

**СЕКЦІЯ 1**

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

УДК 534.07+629.7.036.3

**РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ БОРТОВИХ  
СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ**

*Павловський О. М., Бурау Н. І.*

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

Авіаційні газотурбінні двигуни (ГТД) є найбільш складними функціональними системами літальних апаратів. Надійність їх експлуатації безпосередньо впливає на безпеку польотів, тому підтримка заданого рівня експлуатаційної надійності ГТД є однією з основних задач безпечної експлуатації авіаційної техніки. Контроль технічного стану (ТС) двигуна відбувається на стаціонарних режимах експлуатації, а обмеження маси бортового обладнання зумовлює використання тільки простих алгоритмів обробки інформації, що значно обмежує функціональні можливості бортових систем.

Система контролю вібрації двигуна (СКВД) є однією із складових бортової системи керування та контролю. Важливість СКВД зумовлена тим, що вібрація двигуна генерується обертовим ротором і є одним з основних динамічних навантажень на елементи конструкції ГТД в експлуатації, що призводить до появи та розвитку пошкоджень роторних елементів двигуна. З іншого боку, вібрація ГТД несе інформацію про загальний вібраційний стан двигуна та його елементів, а змінювання параметрів вібрації під час експлуатації використовується в СКВД як діагностична інформація про зміну ТС ГТД. Однак на сьогоднішній день, не зважаючи на високу чутливість вібраційних процесів до зміни ТС та їх високу діагностичну інформативність, головним завданням бортових СКВД є попередження передаварійних станів двигуна у разі перевищення вібрацією встановлених значень. Тому функціональні можливості бортових СКВД обмежуються лише контролем рівнів вібрації на стаціонарних режимах роботи.

Для вирішення поставленої задачі пропонується створити нову систему контролю вібрації із розширеними функціональними можливостями на основі об'єднання модернізованої підсистеми контролю вібрації на основних роторних гармоніках для стаціонарного режиму та двох нових підсистем для діагностики пошкоджень роторних елементів (таких як лопатки робочих коліс та вали обертових роторів) на стаціонарних і нестаціонарних режимах. Таке вдосконалення стало можливим за умови використання сучасної цифрової елементної бази і потужних мікроконтролерів у якості обчислювального ядра.

Практична реалізація таких систем контролю вібрації у нових ГТД підвищеної контрольної придатності дозволить суттєво підвищити їх експлуатаційну надійність на основі розширення функціональних можливостей систем, підвищення чутливості та вірогідності виявлення не тільки перед аварійних станів, а й початкових пошкоджень роторних елементів в експлуатації.

*Ключові слова:* підвищення безпеки, авіаційні двигуни, віброконтроль.

УДК 629

## ОСОБЛИВОСТІ ТА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СКАЛЯРНОЇ КАЛІБРОВКИ ДЛЯ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

*Лакоза С. Л., Мелешко В. В.*

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

Калібровка – це процедура визначення параметрів вихідного сигналу з метою їх подальшого врахування. Особливо це актуально для інерціальних систем, котрі потребують високоточної інформації від первинних вимірювачів, таких як акселерометри. Врахування особливостей датчиків можливо тільки при умові визначення параметрів з максимальною точністю. Це в свою чергу ставить високі вимоги як до обладнання, так і до застосовуваних методик. Однією з методик, що заявляє про значне підвищення точності калібровки при використанні досить грубого обладнання, є скалярна калібровка. Її вихідні положення та математична модель для навігаційних акселерометрів і гіроскопів приведені в роботах [1, 2]. Модель вихідних сигналів має вид:

$$\begin{cases} B_x = \Delta_{0x} + a_x + \Delta_{1x} a_x + \Delta_{2x} a_x^2 + \alpha_{xz} a_y - \alpha_{xy} a_z; \\ B_y = \Delta_{0y} + a_y + \Delta_{1y} a_y + \Delta_{2y} a_y^2 - \alpha_{yz} a_x + \alpha_{yx} a_z; \\ B_z = \Delta_{0z} + a_z + \Delta_{1z} a_z + \Delta_{2z} a_z^2 + \alpha_{zy} a_x - \alpha_{zx} a_y; \end{cases} \quad (1)$$

Калібровочна модель – це рівняння зв’язку:

$$\frac{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 - 1}{2} = \sum_{j=0}^2 \Delta_{jx} B_x^{j+1} + \sum_{j=0}^2 \Delta_{jy} B_y^{j+1} + \sum_{j=0}^2 \Delta_{jz} B_z^{j+1} + \Psi_{xy} \cdot B_x \cdot B_y + \Psi_{zx} \cdot B_x \cdot B_z + \Psi_{yz} \cdot B_y \cdot B_z. \quad (2)$$

Серед оголошених переваг цієї методики – інваріантність щодо положення датчиків в просторі під час калібровки, забезпечення високої точності навіть при похибках виставки до  $2^\circ$ .

Відповідно до формул (1)-(2) була створена програмно-математична модель, що дозволила дослідити запропоновану методику. Під час дослідження було виявлено наступні особливості скалярної методики калібровки: 1) Зсув нуля акселерометра має бути величиною малою і не перевищувати похибку визначення масштабного коефіцієнта; 2) Похибки визначення коефіцієнтів

мають бути на одному рівні та не перевищувати 1% (при цьому похибка калібровки не перевищуватиме 5%); 3) Модель калібровки дуже чутлива до відхилення від вихідних положень стосовно наявності перехресних зв'язків.

**Література:**

1. Измайлов А.Е. Исследование точности прецизионных акселерометров и повышение их качества: Дисс. на соиск. уч. степени к.т. н.: 05.11.14 - М., 2003.
2. Лепе С. Н. Разработка и исследование метода калибровки избыточных измерителей ускорения с целью повышения точности БИНС: Дисс. на соиск. уч. степени к.т.н.: 05.11.14 - М., 2008.

*Ключові слова:* калібровка, акселерометр.

УДК 629.05

**КАЛІБРУВАННЯ МИКРОМЕХАНИЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ**

*Лакоза С. Л., Катиця М. С.*

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

Розглянуто дві основні методики виробничого калібрування [1]: методика тестових поворотів (використовується 4 положення для вимірювань) і методика із застосуванням методу найменших квадратів (МНК) (використовується мінімум 12 положень). Наведені експериментальні дані результатів калібрування чутливих елементів блоку одновісних мікромеханічних акселерометрів Colibrus MS 9002.d, ADXL 202.

Проведено порівняльний аналіз двох вищезазначених методик калібрування. У табл. 1 наведені значення математичного сподівання і середньоквадратичного відхилення похибок вимірювання прискорення акселерометрами.

Таблиця 1. Оцінка похибок вимірювання акселерометрів

№ акселерометра	Методика МНК	Методика тестових поворотів
Значення математичного сподівання (МС) похибки, м/с <sup>2</sup>		
1.	0.026911	0.025339
2.	0.022722	0.021651
3.	0.002478	0.001180
4.	0.005007	0.003331
5.	0.051726	0.049486
Середньоквадратичне відхилення (СКВ), м/с <sup>2</sup>		
1.	0.072104	0.071245
2.	0.068407	0.068234
3.	0.051914	0.050073
4.	0.059554	0.057722
5.	0.079623	0.078960

Дані приведені з використанням результатів калібровки при розрахунку вихідних прискорень датчиків.

Значення СКВ і МС, що визначаються за вказаними методиками, практично однакові, але при використанні МНК значення СКВ і МС більші, ніж їх значення при використанні методики тестових поворотів.

Також розглядається метод групового урахування аргументів (МГУА), який застосовується для ідентифікації структури моделі за результатами спостережень, причому структура моделі сигналу датчика невідома [2].

#### **Література**

1. Аврутов В.В. Мікромеханічні акселерометри: навчальний посібник / Аврутов В.В., Бондар П.М., Мелешко В.В. - К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 32 с.
2. Зайченко Ю.П. Основи проектування інтелектуальних систем: навчальний посібник / Зайченко Ю.П., -К.: Видавничий Дім «Слово», 2004. - 35 с.

*Ключові слова:* калібровка, тестові повороти, МНК, МГУА.

УДК 531/534

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОРИОЛИСОВА ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА**

*Бондарь П. М.*

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина*

В качестве чувствительного элемента волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) в режиме датчика угловой скорости используют металлический резонатор цилиндрической формы, состоящий из массивного накопителя колебаний в виде кольца и упругого подвеса – стакана со сложной структурой дна. На дне размещен пьезоэлектрический актюатор, состоящий из двух радиально закрепленных плоских пьезокерамических пластинок длиной 4 мм. Основными параметрами, определяющими качество их работы, являются амплитуды колебаний, возбуждаемые в резонаторе.

Цель исследования – выбор оптимального размещения пьезоэлементов (расстояния  $d$  от центра симметрии) для обеспечения максимальной амплитуды  $A$  колебаний.

Исследованы два режима деформации кромки резонатора. В статическом режиме деформация пьезоэлементов из-за пьезоэлектрического эффекта имитировалась их линейным расширением, вызванным изменением температуры. При этом температурный коэффициент линейного расширения пьезоэлемента приравнен к пьезоэлектрическому. Для материала резонатора температурный коэффициент принят нулевым.

В динамическом режиме для моделирования системы возбуждения использована силовая аналогия метода возбуждения. Сущность метода состоит

в приложении эквивалентного давления к торцевой поверхности пьезоэлемента с частотой, равной частоте основной моды колебаний резонатора.

На рис. 2. приведены результаты моделирования в динамическом режиме в программе Ansys.

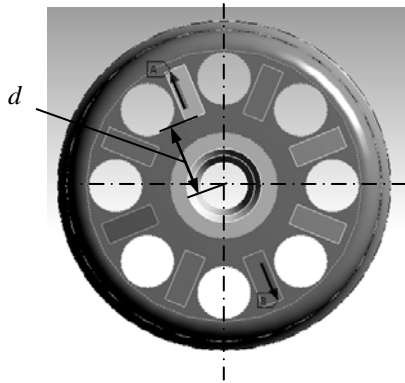


Рис. 1 Модель резонатора

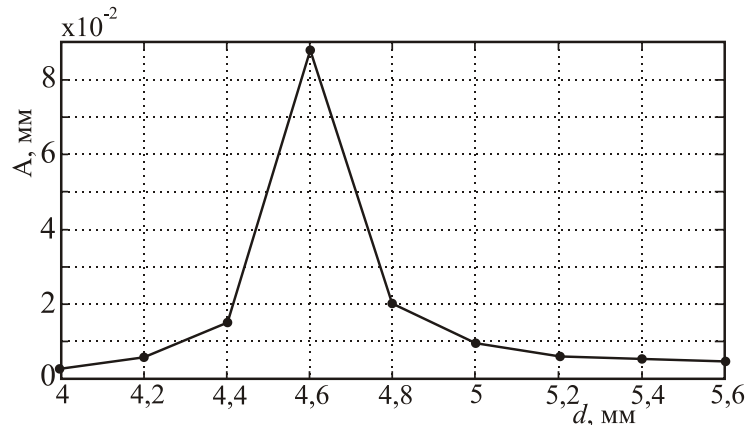


Рис.2. Амплитуда колебаний резонатора

*Ключевые слова:* волновой твердотельный волновой гироскоп, система возбуждения, пьезоэффект.

УДК 531.383

## СКАЛЯРНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ БИНС

*Аврутов В. В., Головач С. В., Косяк М. Р.*

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

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) используются для автономного определения координат летательных аппаратов различного типа и назначения. Для предстартовой подготовки БИНС необходимо проводить калибровку, контроль и диагностику блока гироскопов и акселерометров. Существуют различные методы калибровки, контроля и диагностики. Для их проведения на борту предлагается использовать скалярный метод, где в качестве эталона измеряемой величины принимают не вектор, а скалярную величину. В гравитационном поле Земли для гироскопов такой скалярной величиной будет являться угловая скорость вращения Земли  $\Omega$ , а для акселерометров – величина ускорения силы тяжести  $g$ .

Рассмотрен скалярный метод контроля и диагностики блока гироскопов и акселерометров, входящих в состав БИНС. Согласно методу, следует вычислить скалярную величину вектора измерений и сравнить его с известным скалярным значением измеряемого вектора. Данный метод позволяет определять нулевые сигналы, погрешности масштабных коэффициентов и углов неортогональностей датчиков (коэффициентов перекрестной связи), не

пред'являя жестких вимог до кутової виставки випробувального обладнання.

Пропонується кути повороту основи для скалярного методу калібрування, контролю та діагностики перекласти в кватерніони. Таким чином, переходом від кутів Ейлера-Крылова до кватерніонів вдасться уникнути проблем виродження матриць при проведенні необхідних обчислень.

Останнім етапом скалярного методу контролю та діагностики є операція порівняння обчислених значень нульових сигналів, похибок масштабних коефіцієнтів та кутів неортогональності датчиків з їх відповідними паспортними параметрами з урахуванням допусків до цих параметрів, збережених у внутрішній пам'яті БІНС. В результаті порівняння робиться висновок про придатність датчиків, а також визначається, в якому датчику БІНС стався збій.

*Ключові слова:* гіроскопи, акселерометри, контроль, діагностика

УДК 681.327.67

## ВИКОРИСТАННЯ SSD НАКОПИЧУВАЧА ДЛЯ ОБРОБКИ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ БОРТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

*Демчук А. А.*

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

На сьогодні в світі йде швидко впровадження інформаційних технологій в системи керування повітряним рухом, системи керування та діагностики авіаційних двигунів, системи керування та навігації літальних апаратів. Дана робота безпосередньо стосується огляду та можливого впровадження сучасних накопичувачів інформації на переносних носіях, типу твердотільних SSD накопичувачів, на літальних апаратах.

Твердотільний енергонезалежний SSD накопичувач може використовуватися для безперервного запису даних зареєстрованими бортовими приладами реєстрації параметрів польоту. Твердотільні SSD накопичувачі на борту сучасних літальних апаратів можуть бути використані в якості як резервного «чорного ящика» (бортового самописця – для запису основних параметрів польоту, внутрішніх показників систем літального апарату, переговорів екіпажу і т.д.), так і в якості системи обробки і зберігання інформації в складі систем діагностики, навігації або керування сучасних літальних апаратів.

Для демонстрації роботи твердотільного SSD накопичувача в якості системи обробки і зберігання інформації була створена в середовищі LabView структурна схема обробки та зберігання інформації: основні дані з датчиків роботи двигуна літального апарату (частота вібрації ротора, частота обертів ротора, температура газів, та інші) обробляються та зберігаються на твердотіль-

ний SSD накопичувач за певною структурною схемою.

Вся інформація, записана на SSD накопичувач, повинна бути зашифрована або захищена паролем. Зняття всієї записаної інформації з накопичувачів SSD в повному обсязі має здійснюватися лише за допомогою спеціально налаштованих персональних комп'ютерів.

У даному дослідженні був зроблений огляд сучасних промислових носіїв інформації типу SSD накопичувачів, огляд та опис контролерів, загальний принцип роботи SSD накопичувачів та створена в середовищі LabView структурна схема обробки та зберігання інформації на SSD накопичувачі.

*Ключові слова:* SSD накопичувач, обробка та збереження бортової інформації.

УДК 531.383

## О ПРЕЦЕССИИ ОРБИТЫ СПУТНИКА ЗЕМЛИ

*Лазарев Ю. Ф.*

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

Рассмотрено влияние экваториального утолщения Земли на повороты в инерциальном пространстве круговой орбиты спутника. С использованием некоторых упрощений, связанных с предположением о малости радиуса Земли по сравнению с радиусом орбиты, получены приближенные выражения для проекций вектора силы притяжения спутника Землей на оси, связанные с Землей

$$F_x = -\gamma \frac{M}{R^2} \left[ m - \frac{3}{2R^2} (2J_e + 3J) \right] \cos(\omega_o t);$$
$$F_y = -\gamma \frac{M}{R^2} \left[ m - \frac{3}{2R^2} (2J_e + 3J) \right] \sin(\omega_o t) \cos \vartheta;$$
$$F_z = -\gamma \frac{M}{R^2} \left[ m - \frac{3}{2R^2} (5J_e - J) \right] \sin(\omega_o t) \sin \vartheta,$$

проекции вектора момента этой силы на те же оси

$$M_x = -\gamma \frac{3M(J - J_e)}{2R^3} \sin 2\vartheta (1 - \cos 2\omega_o t); \quad M_y = \gamma \frac{3M(J - J_e)}{2R^3} \sin \vartheta \sin 2\omega_o t; \quad M_z = 0,$$

а также угловых скоростей прецессии и нутации орбиты спутника

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{3}{4} \frac{J - J_e}{R^4} \sqrt{\frac{\gamma R}{m}} \sin 2\vartheta \sin 2\omega_o t; \quad \frac{d\psi}{dt} = -3 \frac{J - J_e}{R^4} \sqrt{\frac{\gamma R}{m}} \cos \vartheta (1 - \cos 2\omega_o t).$$

Здесь обозначено:  $X$  – линия узлов орбиты (пересечения плоскостей экватора и орбиты);  $Z$  – линия полюсов Земли;  $\gamma$  – гравитационная постоянная;  $m$  – масса Земли;  $M$  – масса спутника;  $J$  – момент инерции Земли относительно линии ее полюсов;  $J_e$  – экваториальный момент инерции Земли;  $R$  – радиус орбиты спутника;  $\vartheta$  – угол между плоскостями орбиты спутника и

земного екватора;  $\omega_o$  – угловая скорость обращения спутника вокруг Земли.

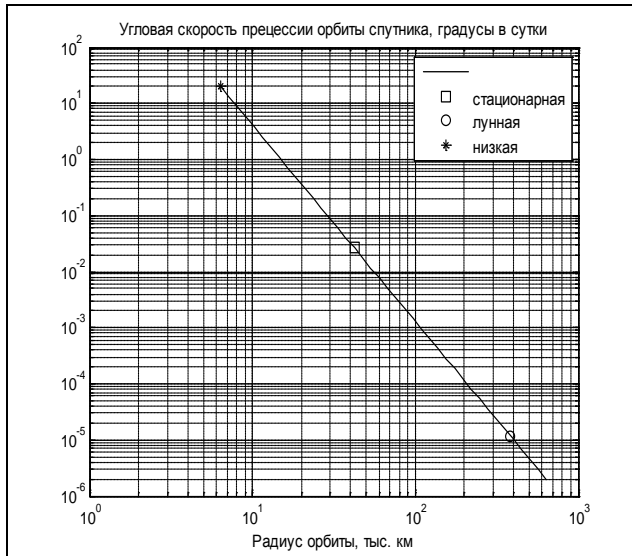


Рис.1

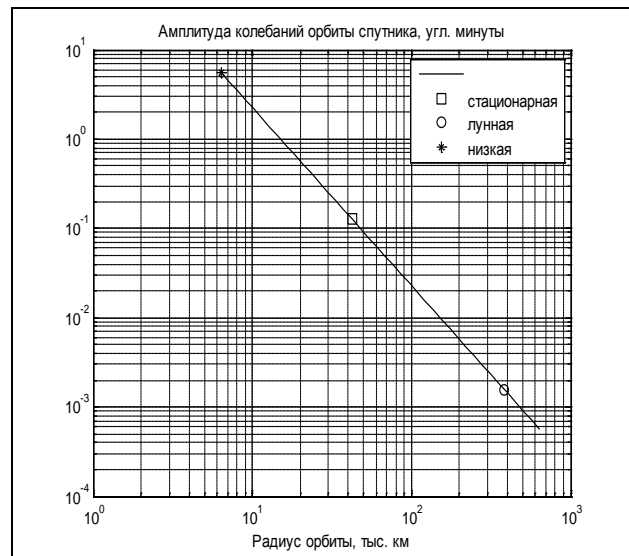


Рис.2

На рисунках 1, 2 показані графіки залежностей кутової швидкості прецесії і амплітуди нутації від радіуса орбіти спутника, розраховані за наведеними формулами.

Показано, що вплив несферичності поля тяжотення Землі значуще сказується на положенні в інерціальному просторі орбіт спутників, особливо близьких до поверхні Землі. Поворот площини орбіти навколо лінії полюсів Землі в цьому випадку може досягати порядку десяти градусів за сутки.

*Ключевые слова:* спутник, орбіта, прецесія.

УДК 519.876.5

## ФУНКЦІОНАЛЬНА ДІАГНОСТИКА РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ ХРАНЕННЯ ЕКОЛОГІЧЕСКИ-ОПАСНИХ ВЕЩЕСТВ

*Цыбульник С. А.*

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

Оценка технического состояния объектов инфраструктуры, технологического и энергетического оборудования, а также коммуникаций (в особенности в столь недоступных местах как антарктические станции) представляет собой важную задачу. Решение этой задачи позволит обнаружить зарождающиеся на ранней стадии дефекты и, тем самым, предотвратить аварийные ситуации, которые могут привести к серьезным негативным последствиям, как для людей, так и для окружающей среды. На смену существовавшей ранее системы плановых проверок, включающей в себя периодический контроль и профилактику, более



целесообразным с технической и экономической точек зрения может стать обслуживание объектов контроля по их фактическому состоянию. Это означает, что ремонтные работы производятся только в том случае, когда в них возникает реальная необходимость.

При оценке состояния контролируемого объекта с помощью тестового диагностирования на объект подаются тестовые воздействия, а сам он находится, как правило, в нерабочем состоянии. В случае функционального диагностирования объект всегда находится в рабочем состоянии, а поиск дефектов осуществляется на основе измерений и анализа определенных заранее диагностических параметров, количество которых может быть достаточно большим, а требования к быстродействию и точности измерений очень жесткими. Также необходимо учесть математическую обработку исходной диагностической информации, включающую в себя вычисление спектральных характеристик и корреляционных функций, цифровую фильтрацию, статистику и другие методы цифровой обработки. Реализовать все эти операции можно в информационно-диагностическом комплексе на базе персонального компьютера с необходимым программным обеспечением.

В программном комплексе ANSYS был проведен ряд имитационных моделирований вертикального стального резервуара для определения используемых аппаратных мощностей, а также времени расчета каждого отдельно взятого типа анализа. В дальнейшем это позволит разработать методику проведения имитационного моделирования фактического состояния резервуаров с экологически-опасными веществами в одном из структурных блоков информационно-диагностического комплекса.

*Ключевые слова:* функциональная диагностика, вертикальный стальной резервуар, CAD, CAE, информационно-диагностический комплекс.

УДК 531/534

## УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА УПРУГОГО ПОДВЕСА АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

*Золотарев Е. А., Бондарь П. М.*

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,  
г. Киев, Украина*

В современных микроакселерометрах используются чувствительные элементы (ЧЭ) консольного типа, в которых в качестве конструктивного материала используется кварц различных срезов. Особенностью этого материала является анизотропия свойств (в том числе механических) в зависимости от кристаллографических направлений [1]. Основной целью работы является сравнительная оценка относительных деформаций подвеса ЧЭ под действием ускорений и собственных частот колебаний с помощью

программного пакета Comsol Multiphysics для двух наиболее распространенных кристаллографических направлений кварца.

Ориентации срезов задаются с помощью углов Эйлера, а учет анизотропии реализован переходом от главной системы кристаллографических осей к осям исследуемого среза [2]. Рассчитанные значения основных характеристик приведены в таблице.

Таблица 1.

Срез	Углы Эйлера			Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона, Па	Модуль сдвига, Па
	$\Phi$	$\Psi$	$\theta$			
ST	0	132°45'	0	$1.06 \cdot 10^{11}$	0.165	$4.8 \cdot 10^{10}$
УХ	22,4°	124,3	-15°	$7.96 \cdot 10^{10}$	0.086	$5.2 \cdot 10^{10}$

Показано, что вид среза существенно влияет на жесткость и величину собственных частот колебаний подвеса. Так относительная деформация поверхностных слоев отличается в 1,3 раза, а частоты собственных колебаний на 10%.

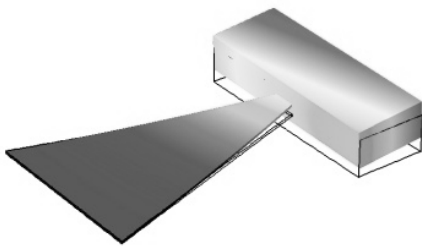


Рис. 1. Чувствительный элемент акселерометра

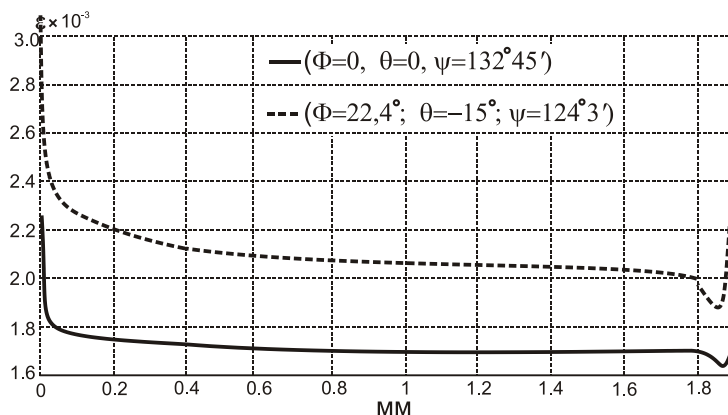


Рис. 2. Относительные деформации подвеса в зависимости от типа среза кварца

*Ключевые слова:* акселерометр, кварцевый подвес, анизотропия.

УДК 531.383

### ОСОБЛИВОСТІ АЛГОРИТМІЧНИХ ДРЕЙФІВ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ ВЕКТОРНИХ ФОРМ ПОДАВАННЯ ПОВОРОТІВ

*Євдокименко С. М., Лазарєв Ю. Ф.*

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

Дослідження проводилося за допомогою комп’ютерного моделювання процесу перетворення інформації в безплатформовій інерціальній системі орієнтації.

Моделювання процесу обробки інформації у бортовому процесорі здійснювалося шляхом чисельного інтегрування методами прогнозу-корекції (різних порядків) векторних рівнянь орієнтації (векторне рівняння Ейлера, векторне рівняння Гіббса, кватерніонне рівняння). Головним режимом руху основи приймалося гармонічні коливання основи з однаковою частотою по двом кутам.

Досліджувалася швидкість дрейфу з третього куту, обумовлена алгоритмічними похибками прийнятих методів інтегрування, та її залежність від:

- зсуву фаз між коливаннями основи
- амплітуди і частоти коливань основи
- кроку інтегрування

Для порівняння розглядалося також алгоритмічні дрейфи основаних на матричному рівнянні Пуассона.

В результаті проведених досліджень було встановлено:

Дрейф алгоритмів на основі векторних рівнянь для методів інтегрування будь-якого порядку змінюється за синусоїдальним законом при змінюванні зсуву фаз між коливаннями основи, на відміну від неекторних рівнянь для яких при непарному порядку методу інтегрування залежність є косинусоїдальною, а при парному – синусоїдальною.

При змінюванні кроку інтегрування алгоритмічний дрейф на основі неекторних рівнянь є пропорційним до кроку інтегрування у степені  $n$ , що дорівнює порядку методу. Як показали дослідження метод 3-го порядку інтегрування на основі векторних рівнянь залежить від кроку, як метод 4-го порядку. Можна висновувати навіть, що метод інтегрування 3-го порядку є більш точним за метод інтегрування 4-го порядку.

Максимальні дрейфи методів парного порядку для векторних рівнянь майже не відрізняються за величиною від відповідних методів для неекторних рівнянь.

*Ключові слова:* алгоритмічний дрейф, векторні рівняння орієнтації.

УДК 531.383

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ПОХИБКИ ГІРОТЕОДОЛІТУ

*Мураховський С. А.*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
м. Київ, Україна*

Поступальна вібрація, як складова частина складного просторового руху основи, спричиняє появу вібраційної похибки, яка може досягати величин

десятків кутових градусів. Існують роботи присвячені методам підвищення точності гіртеодолітів, зокрема шляхом компенсації похибок алгоритмічно.

В представленій роботі розроблено математичну модель гіртеодоліта з магнітним підвісом чутливого елемента. Розглянуто теоретичні залежності вібраційної похибки та шляхи зменшення її величини. Побудовано програмну модель в середовищі Matlab, яка реалізується у вигляді схеми Simulink для інтегрування рівнянь руху чутливого елемента. Розроблена модель дозволяє дослідити особливості спостереження кутових координат та швидкостей при регулярній та випадковій вібрації основи.

Проведено порівняльний аналіз теоретичних результатів алгоритмічної компенсації похибки та результатів компенсації за експериментальними даними, які отримані на виході гіртеодоліта. Отримані результати свідчать про можливість значного зменшення вібраційної похибки. В подальшому передбачається підвищення ефективності алгоритмічної компенсації за рахунок вибору оптимальних параметрів спостерігача для оцінювання параметрів руху чутливого елемента приладу.

*Ключові слова:* гіртеодоліт, вібраційна похибка.

УДК 629.783

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ПАСИВНОЇ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ

*Бабич І. В., Клішута А. В.*

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

Пасивна система орієнтації не потребує на борту космічного апарату джерела енергії для своєї роботи. Для створення керуючих моментів вона використовує фізичні властивості оточуючого середовища (наприклад, гравітаційне та магнітне поля).

Орієнтація космічного апарату з пасивною магнітною системою відбувається відносно вектора напруженості геомагнітного поля  $H$ . Внаслідок нерівномірного обертання вектора  $H$  в інерційному просторі, а також зміни його модуля, принципово не можливо забезпечити точну орієнтацію повздовжньої осі супутника вздовж цього вектору. Незважаючи на свою привабливість в силу простоти і надійності, пасивні системи, як правило, не в змозі забезпечити точність орієнтації, необхідну для вирішення завдань, наприклад, пов'язаних з наглядом Землі з космосу.

При розробці пасивної магнітної системи, необхідно вирішити дві принципові проблеми, які полягають в забезпеченні відновлюючого та демпфуючого моментів. Проблема забезпечення відновлюючого моменту вирішується за допомогою постійного магніту. Для вирішення проблеми розсіювання енергії використовується демпфуючий пристрій, який складається

з магнітом'яких гістерезисних стержнів. Стержні перемагнічуються в геомагнітному полі при обертанні супутника відносно силової лінії поля.

Одним з головних показників ефективності гістерезисних стержнів є вдало підібраний матеріал. Пермалої - залізонікелеві сплави леговані хромом, молібденом, кремнієм, міддю. Пермалої характеризуються високою магнітною проникністю в слабких магнітних полях і значним магнітним насиченням, що найкраще підходить для пасивним систем орієнтації в космосі.

Представлено петлі гістерезису для трьох різних марок пермалоїв, які наближено апроксимовано паралелограмом і розраховано наближений час закінчення перехідного процесу. Також виконано моделювання динаміки супутника з жорстко закріпленим постійним магнітом, за умови, що на його діє момент створений взаємодією магнітних полів Землі та магніту, а зовнішні шкідливі моменти відсутні. Система приймалася у спрощеному вигляді: конструктивні особливості корпусу та кріплення постійного магніту до уваги не бралися.

*Ключові слова:* пасивна система орієнтації, штучний супутник Землі, магнітна система орієнтації, гістерезис, постійний магніт.

УДК 621.3.537.625

## МИНИМИЗАЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ РЕЗОНАНСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РУЛЕВОГО ПРИВОДА

*Бондарчук П. С.*

*Казённое предприятие специального приборостроения «Арсенал», г. Киев, Украина*

Резонансный рулевой электрический привод (РЭРП) применим в составе систем управления всех классов вращающихся по крену ракет. Существующие образцы РЭРП далеки от совершенства, их массогабаритные характеристики избыточны. Проведенная ранее количественная оценка показала, что потребная мощность и масса исполнительного двигателя (ИД) лучшего известного в настоящее время образца превышена более чем в 10 раз.

Целью данной работы было определение пределов минимизации массы исполнительного двигателя и энергопотребления РЭРП.

В данной работе решалась задача достижения наилучших массогабаритных и энергетических характеристик рулевого привода путём минимизации ИД. Методом моделирования привода с гипотетическим минимизированным ИД при решении типовой задачи управления полётом гипотетической ракеты проводилась проверка достижимого уровня минимизации.

В ходе работы осуществлён выбор параметров РЭРП вращающейся по крену управляемой ракеты и его ИД, которые обеспечивают достижение наилучших массогабаритных и энергетических показателей. Создана модель гипотетического минимизированного ИД, мощности которого достаточно для

выполнения типового полётного задания с заданным запасом. Проведено моделирование типовой задачи управления полётом гипотетической ракеты использованием созданной модели гипотетического минимизированного ИД. Нагрузка ИД численно оценивалась по температуре перегрева обмоток и по энергии потерь.

Полученный результат подтвердил принятый предел достижимых массы и габаритов ИД при решении типовой задачи.

Была проведена оценка технического уровня гипотетического рулевого привода с минимизированным исполнительным двигателем по показателю использования массы исполнительного двигателя. Оценка показала, что исследуемый привод по этому показателю имеет уровень лучших известных образцов рулевых приводов.

*Ключевые слова:* резонансный рулевой электрический привод, исполнительный двигатель, минимизация массы.

УДК 621.01

## ТЕОРІЯ ФРАКТАЛІВ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ В ЗАДАЧАХ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

*Бурау Н. І., Паздрій О. Я.*

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

Задачі аналізу інформації у вигляді часових реалізацій (послідовностей, рядів) на сьогодні є актуальними для багатьох технічних застосувань. Зокрема, для визначення поточного функціонального стану складних динамічних об'єктів зі зміною у часі режимів та умов експлуатації використовуються часові реалізації основних вимірюваних параметрів об'єктів, динамічних навантажень, а також параметрів тих процесів, що генеруються об'єктами та супроводжують їх експлуатацію. Для аналізу інформації найчастіше використовуються методи обробки сигналів, які дозволяють визначити характер змінювання у часі показників надійності та безпечної експлуатації об'єктів, а також спрогнозувати їх поведінку у майбутньому. До таких методів, залежно від складності та потенційної діагностичної цінності інформації, що аналізується, можна віднести статистичні методи, спектрально-кореляційні, частотно-часові та масштабно-часові перетворення. Але складність самих об'єктів та їх режимів функціонування, різноманітність зовнішніх впливів на елементи конструкції об'єктів, складність діагностичної інформації значною мірою впливають на якість інтерпретації результатів аналізу. Подібні проблеми виникають і у разі необхідності аналізувати сигнали, які з точки зору спектрально-кореляційної теорії можна віднести до білого шуму, а також у випадках, коли результати обробки сигналів подаються двовимірними зображеннями.

У даній роботі розглядаються теоретичні основи та приклади застосування методів фрактального аналізу часових рядів. На сьогодні аналіз фрактальних чи мультифрактальних властивостей часових послідовностей є одним з перспективних напрямків розвитку методів обробки інформації, що знаходить застосування в різних галузях науки і техніки. Фрактал – це нерегулярна самоподібна математична структура, невелика частина якої містить інформацію про весь фрактал. Основною характеристикою фрактального об'єкту є фрактальна розмірність – невід'ємне неціле число, що характеризує геометричну складність фрактального об'єкта. Інформація, що представлена часовими послідовностями, також має фрактальні властивості. А зміна структури часового ряду при зміні стану об'єкта чи зміні навантаження призводить до відповідних змін фрактальних властивостей і характеристик інформації, що аналізується.

*Ключові слова:* обробка інформації, часові послідовності, фрактал, фрактальні об'єкти, фрактальна розмірність.

УДК 621.318.4

## РАСЧЕТ КАТУШЕК МОМЕНТНОГО МАГНИТОПРИВОДА

*Клишита А. В., Степанковский Ю. В.*

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

Малые спутники получили в настоящее время широкое распространение благодаря относительной простоте их реализации, короткому сроку разработки и изготовления, сравнительно низкой стоимости. При этом в большинстве случаев к ним не предъявляются высокие требования в отношении точности ориентации, а требования к массоэнергетическим показателям бортовых систем весьма жесткие.

Указанные особенности малых спутников заставляют широко использовать в качестве систем их ориентации пассивные либо полупассивные системы. При этом в некоторых случаях предпочтение отдается магнитным системам ориентации. Принцип действия их достаточно прост – если на борту спутника имеется устройство с магнитным моментом  $\bar{P}$ , то его взаимодействия с магнитным полем Земли (МПЗ) дает механический момент  $\bar{M}$ , определяемый выражением

$$\bar{M} = \bar{P} \times \bar{B},$$

где  $\bar{B}$  - индукция магнитного поля Земли.

Большими возможностями обладают магнитные системы, содержащие активные устройства. В качестве таких систем чаще всего применяются катушки без ферромагнитного сердечника максимальной площади. При пропускании по такой катушке постоянного тока  $i$ , создается магнитный

МОМЕНТ

$$P = inS,$$

где  $n$  - количество витков катушки;  $S$  - площадь катушки.

В работе представлена методика расчета катушечных исполнительных органов магнитных систем ориентации спутников. Расчетные соотношения для определения конструктивных параметров катушек выбираются при условии минимизации суммарной массы катушки и эквивалентной массы источника питания, необходимого для работы:

$$m = m_k + m_{эк} + m_{ин},$$

где  $m_k$  - масса катушки;  $m_{эк}$  - масса элементов конструкции;  $m_{ин}$  - эквивалентная масса источника питания. В качестве  $P$  принимается максимальное требуемое в процессе функционирования системы значение магнитного момента. Для примера по представленной методике проведен расчет катушки для создания заданного магнитного момента.

*Ключевые слова:* магнитная система ориентации, катушечный исполнительный орган, моментный магнитопровод.

УДК 621.757

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ

*Кузнецова С. В., Симаков А. Л.*

*ФГБОУ ВПО “Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева”, г. Ковров, Россия*

В теории управления при исследовании динамических систем, с целью анализа сложных процессов, прибегают к понятиям фазового пространства, фазовой плоскости и фазовой траектории. Сущность метода фазовой плоскости заключается в том, что состояние сколь угодно сложной системы представляется на ней точкой, а изменение во времени этой системы – перемещением этой точки. Данный подход может быть применим к системе управления процессом автоматизированной сборки деталей. На рисунках 1 и 2 представлены фазовые портреты процессов относительного и углового совмещения соединяемых деталей соответственно.

Введены обозначения: точки 1 и 2 – исходные положения 1-ой и 2-ой соединяемых деталей;  $q, \varphi, \dot{q}, \frac{d\varphi}{dt}$  – обобщенные координаты относительного и углового совмещения и их первые производные соответственно;  $a_1, b_1$  – траектории транспортного этапа для 1-ой и 1-ой деталей;  $a_2, b_2$  – траектории на этапе адаптации положения 1-ой и 2-ой деталей.

По результатам исследований разработана база геометрических образов способов автоматизированной на фазовой плоскости.



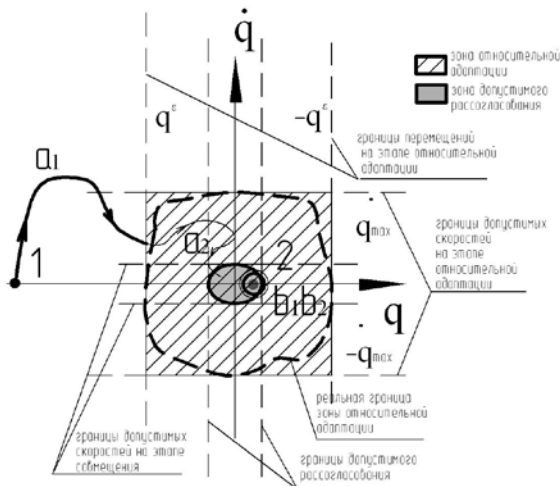


Рис. 1. Изображение процесса относительного совмещения деталей на фазовой плоскости

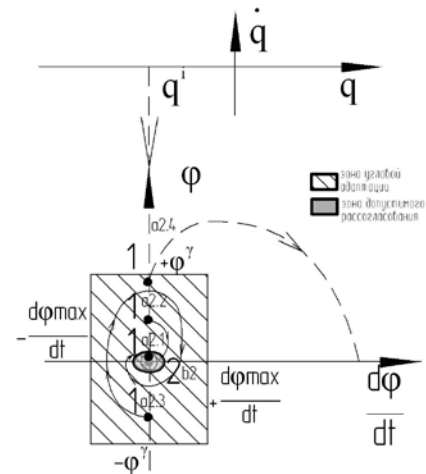


Рис. 2. Изображение процесса углового совмещения деталей на фазовой плоскости

Применение данного инструмента позволяет проанализировать эффективность режима функционирования сборочной системы, провести сравнительный анализ применяемых способов сборки и дает возможность выявить направления развития средств автоматизированной сборки.

#### Литература

1. Кузнецова, С.В. Методы и средства автоматизированной сборки: представление в фазовом пространстве [Текст]: монография / А.Л. Симаков, С.В. Кузнецова. – Ковров: ФГБОУ ВПО “КГТА им. В.А. Дегтярева”, 2013. – 176 с.

*Ключевые слова:* метод фазовой плоскости, система автоматизированной сборки.

УДК 621.757

### ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Кузнецова С. В.

ФГБОУ ВПО “Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева”, г. Ковров, Россия

Предлагается инженерная методика проектирования устройства автоматизированной сборки осесимметричных деталей. Исходные данные для расчета:  $d_d$  – диаметр вала;  $h_d$  – высота вала;  $D_d$  – наружный диаметр втулки;  $H_d$  – высота втулки.

1 этап. Анализ конфигураций рабочего пространства манипулятора:

1.1. Наилучшая конфигурация соответствует соотношению длин звеньев  $L_1 > L_2$ ;  $r \leq L_2$ ;

1.2. Наибольшие диапазоны перемещений рабочего органа:  $x_{\max} = y_{\max} = 2L_1$ ;  
 $z_{\max} = L_1$ ;

1.3. Габаритное пространство:  $R_g = L_1 + L_2 + r$ ;  $h_{g \max} = L_1 + \Delta h_g$ .

2 этап. Расчет соотношений параметров звеньев на основе геометрического анализа конструкции манипулятора:

2.1.  $L_2 \approx 0,65L_1$  – соотношение длин управляющего и соединительного звеньев;

2.2.  $r_B \approx 0,3r_A \approx 0,5L_2$ ,  $r = r_A - r_B \approx L_1$  – соотношение параметров неподвижного основания и подвижной платформы;

2.3.  $h_{d \max} \approx 0,16L_1$  – максимальная высота соединяемой детали;

2.4.  $d_{d \max} \approx 2 \cdot 0,25r_B \approx 2 \cdot 0,08L_1 \approx 0,16L_1$  – максимальный диаметр соединяемой детали.

3 этап. Расчет параметров гибкого питателя.

3.1. Длина питателя –  $l_{zn}$  должна удовлетворять условиям:  $l_{zn0} \approx L_1$ ;  $l_{znk} \approx 1,5L_1$ ;

3.2.  $d_{zn}$  – диаметр сечения гибкого питателя составляет:  $d_{zn} = d_d + \Delta_{zn}$ , где  $d_d$  – диаметр детали;  $\Delta_{zn}$  – зазор, обеспечивающий свободное поступательное движение и ограничивающий угловые перемещения относительно осей  $x$ ,  $y$  детали при ее транспортировке;

3.3.  $h_d$  – высота соединяемой детали ограничена только верхней границей  $h_{d \max} \approx 0,16L_1$ , причем отношение высоты детали к её диаметру –  $h_d / d_d$  может быть как меньше, так больше или равно единице;

4 этап. Математическое моделирование процесса адаптации захватываемой детали рабочим органом манипулятора.

5 этап. Анализ условий совмещения собираемых деталей, обеспечиваемых конструкцией роботизированного сборочного устройства.

6 этап. Выбор конструктивного исполнения ориентирующих модулей.

#### Литература

1. Кузнецова, С.В. Устройство для сборки осесимметричных деталей на базе манипулятора с параллельной кинематикой [Текст] / С.В. Кузнецова, А.Л. Симаков // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2011. – №8. – С. 3-15.

*Ключевые слова:* методика проектирования, устройство автоматизированной сборки.

УДК 519.254, 629.5.051

### АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

*Джангиров М. В., Снигур А. К.*

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина*

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на микромеханических датчиках в настоящее время получили широкое распространение. В автономном режиме работы такие системы быстро накапливают ошибки по координатам местоположения и угловой ориентации за

небольшие промежутки времени. Это связано с большими ошибками в выходных сигналах микромеханических датчиков, входящих в инерциальный измерительный блок (ИИБ).

Целью работы является исследование точности алгоритмов оценивания, основанных на использовании различных методов нелинейной фильтрации.

Одним из способов улучшения точности таких БИНС является создание интегрированной системы, в которую входят ИИБ, GPS, магнитный компас, барометрический высотомер, доплеровский измеритель скорости.

Повышение точности достигается также за счет применения специализированных алгоритмов калибровки, начальной выставки, определения параметров угловой ориентации и навигационных параметров, учитывающих специфику, как используемых микромеханических датчиков, так и движения подвижного объекта, на котором установлена БИНС. Когда сигналы от корректирующих систем не доступны, повышение точности достигается за счет использования оптимальных алгоритмов фильтрации, позволяющих спрогнозировать состояние системы на основе текущих измерений. Таким образом, выбор соответствующего метода оценивания является одной из основных задач при разработке БИНС такого класса. В настоящее время можно выделить следующие алгоритмы нелинейной фильтрации:

- 1) линеаризованный или расширенный фильтры Калмана;
- 2) фильтрация, основанная на выборках, например, сигма-точечные, кубатурные, частичные (байесовские) фильтры Калмана.
- 3) методы, основанные на искусственном интеллекте.

Для исследования точности алгоритмов было проведено моделирование в системе MATLAB для объектов движущихся по прямолинейным и криволинейным траекториям при различных значениях времени автономной работы (30 секунд, 1 минута, 5 минут). Полученные результаты показывают, что использование новых методов фильтрации позволяет улучшить точность микромеханических БИНС (на 25-30 %) по сравнению с системой, использующей расширенный фильтр Калмана.

*Ключевые слова:* бесплатформенная инерциальная навигационная система, микромеханические датчики, фильтр Калмана.

УДК 629.5.051

## НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ КОРПУСА СУДНА ИНЕРЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

*Еременко А. П., Снигур А. К.*

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина*

Определение статических и динамических деформаций корпуса судна в условиях плавания является важной задачей как для обеспечения безопасности

мореплавания, так и для достижения высокой точности бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). В данной работе рассматривается инерциальный метод, основанный на сравнении значений углов ориентации, выдаваемых несколькими БИНС, расположенными в различных точках корпуса судна. Комплексование информации осуществляется на основе оптимального оценивания с помощью фильтра Калмана. Совершенствование данных систем происходит в направлении снижения требований к датчикам за счет использования более эффективных методов комплексования информации.

Целью работы является исследование свойств нейросетевых алгоритмов нелинейного оценивания в задаче определения статических и динамических деформаций корпуса судна на основе ДУС и акселерометров.

В работе рассмотрены возможные варианты расположения блоков ДУС и акселерометров в районе кормовой и носовой оконечности в диаметральной плоскости судна. В качестве ДУС использованы волоконно-оптические гироскопы фирмы «Физоптика» моделей VG -035P, VG-091A-LN, а в качестве акселерометров – приборы типов А-15, А-16. Рассмотрены структуры рекуррентных нейронных сетей для оценивания деформаций корпуса, использующих информацию от двух БИНС. Использование акселерометров позволяет оценивать статические деформации. Расчетная модель деформаций корпуса учитывает только первую моду колебаний. Определены функции активации нейронных элементов и количественные параметры сети.

С целью проверки точности оценивания было произведено моделирование движения судна на качке с учетом деформаций изгиба в двух плоскостях и кручения. Модель построена в среде Simulink и содержит блоки моделирования движения судна на качке с учетом деформаций, блоки моделирования погрешностей гироскопов и акселерометров, блоки алгоритмов фильтрации Калмана и нейросетевой фильтрации.

Результаты моделирования и сравнения с существующими методами показывают целесообразность использования нейросетевых алгоритмов оценивания деформаций корпуса судна.

*Ключевые слова:* деформации корпуса, инерциальная навигационная система, датчики угловой скорости, акселерометры, оптимальное оценивание, нейронная сеть.

УДК 629.7.054

## ГІПЕРЗВУКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ І ПРОБЛЕМИ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ

*Шибедький В. Ю.*

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

Освоєння літальними апаратами (ЛА) гіперзвукових швидкостей сьогодні стає надзвичайно важливим етапом розвитку авіації. Значення *гіперзвукових*

технологій важко переоцінити: бойовий гіперзвуковий ЛА отримує величезну тактичну перевагу над існуючими бойовими системами, стаючи практично неуразливим для систем ППО.

За останніми даними, Китай провів випробування першого гіперзвукового ЛА власної конструкції і став, таким чином, третьою країною після США і Росії, які мають подібну техніку. Випробування апарату, за твердженням китайських джерел, несе виключно наукове значення. Однак, в перспективі, на основі даної конструкції можуть бути створені крилаті ракети.

Зараз у світі зростає інтерес до освоєння активних гіперзвукових польотів в атмосфері. Однак роботи, що були розпочаті ще в Радянському союзі і США в 60-ті роки, так і не мають пристойного завершення. Причина не лише в фінансовій складовій. Найбільша складність криється в розв’язанні технічних завдань, що стикаються з величезною кількістю науково-технічних бар’єрів.

Масштабні дослідження гіперзвукових технологій здійснюються по п’яти магістральним напрямкам: *аеродинаміка; теплозахист; наведення; навігація і керування рухом; обладнання і двигуни.*

Приймаючи до уваги надзвичайно експлуатаційні умови гіперзвуковиків, надзвичайно **актуальними** постають задачі дослідження взаємодії систем інерціальної навігації літального апарату з акустичними полями, що виникають в процесі експлуатації.

Порівняльний аналіз реалізацій вихідного сигналу датчика кутових швидкостей надає можливість, з одного боку, встановити ступінь впливу ультразвукового пучка, власне, на поліагрегатний підвіс гіроскопа, а з іншого – визначити ступінь впливу і динаміку розвитку в часі додаткової похибки  $\Delta\omega$  вимірювань кутової швидкості літального апарату при гіперзвуковому польоті.

При експлуатації датчика кутових швидкостей зовнішній ультразвуковий промінь гіперзвукового польоту породжує похибки, які сягають 1 *град/с*, перевищуючи паспортні обмеження. Наявність таких похибок негативно відображається на точності позиціонування ЛА в цілому, а у випадку гіперзвукових апаратів може призвести до виникнення позаштатних ситуацій, в тому числі до катастрофічних наслідків.

*Ключові слова:* гіперзвуковий літальний апарат, датчик кутових швидкостей, ультразвуковий промінь.

УДК 620.186.6

## КОНСТРУКТИВНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

<sup>1)</sup>Жуковский Ю. Г., <sup>2)</sup>Кузько А. В.

<sup>1)</sup>Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина, <sup>2)</sup>Национальный антарктический научный центр, г. Киев, Украина

Решение проблемы конструктивной безопасности (КБ) металлических

резервуаров состоит из комплекса задач, которые необходимо решать от начала их проектирования до вывода из эксплуатации.

Актуальность данной проблемы заключается в том, что в случае аварии на резервуаре наносится непоправимый ущерб природной среде, с последующими большими финансовыми затратами из-за потери нефтепродукта и от выполнения работ по ликвидации последствий аварии. Проблема эта не надуманная, мировая статистика свидетельствует, что аварии на металлических резервуарах во многих странах мира явление довольно частое и последствия от них порой катастрофические. Это объясняется, во-первых, большим парком резервуаров и, во-вторых, недостаточным вниманием к контролю за их техническим состоянием (ТС).

Во многом КБ резервуаров зависит от качества выполненного технического проекта, когда учитываются все негативные процессы, оказывающие воздействие на них в процессе эксплуатации, качества выполненных работ при монтаже и эффективного контроля за их техническим состоянием.

Если два первых положения о КБ резервуаров для всех являются очевидными и не требуют доказательства, то по вопросу организации постоянного контроля за их ТС порой приходится долго доказывать насколько это важная и значимая задача. В настоящее время получили распространение методы контроля за изменением ТС объектов повышенной экологической опасности на основе постоянно действующего наблюдения за изменением их ТС – мониторинга. При этом решается задача постоянно действующего системного наблюдения, контроля, анализа и прогнозирования ТС всех основных узлов и элементов резервуара, отклонения их технических характеристик от заданных в проектной документации.

При проведении мониторинга резервуаров необходимо учитывать, что возможны два вида их разрушения:

- с постепенным накоплением изменений в ТС узлов и элементов резервуара и, по достижении определенного критического состояния, следует разрушение. Это, так называемый, эволюционный путь разрушения.

- быстротекущее (лавинообразное) разрушение, когда как бы технически исправный резервуар вдруг внезапно полностью разрушается.

При первом виде разрушения резервуара можно ограничиться периодическими диагностическими измерениями и на определенном до критическом его состоянии предпринять упреждающие защитные меры в виде профилактических ремонтных работ или вывода из эксплуатации.

При втором виде разрушения ряд специалистов по диагностике резервуаров считает, что, так как процесс разрушения происходит мгновенно и непредсказуемо, то от этого вида разрушения нет надежной защиты. Но, это не так. Даже мгновенное разрушение резервуара происходит не на пустом месте, всякому явлению всегда есть причина. Причинами мгновенного разрушения резервуаров могут быть: изменение напряженно деформированного состояния его несущих конструкций в процессе эксплуатации, изменение структуры

металла, образование микротрещин, усталость металла и многое другое. Многие из этих дефектов не могут быть обнаружены при эпизодических измерениях на резервуаре. А при постоянном наблюдении за изменением ТС резервуара многие из названных причин путем анализа результатов последовательных измерений легко обнаруживаются, что позволяет не только определить ТС резервуара на момент измерений, но и прогнозировать его изменение в будущем.

Отсюда следует вывод, что предотвратить как медленное так и лавинообразное разрушение металлических резервуаров, т.е. обеспечить их КБ, можно только путем установки на них постоянно функционирующей информационно-измерительной системы, состоящей из высокочувствительных датчиков с использованием современных компьютерных технологий.

*Ключевые слова:* конструктивная безопасность, металлические резервуары, техническое состояние, разрушение, диагностика, система мониторинга.

УДК 621.372

## ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-ЧАСОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ВИЩИХ ПОРЯДКІВ В ЗАДАЧАХ ВІБРОАКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

*Сопілка Ю. В.*

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

В роботі аналізується ефективність використання частотно-часових перетворень Вігнера-Вілла вищих порядків для обробки діагностичної інформації та підвищення чутливості діагностичних ознак малої втомної тріщини в задачах віброакустичної діагностики лопаток робочих коліс авіаційних газотурбінних двигунів на нестационарних режимах експлуатації.

Для ідентифікації можливої локальної нестационарності у вимірюваному сигналі, яка може бути зумовлена наявністю пошкодження об'єкту діагностики, а також для обробки суттєво нестационарних сигналів на нестационарних режимах експлуатації двигунів, доцільно використати методи залежного від часу спектрального аналізу, що базуються на розподілі Вігнера-Вілла.

Для даного розподілу характерним є залежність автокореляційної функції сигналу  $x(t)$  від часу:

$$r_2(t, \tau) = x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right),$$

а частотно-часовий залежний від часу спектр Вігнера-Вілла першого порядку визначається шляхом перетворення Фур'є автокореляційної функції:

$$W_2(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau,$$

де \* - знак комплексного спряження.

Методи частотно-часового аналізу першого та вищих порядків, що дозволяють суттєво збільшити роздільну здатність аналізу в часовій області при збереженні високого частотного розділення.

Проведено моделювання і частотно-часовий аналіз віброакустичних сигналів, що випромінюються моделями лопаток робочих коліс без пошкоджень і з тріщиноподібним пошкодженням при нестационарному вібраційному обуренні. Використання частотно-часових перетворень Вігнера третього порядку вдвічі підвищує чутливість діагностичних ознак до зародження та початкового розвитку пошкодження порівняно з перетворенням першого порядку. Підвищення порядку частотно-часових перетворень Вігнера сприяє пригніченню складових частотно-часових оцінок спектрів зумовлених діями адитивної гаусівської завади.

*Ключові слова:* віброакустична діагностика, лопатки, втомні пошкодження, обробка сигналів, частотно-часовий аналіз.

УДК 531.383

## ВІБРАЦІЙНА ПОХИБКА ОСЬОВОГО МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

*Головачук О. Ю., Мироненко П. С.*

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

Акселерометри в теперешній час – одні із самих поширених мікромеханічних приладів первинної інформації. Такі акселерометри характеризуються малими масою і габаритами, низьким споживанням електроенергії, можливістю працювати в умовах дії суттєвих збурень. Існує декілька можливих схем побудови вимірювачів прискорень. В даній роботі розглядається компенсаційний акселерометр осьового типу з пружним підвісом і зміщеним центром мас чутливого елемента відносно геометричного центра.

Математичні моделі, яка використовуються для дослідження, відповідають теоретичним положенням робіт [1], [2]. Основну увагу в цих роботах приділяється дослідженню зсуву нуля акселерометра в залежності від амплітуди трьохкомпонентної вібрації.

Дана робота присвячена подальшому вивченню систематичної похибки акселерометра в умовах дії просторової вібрації. Розглянуто найбільш поширені конструктивні, технологічні та зовнішні фактори, які впливають на вібраційну похибку: неоднаковість лінійної та кутової жорсткостей пружних



підвісів, несиметричність демпфування чутливого елемента, вплив положення центра мас відносно центра жорсткості та параметрів вібрації.

Найбільш важливою ланкою, до якої пред’являються підвищені вимоги, є пружній підвіс. Особливість його конструкції полягає у тому, що для досягнення високої міцності та меншого зміщення центра мас відносно геометричного центра, вимагається забезпечення більшої жорсткості підвісу. В той же час це приводить до зниження чутливості акселерометра. В роботі досліджується метод подолання вказаних суперечностей.

Отримані формули можуть бути використані при розробці вимог до параметрів пружного підвісу, системи демпфування та точності балансування чутливого елемента осьового мікромеханічного акселерометра з метою зменшення вібраційної похибки.

#### **Література**

1. Распопов В.Я. Влияние трехкомпонентной вибрации на осевой микромеханический акселерометр/ В.Я. Распопов, В.В. Турчанинов, Ю.В.Иванов // Датчики и системы. -2009. - №8.
2. Дем’яненко Т.В. Осьовий мікромеханічний акселерометр за впливом трьохкомпонентної вібрації / Збірник тез доповідей VI науково-практичної конференції студентів та аспірантів “ Погляд у майбутнє приладобудування ”, м. Київ, ПФ НТУУ “КПІ”. - 2013. – 174 с.

*Ключові слова:* осьовий мікромеханічний акселерометр, вібраційна похибка.

УДК 629.7.054

### **РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОПЛАВКОВОМ ПОДВЕСЕ ПРИ ЛЕТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Карачун В. В., Мельник В. Н.*

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

В том случае, когда геометрические размеры корпуса поплавкового гироскопа, например, класса ДУСУ, превышают длину звуковой волны, в жидкостатической части подвеса прибора могут наблюдаться зоны возбуждения, т.е. области, где с достаточной степенью точности выполняется условие совпадения следа падающей и изгибающей волны, возбуждаемой в корпусе. Наблюдается, таким образом, фокусировка энергии проникающего акустического излучения, принимающая вид каустической поверхности. Эта поверхность является огибающей звуковых волн, исходящих из одной и той же точки внутренней поверхности цилиндрического корпуса поплавкового прибора как следствие продольных (вдоль параллели) и поперечных (в плоскости шпангоута) колебаний. В результате этого происходит резкая концентрации энергии звуковых волн внутри жидкостатической части подвеса, сопровождающаяся значительным увеличением уровня звукового давления.

Таким образом, возникают каустические поверхности, разделяющие зоны акустической тени. Причем, они конфокальные внутренней поверхности корпуса.

Наличие волнового совпадения создает условия практически полного отсутствия диссипации звуковой энергии извне в жидкостатическую часть подвеса, а наличие аберрации генерируемых в корпусе звуковых волн – формирование необходимой каустической поверхности.

К примеру, окружные колебания корпуса ДУСУ, при условии, что их скорость больше скорости звука, а внутренний радиус корпуса равен 2,50 см, формируют при облучении цилиндрическую *zone kaustikos* радиусом 2,32 см в поддерживающей поплавков жидкости. При этом импедансная поверхность поплавок создает Эйлеровы силы инерции в виде возмущающих моментов и порождает дополнительную погрешность прибора.

Полунатурные испытания дают возможность установить наличие в выходном сигнале ДУСУ кроме периодических и систематические составляющие акустической погрешности.

Следует заметить, что волновое совпадение наблюдается для определенных значений угла падения  $\theta$  звукового луча.

*Ключевые слова:* зоны каустик, жидкостатический подвес, волновое совпадение

УДК 629.7.054

## «БЕЛЫЙ ШУМ» УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУЧА КАК ФАКТОР ПОЯВЛЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОПЛАВКОВЫХ ПРИБОРОВ

*Бойко Г. В.*

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

При облучении ультразвуковым пучком, с ростом частоты  $\omega$  скорость изгибных волн корпуса ДУСУ увеличивается. Начиная с некоторой, так называемой граничной (критической) частоты, при соответствующем подборе угла падения  $\theta$ , всегда возможно проявление равенства

$$c_u = c_o \sin \theta,$$

где  $c_u$  - скорость изгибной волны в корпусе прибора;  $c_o$  - скорость звука в воздухе. Это соотношение раскрывает смысл явления волнового совпадения при изгибных колебаниях корпуса. Наличие волнового совпадения обеспечивает трансляцию звуковой энергии в подвес поплавкового прибора практически без диссипации. Так, при частоте в 42 кГц, погрешность гироскопа класса ДУСУ2-30В может достигать  $0,9 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$ .

В отличие от частотного резонанса, порождаемого равенством собственной частоты корпуса и частоты ультразвукового луча, при волновом резонансе имеет место совпадение геометрических размеров, а именно, следа падающей и изгибной волн.

Наименьшая частота  $f_{cp}$ , при которой становится возможным волновое совпадение, будет при  $\theta = \frac{\pi}{2} \text{ рад}$ . Ее величина определяется формулой -

$$f_{cp} = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{II}}{D}},$$

где  $m_{II}$  - удельная масса корпуса,  $D$  - цилиндрическая жесткость.

Анализируя эффект возникновения совпадения, следует рассматривать изгибную и окружную скорость генерируемой в корпусе вибрации.

Кроме того, не последним обстоятельством представляется расчленение акустического давления на симметричную и антисимметричную составляющие.

Степень рассеяния энергии звуковых волн в материале корпуса можно оценить введением комплексного коэффициента потерь  $\eta$ .

В эксплуатационных условиях, строго говоря, проникающее внутрь приборного отсека акустическое излучение представляет собой не плоскую звуковую волну, а диффузное поле. Поэтому, результаты анализа явления должна пройти процедуру осреднения по Пэрису, которая предполагает равновероятное по углу падения распространение акустического излучения.

*Ключевые слова:* волновое совпадение, граничная частота, погрешность гироскопа

УДК 629.7

## КАЛИБРОВКА ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

*Мелешко В. В., Лакоза С. Л., Капица М. А.*

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

В современных инерциальных навигационных системах (ИНС) важной составной частью их работы является калибровка параметров математических моделей их чувствительных элементов (ЧЭ): акселерометров и гироскопических датчиков.

Такая калибровка позволяет, в первую очередь, проводить контроль ИНС. При надлежащей точности калибровки можно уточнить паспортные данные калибруемых параметров.

Калибровка может производиться в режиме начальной выставки и в рабочем режиме.

В режиме производственной калибровки используются измерения векторов ускорения силы тяжести или специально созданных ускорений, угловой скорости вращения Земли или специально заданной угловой скорости (назовем эти вектора опорными). Когда калибровка производится в составе ИНС, опорными векторами, кроме ускорения силы тяжести, могут быть вектор скорости движения объекта (в частном случае нулевой), вектор направления на известное светило. Калибровка может опираться на известные координаты места или высоту объекта (в частном случае нулевую).

При выполнении калибровки объект с ИНС совершает естественное пространственное движение, которое определяется с точностью работы ИНС.

Тем самым, мы определяем ошибки измерения проекций опорных векторов. Иногда пространственное движение блока ЧЭ задают специально.

В работе показано, при каких параметрах работы ИНС точность измерений соответствует точности стендовых испытаний в производстве. При использовании векторов скорости или координат в качестве эталонных используют спутниковые данные или показания высокоточных доплеровских измерителей скорости. Для выполнения калибровки могут также использоваться высокоточные измерители магнитного поля Земли.

В работе путем моделирования исследуются возможности калибровки в зависимости от состава эталонных систем, возможности использования различных моделей погрешностей ЧЭ.

*Ключевые слова:* инерциальная навигационная система, калибровка акселерометров, калибровка гироскопов.

УДК 624.953; 004.03

## МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ БУДІВЕЛЬНИХ СПОРУД

*Шевчук Д. В., Рупіч С. С.*

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

В умовах інтенсивного розвитку промисловості та технічного прогресу, якими ознаменувались останні сторіччя існування людства, актуальними є проблеми пов'язані з безпечною експлуатацією складних інженерних споруд різного призначення. Руйнування таких будівельних конструкцій, спричинене закінченням терміну експлуатації, зміною навантаження та природними збурюючими впливами, призводить до суттєвих економічних втрат, забруднення навколишнього середовища та загибелі людей.

Одним із шляхів вирішення проблеми безпечної експлуатації будівельних споруд є контроль їх основних технічних параметрів. Найбільш ефективним засобом, який реалізує цей напрямок є використання сучасних інформаційно-

діагностичних комплексів. Тому для моніторингу та визначення поточного технічного стану складних будівельних конструкцій було розроблено структуру інформаційно-діагностичного комплексу для моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних споруд, який за своєю структурою, функціональними можливостями та характеристики відповідає діючим нормам та вимогам.

Даний комплекс призначений для функціонування в режимі реального часу, він стаціонарний та автоматичний, має сучасне програмне забезпечення і гнучку структуру. Основними відмінностями системи, що відрізняють її від аналогів є: прогнозна оцінка, яка враховує вплив зовнішніх збурень та можливість передачі даних на віддалений діагностичний сервер.

При розробці інформаційно-діагностичного комплексу важливим фактором його коректної роботи є вибір параметрів для каналів зв'язку. Для вирішення цієї задачі доцільно використовувати програмні моделі розроблені в сучасних пакетах прикладних програм.

Основним завданням зазначених каналів є вимірювання, перетворення та реєстрація параметрів, що характеризують технічний стан об'єкту контролю та навантаження на елементи конструкції.

Для дослідження вимірювальних каналів інформаційно-діагностичного комплексу було створено їх моделі у програмному комплексі MATLAB. В загальному вигляді, вимірювальні канали складаються з блоку формуючого сигналу, перетворюючого блоку АЦП, блоку з ФНЧ та блоку аналізу діагностичних даних. Також було проведено моделювання роботи вимірювальних каналів з сформованими (перевірочними) сигналами та сигналами з реальних будівельних споруд.

*Ключові слова:* інформаційно-діагностичні комплекси, вимірювальні канали, моделювання, будівельні споруди.