

## СЕКЦІЯ 1

### ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ, СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКИ

УДК 629.7

#### АКСЕЛЕРОМЕТРЫ ДЛЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

<sup>1)</sup>Лихолит Н.И., <sup>2)</sup>Черняк Н.Г., <sup>1)</sup>Шостак А.М., <sup>1)</sup>Юрьев Ю.Ю., <sup>1)</sup>Никонов И.В., <sup>1)</sup>Казенное предприятие специального приборостроения “Арсенал”, г. Киев, Украина; <sup>2)</sup>Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина

Казенное предприятие специального приборостроения “Арсенал” разрабатывает различные комплексы командных приборов (ККП) для бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) различного назначения. Для всех разрабатываемых ККП необходимы малогабаритные прецизионные навигационные линейные акселерометры (НА). Поэтому задача разработки и освоения серийного производства таких НА, с метрологическими и эксплуатационными характеристиками на уровне лучших зарубежных образцов, является актуальной.

В докладе изложены результаты разработки и испытаний двух типов маятниковых компенсационных НА с упругим подвесом чувствительного элемента (ЧЭ) для ККП БИНС различного назначения.

Для каждого типа НА представлены их конструкции, функциональные и структурные схемы, основные расчетные и метрологические модели, а также модели их наиболее существенных погрешностей. Рассмотрены результаты испытаний, методы калибровки, достигнутые метрологические и эксплуатационные характеристики, а также направления усовершенствования конструкций и повышения точности.

**1. Акселерометр с бронзовым ЧЭ типа АК-Д4.** Акселерометр АК-Д4 является первым НА созданным на предприятии и внедренным в производство. Он разработан для применения в трехосном термостатируемом блоке акселерометров ККП БИНС ракеты-носителя “Циклон-4” и представляет собой маятниковый компенсационный акселерометр, состоящий из конструктивно разделенных электромеханического датчика акселерометра и электронного модуля, что обусловлено применением акселерометра в составе трехосного блока акселерометров. В акселерометре реализована традиционная для компенсационных НА силовая схема уравнивания. В докладе представлены основные технические характеристики акселерометра АК-Д4.

**2. Акселерометр с кремниевым ЧЭ типа АКС-03.** Компенсационный акселерометр АКС-03 создается для использования в ККП перспективных БИНС. Особенностью акселерометра АКС-03 является малое время метрологической готовности. Полностью симметричная относительно

измерительной оси конструкция датчика акселерометра выполнена по менее распространенной для компенсационных НА моментной схеме уравнивания. В докладе представлены основные технические характеристики акселерометра АКС-03.

Также в докладе рассмотрены направления дальнейших работ по отработке конструкций, уменьшению их стоимости и повышению точности разрабатываемых на предприятии НА и приборов на их основе.

Ключевые слова: акселерометр, типы чувствительных элементов.

УДК 531.383

## РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ

*Нестеренко О.И., ООО «Гиротех», г. Киев, Украина*

Разработана малогабаритная система ориентации для наземных подвижных и стационарных объектов, которая позволяет с высокой точностью определять углы ориентации объекта, и особенно угла курса, в условиях изменяющегося магнитного поля на объекте-носителе и наличия других источников магнитных возмущений, затрудняющих работу магнитного канала.

Система ориентации построена на основе комплексирования двух систем, основанных на различных принципах работы – бесплатформенной гироманитной курсовертикали и оптической системы ориентации, использующей камеру с полем зрения, направленным вдоль продольной оси системы. Основой алгоритма комплексирования двух систем является оптимальный фильтр Калмана.

Изготовлены и испытаны первые образцы такой интегрированной инерциально-оптической системы ориентации (ИИОСО), имеющей в своем составе:

- бесплатформенную курсовертикаль (БКВ) WOM3 фирмы Inertial Labs (США);
- оптическую CMOS камеру iCube фирмы NET GmbH (Германия).

БКВ WOM3 построена на микромеханических датчиках угловой скорости (ДУС), микромеханических акселерометрах и магнитометрах-феррозондах и обеспечивает точность определения углов наклона  $0.1^\circ$ , угла курса  $0.17^\circ$  в статике, и  $0.3^\circ$ ,  $0.7^\circ$  соответственно в динамике. Однако указанная точность определения угла курса обеспечивается в условиях однородного внешнего магнитного поля, после компенсации влияния ферромагнитных материалов и электромагнитных полей объекта, на котором БКВ установлена.

Использование оптической системы ориентации позволяет устранить указанный недостаток гироманитной курсовертикали. С миниатюрным объективом, имеющим поле зрения  $106^\circ$  по горизонтали и  $133^\circ$  по вертикали,

ИИОСО обеспечивает точность определения угла курса не хуже  $0.3^\circ$  в диапазоне углов курса и тангажа  $\pm 22.5^\circ$  относительно опорного кадра независимо от магнитных возмущений. При штатной работе ИИОСО в указанной зоне углов производится калибровка магнитометров «на лету», позволяющая компенсировать влияние магнитотвердого и магнитомягкого железа объекта. При подходе к границе зоны и при выполнении определенных условий автоматически создается новый опорный кадр, позволяющий расширить зону работы системы. Магнитный канал ИИОСО играет вспомогательную роль, подключаясь при ухудшении работы оптического канала из-за изменения освещенности, затенения объектов, при плохих погодных условиях, ухудшающих качество изображения.

Ключевые слова: курсовертикаль, оптическая система ориентации, интегрированная система ориентации, фильтр Калмана.

УДК 531/534

## ВЛИЯНИЕ КАНАЛА КОМПЕНСАЦИИ НА ПОГРЕШНОСТИ ДВУХСТЕПЕННОГО РОТОРНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА

*Шевченко О.Ю., Черный О.И., Бондарь П.М., Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина*

Для реализации компенсационного метода измерения угловой скорости в двухстепенных роторных вибрационных гироскопах (РВГ) в контуре компенсации используется магнитоэлектрический датчик момента (ДМ), создающий момент коррекции относительно оси симметрии упругого подвеса ротора гироскопа и состоящий из цилиндрической катушки, закрепленной на корпусе и постоянного магнита на вращающемся роторе. Сигнал управления поступает с датчика генераторного типа, измеряющего угловую скорость поворота ротора вокруг оси подвеса.

Погрешности установки элементов ДМ являются причиной возникновения возмущающего момента по оси вращения двигателя, зависящего от величины измеряемой угловой скорости и изменяющегося с частотой вращения ротора. При этом угловая скорость вращения ротора

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 + \omega_x + \Delta\dot{\gamma},$$

где  $\omega_x$  - угловая скорость переносного движения основания вокруг оси ротора;  $\Delta\dot{\gamma}$  - нестабильность скорости, обусловленная влиянием системы компенсации и наличием возмущающих моментов.

В работе проведено исследование влияния дефектов монтажа катушки ДМ на погрешности и основные динамические характеристики прибора. Основное внимание уделено влиянию переносного движения основания и высокочастотной составляющей вариации угловой скорости вращения ротора, обусловленной системой компенсации.

Исследования проведены на основе анализа уравнений движения РВГ в компенсационном режиме с учетом структуры системы управления скоростью вращения ротора.

Проведены исследования на программной модели, которые позволяют оптимизировать структуру и параметры как системы управления скоростью приводного двигателя, так и канала компенсации.

При выборе параметров модели были использованы геометрические размеры макетного образца прибора, а также результаты его экспериментальных и модельных исследований. Результаты могут быть использованы при проектировании гироскопических приборов.

Ключевые слова: роторный вибрационный гироскоп, компенсационный режим, нестабильность скорости.

УДК 624.131.1

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПРОТИЗСУВНИХ АНКЕРНИХ СПОРУД

*<sup>1)</sup>Куліш Е.В., <sup>2)</sup>Бурау Н.І., <sup>2)</sup>Жуковський Ю.Г., <sup>1)</sup>ТОВ Центр науково-технічних послуг «Інжзахист», м. Ялта, Україна, <sup>2)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Для діагностики протизсувних анкерних споруд (ПАС) розроблено метод вібраційної діагностики, який полягає у періодичному вимірюванні переміщень у визначеній точці підпірної стінки (в місці встановлення натяжного пристрою), у періодичних вібраційних вимірюваннях за методом вільних коливань з визначенням частоти імпульсного відклику контрольованого стрижня, в подальшому оцінюванні параметру натягу стрижня анкера та прийнятті рішення про поточний функціональний стан ПАС.

Для проведення вібраційних вимірювань розроблено автономну багатоканальну систему вібраційної діагностики, до складу якої входять два чи три вібраційні перетворювачі (акселерометри з блоками підсилення та перетворення), джерело живлення, багатоканальний аналого-цифровий перетворювач та портативний персональний комп'ютер.

Для підтвердження ефективності запропонованого методу було розроблено методику та проведено експериментальні дослідження на таких типах конструкцій ПАС:

- анкери, об'єднані загальною опорною конструкцією (балкою);
- анкери на окремих підпірних стінках;
- анкери, об'єднані загальною підпірною стінкою (плитою).

Всі об'єкти знаходяться на південному березі Криму в зонах найбільшого розповсюдження зсувних процесів та в межах активної дії окремих зсувів. Експериментальні дослідження виконувались при встановленні анкерної

споруди та на спорудах, що знаходяться в експлуатації. При встановленні ПАС вібраційні вимірювання виконано для таких етапів: до натягу анкерів; під час натягу при проведенні контрольних випробувань; після натягу анкерів при проектних робочих навантаженнях. Експериментальні дослідження на ПАС, що знаходяться в експлуатації, проведено з інтервалом в чотири місяці. В результаті визначено залежності частот імпульсних відкликів досліджуваних анкерів та переміщень підпірної стінки від параметрів, що характеризують функціональний технічний стан протизсувної анкерної споруди.

Отримані результати узгоджуються з теоретичними і підтверджують ефективність розробленого методу вібраційної діагностики для визначення функціонального технічного стану протизсувних анкерних споруд.

Ключові слова: протизсувні анкерні споруди, вібраційна діагностика, метод вільних коливань, імпульсний відклик, переміщення підпірної стінки.

УДК 534.07+629.7.036.3

## МОДЕЛЮВАННЯ ДВОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ

*Павловський О.М., Бурау Н.І., Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Однією із проблем, що гостро постає при розробці систем діагностування авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), є одержання достовірної в достатньому обсязі інформації про технічний стан досліджуваного об'єкта. Якщо раніше вважалося, що збір інформації про технічний стан авіаційного ГТД повинен в основному проводитися в наземних умовах, то у сьогоднішній основна увага приділяється збору діагностичної інформації безпосередньо в польоті, тобто в процесі експлуатації двигуна. Тому завдання полягає в тому, щоб розробити достовірну діагностичну модель яка максимально буде відповідати реальним умовам, що забезпечить необхідний масив даних для реалізації системи вібраційного контролю.

Як показує практика експлуатації, бортові системи контролю вібрації не відповідають сучасним вимогам безпеки. У той же час, заміна застарілої елементної бази на нову, призводить до появи вільного ресурсу який не використовується через те, що стандартні алгоритми обробки використовують незначну частину загальної потужності.

Для вирішення поставленої задачі пропонується модель дворівневої системи вібраційного контролю. В роботі виконано моделювання такої системи. Перший рівень із змодельованого сигналу, виділяє інформативну складову і для визначення неприпустимого стану ГТД, відбувається порівняння із пороговими значеннями, які відповідають небезпечному і підвищеному рівням вібрації. У разі перевищення цих значень приймається рішення про зміну стану контрольованого об'єкта із виводом інформуючої індикації. Другий рівень

призначений для більш детального аналізу “нормальної” вібрації. Тут відбувається попередня Вейвлет-обробка сигналу, результати вейвлет-розкладання використовуються як вибірки окремих реалізацій для статистичної обробки. За її результатами формуються діагностичні ознаки, а на їх основі приймається рішення і виводяться рекомендації щодо загального стану контрольованого об’єкта, а також стадії і місця можливого утворення дефекту.

Модель реалізована у вигляді віртуального приладу в системі NI LabView, особливостями даної системи є виключна розширюваність і взаємодія із великою кількістю як програмних так і апаратних засобів. Тому запропонована модель за умови певної адаптації, може бути використана у якості діагностичного програмного забезпечення на борту.

Ключові слова: вібраційна діагностика, авіаційні двигуни, LabView.

УДК 531.383

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ ГІРОТЕОДОЛІТУ НАВКОЛО ГОЛОВНОЇ ОСІ

*Мураховський С.А., Хоца А.А., Національний технічний університет України,  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Визначення параметрів кутових коливань чутливого елемента (ЧЕ) гіротеодоліта (ГТ) відносно головної осі гіроскопа є важливою задачею для реалізації алгоритмічної компенсації вібраційної похибки. Безпосереднє вимірювання вищевказаних коливань представляє досить складну задачу і пов’язане з значним ускладненням конструкції ГТ, оскільки в цьому випадку необхідно встановлювати додатковий датчик кута. Водночас, в існуючих конструкціях гіротеодолітів присутні системи стабілізації обертів гіромотора, по інформації з яких можна визначити кут  $\gamma$  та кутову швидкість  $\dot{\gamma}$ .

Такі системи являють собою замкнені системи автоматичного керування, в яких об’єктом керування є гіромотор (ГМ). Датчик, який закріплений на осі двигуна, виробляє пропорційний швидкості обертання ротора сигнал, що подається на один із входів фазового дискримінатора. На інший його вхід подається сигнал з опорного генератора. Напряга на виході фазового дискримінатора, яка залежить від зсуву по фазі між цими сигналами, подається на формувач керуючого впливу. При зміні частоти обертання ротора від заданої, що визначається опорним генератором, на обмотки ГМ подається компенсуюча напруга для усунення неузгодженості, яка з’явилася [1].

В представленій доповіді розглянуто математичну модель коливань ЧЕ відносно головної осі. На її основі розроблено програму для моделювання динаміки гіротеодоліта в середовищі MATLAB. Проведено аналіз спостережуваності системи рівнянь, що описують динаміку чутливого елемента гіротеодоліта за кутом  $\gamma$ , а також синтез спостерігача для визначення оцінки

кута та кутової швидкості коливань ЧЕ. Отримані результати моделювання свідчать про можливість застосування запропонованого методу визначення оцінки додаткових параметрів руху ЧЕ гіротеодоліта відносно головної осі гіроскопа при використанні інформативного сигналу із системи керування кутовою швидкістю гіромотора. Показано, що оцінка кута  $\gamma$  визначається спостерігачем з достатньою точністю, і в подальшому може бути використана для алгоритмічної компенсації вібраційної похибки ГТ.

Ключові слова: гіротеодоліт, вібраційна похибка, алгоритмічна компенсація.

**Література:**

1. Воробьев В.М. О влиянии качаний ротора гиродвигателя на устойчивость движения гироскопа. // Информационные системы, механика та керування. – вип.6. – 2011.

УДК 629.1

## ГИРОКОМПАСИРОВАНИЕ ПО СИГНАЛУ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НА КАЧАЮЩЕМСЯ ОСНОВАНИИ

*Мелешко В.В., Нужный А.В., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

При запуске ИНС необходимо как можно точнее выполнить ее начальную выставку, которая включает физическую или аналитическую выставку чувствительных элементов в азимуте (гироскопирование). Чувствительными элементами ИНС являются датчики угловой скорости (ДУС) и акселерометры, по сигналам которых и производится начальная выставка.

В рассматриваемом методе гироскопирования платформа выставляется относительно плоскости меридиана по сигналу ДУС, по сигналам акселерометра осуществляется коррекция положения платформы в плоскости горизонта и демпфирование колебаний

При колебаниях основания указанные измерительные элементы будут реагировать также на составляющие ускорений и угловых скоростей, обусловленных этим движением. Эти составляющие воспринимаются как помехи. Эти помехи в процессе гироскопирования приводят к возникновению колебаний платформы относительно установившегося значения

Для гироскопирования при воздействии качки применяется метод компенсации вредных составляющих угловых скоростей и ускорений, вызванных качкой. Для компенсации воздействия ускорений, вызванных качкой, на сигналы акселерометров платформы, используются сигналы трех дополнительных однокомпонентных акселерометров установленных на объекте в непосредственной близости от платформы. Перепроектированные на оси платформы значения действующих на объект ускорений вычитаются из сигналов акселерометров, установленных на платформе, в результате чего сигнал этих акселерометров содержит информацию только о наклоне

платформи относительно плоскости горизонта. Эти сигналы суммируются с сигналами угловых скоростей коррекции и поступают на следящие приводы.

Использование данного метода позволяет компенсировать влияния качки при расположении платформы на расстоянии от центра качки (ЦК). Особенно важным является компенсация ускорений при удалении платформы от ЦК по вертикальной оси, так как в таком случае ускорения, вызванные качкой, принимают максимальные значения.

Ключевые слова: гироскопирование, датчик угловой скорости, акселерометр, качка, компенсация.

УДК 629.7.05

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЖУЩЕЙСЯ СКОРОСТИ

*Васильковский И. В., КП СПС «Арсенал», г. Киев, Украина*

Вычисление кажущейся скорости по первичной информации, получаемой от инерциальных датчиков кажущегося ускорения – акселерометров, является одной из ключевых задач инерциальной навигационной системы. Вопрос точности вычисления кажущейся скорости, по сути, определяет точность работы инерциальной системы.

Схемы реализации вычисления кажущейся скорости могут быть определены в зависимости от вида первичной информации (кажущегося ускорения) и методов реализации решения навигационных уравнений.

Рассматривается случай БИНС, когда акселерометры измеряют ускорение в проекциях на связанный базис  $E$ ; датчики предполагаются однократно интегрирующими, так что на их выходе образуется поток приращений интеграла от измеряемой величины (проекции):

$$(\Delta b_{E_n})_s = \int_{t_{n-1}}^{t_n} P_{Es} d\tau, \quad s = 1, 2, 3.$$

Применено пошаговый метод интегрирования в инерциальном базисе:

$$\mathbf{W}_I(t_n) = \mathbf{W}_{In} = \mathbf{W}_{In-1} + \Delta \mathbf{W}_{In}, \quad \Delta \mathbf{W}_{In} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \mathbf{P}_I d\tau,$$

где  $\mathbf{W}_I, \mathbf{P}_I$  – соответственно кажущаяся скорость и кажущееся ускорение в базисе  $I$ .

Разработаны алгоритмы вычисления вектора-приращения кажущейся скорости в инерциальном базисе  $\Delta \mathbf{W}_{In}$  с точностью до величин второго, третьего и четвертого порядка малости относительно малого шага интегрирования  $h$ .



Проведено моделювання в комп'ютерній середі Matlab помилок чисельного інтегрування по отриманим алгоритмам. Моделювальні експерименти показали доцільність розроблених алгоритмів, і значить, правильність застосовуваної методики побудови алгоритмів.

Ключові слова: кажущася швидкість, акселерометри, БИНС.

**Література:**

1. Бранец В. Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Шмыглевский И. П. – М.: Наука, 1992. – 280 с.
2. Лазарев Ю. Ф., Бобровицька Я. Г. Зіставлення алгоритмів чисельного інтегрування рівнянь орієнтації твердого тіла у кватерніонах за методом Пікара // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2006. – № 6. – с. 113 – 118.

УДК 531.383

## О ТЕОРИИ ДВУХСТЕПЕННОГО ГИРОКОМПАСА НА ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ

*Лазарев Ю. Ф., Мураховский С.А., Національний технічний університет України, «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

В реальных условиях эксплуатации основание двухстепенного гироскопа (ДГК) подвержено угловым вибрациям, накладываемым на основное вращение географической системы координат в инерциальном пространстве. Такие угловые вибрации могут приводить к значительному смещению положения равновесия гироскопа в азимуте в результате выпрямительного эффекта.

Теоретическое исследование вибрационных ошибок ДГК обычно производится методом возмущений. Однако, как показывает моделирование, результаты такого исследования дают удовлетворительное описание происходящих явлений только при незначительных амплитудах вибрации основания, а некоторые явления вообще не могут быть выявлены таким методом. Проблема здесь заключается в том, что для выявления не малых постоянных составляющих решения необходимо предварительно определить амплитуду возникающих вынужденных колебаний, которая, однако, в свою очередь зависит от неизвестной постоянной составляющей.

В аналогичных условиях при описании поведения маятника значительно более глубокое погружение в действительность дает применение минимаксного критерия устойчивости Т. Г. Стрижак [1, с. 51-63]. Применение методики Т. Г. Стрижак дает возможность найти постоянные составляющие вынужденных колебаний, минуя процесс определения амплитуд этих колебаний. Для маятника эта методика дает очень хорошее описание картины возникновения и устойчивости новых положений равновесия. Однако, во-первых, минимаксный критерий не дает возможности определить другие характеристики

вынужденных колебаний (амплитуду, фазу), а во-вторых, для описания поведения ДГК эта методика оказалась неприменимой.

В докладе приводится новый эффективный метод теоретического исследования поведения ДГК при вибрации, названный *методом баланса*, который основан на разделении уравнения движения ДГК на два уравнения, одно из которых не содержит постоянных составляющих, а второе состоит из членов с постоянными составляющими. В результате удается, пользуясь обычными допущениями, найти приближенные решения, определяющие центрированную составляющую и связанную с ней постоянную составляющую угла поворота гирокомпаса, а затем исключить из них центрированную составляющую. Такая методика, примененная для маятника, дает те же результаты, что и минимаксный критерий. Но, в отличие от последнего, она позволяет определить и параметры центрированной части решения.

В докладе проводится сопоставление результатов теоретического анализа движения ДГК методом возмущений и представленным методом баланса с результатами численного интегрирования уравнения движения ДГК на программной модели. Показана хорошая сходимость полученных новым методом результатов с экспериментами на модели.

Ключевые слова: двухстепенной гирокомпас, метод баланса.

**Литература:**

1. Стрижак Т. Г. Метод усреднения в задачах механики. – Киев: Донецк: Вища школа, 1982. – 250 с.

УДК 531.383

## РАСШИРЕННЫЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

*Мелешко В.В., Лакоза С.Л., Костюк А.Ю., Национальный технический университет  
Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

В данном исследовании для идентификации стохастических характеристик погрешностей инерциальных датчиках используется метод вариаций Аллана. Этот метод позволяет определить следующие параметры «цветного шума» датчиков: шум квантования, белый шум в ускорении, нестабильность нуля, случайное блуждание нуля, трендовая составляющая ухода. По параметрам шума могут быть определены функции спектральной плотности мощности стохастических источников погрешностей. Каждый тип шума может быть аппроксимирован соответствующим дифференциальным уравнением. Впоследствии эти уравнения были использованы для создания единой калибровочной модели. При этом существующая детерминированная модель выходного сигнала инерциальных датчиков дополняется дифференциальными уравнениями, записанными для стохастических погрешностей. Записанная

модель виходного сигналу, в якій учитуються шумові характеристики виходного сигналу, служить для створення розширеного фільтра Калмана.

Конечним етапом досліджень було застосування фільтра Калмана (ФК) для калібрівки блоку акселерометрів. В результаті проведених експериментів, розширена калібрівочна модель, показала високі точнісні характеристики на рівні пакетного методу найменших квадратів (МНК). Також ФК дав вииграш в 4 рази в швидкості збігності оцінок калібрівочних коефіцієнтів порівняно з рекуррентним МНК. Абсолютна похибка визначення прискорень знаходиться на рівні  $0.2 \text{ м/с}^2$  при оцифруванні сигналу 12-бітним АЦП, власний рівень шуму якого становить  $0.11 \text{ м/с}^2$ . Особливістю даного алгоритму виявилася його чутливість до заданих стохастических параметрів шумів, а також урахування їх впливу на коефіцієнти перехресних зв'язів. Графіки, що відображають швидкість збігності калібрівочних коефіцієнтів та абсолютну похибку вимірювання, представлені нижче.

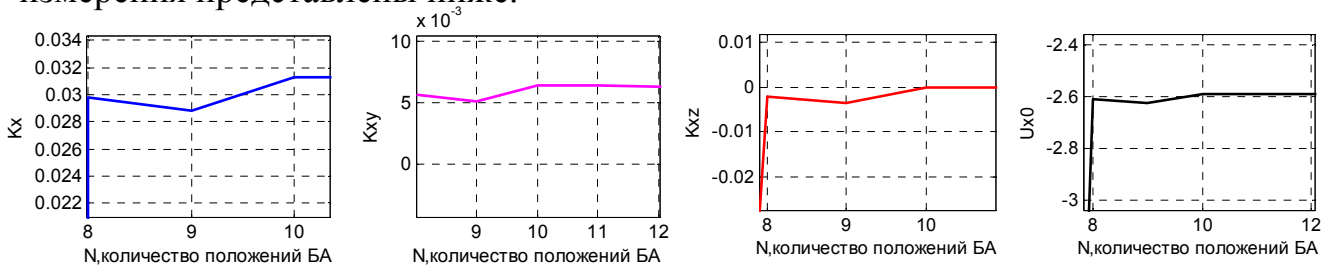


Рис.1. Швидкість збігності визначення калібрівочних коефіцієнтів в залежності від кількості положень блоку акселерометрів

Ключові слова: калібрівка, варіація Аллана, фільтр Калмана, інерціальний датчик.

УДК 531.383

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ГІРОТЕОДОЛІТА ПРИ ДІЇ ВИПАДКОВОЇ ВІБРАЦІЇ

*Мураховський С.А., Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна.*

Сучасні вимоги, що висувуються до гіртеодолітів, передбачають можливість роботи приладу в умовах частково рухомої основи, тобто без спеціальних пристосувань, що забезпечують незбурюваність вібраціями, при цьому характеристики вібрації, частота і амплітуда, як правило є випадковими величинами. Представлена доповідь присвячена аналізу динаміки гіртеодоліта за випадкових збурень, а також визначенню загальних залежностей, що визначають вібраційну похибку.

В результаті теоретичних досліджень отримано загальну формулу, відповідно до якої, математичне сподівання вібраційної похибки гіртеодоліта

при випадковій вібрації  $M[\alpha(t)]$  буде залежати від багатьох факторів. По-перше, за аналогією з регулярною вібрацією, середнє значення залежатиме від напрямку поступальної випадкової вібрації, і буде досягати максимуму при куті нахилу вібрації до площині меридіана  $45^\circ$ . По-друге, математичне сподівання  $M[\alpha(t)]$  залежатиме від дисперсії амплітуди перевантаження  $\sigma_n^2$ , аналогічно квадрату амплітуди регулярної вібрації. Нарешті, воно буде також залежати від переважаючої частоти та ступеня нерегулярності вхідної випадкової вібрації, а також від характеристик гіротеодоліта, як динамічної системи.

Представлені в доповіді результати показують, що розраховані значення вібраційної похибки  $M[\alpha(t)]$  повністю відповідають отриманим значенням при моделюванні процесу  $\alpha(t)$  на виході гіротеодоліта. Отже отримана залежність може використовуватись для розрахунків при відомих параметрах приладу і характеристиках вібрації – напрямку, середньоквадратичному відхиленні, переважаючій частоті та нерегулярності вібрації. Проведено також моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки. Такий процес при випадковій вібрації основи приводить до виключення більшої частини постійної складової  $M[\alpha(t)]$ , аналогічно до випадку регулярної вібрації.

Окрім середнього значення вібраційної похибки на точність гіротеодоліта також впливає амплітуда коливань чутливого елемента в азимуті, яку при випадковій вібрації основи можна охарактеризувати середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_\alpha$ . Подальші дослідження можуть бути спрямовані на визначення шляхів зменшення дисперсії коливань чутливого елемента, наприклад за допомогою фільтра Калмана.

Ключові слова: гіротеодоліт, вібраційна похибка, випадкова вібрація.

УДК 531.383

## МОДЕЛЬ ПОХИБОК КАЛІБРУВАННЯ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ МЕТОДОМ ТЕСТОВИХ ПОВОРОТІВ

*Лакоза С.Л., Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Процесом калібровки датчиків, як відомо, називають процедуру ідентифікації параметрів моделі похибок датчиків. Дана робота розглядає процес калібровки акселерометрів методом тестових поворотів. У залежності від моделі похибок датчиків ставляться вимоги до кількості точок процедури калібровки. У загальному випадку стверджується, що чим більше дослідних точок, то тим точніший результат. Проте з іншої сторони точність отриманого результату сильно залежить від метрологічної точності обладнання, на якому проводиться калібровка. Сучасні вимоги до обладнання ставляться як такі, що точність обладнання для калібровки має бути мінімум на порядок вища чим

точність каліброваних датчиків. Проте автору даної роботи не відомо аналітичних оцінок впливу точності обладнання, що використовується в процесі калібровки, на точність визначення коефіцієнтів математичної моделі. Саме цьому питанню присвячена дана робота.

За модель вимірювання акселерометрів було обрано наступну лінійну модель:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{0x} \\ U_{0y} \\ U_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} & U_{0x} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} & U_{0y} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} & U_{0z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 1 \end{bmatrix} = K_{[3 \times 4]} \cdot A;$$

Похибки процесу калібровки, що враховувалися при виведенні моделі похибок калібровки методом тестових поворотів:

- 1) неточності початкового горизонтування -  $\delta_\alpha, \delta_\beta$ ;
- 2) неточності виставки в задане положення -  $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$ ;
- 3) неправильність задання модуля прискорення сили земного тяжіння -  $\Delta g$ ;
- 4) шум датчиків -  $\xi_i$ .

У результаті досліджень була отримана наступна модель похибок визначення коефіцієнтів (загальний вираз):

$$\delta K = \Delta W \cdot A^T (A \cdot A^T)^{-1},$$

де  $\delta K$  - відносна похибка визначення коефіцієнтів,

$\Delta W$  - матриця похибок моделі калібрування,

$A$  - матриця значень прискорень процедури калібровки в обраних положеннях.

Отримана модель дозволяє проаналізувати вплив усіх вищезазначених факторів на точність визначення коефіцієнтів математичної моделі.

Ключові слова: калібровка, акселерометр, похибка.

УДК 620.186.6

## О ВАЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ В УСЛОВИЯХ АНТАРКТИКИ

<sup>1)</sup>Жуковский Ю.Г., <sup>2)</sup>Кузько А.В., <sup>2)</sup>Мороз И.В., <sup>1)</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина,  
<sup>2)</sup>Национальный антарктический научный центр, г. Киев, Украина

Эффективность научных исследований в Антарктике во многом зависит от уровня комфортности, который можно там обеспечить. Этот уровень во многом определяется бытовыми условиями, такими как обеспечение теплом и электроэнергией. На украинской антарктической станции (УАС) Академик Вернадский такое обеспечение осуществляется за счет дизель-генератора и

системы отопления, которые работают на дизельном топливе. Дизельное топливо хранится в стальном сварном резервуаре и доставляется на станцию раз в год в период смены зимовщиков.

Суровые климатические условия Антарктики, чрезвычайно жесткие требования по экологической безопасности, социальные, экономические и политические аспекты делают резервуар с дизельным топливом объектом особой важности и постоянного контроля за его физическим состоянием.

Статистика свидетельствует [1], что аварии на резервуарах для хранения нефтепродуктов случаются довольно часто, при этом наносится огромный экономический и экологический ущерб. Обычно после аварии создается специальная комиссия, которая расследует причины ее возникновения и определяет причиненные убытки, а также организации и лица по чьей вине авария произошла. Так, в [2] приведены данные, что виновниками дефектов стальных сварных резервуаров являются как проектировщики, так и монтажники и лица эксплуатирующие резервуары. Доля их вины соответственно распределена 23-63-14 процентов. Как видим, наибольшая часть вины в авариях на резервуарах приходится на монтажников, а среди их дефектов, более 80% составляют дефекты сварных швов в виде раковин и подрезов. Дефекты сварных швов под воздействием коррозионных процессов со временем превращаются в сквозные свищи.

Кроме причин, указанных выше, оказывающих влияние на безопасную эксплуатацию резервуара, следует выделить дополнительно еще две группы: воздействие внешней среды и хранимого дизельного топлива. О степени их влияния на безопасную эксплуатацию резервуара трудно судить, так как статистических данных по этому вопросу крайне мало. В данный момент можно строить только предположения на основе моделирования возможных ситуаций, а в дальнейшем на основе анализа долговременных наблюдений и измерений, проведенных на УАС, прогнозировать степень влияния на резервуар тех или иных возмущений. Внешняя среда в условиях Антарктики характеризуется постоянно дующими ветрами, порой переходящими в ураганы, обильными осадками, высокой влажностью и низкими температурами. В результате резервуар подвергается статическим и динамическим нагрузкам. Особую опасность представляют вибрации, возникающие из-за турбулентности обтекающего резервуар потока воздуха при ветре. Хранимое в резервуаре дизельное топливо относится к средне агрессивной жидкости и медленно, но постоянно разъедает его внутренние стенки. В результате этих воздействий образуются коррозионные язвы, свищи, трещины и деформации листов, что может вызвать разгерметизацию резервуара с последующим разрушением.

Поэтому, одной из первоочередных задач при эксплуатации резервуара является постоянный контроль за его физическим состоянием, т.е. проведение диагностических работ. В этом случае задачей технической диагностики является получение информации о наличии, параметрах и классификации дефектов резервуара, позволяющей принимать решения о режимах его

дальнейшей эксплуатации и при необходимости проведения срочных ремонтных работ или вывода из эксплуатации.

Ключевые слова: стальной резервуар, экология, дефекты, эксплуатация, диагностика.

**Литература:**

1. Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров. – М.: Недра, 1995.- 253с.
2. Швырков С.А., Семиков В.Л., Швырков А.Н. Анализ статистических данных разрушений резервуаров // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1996. – Вып. 5. – С. 39-50.

УДК 531.8

## СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

*Варабин Д.А., Багаев Д.В., Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, г. Ковров, Владимирская обл., Россия*

Работа посвящена созданию системы определения угла поворота подвижного объекта относительно начального положения для системы ориентации мобильного робота основе применения микропроцессорного комплекта «Single Board» фирмы National Instruments.

Принцип определения угла поворота основан на численном интегрировании оцифрованных значений датчика угловой скорости (ДУС), где постоянная интегрирования задавалась заранее известным значением начального положения робота. Данное значение угла в последующем использовалось в работе системы ориентации мобильного робота в пространстве.

Основные проблемы данного решения следующие:

- Зависимость нулевого сигнала ДУСа от условий внешней среды (температура, давление, влажность).
- Непостоянство масштабного коэффициента ДУСа.

Предлагаемое решение заключается в доработке конструкции системы определения угла, проектировании и использовании специальных алгоритмов калибровки, при этом оно заключается в установке ДУСа на поворотную платформу, способную с высокой точностью вращать датчик непосредственно на мобильном роботе. Данное решение позволяет, находясь в неподвижном состоянии, при вращении датчика на поворотном устройстве, осуществить привязку рассчитанного угла к реальному, тем самым устранив ошибку коэффициентов шкалы датчика. Аналоговый выход датчика угловой скорости CRS03 подключен непосредственно к аналоговому входу платы NI Single Board. Цепи питания датчика (GND, 5V) подключаются так же к плате NI Single Board (к выводам внутреннего высокоточного источника напряжения). Данное решение минимизирует ошибки оцифровки выходного напряжения датчика,

связанные с помехами на аналоговую линию и шумами стороннего источника питания датчика.

В ходе испытаний было выявлено, что "ноль" ДУСа (2,5 В) в зависимости от условий внешней среды может быть от 2,35 В до 2,65 В. Наибольшее влияние на данную погрешность вносит температура окружающей среды. Суть используемого алгоритма состоит в последовательном подборе "нуля" датчика при его неподвижном положении (корректирующее значение прямо пропорционально рассчитываемому значению угла со знаком минус). Так как изменение температуры окружающей среды процесс медленный, а сам заезд робота длится не более 5 минут, то для достижения необходимой точности на заданном интервале времени достаточно проводить данную калибровку за несколько минут до каждого заезда.

В результате испытаний системы максимальная ошибка определения угла поворота составляла не более 1 градуса за 3 минуты при 20 поворотах (более 180 градусов в обе стороны).

Ключевые слова: датчик угловой скорости, система определения угла поворота.

УДК 531.8

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ШАРИКОВИНТОВОГО МЕХАНИЗМА

*Некрасов А.М., Багаев Д.В., Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, г. Ковров, Владимирская обл., Россия*

Актуальность использования физических моделей, взамен математическим (компьютерным, 3D-моделям) никогда не перестанет иметь место, т.к. ничто так лучше не отражает понимание сути и восприятия того или иного прибора (устройства), как его прототип или полноразмерная модель. Только «вживую» можно узнать точно, как поведёт себя устройство, т.к. полностью симитировать реальное поведение невозможно. В образовательной деятельности наглядное представление играет значительно-важную роль в процессе обучения учеников и студентов. Интерес к реальным моделям гораздо больше, нежели к их математическим аналогам, что является немаловажным мотивационным фактором «тяги к знаниям».

На данный момент, в школах/ВУЗах осталось довольно много устарелых лабораторных и испытательных стендов. У них есть существенные недостатки:

- Невозможность сохранения выходных данных в электронном виде.
- Автоматизация использования этих данных в последующих примитивных и «ёмких» расчётах и построения различных зависимостей в графическом виде, на что уходит много дополнительного времени.



Однако, благодаря технологиям National Instruments, можно исправить эти два недостатка и модернизировать лабораторный стенд до современного уровня, сделав его вновь актуальным.

В используемом примере, такой модернизации подвергнется лабораторный стенд (рис.1) изучения закона движения и определения момента сопротивления шариковинтового механизма (ШВМ).



Рис. 1. Общий вид ШВМ

Задача лабораторного стенда заключается в следующем: нахождение количества оборотов, времени движения и угловой скорости вращения гайки. В последствии, на основе полученных данных, определяются моменты сопротивления на различных участках движения.

В роли датчика используется оптронная пара (ИК-диод и фототранзистор). В качестве «посредника» между стендом и ЭВМ выбор пал на использование NI Single-Board RIO 961x/963x и NI PCI-6025E+SCB-100. Программная среда – NI LabVIEW 2009.

Разработанный лабораторный стенд планируется к внедрению в учебно-образовательный процесс кафедры «Приборостроение» в рамках дисциплины «Автоматизация контрольных операций».

Ключевые слова: лабораторный стенд, LabVIEW.

УДК 629.783

## ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ МІКРОСУПУТНИКА НА ОСНОВІ ПОКАЗІВ МАГНІТОМЕТРІВ

*Рижков Л.М., Степуренко Д.І., Національний технічний університет України  
"Київський Політехнічний Інститут", м. Київ, Україна*

Магнітне поле Землі (МПЗ) широко застосовується як для визначення орієнтації космічних апаратів, так і для керування нею. Зокрема параметри МПЗ використовуються в детермінованих двовекторних алгоритмах визначення орієнтації мікросупутників (МС). Такі алгоритми працюють при наявності інформації про два опорні напрямки. У випадку коли зникає один з опорних векторів, пов'язаний з відповідним напрямком, алгоритм перестає функціонувати.

На борту мікросупутників, як правило, застосовуються сонячні датчики (СД) та магнітометри, які дозволяють визначити відповідно вектор напрямку на Сонце та вектор напруженості МПЗ в зв'язаній із супутником системі

координат. Однак при заході супутника в тінь Землі сигнал СД зникає, і двовекторний алгоритм визначення орієнтації стає недієздатним.

Можливим розв'язанням цієї проблеми є використання сигналів магнітометрів, що отримані в різні моменти часу. В роботі запропонована одна з можливих реалізацій такого підходу. Визначено діапазон кутових швидкостей та величин кутів між двома векторами, при яких запропонований алгоритм є дієздатним. З метою підвищення точності визначення орієнтації проводиться осереднення значень вхідних векторів на певному проміжку часу. Встановлено, що найбільш доцільно використовувати даний алгоритм для випадку орбіт з великим нахиланням. З метою підвищення точності запропонованого алгоритму розглянуто можливість використання інформації про швидкість зміни вектору напруженості МПЗ в опорній системі координат.

Для перевірки алгоритму розглянуто визначення орієнтації для випадку програмного кутового руху МС. Проведено моделювання його роботи у складі замкненої системи керування орієнтацією (СКО) МС з магнітними виконавчими органами. Розглянуто рух на низькій навколоземній орбіті, при якому частина траєкторії знаходиться в тіні Землі. При заході в тінь СКО перемикається в режим використання інформації тільки з магнітометрів. Отримані результати підтверджують можливість використання запропонованого алгоритму у складі СКО МС з метою збереження керованості супутника на затемненій стороні Землі.

Ключові слова: алгоритм, орієнтація, магнітометр, мікросупутник.

УДК 531.383

## МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ПЕРВИННИМИ КОЛИВАННЯМИ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА

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

Для підтримки постійності амплітуди та частоти первинних коливань чутливого елемента мікромеханічного гіроскопа, що забезпечує лінійність статичної характеристики приладу, використовують різні способи, наприклад, фазове автопідстроювання частоти і амплітуди, ПД-регулятори та їх різновиди, а також методи адаптивного керування.

В роботі проведено вибір структури та параметрів адаптивного контуру керування первинними коливаннями планарного двомасового мікромеханічного гіроскопа. Показано, що для адаптивного керування необхідно застосування зовнішнього додаткового контуру, який складається з смугового фільтру та регулятора з законом параметричної адаптації.

Схема адаптивного керування показана на рисунку 1.

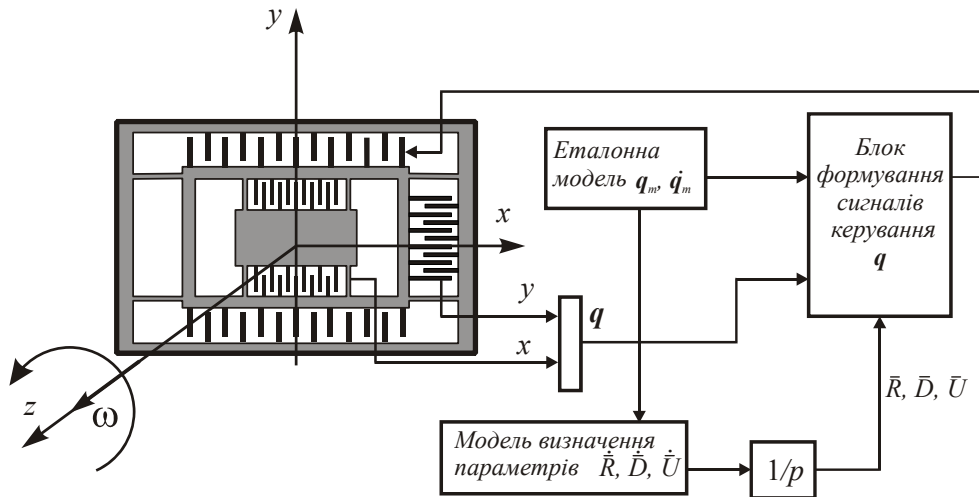


Рисунок 1 Система адаптивного керування первинними коливаннями чутливого елемента мікромеханічного гіроскопа

На основі обраної функції Ляпунова визначені основні параметри адаптивного закону керування, що враховують як параметри гіроскопу так і кутову швидкість обертання основи. Проведено візуальне моделювання в середовищі MatLab Simulink.

Ключові слова: фазове автопідстроювання частоти і амплітуди, ПД-регулятор, адаптивне керування

**Література:**

1. Adaptive Control for MEMS Gyroscopes / S. Park, R. Horowitz, C.-W. Tan, University of California, Berkeley California – PATH Research Report 03-01-2002, p. 35

УДК 629.7.05

## О ВОЗДЕЙСТВИИ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА НА СИГНАЛ АКСЕЛЕРОМЕТРА

*Аврутов В.В., Аврутова Д.В., Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

Во время старта ракет уровень интенсивности акустического шума на расстоянии 100 м от носителя достигает 150 дБ. Такой шум представляет собой реальное механическое воздействие, способное вызвать реакцию у различных инерциальных приборов. Поскольку в состав бортовых приборов входят блоки гироскопов и акселерометров, то акустический шум может вызвать дополнительный сигнал или погрешность.

Акустическое воздействие представляет собой волну, вызывающую на поверхности приборов упругие перемещения, которые могут привести к появлению дополнительной составляющей ускорения и, как следствие, к появлению сил инерции.

В результате проведенных исследований получены аналитические выражения выходного сигнала акселерометра при движении объекта с

постоянным (полезным) ускорением, а также с учетом дополнительной составляющей ускорения, вызванного действием акустического шума значительной интенсивности.

Приводятся результаты математического моделирования и даны практические рекомендации по снижению акустического воздействия.

Ключевые слова: акустический шум, воздействие, акселерометр

УДК 629.7.054

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ПОХИБОК ДВОСТЕПЕНЕВОГО ГІРОСКОПА ПРИ НАЯВНОМУ АКУСТИЧНОМУ ІМПЕДАНСІ

*Карачун В.В., Мельник В.М., Фесенко С.В., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Похибка у вимірах кутової швидкості внаслідок зсуву нуля  $\beta_2^{(0)}$  може бути обчислена за формулою:

$$\Delta\omega \approx \frac{P_0^2 \omega_a^4 B^2}{H^3 R R_T^2 \beta_2^{(0)}} \left\{ J_n \left[ \rho_r \cos(\omega_a t + \delta_v) + \pi \rho_r \cos(\omega_a t + \delta_w) \right] + \right. \\ \left. + m_T R_T L \rho_T \cos(\omega_a t + \delta_T) \right\},$$

де  $H$  - кінетичний момент;  $B, R, J_n$  - момент інерції;  $P$  - акустичний тиск;  $\omega_a$  - частота акустичного випромінювання;  $m_T R_T L \rho_T$  - маса, радіус та щільність матеріалу торця поплавкового підвісу;  $L$  - довжина підвісу;  $\rho_r, \rho_v, \rho_T$  - пружні переміщення поверхні оболонкової частини підвісу і торцевої.

Аналіз показує, що за рівності частот акустичного навантаження і кутового руху основи, тобто за умови  $\Omega_a = \nu$ , зсув нуля зменшується на величину але при цьому вдвічі збільшуються складові, що містять суму цих частот. За цих обставин важливою постає наявність рівності фаз коливань. Якщо вони мають місце, тоді подвоювання цих доданків спостерігатися не буде, натомість за точної їх рівності, вони можуть зовсім щезнути.

Якщо прийняти  $P_0 = 0$ , тобто вилучити із розгляду вплив акустичного випромінювання, отримаємо відому формулу для обчислення похибки  $\beta_2^{(0)}$  двостепеневого гіроскопа за наявності тільки хитавиці основи.

Таким чином, аналітичний опис природи одночасної дії на підвіс поплавкового гіроскопа проникаючого акустичного випромінювання і кутової хитавиці об'єкта дає можливість уточнити механізм появи похибок вимірювань за натурних умов. Привабливим постає той факт, що, як окремий випадок, отримані співвідношення дозволяють означити вплив на прилад тільки хитавиці і порівняти з відомими результатами. Математичні моделі, що одержані, надають можливість більш глибокого аналізу динаміки гіроскопа і окреслюють перспективні напрями синтезу оптимальної конструкції.

Мова йде про пасивні методи боротьби з виникненням хвильових процесів у підвісі. З одного боку, можна розглядати конструкторські рішення огорожувальних екранів (наприклад, перфорованих), з другого – проаналізувати можливість і доцільність зміни геометрії рухомої частини підвісу переходячи до оболонок обертання с ненульовою Гаусовою кривизною. Це надає можливість узагальнення рекомендацій боротьби з цим явищем і на інші елементи конструкції.

Ключові слова: кінетичний момент, акустичний тиск, зсув нуля.

УДК 629.7.054

## ЛОКАЛЬНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА НА ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ

*Мельник В.Н., Карачун В.В., Фесенко С.В., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

В основу локальной аттестации гироскопов поставлена задача максимального уменьшения времени предполетной оценки работоспособности инерциальных приборов, причем непосредственно на стартовых позициях в составе Блока Приборов Управления боекомплекта, без демонтажа модуля командно-измерительного комплекса и транспортировки его к испытательному стенду. Суть локальной аттестации состоит в том, что проверка работоспособности гироскопов ограничивается тестовой регистрацией функционирования сигнальных цепей датчиков угла двухстепенных и трехстепенных гироскопов. Основополагающим фактором здесь служит не подлежащий сомнению безотказный режим выхода гиромоторов на рабочий режим. Что касается поплавковых приборов, то это вообще не вызывает сомнений, так как гиromотор расположен в герметичном, заполненном инертным газом поплавке. Касательно трехстепенного гироскопа, то уверенность в обязательном выходе на рабочий режим подкреплена надежной системой арретирования рамок, исключающей нарушение целостности подвеса при транспортировке.

Упрощенная структура автоконтроля работоспособности гиротаксметра на базе двухстепенного гироскопа с поплавковым подвесом опирается на декларированную *комфортность* гиromотора, что вселяет уверенность в его сверхнадежности и допустимости упрощенной структуры аттестационных мероприятий. Конечно, подразумевается нахождение прибора в пределах Гарантийного срока, установленного Паспортом на изделие.

Таким образом, на гиromотор питание не подается и он находится в нерабочем режиме, а локальный автоконтроль работоспособности гиротаксметра ограничивается аттестацией сигнала датчика угла на

калиброванное принудительное угловое движение подвеса под действием датчика момента (ДМ).

При отсутствии электрического питания на гиromоторе (контакты 3, 4, 5 обесточены), на потенциометр на клеммы 1 и 2 подается постоянное напряжение. Аттестация прибора осуществляется по сигналам с контактов 6 и 7 (щетка и средняя точка потенциометра).

Принудительный поворот поплавкового подвеса имитирует реакцию гироскопа с включенным гиromотором на циркуляцию объекта. Таким образом, сигнальные цепи подтвердят вместе с датчиком моментов свою работоспособность.

Ключевые слова: поплавок, гироскоп, локальная аттестация функциональной способности, автоконтроль

УДК 629.7.054

## ПРИРОДА ВИНІКНЕННЯ ПОХИБОК ПОПЛАВКОВОГО ГІРОСКОПА ЗА НАТУРНИХ УМОВ

*Ковалець О.Я., Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Ефективність наземних рухомих об'єктів визначається, головним чином, безперервністю та надійністю керування підрозділами, що, в свою чергу, забезпечується наявністю повної навігаційної інформації на борту. Однією з найважливіших оперативних задач постає процедура оптимізації режиму пошуку цілі в умовах постійної зміни оточення, тобто вимога мінімального часу виявлення – визначення дальності, пеленгу та кута місця рухомого об'єкту. Виконання цієї задачі вирішальним чином забезпечує ефективність маневрів рухом і вогнем.

Вирішення проблеми досягається шляхом створення точних та надійних навігаційних систем.

Глибокий аналіз похибок поплавкового гіроскопа за кінематичного, силового збурення, дебалансу рухомої частини, тяжіння струмопідводів, внаслідок дії перехресної кутової швидкості та інших зовнішніх чинників досить повно наведений в науковій літературі. Разом з тим, вимагають серйозного вивчення інші негативні фактори, що мають місце за натурних умов, а саме, проникаюче акустичне випромінювання, що призводить до виникнення хвильових процесів у підвісі і до появи додаткових похибок вимірювань. Важливим є факт побудови розрахункових моделей, які враховували б дію звукових полів спільно з кутовим рухом основи, що і буде найбільш повно відповідати натурним умовам.

Особливістю акустичного навантаження слугує його просторовий характер порівняльно з кінематичним та силовим (вібрації), які проникають усередину

приладів крізь опори. В першому випадку слід розглядати підвіс гіроскопа як систему з розподіленими параметрами, в другому - як систему із зосередженими параметрами. Крім того, за акустичного впливу слід з'ясувати сумірність розміру елемента та напівхвилі збурення.

Перехід до розрахункових моделей як систем з розподіленими параметрами надає можливість узгодити відносний рух пружно-податливої поверхні підвісу (відносний рух) з кутовим рухом основи (переносний рух) шляхом визначення моменту сил інерції Коріоліса і ступінню його внеску в появу хибної кутової швидкості на вхідній осі приладу. Це вже в першому наближенні дає змогу виявити сталу складову похибки гіроскопа за асинхронної хитавиці корпусу.

Метою досліджень є з'ясування закономірності виникаючих похибок поплавцевого гіроскопа за натурних умов. Побудова розрахункових моделей базується на з'ясуванні природи сукупної дії двох чинників – кутового руху основи і проникаючого акустичного випромінювання.

Ключові слова: поплавковий гіроскоп, рухомий об'єкт, натурні умови.

УДК 629.331.017

## СИСТЕМА УПРАВЛЕННЯ ПЛАВНОСТЮ ХОДА АВТОМОБІЛЯ

*Огрызков С.В., Ветрогон А.А., Торлин В.Н., Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина*

Разрабатывается многомерная система автоматического управления (САУ), в которой объектом управления (ОУ) является кузов автомобиля, а регулируемой величиной основной критерий плавности хода – среднеквадратичное ускорение в зоне водителя. Синтезирован многомерный регулятор, состоящий из четырех акселерометров, установленных на неподрессоренных массах, четырех акселерометров установленных на верхних опорах амортизаторов и одного акселерометра установленного в зоне сиденья водителя. Исполнительным механизмом данной САУ являются амортизаторы с регулируемым сопротивлением. Коэффициенты сопротивления этих амортизаторов являются управляемыми переменными. Передаточная функция этой системы имеет вид:

$$W(p) = W_b(p) \cdot W_d(p) \cdot W_n(p) \cdot W_m(p),$$

где  $W_b$  – передаточная функция блока определения величины корректирующего воздействия;  $W_d$  – передаточная функция датчика измерения ускорения;  $W_n$  – передаточная функция ОУ;  $W_m$  – передаточная функция исполнительного механизма САУ.

Основной особенностью данной САУ является наличие распределенного многомерного объекта управления. Блок управления оценивает спектральную плотность ускорений неподрессоренных масс и рассчитывает оптимальный

коэффициент сопротивления, в зависимости от выбранного критерия плавности хода, который используется в качестве начальной уставки. Показания акселерометра в салоне автомобиля сравниваются с показаниями за предыдущий период. По разнице показаний определяется поправка к значению коэффициента сопротивления для текущего значения среднеквадратичной скорости штока амортизатора. При достижении минимума критерия плавности хода новое значение коэффициента сопротивления запоминается в качестве новой уставки.

В докладе рассматриваются результаты экспериментов по определению ускорений подрессоренных и непрорессоренных масс автомобиля на различных дорожных покрытиях и скоростях движения, алгоритм работы системы управления, результаты математического моделирования работы системы управления.

Ключевые слова: автомобиль, плавность хода, система управления

УДК 629.7.054

## ПОПЛАВКОВЫЙ ГИРОСКОП В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

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

Достижения практической космонавтики существенно расширили и вывелина качественно высшую ступень сложившиеся представления о характере рассеяния энергии акустических полей в механических системах бортовой аппаратуры летательных аппаратов, определили перспективы развития и совершенствования бортовой аппаратуры, очертили круг прикладных и теоретических задач в приборостроении. Вместе с тем, остается много нерешенных проблем качественной и количественной оценки природы этого явления. В первую очередь это относится к инерциальным навигационным системам.

Как оказалось, многие из новинок научно-технической мысли, позволявшие успешно решать задачи оптимизации функционирования аппаратуры в акустических полях низкого и среднего уровней (до 130 дБ), утратили свои приоритеты, а в некоторых случаях даже привели к ухудшению паспортных характеристик приборов, например, в акустических полях высокой интенсивности – 140-150 дБ и выше.

Объяснение этому факту лежит на поверхности. Жидкофазная составляющая подвеса, предназначенная для взвешивания подвижной части гироскопа и демпфирования колебаний, являясь лучшим проводником звука, чем газообразная фаза, позволяет беспрепятственно проникнуть акустическому излучению внутрь прибора не столько через опоры, сколько через жидкостатический подвес. Таким образом, гироскоп оказывается с этой



стороны полностью незащищенным. Генерируемые в подвесе волновые процессы приведут в своей совокупности к погрешностям измерений.

Особенностью излучения звука аэродинамическим потоком является наличие сферических звуковых волн и остронаправленных интенсивных волн Маха, которые и являются основным источником шума. Величина среднего квадрата акустического давления  $P$ , определяется формулой:

$$\bar{P}^2 \sim \varepsilon^5 l^2 |\gamma|^{-2} (\rho U)^2 M^4 \left[ (1 - M \cos \Theta)^2 + \varepsilon^2 M^2 \right]^{\frac{5}{2}},$$

где  $M$  – число Маха;  $\Theta$  – угол между направлением движения вихрей и направлением излучения;  $\varepsilon$  – безразмерный коэффициент уровня турбулентности.

Ключевые слова: акустические поля, гироскоп, аэродинамический поток, жидкостатический подвес.

УДК 583.383

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА ПРИ ВИБРАЦИИ ОСНОВАНИЯ

*Лазарев Ю.Ф., Гуриченко С.О., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина.*

Известные методы теоретического исследования (такие, как методы возмущений и усреднения) вынужденных колебаний нелинейных систем, в частности, маятниковых, зачастую приводят к результатам, далеким от реальности, особенно, в части определения устойчивых положений равновесия. Минимаксный признак устойчивости Т. Г. Стрижак в этом отношении выгодно выделяется. Он дает результаты, полностью совпадающие с результатами численного интегрирования дифференциальных уравнений маятника, причем при самых разных сочетаниях параметров вибрации основания.

Предлагаемый метод заключается в том, что исходное дифференциальное уравнение маятника

$$\gamma'' + n_{o\xi} \cos(\gamma) + n_{o\eta} \sin(\gamma) + \sin(\gamma) = 0,$$

где предполагается  $n_{o\xi} = n_{xm} \sin(\nu\tau)$ ;  $n_{o\eta} = n_{ym} \sin(\nu\tau + \varepsilon)$ , разделяется на два уравнения: содержащее члены с постоянными составляющими

$$\sin(\gamma^*) - n_{o\xi}(\tau) \Delta\gamma(\tau) \sin(\gamma^*) + n_{o\eta}(\tau) \Delta\gamma(\tau) \cos(\gamma^*) = 0, \quad (1)$$

и содержащее члены только с первой гармоникой

$$\Delta\gamma + n_{o\xi}(\tau) \cos(\gamma^*) + n_{o\eta}(\tau) \sin(\gamma^*) + \cos(\gamma^*) \Delta\gamma = 0, \quad (2)$$

где  $\gamma^*$  предполагается искомой постоянной составляющей, а  $\Delta\gamma(\tau)$  – флуктуационной составляющей угла  $\gamma$  отклонения маятника от вертикали (с нулевым средним).

В предположении большой частоты вибрации основания ( $\nu \gg 1$ ) приближенное решение уравнения (2) имеет вид

$$\Delta\gamma(\tau) = \frac{1}{\nu^2} [n_{0\xi}(\tau) \cos(\gamma^*) + n_{0\eta}(\tau) \sin(\gamma^*)]. \quad (3)$$

Используя его в уравнении (1), приходим к тригонометрическому уравнению определяющему положения равновесия маятника. Оно полностью совпадает с получаемым применением минимаксного признака устойчивости. Однако, в отличие от минимаксного метода, одновременно найдено и соотношение (3), определяющее само решение.

Компьютерное моделирование уравнения показывает полное совпадение с результатами теоретического исследования.

Ключевые слова: устойчивость, маятник, центр колебаний

УДК 629.179.13

## РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОХРАНЕНИЯ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОГО КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

<sup>1)</sup> Антонов А.О., <sup>2)</sup> Яцко Л.Л., <sup>1)</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина,  
<sup>2)</sup> ПАО «НТК «Электронприлад», г. Киев, Украина

На сегодняшний день с развитием информационных технологий и электроники стало постоянно возрастать количество разнообразных систем и электронных блоков. Которые отвечают за управление и контроль многочисленными узлами современного самолета, получая и обрабатывая непрерывный поток данных от различных датчиков.

В связи с использованием в самолете большого количества управляющих и контролирующих устройств появляется необходимость в сохранении получаемой от них информации.

Так как в бортовые самописцы (БУР – бортовое устройство регистрации, ЗБН – защищенный бортовой накопитель) в виду ограниченного размера памяти записывается самая важная информация. В связи с этим возникает проблема сохранения всего потока информации от различных бортовых систем.

Эту проблему можно решить, воспользовавшись бортовым накопителем БХД-1. Данный накопитель предназначен для хранения информации, получаемой от блока управления и контроля авиационным двигателем. Но он может осуществлять прием и сохранение информационного потока только по одному каналу, то есть только от одного устройства. В соответствии с этим необходимо использовать несколько таких накопителей, либо же сконструировать один, который бы мог принимать одновременно несколько независимых информационных потоков.

Преимущество нескольких отдельных блоков в их независимости друг от друга. Недостатком является увеличение массы и габаритов.

При создании нового накопителя возникают несколько путей решений поставленной задачи:

- объединить несколько устройств в одном корпусе (уменьшается количество блоков, но габарит одного накопителя всё равно будет большим);
- выполнить накопитель с несколькими приемниками (габариты накопителя не должен отличаться от габаритов БХД-1).

В докладе были рассмотрены несколько возможных вариантов реализации сохранения информации от многочисленных бортовых электронных систем. Еще необходимо уделить внимание идентификации сохраненных потоков информации и их синхронизации при дальнейшем анализе.

Ключевые слова: электронные блоки, бортовой накопитель, информационный поток.

УДК 004.4

## ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВІБРОАКУСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

*Сопілка Ю.В., Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

Для вирішення завдань з виконання акустичних вимірювань, контролю зашумленості середовища, аналізу вібрацій і шумів, моніторингу стану механізмів в LabVIEW є пакет Sound and Vibration Toolkit. Він містить бібліотеку компонентів для виконання вимірювань звукових частот, октавного аналізу, аналізу гармонічних сигналів, вимірювань рівня звуку і вібрацій, частотного аналізу та аналізу перехідних процесів. Він також надає зручну основу для використання програмного забезпечення з більш ніж п'ятдесятьма прикладами для віброакустичного аналізу. Цей пакет є одним з найбільш функціонально розроблених пакетів програм для звукового і вібраційного аналізу.

Пакет Sound and Vibration Toolkit містить багато функцій для акустичних вимірювань таких параметрів, як посилення, фаза, аналізу спотворень і аналізу гармонічних сигналів. Гармонічний аналіз - це ефективний метод вимірювання частотних характеристик. За допомогою Sound and Vibration Toolkit можна легко генерувати сигнали і досліджувати відгук на виході вимірювального пристрою. На відміну від звичайних частотних характеристик гармонічний аналіз дозволяє також вимірювати частотно-залежні спотворення і враховувати індивідуальні для пристрою вимоги до налаштувань. Крім акустичних вимірювань цей метод аналізу є чудовим інструментом для багатьох додатків тестування механічних вібрацій. Інші звукові вимірювання, що проводяться пакетом Sound and Vibration Toolkit, включають в себе посилення, фазу,

сумарний коефіцієнт гармонік, інтермодуляційні спотворення, динамічний діапазон і лінійність фазочастотної характеристики.

Пакет для віброакустичного аналізу оптимізує LabVIEW для виконання вимірювань шуму і вібрацій. Наприклад, спектральний аналіз можна проводити зі зміною масштабу відображення, тобто аналізувати той частотний діапазон, який необхідно досліджувати. Інтегрування сигналів може проводитися як в часовій, так і в частотній області, що дозволяє легко перетворювати сигнали, отримані з акселерометрів, в швидкість або зсув для додаткового аналізу. Крім того, за допомогою попередньо встановлених функцій забезпечується лінійне усереднення, експоненціальне усереднення і фіксація піку. Завдяки вбудованому октавному аналізу можна виконувати вимірювання в декількох частотних діапазонах з будь-якою частотою вибірки.

Ключові слова: віброакустичний аналіз, гармонічний аналіз.

УДК 531.383

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БЛОКА ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

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

В настоящее время лазерные гироскопы (ЛГ) прочно закрепились в качестве гироскопических датчиков в безплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС), благодаря ряду преимуществ. Одним из главных преимуществ датчиков такого типа является широкий диапазон измеряемых угловых скоростей движения объекта.

В ЛГ осуществляется режим генерации двух электромагнитных волн, распространяющихся во встречных направлениях. При вращении ЛГ между встречными лучами возникает разность частот, значение которой пропорционально угловой скорости его вращения.

Одним из технических условий работоспособности ЛГ является устранение явления захвата частот, которое заключается в том, что при вращении ЛГ с угловой скоростью меньшей некоторого критического значения, частоты встречных волн синхронизируются, и разность частот оказывается равной нулю.

Для устранения этого явления в ЛГ применен принудительный разнос частот встречных волн за счет синусоидальных колебаний чувствительного элемента (ЧЭ) ЛГ вокруг его оси чувствительности с амплитудой в несколько угловых минут, создаваемых с помощью вибропривода. Однако при этом в выходную информацию ЛГ добавляется информация об угловом движении ЧЭ ЛГ относительно основания БИНС.

Для исключения этой информации было использовано два подхода. При первом подходе в ЛГ был введен индукционный датчик относительной угловой скорости. Мгновенное значение интеграла от этого датчика, которое содержало информацию о текущем положении ЧЭ ЛГ, вычиталось из выходного сигнала ЛГ. Во втором подходе выходной сигнала ЛГ пропускаться через полосно-заграждающий (режекторный) фильтр.

По откорректированным сигналам, полученным в результате применения представленных подходов, была проведена оценка их дисперсии и Фурье анализ. В итоге было определено, что коэффициент подавления синусоидальных колебаний вибропривода при применении режекторного фильтра по всем трем каналам блока ЛГ оказался значительно выше, чем при использовании вычета из сигнала ЛГ показаний индукционного датчика относительной угловой скорости. Так же следует отметить и значительное уменьшение дисперсии шума сигнала при применении режекторного фильтра, что в целом положительно отражается на параметрах стабильности ЛГ.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, вибропривод, режекторный фильтр.

УДК 629.7.054

## **ЗВУКОВИЙ БАР'ЄР І ЙОГО ВПЛИВ НА ПРИЛАДИ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ**

*Калініна М.Ф., Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Зміна характеру обтікання літального апарата повітряним потоком при наближенні швидкості польоту до швидкості звуку супроводжується *хлопком*. *Хлопок* – це звуковий удар високої інтенсивності – 240 Нм<sup>2</sup> (180-190 дБ). В порівнянні, при старті ракет-носіїв із поверхні Землі рівень акустичного випромінювання становить 140 – 150 дБ.

Ударна хвиля переходить в звукову, проходить під Головний Аеродинамічний Обтікач (ГАО) та через корпус ракети, генерує нелінійні та резонансні коливання у механічних системах бортової апаратури, що призводить до пружно-напруженого стану підвісу, який сприймається гіроскопом за «корисний» вхідний сигнал.

Акустичний удар під час долання звукового бар'єру здійснює суттєвий вплив на пілотажно-навігаційне обладнання, знижуючи паспортні характеристики приладів і систем командно-вимірювального комплексу апарата та погіршуючи тактико-технічні характеристики ракет-носіїв в цілому.

Звуковий бар'єр – явище, яке спостерігається при польоті літальних апаратів у щільних шарах атмосфери по знижених траєкторіям, на швидкостях, близьких до швидкості звуку, або тих, що її перевищують. Характеризується

різким ростом аеродинамічного (лобового) опору ракети, зниженням підйомної сили, появою вібрацій, зміною тиску та температури.

Одним із головних зовнішніх чинників, що впливає на точність інерціальних навігаційних систем РН, являється проникаюче акустичне випромінювання, яке під час долання звукового бар'єру сягає 180 – 190 дБ.

В системах управління ракетами-носіями (РН) широке застосування знайшли двостепеневі поплавкові гіроскопи, вільні гіроскопи, гіростабілізовані платформи, гіроскопічні інтегратори лінійних прискорень та ін. Зазвичай, вони мають подвійне призначення – навігаційне та пілотажне. Цілком зрозуміло, що похибки навігаційного обладнання суттєво впливають на відповідність, вимагаємій польотним завданням траєкторії руху літальних апаратів в режимі *пошуку-цілі*, а також в режимі *наведення*.

Ключові слова: звуковий бар'єр, хлопок, проникаюче акустичне випромінювання

УДК 629.7.05.06

## ДЕМПФУВАННЯ КОЛИВАНЬ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

*Грушецький В.М., Лесик Р.М., Мироненко П.С., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Сучасна техніка надає багато прикладів роботи різних засобів виміру в умовах інтенсивного динамічного навантаження. Це пов'язано з підвищенням потужності рухових установок, зростаючої швидкості руху робочих органів. При цьому безперервно зростають вимоги до надійності функціонування машин, агрегатів, приладів і забезпечення діяльності людини-оператора. Особливо наочними в цьому плані є проблеми, пов'язані з експлуатацією навігаційних систем.

Вібрації і збурення, супроводжуючі експлуатацію навігаційних систем, стимулюють розробку проблем віброзахисту, віброізоляції, нормування і обмеження динамічних дій стосовно устаткування, приладів, апаратури. З іншого боку, вібраційні процеси знаходять застосування в різних технологіях, що ініціює пошук і розробку методів і засобів, що дозволяють управляти вібраційним станом різних об'єктів, розробляти варіанти конструкторсько-технологічних рішень по забезпеченню необхідного спектру динамічних властивостей.

Характерним прикладом може служити використання мікромеханічного акселерометра (ММА), встановленого на рухливій основі. Найбільш відповідальним вузлом ММА є чутливий елемент. У роботі розглянуті ряд конструктивних схем мікромеханічних акселерометрів, рівняння руху їх чутливих елементів в умовах вібрації у тісному зв'язку з питаннями

моделювання динаміки коливальних з урахуванням спрощень, виправданих результатами численних теоретичних і експериментальних досліджень.

В процесі досліджень вивчались демпфування коливань чутливого елемента ММА за допомогою динамічного поглинача для осьового і маятникового типу акселерометрів. Розглянуті основні схеми розміщення поглиначів при лінійних і кутових вібраціях основи. Перевагою розглянутих конструкцій перед відомими є використання активно-пасивної схеми, яка дозволяє в певних границях змінювати характеристики поглинача і таким чином за певним вибраним критерієм здійснювати оптимальне гасіння коливань. Згасання вважалось оптимальним, якщо найближча резонансна частота системи без поглинача максимально віддалена від резонансної частоти системи з поглиначем коливань.

Ключові слова: віброзахист, демпфування, мікромеханічний акселерометр, резонанс, динамічний поглинач коливань.

УДК 629.5.051

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА СУММАРНУЮ ПОГРЕШНОСТЬ

*Джангиров М.В., Еременко А.П., Снигур А.К.,  
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина*

При проектировании бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) актуальной является задача выбора характеристик элементов системы для обеспечения заданной точности. Решение этой задачи основывается на исследовании уравнений ошибок БИНС.

Целью работы является получение выражений функциональных связей погрешностей элементов БИНС и суммарной погрешности.

Источниками ошибок БИНС являются:

- 1) систематические и случайные составляющие инструментальных погрешностей акселерометров и гироскопов;
- 2) погрешности задания начальных значений местоположения, угловой ориентации и скорости;
- 3) методические погрешности используемого алгоритма работы БИНС;
- 4) погрешности цифрового вычислителя (погрешности округления и ограничения);
- 5) погрешности, обусловленные движением объекта («coning» ошибка – коническое или близкое к нему движение в инерциальном пространстве одной из гироскопических осей, «sculling» ошибка – комбинация линейного и углового движения равной частоты по ортогональным осям и «scrolling» ошибка – ошибка определения координат объекта);

б) другие погрешности (шумы усилителей, погрешности АЦП и т. д.).

Среди перечисленных ошибок наибольшее влияние оказывают первые два вида, вследствие их интегрирования при решении кинематических и навигационных уравнений. Для обоснования выбора элементов БИНС по критерию точности необходимо разделить влияние их ошибок на суммарную погрешность системы, что возможно, используя решения дифференциальных уравнений ошибок. Аналитические решения получены только для частных случаев: неподвижной системы и движения с постоянной скоростью вдоль параллели.

**Выводы:** Ошибки начальных условий имеют колебательный характер, а постоянные ошибки акселерометров и гироскопов приводят к колебательной и пропорциональной времени ошибке.

**Ключевые слова:** бесплатформенная инерциальная навигационная система, уравнения ошибок, источники ошибок.

УДК 531.383

### ПРИМЕНЕНИЕ МИНИМАКСНОГО КРИТЕРИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ЦЕНТРОВ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА ПРИ ВИБРАЦИИ ОСНОВАНИЯ

*Лазарев Ю.Ф., Аксёненко П.М., Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина*

При интенсивной вибрации точки подвеса маятника помимо вынужденных устойчивых колебаний могут возникнуть новые положения равновесия, относительно которых эти колебания совершаются. В частности, при вертикальной вибрации основания может стать устойчивым верхнее положение равновесия. При вибрации основания одновременно в вертикальном и горизонтальном направлениях вынужденные колебания маятника могут в среднем отклоняться от вертикали. Наконец, при горизонтальной вибрации маятник в среднем тоже может значительно отклониться от вертикального положения.

В докладе показано, что для анализа поведения маятника в условиях интенсивной высокочастотной поступательной вибрации основания весьма эффективным является минимаксный признак устойчивости. В соответствии с минимаксным критерием положение  $\gamma^*$  центра вынужденных колебаний маятника определяется из тригонометрического уравнения:

$$\sin \gamma^* - \frac{A}{2} \sin(2\gamma^* - \alpha) = 0, \text{ где } A = \sqrt{\left(\langle \bar{V}_{0\xi}^2 \rangle - \langle \bar{V}_{0\eta}^2 \rangle\right)^2 + 4\langle \bar{V}_{0\xi} \bar{V}_{0\eta} \rangle^2}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{2\langle \bar{V}_{0\xi} \bar{V}_{0\eta} \rangle}{\langle \bar{V}_{0\xi}^2 \rangle - \langle \bar{V}_{0\eta}^2 \rangle},$$



$\bar{V}_{0\xi}$ ,  $\bar{V}_{0\eta}$   $\bar{V}_{0\xi}$  и  $\bar{V}_{0\eta}$  – безрозмірні швидкості вібрації основи в горизонтальному і вертикальному напрямках.

В доповіді розглянуто частний випадок чисто горизонтальної вібрації основи. Існуючі методи не дозволяють виявити в цьому випадку наявність стійких положень рівноваги, відрізняються від нижнього.

Мінімаксний критерій передбачає положення стійких коливань, представлені на малюнку 1 суцільними лініями як функції амплітуди швидкості горизонтальної вібрації основи. Там же квадратними маркерами показані результати визначення положення центру стійких коливань, отримані шляхом чисельного інтегрування диференціального рівняння маятника за програмною моделлю.

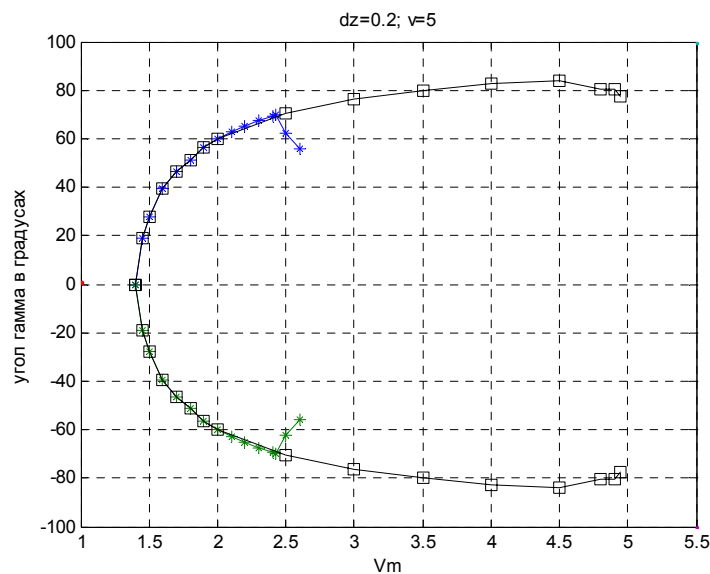


Рис.1. Положення стійких коливань.

Сопоставление полученных результатов моделирования с рассчитанными по теоретической формуле позволяет сделать следующие выводы. Минимаксный признак устойчивости обеспечивает достаточно точное определение положений центров стійких коливань маятника в самых разнообразных случаях вібрації основи. При цьому відпадає необхідність попереднього визначення амплітуд цих коливань. Хоча, як показало моделювання, в відміння від передбачень мінімаксного критерію, положення центрів, починаючи з деякої амплітуди при її збільшенні, починає наближатися до нижнього положення рівноваги маятника, амплітуда коливань – збільшується, а потім коливання замінюються режимом постійного обертання маятника в одному напрямку.

Ключевые слова: мінімаксний критерій, стійкість коливань.