНС, используя при этом оптимальное количество измерений.

Алгоритм рекуррентного МНК (РМНК) в векторном виде представляет собой итерационный процесс, где на каждом k -ом шаге вычисления (максимум шагов – N) осуществляются по формуле:

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + K(z_{k+1} - A_{k+1}\hat{X}_k).$$

РМНК допускает последовательную обработку измерений при их получении. Прекратить процесс измерений (и обработки) можно по заданной сходимости результатов. Практическое использование РМНК позволило значительно сократить количество измерений при калибровке БА до 12 – по осям Ox и Oz , а так же 14 – по оси Oy .

Точность калибровки определялась среднеквадратическим отклонением (СКО) между заданными проекциями ускорения силы тяжести и полученными в результате калибровки. При этом СКО откалиброванного сигнала составило 0.0178(В), 0.0022(В) и 0.0369(В) для каналов Ox , Oy и Oz соответственно.

Сравнивая результаты расчета при использовании рекуррентного и пакетного МНК, можно сделать вывод, что рекуррентный метод не значительно уступает по точности, используя при этом намного меньше вычислений. При использовании пакетного МНК СКО составило: 0.0074(В), 0.0010(В) и 0.0164(В), для каналов Ox , Oy и Oz соответственно, при том же количестве измерений.

Ключевые слова: метод наименьших квадратов, калибровка, бесплатформенная инерциальная система, блок акселерометров

Научный руководитель: Мелешко В. В., к. т. н., доцент

УДК 531.383

*Косяк М. Р., студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

ПРЕЦЕСІЯ І НУТАЦІЯ ЗЕМЛІ

Завдяки наявності екваторіальних надлишків мас Землі, тяжіння Місяця і Сонця викликає прецесію осі обертання Землі навколо полюса екліптики з періодом 26 000 років. Це явище, назвали місячно-сонячною прецесією, що призводить до руху точки весняного рівнодення по екліптиці зі швидкістю $50''$ на рік і до зміни екваторіальних координат небесних тіл. Явище прецесії було відкрито у II ст. до н. е. грецьким астрономом Гиппархом при порівнянні довгот зірок, визначених ним зі спостережень, з довготами цих самих зірок, знайденими за 150 років до нього грецькими астрономами Тімохарісом і Арістиллом. Наряду з рухом осі обертання Землі по конусу, спостерігаються невеликі її коливання, названі нутацією. Найбільше з таких коливань має амплітуду $9,2''$ і період 18,6 років. Під впливом прецесії і нутації полюс світу описує серед зірок складну хвилеподібну криву.

Представляє інтерес виявити, чи можна задовільно описати ці явища за допомогою теорії гіроскопів. Найбільш простий і загальний опис дії на Землю сил тяжіння з боку Місяця і Сонця наведений в книзі Д.Б.Скарборо «Гіроскоп. Теория и применения». На основі уточнених формул для моментів сил тяжіння побудовано програму мовою MatLab, яка здійснює чисельне інтегрування рівнянь руху Землі як симетричного зрівноваженого гіроскопа під дією цих моментів.

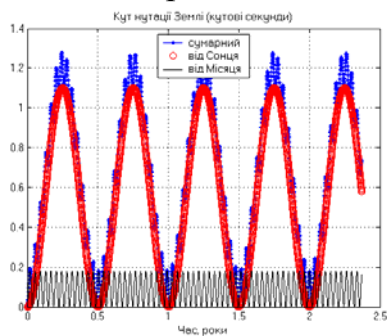


Рис.1. Вимушена нутація Землі.

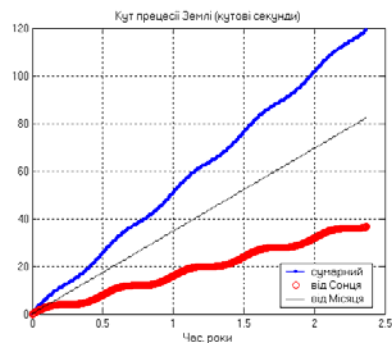


Рис.2. Прецесія Землі.

За результатами моделювання виходить, що Земля здійснює прецесію (рис.2) з кутовою швидкістю $50,5''$ у рік, а також вимушені нутаційні коливання в наслідок дії Сонця з періодом у півроку і амплітудою близько $0,6''$ і внаслідок дії Місяця з періодом у півмісяця з амплітудою $0,04''$ (рис.1). Такий результат досить близько збігається з реальними вимірюваннями.

Ключові слова: прецесія, нутація.

Науковий керівник: Лазарев Ю. Ф., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Кравченко В. А., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ГІРОСКОПІЧНИЙ ІНТЕГРАТОР ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЕНЬ

Специфіка визначення швидкості руху балістичних ракет передбачає використання переважно інерціальних приладів, до яких відносять акселерометри різних типів.

В докладі розглядається принцип роботи та будова одного з таких вимірювачів – гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень (ГІЛП).

Він являє собою трьохступінчастий гіроскоп, центр мас якого зміщений відносно точки підвісу на 10-20 мм, внаслідок чого він чутливий до поступального руху об'єкту, оскільки виникаючий при прискореному русі момент сил інерції викликає прецесію гіроскопа з кутовою швидкістю, пропорційною даному моменту, тобто величині прискорення об'єкту. Тоді кут прецесії буде пропорційним лінійній швидкості об'єкту, що дозволяє, вимірявши цей кут, знайти шукану швидкість. Завдяки такому принципу роботи він одержав назву гіроінтегруючий акселерометр.

Розглянуто основні схеми побудови, принцип дії і конструктивні різновиди.

На основі аналізу математичної моделі приладу розглянуті похибки приладу та основні способи їх усунення – використання двохроторних схем побудови та поплавковий підвіс чутливого елемента. Сформульовані вимоги до системи між рамкової корекції.

Розглянуті інші напрями використання ГІЛП, наприклад для вимірювання поперечних швидкостей руху.

ГІА забезпечує малу похибку вимірювання швидкості (до 0,01 %).

Ключові слова: Гіроскопічний інтегратор лінійних прискорень, гіроінтегруючий акселерометр.

Науковий керівник: Бондар П. М., к. т. н., доцент

УДК 629.7.0.72.1

Кривицький О. В., студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна
ІНЕРЦІЙНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ

Робота присвячена підвищенню точності визначення орієнтації рухомого об'єкту за допомогою інерційного вимірювального модулю (ІВМ) на базі мікромеханічних чутливих елементів з малою вартістю.

Модуль призначений для використання у складі навігаційних систем автономних мобільних роботів та безпілотних літальних апаратів.

ІВМ представляє собою блок датчиків, який складається з трьох лінійних акселерометрів, що вимірюють уявне прискорення (прискорення, яке викликане рівнодіючою сил негравітаційної природи) вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей чутливості, а також датчиків кутової швидкості (ДКШ), що вимірюють кутові швидкості обертання навколо тих самих осей. Крім того, ІВМ містить електронні вузли, необхідні для підтримки роботи датчиків і первинного перетворення їх вихідних сигналів.

У роботі вирішуються завдання розробки моделей окремих датчиків, аналізу способів параметризації представлення орієнтації об'єкту, моделювання кінематики обертального руху об'єкту, розробки макету вимірювальної системи та визначення характеристик датчиків на підставі експериментальних даних.

Розроблений алгоритм роботи ІВМ в основі якого лежить вектор кінцевого повороту - кватерніон. Переваги застосування кватерніонів для опису орієнтації полягають у лінійності кінематичної моделі, відсутності особливих орієнтацій, як у випадку з кутами Ейлера, високій обчислювальній стійкості завдяки єдиному рівнянню зв'язку.

Було виконано синтез алгоритму комплексування результатів вимірювань на базі фільтру Калмана (рекурсивного алгоритму, який оцінює фазовий стан динамічної системи, використовуючи ряд неповних та зашумлених вимірювань).

Створена модель може бути використана для оцінювання характеристик засобів навігації, що засновані на мікромеханічних датчиках, на етапі їх проектування; синтезований алгоритм придатний для використання у системах визначення орієнтації.

Ключові слова: інерційний вимірювальний модуль, акселерометр, датчик кутової швидкості, фільтр Калмана, кватерніон.

Науковий керівник: Аврутов В. В., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Крук Д. С., студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна
ГІРОСКОПІЧНІ ВИМІРЮВАЧІ ВЕРТИКАЛІ

Одним з найважливіших базових напрямків, що використовуються для орієнтації та навігації рухомих об'єктів, є напрямок вертикалі, відносно якої вимірюються кути нахилу основи.

В даний час для вимірювання кутів крену та тангажу використовують прилади, побудовані на різних фізичних принципах - фізичні маятники, триступеневі гіроскопи та комплексні системи, в яких здійснюється спільна обробка вище означених вимірювальних перетворювачів – маятника та гіроскопа.

Об'єднання двох вимірювачів вертикалі, що побудовані на різних фізичних принципах, - триступеневого гіроскопа та фізичного маятника, в одну комплексну систему дозволяє суттєво обмежити головні похибки окремих вимірювачів - схильність фізичного маятника до динамічних збурень, а також відхилення триступеневого гіроскопа від вертикалі, що постійно накопичуються під дією збурюючих моментів та обертання Землі.

В роботі розглядаються основні схеми побудови гіроскопічних вертикалей (ГВ) залежно від виду корекції:

- Гіроскопічні маятники;
- ГВ з радіальною(позиційною) корекцією;
- ГВ з інтегрально-позиційною корекцією;
- ГВ з інтегральною корекцією;
- ГВ з додатковою слідкуючою рамкою;
- ГВ з кульовим гіроскопом на аеродинамічному підвісі.

Проаналізована залежність методичних похибок ГВ для різних режимів руху основи від структури і параметрів систем корекції.

Показано, що для зменшення впливу руху основи з сталою швидкістю доцільно використовувати ГВ з сталою характеристикою системи позиційної корекції, або ГВ з інтегрально-позиційною корекцією.

Для зменшення впливу хитавиці основи необхідно здійснити оптимізацію питомої швидкості систем корекції, ускладненню ланцюга корекції, включенням до нього додаткових згладжуючих пристроїв з постійною часу, достатньо великою в порівнянні з періодом хитавиці.

Ключові слова: маятник, триступеневий гіроскоп, гіровертикаль, поперечна корекція

Науковий керівник: Бондар П. М., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Лошкарьова К. В., студент

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

МУЛЬТИСЕНСОРНИЙ МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ДАТЧИК

В роботі розглянуто схему мультисенсорного мікромеханічного датчика, побудовану на основі двох мікромеханічних гіроскопів, первинні коливання яких здійснюється у протифазі та мають однакову амплітуду. Датчик містить пристрій для віднімання сигналів вторинних коливань для одержання інформації про кутову швидкість. З метою одержання інформації про лінійне прискорення, що діє в напрямку вторинних коливань, запропоновано використати пристрій для додавання вторинних коливань.

Виходячи з аналізу математичної моделі, яка описує такий вимірювач, можна записати розв'язки рівнянь, які стосуються тільки вторинних коливань:

$$x_1(p) = \frac{[p^2 + 2h_2p + (k_{21}^2 - \Omega^2)] \cdot W(p) - 2\Omega pq(p)}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - \Omega^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - \Omega^2)] + 4\Omega^2 p^2},$$

$$x_1'(p) = \frac{[p^2 + 2h_2p + (k_{21}^2 - \Omega^2)] \cdot W(p) + 2\Omega pq(p)}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - \Omega^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - \Omega^2)] + 4\Omega^2 p^2},$$

де Ω та W – вимірювана кутова швидкість та лінійне прискорення відповідно.

На основі аналізу отриманих розв'язків рівнянь можна зробити висновок, що існує можливість виділення сигналів як про кутову швидкість так і про переносне лінійне прискорення з використанням диференціальної схеми підключення. При цьому переносна кутова швидкість вимірюється шляхом вирахування вихідних сигналів вимірювачів, а переносне лінійне прискорення – шляхом складання цих сигналів.

Розглянуті основні похибки вимірювань, основні фактори, що впливають на якість виділення сигналів, а також вплив неоднаковості параметрів мікромеханічних гіроскопів на точність вимірювань.

Показано, що вплив неоднаковості параметрів можна зменшити за рахунок введення загального зворотного зв'язку по сумі сигналів.

Ключові слова: мультисенсорний мікромеханічний датчик, мікромеханічний гіроскоп, лінійне прискорення, кутова швидкість.

Науковий керівник: Бондар П. М., к. т. н., доцент

УДК 531.383

*Лошкарьова К. В., студент
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

ОГЛЯД СХЕМ ПОБУДОВИ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ LL-ТИПУ

В мікромеханічних датчиках МЕМС технологічні та експлуатаційні фактори суттєво впливають на точність вимірювань. Виготовлення стабільного та надійного вібраційного мікромеханічного гіроскопа є надзвичайно складним завданням, переважно через високу чутливість динамічної системи, реагування на недосконалості виготовлення та умови експлуатації.

В роботі проведений аналіз схем побудови мікромеханічних гіроскопів LL-типу, в яких за рахунок удосконалення механічної частини зменшуються вимоги до засобів контролю електроніки.

Зроблено огляд основних схем побудови механічної частини з врахуванням можливостей технології виготовлення. Для вирішення поставленого завдання запропонована концепція використання осциляторів з великою кількістю ступенів вільності.

Були проаналізовані двоступенева конструкція в режимі вимірювання, двоступенева конструкція в режимі керування, і чотириступенева система з керуванням по двом осям і вимірюванням по двом осям.

Показано, що двоступенева конструкція в режимі вимірювання є найбільш придатною для недорогого комерційного застосування завдяки її сумісності з добре відпрацьованими методами керування.

Двоступенева конструкція в режимі керування дозволяє досягти великих амплітуд коливань, використовуючи переваги динамічного коефіцієнта підсилення.

В розглянутій чотириступеневій конструкції, яка поєднує в собі дві двоступеневі системи, які забезпечують керування та вимірювання по двом осям, визначено основні недоліки пов'язані з двоступеневим режимом керування.

Ключові слова: мікромеханічний гіроскоп LL-типу, ступінь вільності, динамічна система, режим керування, осцилятор.

Науковий керівник: Бондар П. М., к. т. н., доцент

УДК 629.7.05

Мазена Т. Ю., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

МЕТОД СКАЛЯРНОГО КАЛІБРУВАННЯ БЛОКУ ГІРОСКОПІВ ТА АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

Для калібрування блоку гіроскопів і акселерометрів зазвичай використовують методи тестових і послідовних поворотів, при яких як еталон приймають вектор кутової швидкості обертання поворотної установки $\vec{\omega}$ і вектор прискорення сили тяжіння \vec{g} .

Останнім часом знаходить застосування скалярний спосіб калібрування, який отримав свою назву завдяки тому, що в якості еталону вимірюваної величини приймають не вектор, а скалярну величину. У гравітаційному полі Землі для гіроскопів такою скалярною величиною буде кутова швидкість обертання Землі Ω , а акселерометрів - величина прискорення сили тяжіння g .

Різниця між скалярною величиною нормованого вимірюваного вектора і його дійсним значенням, рівним одиниці, пропорційна похибці тріади, наприклад, акселерометрів:

$$\frac{1}{2}(u_{xa}^2 + u_{ya}^2 + u_{za}^2 - 1) = (b_{xa} + n_{xa})\bar{g}_x + (b_{ya} + n_{ya})\bar{g}_y + (b_{za} + n_{za})\bar{g}_z + e_{xa}\bar{g}_x^2 + e_{ya}\bar{g}_y^2 + e_{za}\bar{g}_z^2 + (\delta_{xz_a} - \delta_{yz_a})\bar{g}_x\bar{g}_y + (\delta_{zy_a} - \delta_{xy_a})\bar{g}_x\bar{g}_z + (\delta_{yx_a} - \delta_{zx_a})\bar{g}_y\bar{g}_z.$$

Коефіцієнтами в цій залежності є нормовані значення вимірюваного прискорення $\bar{g}_x, \bar{g}_y, \bar{g}_z$ для акселерометрів і кутової швидкості $\bar{\Omega}_x, \bar{\Omega}_y, \bar{\Omega}_z$ для гіроскопів, їх степені і добутки.

Для калібрування БГА потрібно в полі сили тяжіння повертати БГА навколо певного напрямку на фіксовані кути і в кожному положенні отримувати нормовані вихідні сигнали u_{xi}, u_{yi}, u_{zi} . Для розв'язання рівнянь потрібно мінімум дев'ять положень БГА, тобто число випробувань повинно бути більшим або рівним дев'яти. Скалярний спосіб калібрування блоку гіроскопів і акселерометрів має свої як позитивні, так і негативні особливості:

- не потрібно жорстко «прив'язувати» осі поворотної установки до осей БГА;
- одна вибірка поворотів в принципі дозволяє калібрувати як тріаду акселерометрів, так і тріаду гіроскопів;

Ключові слова: гіроскопи, акселерометри, калібрування.

Науковий керівник: Аврутов В. В., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Маринкевич І. А., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ПОХИБОК ГІРОВЕРТИКАЛІ З ІНТЕГРАЛЬНО-ПОЗИЦІЙНОЮ КОРЕКЦІЄЮ ПРИ ВІРАЖІ ОБ'ЄКТА

Метою даної доповіді є аналіз та моделювання поведінки гіровертикалі (ГВ) з інтегрально-позиційною корекцією при віражах об'єкта, на якому знаходиться прилад. Моделювання проводиться використовуючи рівняння руху ГВ при $|V| = \text{const}$; $\omega_\zeta \approx -\dot{K} = \omega_B = \text{const}$.

Інтегрально-позиційну корекцію використовують в ГВ підвищеної точності. Вона характеризується тим, що між маятником і датчиком моменту включають ізодромну ланку. При цьому підвищується ступінь астатизму ланки корекції, тобто зменшується вплив знакопостійної складової моменту сил сухого тертя, швидкісна похибка та інші статичні і повільно мінливі похибки.

Така гіровертикаль відрізняється від ГВ з пропорційною корекцією тим, що корекційні моменти в ній пропорційні не тільки кутам неузгодження між головною віссю гіроскопу і маятником, а й інтегралам від цих кутів.

Рівняння руху ГВ для рішення даної задачі

$$\begin{cases} \ddot{\beta} + \varepsilon\dot{\beta} + k_i\beta - \omega_B\dot{\alpha} = 0; \\ \ddot{\alpha} + \varepsilon\dot{\alpha} + k_i\alpha + \omega_B\dot{\beta} = k_i \frac{V\omega_B}{g}. \end{cases}$$

де ω_B - кутова швидкість віражу; ε, k_i - параметри системи корекції.

Одержаний аналітичний розв'язок рівнянь руху дозволяє провести оптимізацію параметрів системи корекції. При цьому характеристичний поліном четвертого порядку з урахуванням параметрів досліджуваної системи та параметрів руху був представлений як добуток двох поліномів другого порядку, що значно спростило дослідження. Показано, що на відміну від звичайної ГВ взаємний вплив каналів корекції не спостерігається, тобто відхилення внутрішньої рамки відсутнє. Для зменшення віражної похибки по куту α треба відключити поперечну корекцію на час віражу.

Проведене моделювання в середовищі Matlab підтверджує аналітичні результати.

Ключові слова: гіровертикаль, віраж, інтегрально-позиційна корекція, оптимізація системи корекції.

Науковий керівник: Бондар П. М., к. т. н., доцент

УДК 535.1

*Нелепов В. А., студент, Курлович О. В., студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕВІАЦІЇ МАГНІТНОГО КОМПАСА

Магнітне поле об'єкта описується моделлю Пуассона:

$$\begin{aligned} X' &= X + aX + bY + cZ + P; \\ Y' &= Y + dX + eY + fZ + Q; \\ Z' &= Z + gX + hY + kZ + R; \end{aligned} \quad (1)$$

де X', Y', Z' - проєкції вектору напруженості сумарного магнітного поля; X, Y, Z - складові вектору напруженості МПЗ; a, b, c, \dots, k - параметри Пуассона; P, Q, R - проєкції напруженості магнітотвердого заліза.

Девіація магнітного компасу визначається за формулою:

$$\delta = A + B \sin K_K + C \cos K_K + D \sin 2K_K + E \cos 2K_K, \quad (2)$$

де K_K - компасний курс; A, B, C, D, E - коефіцієнти девіації.

Між моделлю (1) та коефіцієнтами девіації існує наближений зв'язок.

$$A = \frac{d-b}{2\lambda}, B = \frac{cZ+P}{\lambda H}, C = \frac{fZ+Q}{\lambda H}, D = \frac{a-e}{2\lambda}, E = \frac{d+b}{2\lambda}, \lambda = 1 + \frac{a+e}{2}. \quad (3)$$

Девіацію можна обчислити за формулою (4), підставляючи значення компасного курсу, обчисленого за формулою (5) по компонентах X', Y', Z' .

$$\delta = K_K - K_M; \quad (4)$$

$$K_K = \arctg \frac{-(X' \cos \gamma + Z' \sin \gamma)}{(X' \sin \gamma - Z' \cos \gamma) \sin \theta + Y' \cos \theta}, \quad (5)$$

де K_M - магнітний курс; θ, γ - крен і тангаж.

Задаючи деякі значення магнітного курсу у діапазоні від 0° до 360° , обчислюємо девіацію за формулами (2) і (4).

Проведене порівняння обчислених девіацій показує, що похибка обчислення девіації за формулою (2) досягає величини $20'$, вона залежить від курсу та широти. Для більш точного обчислення девіації слід використовувати формулу (5), яка дозволяє обчислювати компасний курс не тільки для горизонтального положення об'єкта, як у формулі (2), а і для довільної орієнтації об'єкта.

Ключові слова: магнітний компас, девіація магнітного компаса.

Науковий керівник: Мелешко В. В., к. т. н., доцент

УДК 629.1

Нужний О. В., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ФІЗИЧНЕ ГІРОКОМПАСУВАННЯ ПО ДАТЧИКУ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

Розглянуто переваги методу гірокомпасування з використанням сигналу ДКШ порівняно з гірокомпасуванням по акселерометру.

Визначення азимутальної орієнтації платформи в горизонтальній площині досягається за допомогою вимірювання складових швидкості обертання Землі в місцевій географічній системі координат. Припускаючи, що ДКШ досить точно визначають швидкість обертання Землі, орієнтування платформи відбувається до тих пір, поки вимір східної кутової швидкості стане рівним нулю.

Точність гірокомпасування визначається співвідношеннями (1.1) при використанні сигналу акселерометра і (1.2) при використанні сигналу ДКШ

$$\delta^A_{уст} = \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{\omega_{dz}}{\omega_\eta} - \operatorname{tg} \varphi \right) + \frac{\omega_{dx}}{\omega_\eta}, \quad (1.1)$$

$$\delta^D_{уст} = \frac{1}{\omega_\eta} \left(\frac{\omega_{dz} - \omega_\zeta}{k_3} \right) + \frac{\omega_{dx}}{\omega_\eta}. \quad (1.2)$$

На рис. 1 відображені результати моделювання при $\varphi=60^\circ$, $\delta_{нач}=0.05$ рад, $\omega_{dx}=10^{-6}$ рад/с, $\omega_{dz}=10^{-6}$ рад/с, $k_1=0.2$, $k_2=0.009$, $k_3=100$

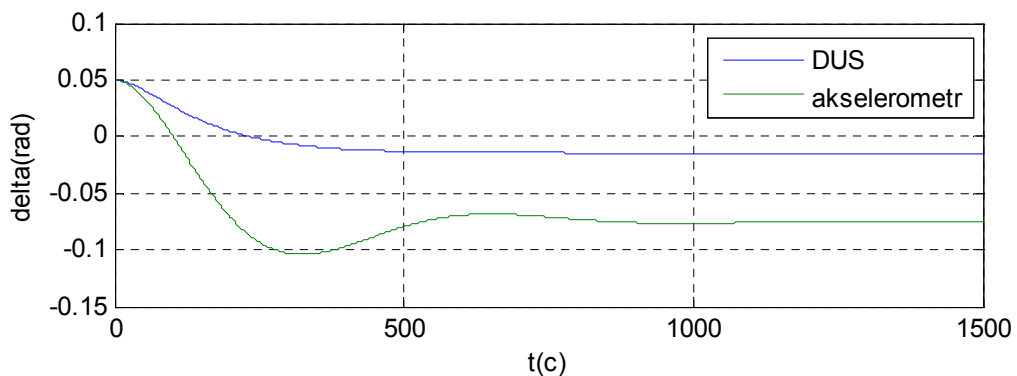


Рис. 1.

Використання сигналу ДКШ дозволяє досягти більш точної виставки за менший час, порівняно з використанням сигналу акселерометра. Точність гірокомпасування по ДКШ суттєво залежить від точності горизонтування платформи.

Ключові слова: гірокомпасування, датчик кутової швидкості, акселерометр.

Науковий керівник: Мелешко В. В., к. т. н., доцент

УДК 621.328:53(075.8)

Огороков А. И., студент

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МИКРОСИСТЕМ

Анализ современного состояния в области техники новых поколений и критических технологий в ряде наиболее развитых стран позволяет сделать заключение о том, что с начала 90-х годов наиболее бурно развивающимся глобальным научно-техническим направлением является микросистемная техника. В рамках данного направления создаются миниатюрные чувствительные, исполнительные и энергообеспечивающие системы, в основе функционирования которых лежит активное использование классических принципов механики, оптики, акустики, электротехники, теплотехники, химии и биологии, интегрируемых в конструктивные решения на микроуровне с широким использованием материаловедческой и технологической баз микро- и оптоэлектроники, а в последнее время – и биотехнологии.

Технология микросистем, выросшая на основе микроэлектронных технологий, решает эту задачу и может обеспечить массовый выпуск самых различных механических, электромеханических, оптических, химических и других компонентов для сенсорных и активаторных подсистем, органично сопрягающихся с микроэлектронной подсистемой в единый блок автоматического управления.

Микромашины, механизмы и приборы микросистемной техники по стоимости, надежности, ресурсу, массогабаритным показателям, энергопотреблению, широте и эффективности применения настолько превосходят традиционные аналоги, что созданная без использования микросистемной техники продукция специального и гражданского назначения в ближайшем будущем может оказаться неконкурентоспособной. Микросистемная техника является в настоящее время одним из наиболее динамично развивающихся междисциплинарных научно-технических направлений, определяющих новую революцию в области систем, реализуемых на микроуровне.

В данной работе рассмотрены механизмы технической механики в микромеханическом исполнении, применяемые в микроустройствах обработки, хранения и записи информации, сенсорах, актюаторах, системах преобразования энергии и движения, а так же в других микроприборах. Приведен расчет напряжений в подвесе микромеханического гироскопа.

Ключевые слова: техническая механика, микромеханические системы, микроустройства.

Науковий керівник: Мироненко П. С., к. т. н., доцент

УДК 623.61:355.40

Пантєєв Р. Л., аспірант

Інститут прикладної математики та механіки НАН України, м. Донецьк, Україна

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ПАСИВНИМИ СИСТЕМАМИ РАДІОЛОКАЦІЇ ДЛЯ РІШЕННЯ КООРДИНАТНО- ТРАСОВОЇ ЗАДАЧІ.

Розглянуто методи обробки результатів вимірювань пасивними системами радіолокації, що можуть бути використані для рішення координатно-трасової задачі.

В останній час особлива увага приділяється використанню систем пасивної радіолокації для рішення задач виявлення, супроводження та розпізнавання цілей. Однак в літературі не приділяється достатньої уваги питанням визначення режимів роботи радіолокаційної системи, задачам, що необхідно вирішувати, порядку управління єдиною інформаційною системою.

Складність вирішення задач розпізнавання повітряних об'єктів обумовлена великою кількістю типів та класів сучасних літальних апаратів, використанням в бортових радіоелектронних системах великої кількості різних режимів роботи, а також складних типів випромінювання з перестройкою всіх або частини параметрів у часі. Високі вимоги до показників якості розпізнавання можуть бути реалізовані тільки при комплексному використанні всіх видів розпізнавання: сигнальних, траєкторних (координатно-трасова задача руху об'єкту) та тактичних.

Для вирішення координатно-трасової задачі одним з ефективних методів знаходження координат об'єкту в певний момент часу є різницево-далекомірний метод, для реалізації якого необхідно розв'язати систему гіперболічних рівнянь. В загальному випадку методів рішення систем нелінійних рівнянь, що гарантують отримання прийняттого результату, не існує. За умови виконання певних вимог щодо властивостей нелінійних рівнянь, ефективним методом рішення є ітеративний метод Ньютона.

Ключові слова: пасивна система радіолокації, координатно-трасова задача, різницево-далекомірний метод.

Науковий керівник: Ткаченко В. М., д. т. н., професор

УДК 004.9

Ракович О. М., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

МІКРОПРОЦЕСОРИ В НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДАХ

В сучасному суспільстві системи орієнтації та навігації відіграють значну і незамінну роль. Із розвитком технологій відбувається часткова або повна заміна елементної бази на нові, більш досконалі елементи та системи. Переважно всі сучасні системи мають стійку тенденцію до мініатюризації. Окрім систем орієнтації та навігації, мініатюризації піддаються і системи контролю приладу та діагностичні системи, тому сучасні системи не можливі без використання мікропроцесорної техніки.

Хоча інтеграція датчиків, систем контролю та обробки даних досягла значного рівня розвитку і досить малих розмірів, більшість існуючих систем мають досить малий КПД за рахунок використання морально та фізично застарілої елементної бази та алгоритмів обробки сигналів.

Перспективним напрямом є створення системи контролю на прикладі використання мікроконтролера AT91SAM7x256. Цей мікроконтролер має аналогові входи до яких можна під'єднати виходи, наприклад, датчиків контролю кутів у системі корекції. При такій схемі побудови можна значно зменшити можливість хибного спрацьовування системи корекції кута нахилу через вплив вібрації або короткострокових змінних впливів, вдосконаливши алгоритми обробки. Вирішити цю проблему можна шляхом створення нелінійного алгоритму обробки сигналів датчиків, що працює у режимі реального часу, який би відділяв шкідливу складову сигналу (від впливу вібрації) від корисної.

Також мікропроцесорну техніку можна і доцільно використовувати у сучасних системах самодіагностики приладу. Наприклад, достатньо просто виконати систему діагностики датчиків приладу перед початком роботи. А саме використати мікроконтролер з запрограмованими алгоритмами порівняння номінальних опорів або напруг датчиків приладу з еталонними значеннями та створити механізм сигналізації несправності того чи іншого датчика. Такий підхід призведе до збільшення точності датчиків, а в деяких випадках до здешевлення системи в цілому.

Ключові слова: мікропроцесори, алгоритми обробки, підвищення точності.

Науковий керівник: Павловський О. М., асистент

УДК 153.1

*Рупич С. С., студент, Гичка О. В., студент
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

ЭЛЕМЕНТЫ НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОТЕХНОЛОГИИ

В настоящее время одной из тенденций развития систем ориентации, навигации и управления движением является применение в них микро- и наносистем. Увеличение степени интеграции, повышение быстродействия и ужесточение условий эксплуатации устройств являются условиями развития технологии интегральных микроэлектромеханических систем (МЭМС). При этом современные многофункциональные МЭМС создаются на основе применения наноматериалов и нанотехнологий. Эти тенденции являются основой для развития фундаментально нового направления - наносистемной техники, в рамках которого проводятся исследования и разработки наноэлектромеханических систем (НЭМС). Интегрированные в подвижный объект микро- и наносистемы должны обеспечивать возможность регистрации параметров движения объекта одним микро/нанопреобразователем и при этом обладать повышенными чувствительностью и быстродействием. Особое внимание при изготовлении НЭМС отводится наноматериалам, что обусловлено их уникальными свойствами. Нанометровые характеристические размеры интегральных чувствительных элементов (ЧЭ) сенсоров позволяют применять в качестве конструктивных элементов углеродные и полупроводниковые нанотрубки.

В работе, как пример применения указанных конструкций, рассматривается микромеханический гироскоп-акселерометр, который содержит инерционную массу, упругий подвес, выполненный на основе углеродных нанотрубок, гребенчатые подвижные и неподвижные электроды емкостных преобразователей перемещений. При подаче на неподвижные электроды переменного напряжения происходят колебания и вращения микромеханического чувствительного элемента вокруг осей X, Y, Z с угловыми скоростями Ω_x , Ω_y , Ω_z . Положение геометрического центра подвижного электрода определяются конечной жесткостью на изгиб упругих элементов подвеса. Приводятся зависимости собственной частоты колебаний ЧЭ от конструктивных параметров подвеса.

Ключевые слова: нанотехнологии, наносистемы, нанотрубки.

Научный руководитель: Мироненко П. С., к. т. н., доцент

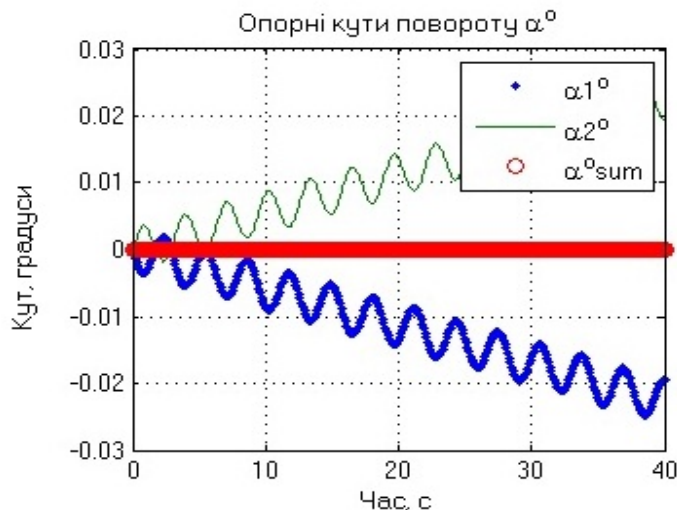
УДК 531.381

*Сапегін О. М., студент**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОГІРОСКОПНОГО ВКАЗІВНИКА НАПРЯМКУ**

Одним з ефективних засобів зменшення похибок гіроскоп напрямку (ГН) є застосування у комплексі двох однакових гіроскопів напрямку з протилежно напрямленими кінетичними моментами.

Задля вивчення ефективності застосування такого двогіроскопного вказівника напрямку була розроблена програмна модель у середовищі Matlab. Для опису ГН використовувалися диференціальні рівняння у відносних та опорних кутових координатах. Використання рівнянь в опорних кутових координатах було продиктовано їх зручністю, через те, що за ними можна безпосередньо отримати інформацію про точність утримання головною віссю гіроскопа заданого напрямку в опорній системі координат.

Моделювання проводилося шляхом чисельного інтегрування рівнянь методом Рунге-Кутта четвертого порядку. На рисунку наведений один з результатів моделювання за яким наочно можна впевнитися в ефективності застосування двогіроскопного приладу.



За результатами моделювання можна зробити висновок, що розроблена програмна модель добре відбиває реальні особливості поведінки двогіроскопного вказівника напрямку і може бути застосована для проведення досліджень цього приладу як у навчальному процесі так і при проектуванні нових приладів.

Ключові слова: гіроскоп напрямку, похибки ГН, математичне моделювання.

Науковий керівник: Лазарєв Ю. Ф., к. т. н.

УДК 531.383

*Сидоров Д. Г., студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

МАГНІТНИЙ КОМПАС

Згідно з вимогами міжнародної конвенції СОЛАС-74 усі судна, не залежно від розмірів повинні мати магнітний компас, у котрого знешкоджена девіація і визначені її остаточні значення. Це обумовлено надійністю, легкістю у використанні, простотою конструкції, а також найголовнішою його якістю – автономністю.

Доповідь містить загальну характеристику, принцип дії та особливості конструкцій магнітного компасу.

В залежності від способу застосування, середовища у якому працює прилад, показана градація магнітних компасів на морські, звичайні а також авіаційні компаси. Наведені історичні відомості про виникнення та удосконалення приладу.

Як основа принципу дії магнітного компасу розглянуті особливості магнітного поля Землі, співвідношення між основними елементами земного магнетизму (модулем T напруженості магнітного поля та кутами відповідних проекцій).

Розглянуті основні причини виникнення магнітних девіацій компасів: таких як наявність ферромагнітних мас, навколишніх електричних полів, які спричиняють викривлення параметрів магнітного поля в робочій зоні.

Проаналізовані основні напрямки модернізації приладу: застосування у конструкції нових матеріалів для досягнення високих механічних та технологічних показників корпусних деталей, мінімізація ефекту тертя між чутливим елементом (магнітом) та кріпленням, альтернативні типи підвісів картушки.

Значну увагу приділено особливостям побудови морських магнітних компасів, зокрема моделям сучасних електричних компасів, оснащених електричним датчиком куту повороту картушки, що дозволяє встановлювати компас у будь-якому місці і отримувати данні курсу дистанційно.

Завдяки надійності, легкості у використанні, простоті конструкції, а також найголовнішій своїй якості - автономності, магнітний компас був і залишається основним резервним навігаційним приладом будь якого рухомого об'єкта геоцентричної системи відліку.

Ключові слова: магнітний компас, морський компас, елементи земного магнетизму, електричне поле, ефект тертя, картушка, геоцентрична система відліку, автономність.

Науковий керівник: Бондар П. М., к. т. н., доцент кафедри ПСОН

УДК 531.383(07)

Філоненко Ю. В., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВОДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЧА ВЕКТОРА КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ПРИ РУСІ ОСНОВИ

Вимірювач вектора кутової швидкості являє собою поєднання трьох гіротахometrів зі взаємно перпендикулярними осями чутливості. Таке поєднання дає змогу зменшити методичну похибку усіх трьох гіротахometrів від перехрестних швидкостей.

Це робиться шляхом створення цифрового виходу сигналів гіротахometrів і застосування вбудованного цифрового обчислювача, який розв'язує систему рівнянь:

$$\begin{aligned} X &= \omega_x \cos\left(\frac{H}{c} X\right) - \omega_z \sin\left(\frac{H}{c} X\right) \\ Y &= \omega_y \cos\left(\frac{H}{c} Y\right) - \omega_x \sin\left(\frac{H}{c} Y\right) \\ Z &= \omega_z \cos\left(\frac{H}{c} Z\right) - \omega_y \sin\left(\frac{H}{c} Z\right) \end{aligned}$$

де X , Y , Z вихідні сигнали з гіротахometrів, що вимірюють відповідно проекції ω_x , ω_y і ω_z кутової швидкості основи, ω_x , ω_y , ω_z – скореговані значення вектора кутової швидкості.

Для перевірки можливостей зменшення цих похибок побудовано математичну модель приладу, проведено моделювання його поведінки за різних умов.

Отримано наглядний результат (рис. 1 а – при русі основи по двом осям, рис. 1 б – при русі основи по трьом осям) зменшення величини похибки визначення проекцій кутової швидкості об'єкту, на якому встановлений прилад. Завдяки поєднанню трьох гіротахometrів отримана компенсація методичної похибки від перехресної кутової швидкості.

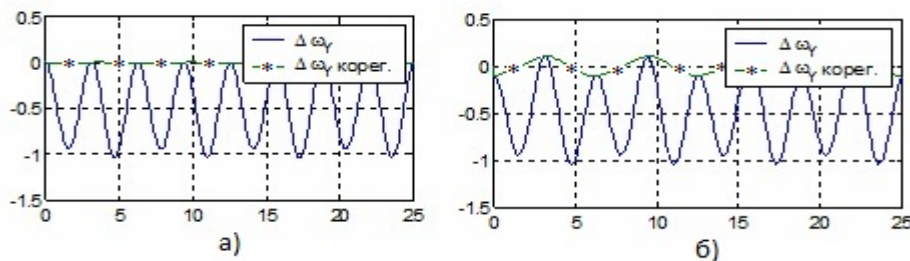


Рис. 1 Результати моделювання

де $\Delta\omega_\gamma$ – вихідне значення похибки кутової швидкості, $\Delta\omega_{\gamma\text{корег.}}$ – значення похибки кутової швидкості при корегуванні.

Ключові слова: гіротахometr, корегування, моделювання.

Науковий керівник: Лазарев Ю. Ф., к. т. н., доцент

УДК 681.3

Харенко П. О., студент

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут, м. Київ, Україна

БАРОМЕТРИЧНИЙ ВИСОТОМІР ЯК ВИМІРЮВАЧ ВИСОТИ ПОЛЬОТУ

Розвиток авіаційного приладобудування нерозривно пов'язаний зі створенням літальних апаратів нових типів, що мають велику швидкість і дальність польоту та потребують більш високого рівня процесів керування польотом.

Висотою польоту називають виміряну по вертикалі відстань між літальним апаратом і деякою поверхнею, що вважається початком відліку. Розрізняють абсолютну, відносну, дійсну і барометричну висоти: абсолютна висота $H_{\text{абс}}$ відраховується від рівня моря; відносна висота $H_{\text{відн}}$ відраховується від деякого вибраного рівня, наприклад від місця зльоту або посадки; барометрична висота $H_{\text{бар}}$ відраховується від місця із заданим атмосферним тиском. На літальних апаратах використовуються висотоміри з візуальною інформацією і датчики висоти, що видають інформацію у вигляді електричного сигналу в системи автоматичного управління і в навігаційні обчислювальні пристрої.

Барометричний метод виміру висоти польоту заснований на залежності атмосферного тиску від висоти. Функціональний зв'язок між висотою H і тиском p не є однозначним, а змінюється залежно від географічної широти, пори року, часу доби і стану погоди. Проте шляхом статичної обробки результатів багатолітніх метеорологічних спостережень встановлена середньостатистична залежність $p = f(H)$, прийнята як міжнародна стандартна атмосфера, яка використовується при градуванні барометричних висотомірів. Барометричний висотомір вимірює барометричну висоту польоту, тобто висоту відносно деякого рівня, тиск повітря на якому відомо. Барометричний висотомір призначений для візуальної вказівки відносної висоти літака над якою-небудь точкою поверхні Землі. З його допомогою витримується задана траєкторія польоту по висоті і здійснюється вихід на посадку. Барометричний датчик висоти призначений для видачі електричного сигналу, пропорційного висоті відносно поверхні Землі або відносно точки, висота якої над Землею була виміряна іншим способом.

Ключові слова: барометричний висотомір, барометричний датчик висоти.

Науковий керівник: Аврутов В. В., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Хоца А. А., студент

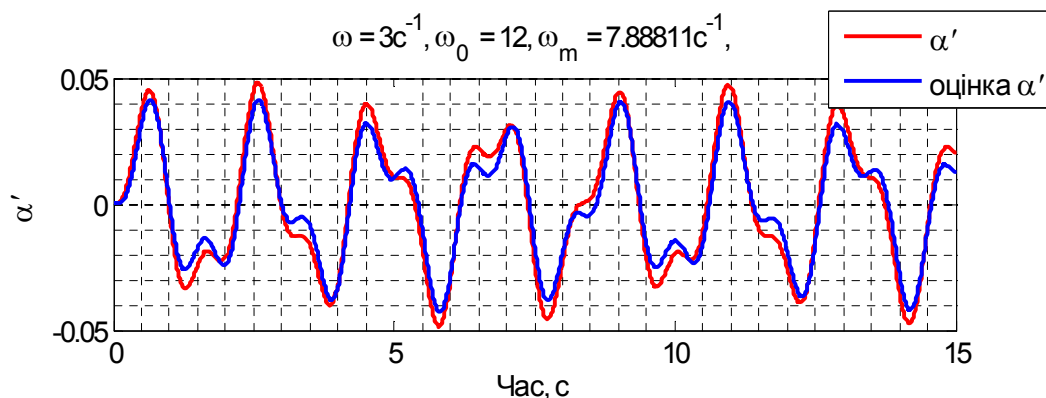
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСТЕРІГАЧА ДЛЯ НАЗЕМНОГО МАЯТНИКОВОГО ГІРОКОМПАСА

Наземні маятникові гірокомпаси (НМГК) дуже чутливі до вібрації основи, які зумовлені зовнішніми чинниками. Ці вібрації, можуть викликати значні похибки. Тому актуальною є задача теоретичного дослідження вібраційної похибки наземного маятникового гірокомпаса. Одним з шляхів корегування вібраційної похибки є алгоритмічна компенсація сталої складової вібраційної похибки, для реалізації якої необхідно мати осереднений добуток $\langle \dot{\alpha}\gamma \rangle$. Але безпосередньо кутова швидкість $\dot{\alpha}$ не може бути виміряна. Тому потрібно розробити алгоритмічні засоби, які дозволили б оцінювати поточні значення цієї кутової швидкості. Таким засобом може бути спостерігач.

Побудовано спостерігач за $\dot{\alpha}$ по лінеаризованих рівняннях руху гірокомпаса. Складено теоретичну модель, на основі якої створена програмна модель, яка дозволяє дослідити особливості спостереження сигналу $\dot{\alpha}$, гірокомпаса при вібрації основи.



Дослідження показали, що створена модель спостерігача задовільно відображує спостережуваний сигнал $\dot{\alpha}$. Застосування спостерігача у обчислювальному пристрої наземного гірокомпаса дозволить здійснити корегування вихідного сигналу гірокомпаса з метою зменшення похибки його вібрації.

Ключові слова: наземний гірокомпас, спостерігач, вібраційна похибка.

Науковий керівник: Лазарев Ю. Ф., к. т. н., доцент

УДК 531.383

Царенко С. В., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

МАЯТНИКОВИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР З ПРУЖНИМ ПІДВІСОМ

У доповіді розглядається маятниковий акселерометр з пружним підвісом. На даний момент цей тип акселерометрів знаходить широке застосування.

Маятникові компенсаційні акселерометри з пружним підвісом призначені для визначення прискорення об'єкта. Такі акселерометри мають чутливий елемент (ЧЕ) у вигляді маятника на пружному підвісі, пристрій для вимірювання переміщення ЧЕ, вихід якого через підсилювач з'єднаний із входом датчика врівноваження.

Пружний підвіс, з одного боку, досить «простий» у виготовленні, а з іншого, при певних умовах дозволяє забезпечити високу чутливість і точність вимірювань.

Недоліком таких акселерометрів є можливість різних видів переміщень ЧЕ через податливість пружного підвісу при дії пікових прискорень, наприклад, ударних, яка веде до пластичних деформацій пружного підвісу або до його руйнування. Тому для таких приладів є актуальним вибір конструктивних параметрів підвісу, який враховує ці особливості.

Так само недоліком акселерометра є необхідність розміщення упорів з високою точністю в певному місці, що не завжди можливо, виходячи із заданих конструктивних вимог і особливостей конструкції вузлів і збірки, а також за рахунок неминучих технологічних допусків. У реальній конструкції точка дотику ЧЕ з упором може не збігатися з центром удару, що призведе до виникнення неприпустимих напружень в пружному елементі при дії зовнішніх сил, до появи пластичної деформації пружного підвісу або до його руйнування, що практично є відмовою акселерометра і навігаційної системи.

Основна увага в доповіді приділена моделюванню малих коливань маятника, які обумовлені двома ступенями свободи.

Визначено власні частоти та коефіцієнти форм коливань маятника. Вивчено вплив різної орієнтації маятника на його власні частоти.

Знайдені вимоги до пружних елементів конструкції, що дозволяють мінімізувати вплив деформацій у неробочих напрямках на точність вимірювань. Визначено вимоги до вибору конструктивних параметрів підвісу, що збільшують його вібростійкість.

Ключові слова: маятниковий акселерометр, пружний підвіс.

Науковий керівник: Дем'яненко В. В., к. т. н., доцент

УДК 004.925.8

*Цыбульник С. А., студент, Шевчук Д. В., студент
Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина*

ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА МОНИТОРИНГА

Одной из важнейших задач проектирования и эксплуатации сложного по своей конструкции объекта является обеспечение его безотказной работы на протяжении всего нормативного срока службы. В связи с этим возникает необходимость в применении специальных систем мониторинга или диагностических комплексов для контроля технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

В мировой практике помимо эмпирического метода для определения конфигурации средств измерения принято также проводить натурные испытания или исследование пространственной модели контролируемого объекта. Создание нужной модели происходит обычно при помощи так называемых САД-программ (Computer-Aided Design programs), которые предназначены для трехмерного геометрического проектирования.

В работе проводится обзор моделей вертикального стального резервуара, созданных на основе чертежей реального объекта, а также проблем, которые возникли в процессе проектирования.

Последующее применение САЕ-программ (Computer-Aided Engineering programs) позволит оценить изменение динамических и частотных характеристик реального объекта на основе данных, полученных при исследовании его модели. В связи с этим для облегчения анализа результатов была создана не только близкая к объекту контроля модель, но и несколько упрощенных моделей различной сложности. Это позволит более точно определить причины возникновения зон концентрации напряжений и деформаций, а также искусственно вводить в модель дефекты и повреждения для оценки их влияния на надежность и долговечность.

Неоспоримым достоинством такого подхода к определению необходимой конфигурации средств измерения являются значительно меньшие затраты времени и денег в сравнении с натурными испытаниями объекта неразрушающими методами контроля.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния, вертикальный стальной резервуар, САД/САЕ.

Научный руководитель: Бурау Н. И., д. т. н., проф., зав. кафедры

УДК 531.383

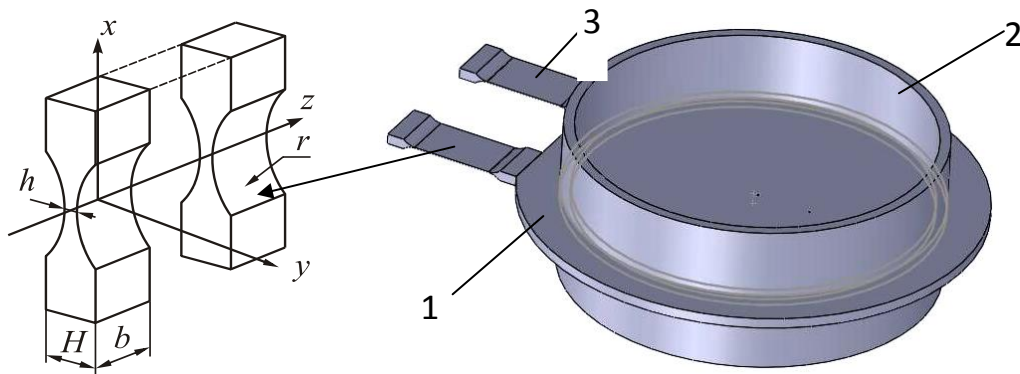
Чорний О. І., студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ГЕОМЕТРІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРУЖНИХ ПІДВІСІВ МАЯТНИКОВИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

Маятниковий чутливий елемент акселерометрів складається з плоскої рухомої пластини 1 із двома котушками 2 та двохбалочного пружного підвісу 3. Пружні підвіси навігаційних акселерометрів виготовляються як одне ціле з чутливим елементом шляхом механічної, або електрохімічної обробки. Матеріалом підвісу є кварц, або кремній. Для збільшення поперечної жорсткості, підвіс виготовляється з двох паралельно розміщених пружних елементів. Схема підвісу показана на рисунку. Конструктивні параметри пружного елемента: b – ширина; h – товщина пружного елемента в його найбільш вузькій частині; r – радіус травлення.



Метою роботи є: дослідження впливу радіуса травлення пружного підвісу на динамічні характеристики чутливого елемента акселерометра, та на цій основі визначення допусків на виготовлення.

Побудована модель чутливого елемента акселерометра в пакеті ANSYS, дає можливість визначити:

- Вплив величини радіуса травлення пружного елемента r на власні частоти коливань чутливого елемента акселерометра на першій та другій моді коливань;
- Вплив величини радіуса травлення пружного елемента r на жорсткість чутливого елемента.

Сформульовані основні обмеження на допуски для виготовлення пружних підвісів.

Ключові слова: пружний підвіс, власні частоти коливань, жорсткість підвісу.

Науковий керівник: Бондар П. М, к. т. н., доцент кафедри ПСОН

УДК 624.953: 004.03

*Шевчук Д. В., студент, Цибульник С. О., студент
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЕКОЛОГО-НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН В УМОВАХ КЛІМАТУ БЕРЕГОВОГО СХИЛУ АНТАРКТИДИ

Протягом останніх десятиріч екологічна ситуація в світі досягла свого критичного рівня. Основними забруднювачами навколишнього середовища, за даними статистики, є промислові об'єкти, а саме еколого-небезпечні речовини, що на них зберігаються, виробляються та використовуються у виробничій діяльності. Тому проблема надійного зберігання еколого-небезпечних речовин на сьогоднішній день є дуже актуальною. Особливо гостро це питання стоїть на територіях берегового схилу Антарктиди через жорсткі вимоги до екологічної безпеки та надзвичайно суворого клімату.

Для того щоб запобігти виникненню екологічних катастроф на об'єктах, які становлять небезпеку для природного середовища, потрібно не лише втручання держави, а й застосування новітніх наукових розробок.

На даний момент якнайкраще для цього підходять комплексні системи інформаційно-діагностичного контролю. Саме така система запропонована в даній роботі. Її головною функцією є попередження виникнення аварій на об'єкті, що діагностується. Тому керування процесом моніторингу здійснюється так, що при реєстрації системою виникнення дефектів на ранніх стадіях розвитку (що є дуже принциповим), діагностичний комплекс попереджає про виникнення потенційно небезпечної ситуації й описує її характер. Виникнення дефектів реєструється за допомогою заданих критичних значень сигналів. Комплексність системи дає можливість підключення необхідної кількості датчиків, побудованих на різних фізичних принципах, що дає змогу більш якісної оцінки стану резервуару. Так як система працює в складних кліматичних умовах, значна увага при виборі первинних перетворювачів та апаратури для обробки й передачі сигналів приділялась їх надійності та стійкості до зовнішніх збурень.

Система має універсальний характер і може використовуватися не тільки на різноманітних резервуарах з еколого-небезпечними речовинами, а також на різноманітних спорудах та інших об'єктах з низькою частотою власних коливань.

Ключові слова: комплексна система інформаційно-діагностичного контролю.

Науковий керівник: Бурау Н. І., д. т. н., проф., завідувач кафедри ПСОН