

Київський політехнічний інститут

На правах рукопису

УДК 681.51:531.787:510.2

ГЕРАУМЧУК МИХАЙЛО ДЕМ'ЯНОВИЧ
СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОКООРДИНАТНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН.

05.11.01 – Прилади і методи вимірювання механічних величин

АВТОРЕФЕРАТ ДИСЕРТАЦІЇ
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

КИЇВ 1994



00778414 (V)

Дисерт
Роботу виконано на ка

Київського політехнічного інституту

Наукові консультанти:

доктор технічних наук, професор Безвесільна О.М.
доктор технічних наук, професор Таланчук П.М.

Офіційні опоненти :

Захарін М.І., доктор технічних наук, професор
Самотокін Б.Б., доктор технічних наук, професор
Афонін А.О., доктор технічних наук

Провідна організація - Київський державний авіаційний завод

Захист відбудеться "26" XII 1994 р. о 15 годині на за-
сіданні спеціалізованої Ради Д 068.14.08 по присудженню науково-
го ступеня доктора технічних наук при Київському політехнічному
інституті.

Адреса: 252056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп.1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського
політехнічного інституту.

Автореферат розіслано "21" XI 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Ради

В.П. Бабак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. У зв'язку з розвитком наукоємних технологій і техніки в різних галузях виникає необхідність розробки багатокординатних перетворювачів механічних величин. Окремі автори називають їх також багатоконтактними чи векторними. Такі задачі виникають в області механіки при дослідженні і вимірюванні полів переміщення, швидкості, поступального і обертового прискорень, пов'язаних з дослідженнями гравітаційних полів, вимірюванням в інерційно-навігаційних системах, робото-технічних, інтелектуальних, сейсмічних та інших подібних системах. Складність розробки таких перетворювачів є те, що вони повинні видавати інформацію про величину і напрямки поля механічної величини, які характеризуються 6-ма координатами: 3-ма лінійними і 3-ма кутовими, наприклад, 3-ма лінійними і 3-ма кутовими прискореннями. Рішення подібної виміральної проблеми, наприклад, у системах інерційної навігації здійснюється з допомогою набору однокомпонентних перетворювачів, встановлених у заданих точках рухомого об'єкту. Однак такі системи мають недоліки, громіздкі алгоритми обробки інформації, на вимірювання впливає деформація корпусу рухомого об'єкту під впливом зміни температури і зовнішніх збурень і вони не завжди придатні, коли постає задача вимірювання поля прискорення. У цьому випадку було б зручно використовувати перетворювач, який був би одним технічним пристроєм і який видавав би інформацію про 6-ть координат рухомого об'єкта (будь-то літак, ракета, підводний човен, чи інтелектуальний робот). Частково ідея створення такого пристрою на базі ефекту надпровідності і використання, відкритого ним, "магнітної потенційної ями" розглядав В.В.Козоріз. Однак до цього часу 6-ти координатних пристроїв з використанням, як надпровідності, так і в звичайному виконанні, які б відповіли сучасним вимогам ні в нашій державі, ні за кордоном немає. Це пояснюється недостатнім рівнем вивчення даного напрямку вимірвальних перетворювачів механічних величин, відсутністю систематизованих досліджень по створенню теорії, методик синтезу і проектування, а також технічної реалізації конструктивних схем.

Тому розробка і дослідження нового класу високоєфективних багатоконтактних перетворювачів (зокрема 6-ти компонентних) механічних величин, які дозволяють здійснити і суттєво спростити проблему вимірювання вектора механічної величини є актуальною проблемою, вирішення якої має велике народногосподарське значення.

Автор захищає:

1. Сукупність теоретичних та технічних положень, методологій синтезу і проектування БКПМВ, які включають:

- нові концепції побудови БКПМВ, структури і їх схемні реалізації; принципи і методології синтезу БКПМВ;

- узагальнені і часткові математичні моделі, які описують роботу БКПМВ і результати їх аналізу на стійкість, ідентифікуємість і керованість, які дозволяють ефективно здійснювати вибір основних параметрів і структури перетворювачів;

- основний принцип можливості побудови багатокординатних перетворювачів, коли кількість вимірвальних координат перевищує три; результати моделювання і дослідження одно і 6-и координатних перетворювачів механічних величин, побудованих по компенсаційній схемі, алгоритми і схеми керування по швидкості і точності на базі мікропроцесорної техніки;

- алгоритми побудови ідентифікатора і регулятора по передбаченню на базі фільтра Калмана; алгоритми параметричної ідентифікації;

- методики дослідження термо-напружено-деформованого стану чутливого елемента методом кінцевих елементів;

- методології геометричного конструювання 6-и координатних перетворювачів в системі Autocad;

- результати дослідження їх ефективності при використанні БКПМВ в системах інерційної навігації;

2. Мікропроцесорну систему керування 6-ти мірними об'єктами їх математичне і програмне забезпечення.

3. Розроблені прикладні програми на базі системи Autocad, Lab Windows, орієнтовані на реалізацію розроблених алгоритмів моделювання та дослідження БКПМВ на ІМ-сумісних комп'ютерах.

Методи дослідження. Для вирішення перелічених задач в роботі використано методи: теорії систем, керування і фільтрації Калмана; теорії інерційної навігації; теорії диференціальних рівнянь і функціонального аналізу, ідентифікації, адаптивного і оптимального керування, системного аналізу і моделювання на ЕОМ, а також методів кінцевих елементів.

Наукова новизна. Для нового класу багатокординатних (6-ти) інерційних перетворювачів механічних величин проведено теоретичне узагальнення і вирішено вперше наступні задачі:

- розроблено методології синтезу і проектування БКПМВ;

- доведено можливість розробки багатокординатних інерційних

перетворювачів на базі принципу компенсації;

-одержано узагальнену математичну модель і результати її дослідження, які дозволяють спростити процес проектування і синтезу конструкцій БКПМВ;

-розроблено і сконструйовано алгоритми керування і реалізації компенсаційного зворотнього зв'язку (регулятори) і проведено їх дослідження, які дозволяють здійснити їх оптимальний вибір;

-визначені умови ідентифікації і вибору оптимальної кількості координатних перетворювачів для індикації розташування чутливого елементу, що дозволяє оптимальним чином синтезувати систему індикації;

-розроблено методологію і проведені дослідження напружено-деформаційного і термо-деформаційного стану чутливого елементу методом кінцевих елементів, результати яких дозволяють оптимальним чином вибирати конструктивні параметри чутливого елементу і враховувати їх вплив на метрологічні показники;

-розроблено методологію синтезу і структурного моделювання, а також конкретні структури БКПМВ;

-показано можливість використання і їх ефективність в системах інерційної навігації.

Практична цінність. Результати роботи в цілому є теоретичною основою для вирішення задач побудови БКПМВ. Зокрема, розвинута теорія і моделі БКПМВ, використання одержаних результатів моделювання і дослідження дозволяють коректно вибирати конструктивні параметри БКПМВ, а також дозволяють цілеспрямовано вести проектування і подальші дослідження у галузі вдосконалення та розробки нових пристроїв перетворення механічних величин.

Дисертаційна робота виконувалась в межах найважливіших НДР, у відповідності до цільових комплексних програм ГНТ.

Використання нових наукових положень, досягнутих і обґрунтованих у дисертаційній роботі, дозволило розробити новий ряд конструктивних варіантів інерційних багатокординатних (6-ти) перетворювачів прискорення, які можуть знайти використання як в системах інерційної навігації, інтелектуальних робото-технічних системах, так і в інших галузях науки і техніки, які призначені, в основному, для роботи в галузях надмалих $w \leq 10^{-6}$ м/с² і малих $w = 10^{-5} - 10^{-1}$ м/с² прискорень і, таким чином, дозволяють спростити вирішення проблеми вимірювання полів і вектора механічних величин (прискорень).

Практичну цінність становить також:

- розроблений пакет програм для геометричного моделювання у системі AutoCAD, який дозволяє одержувати наглядні конструктивні схемні варіанти конкретних технічних реалізацій БКПМБ, та істотно спростити процес проектування БКПМБ;

- алгоритми і програми для моделювання і дослідження системи керування БКПМБ в середовищі Lab Windows;

- алгоритми і програми ідентифікації, ідентифікованості і керуваності чутливого елементу;

- розроблений програмний продукт на основі ПК FEMTOOLS призначений для дослідження напружено-деформаційного і термо-деформаційного стану, який дозволяє одержувати розподіл (емпіри розподілу) термо-деформаційного і напруженого стану чутливого елементу для різних конструктивних рішень чи модифікацій БКПМБ, що є важливим при технічній реалізації перетворювачів;

- розроблена мікропроцесорна система керування багатокomпонентними (багатомірними об'єктами), її математична і програмне забезпечення, яка може знайти саме широкі застосування для керування багатоканальними об'єктами у промисловості і приладобудуванні;

- розроблені конструктивні варіанти БКПМБ, окремих вузлів і ланок, а також допоміжних елементів установки дослідження, які мають самостійну технічну новизну і можуть використовуватися для рішення суміжних задач.

Реалізація результатів роботи. Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи використані:

- у ряді господарських і держбюджетних науково-дослідних робіт, які виконувались у Київському політехнічному інституті на кафедрі приладів точної механіки з 1974 до теперішнього часу;

- при написанні учбового посібника;

- в учбовому процесі кафедри "Прилади точної механіки" Київського політехнічного інституту в дисциплінах "Математичні моделі і моделювання на ЕОМ" і "Теорія і проектування вимірвальних пристроїв".

Апробація роботи. Головні положення і результати досліджень, виконаних у дисертації доповідались та були обговорені на міжнародних науково-технічних конференціях: "Датчики і перетворювачі інформації систем вимірювання, контроль і управління" (Датчик-93, 1993р.), "Морська гравіметрія" (Санкт-Петербург, 1992р.), першому міжнародному симпозіумі

українських інженерів-механіків у Львові (1993 р.), на міжнародній науковій конференції "Геофізика та сучасний світ" (М., 1993); на науково-технічних конференціях: "Фундаментальні та прикладні проблеми космічних досліджень" (Житомир 1993р.), з міжнародною участю "Приладобудування-93 і нові інформаційні технології" (Миколаїв, 1993р.); на другій науково-технічній конференції держав СНД "Контроль і керування в механічних системах" (Вінниця, 1993р.); на українських конференціях: "Моделювання і дослідження стійкості систем" (Київ, 1993, 1994р.), теорія і розробка первинних перетворювачів для вимірювання нестационарних величин (Київ, 1974); на всесоюзній нараді "Пневмоавтоматика" (Донецьк, 1973); на I-й Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика-94" (Київ, 1994); Conference "Optimal Tools for Manufacturing and Advanced Automation" (Boston, USA, 7-10.09.93).

Публікації. По темі дисертації опубліковано понад 40 друкованих праць, з яких: 1 монографія, 5 авторських свідоцтва на винаходи.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку літератури та додатків і включає сторінок тексту, малюнків, таблиць і сторінок додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, подано її загальну характеристику.

У першому розділі розглянуто стан проблеми вимірювання векторних величин, проведено аналіз робіт виконаних по даній темі, обґрунтована класифікація перетворювачів, розглянута постановка проблеми і задач, які підлягають вирішенню і дослідженню у роботі.

Другий розділ присвячено математичному опису БКІМВ і розробці загальної математичної моделі, яка дозволить одержати часткові математичні моделі для різних конструктивних варіантів перетворювачів. Загальнена математична модель розроблена на основі використання рівнянь Лагранжа II-го роду, використання загальних теорем динаміки і принципу Д'Аламбера для твердого тіла (принципа кінетостатики). Здійснено аналіз окремих моделей. Проведено дослідження одержаних моделей на стійкість, ідентифікуємість, керованість і адекватність, які необхідні для синтезу систем керування і обробки інформації. Розроблені алгоритми ідентифікуємості.

У третьому розділі виконані дослідження БКІМВ з ланцюгом

зворотнього зв'язку. Здійснено обґрунтування використання компенсаційного принципу побудови БКПМВ, проведено структурне дослідження ланцюга зворотнього зв'язку по структурній схемі, вивчено вплив сирених ланок і елементів (АЦП, ЦАП, МК) і їх коефіцієнтів передачі на точність БКПМВ та показано їх потенційні можливості. Проведені дослідження роботи БКПМВ з різними синтезованими регуляторами, побудованими на різних принципах (по точності, швидкості, по спостерігачу). Моделювання виконувалося в інтегрованій системі Lab Windows на БОМ.

У четвертому розділі виконані дослідження напружено-міцнісного і термо-напруженого стану конструкції чутливого елемента БКПМВ. Дослідження проведено з допомогою методу кінцевих елементів, з розробкою прикладного пакету для дослідження чутливих елементів.

П'ятий розділ присвячено синтезу структур БКПМВ і їх геометричному моделюванню в системі Autocad.

У шостому розділі наведені результати вирішення головної задачі інерційної навігації з допомогою розроблених БКПМВ, а також розробки програмного пакету розрахунку і дослідження БКПМВ. Наведено конструктивні варіанти розроблених пристроїв і результати експериментальних досліджень.

Додатки містять розроблені алгоритми і листінги програм, які використовувались при моделюванні і комплексному дослідженні БКПМВ, а також опис допоміжних пристроїв, які розроблені автором і необхідні для вирішення поставленої проблеми. Це пристрої для стабілізації і вимірювання тиску, витрат і згладжування коливань тиску. Наведено також опис розроблених схем адапторів і керуваних мікропроцесорних контролерів, які можна використовувати для вирішення суміжних задач з'єднання БОМ з перетворювачами і машинній ідентифікації динамічних характеристик.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета роботи і її коротка характеристика, наводяться основні подороження, які виносяться на захист.

У першому розділі розглянуто стан проблеми вимірювання векторних величин. На основі аналізу літературних даних розроблена класифікація досліджуваних перетворювачів і визначені основні тенденції їх розвитку: лінійаризація, використання мікропроцесорної техніки для керування і обробки інформації, розробка

багатокоординатних перетворювачів, побудова пристроїв на нових фізичних явищах, що відкриває нові перспективи щодо застосування перетворювачів і покращення їх метрологічних показників (точності, швидкості вимірювання) і розширення галузі використання. Відзначається, що тематика дисертації повністю відповідає при тенденціям розвитку перетворювачів механічних величин.

Робота є подальшим розвитком теоретичних і експериментальних досліджень перетворювачів механічних величин, виконаних у цій галузі такими видатними вченими України, як Захарін М.І., Самотокін Б.Б., Двойних Е.В., Таланчук П.М., Козоріз В.В., Безвесільна О.М., Павловський М.А., Афонін А.О., та інші, а також колективами кафедр Київського політехнічного інституту: приладів і систем навігації, теоретичної механіки і приладів точної механіки.

У роботі також обґрунтована і далі розвинута висунута В.В.Козорізом ідея побудови високоточного багатокоординатного перетворювача на основі використання явища надпровідності і ефекту магнітної потенційної ями. Аналіз і дослідження технічної літератури дійсно підтверджує можливість побудови таких пристроїв. Так, побудовані однокомпонентні пристрої гравітації, прискорення з використанням надпровідності мають гранично можливі характеристики по чутливості - до 10^{-9} г і нижче, в переміщеннях - 10^{-12} м, що відповідає відстані між атомами.

Обґрунтована можливість побудови перетворювачів, які не використовувать явище надпровідності і котрі не потребують особливих умов експлуатації, тобто низьких гелієвих температур $4,2^{\circ}$ К, наявність яких стримує розвиток цієї групи перетворювачів. Запропоновані автором дисертації нові конструктивні схеми багатокоординатних пристроїв можуть бути реалізовані як в надпровідному, так і в звичайному виконанні. Також розроблені шляхи реалізації цих пристроїв в інтегральному вигляді, що дозволяє використати можливість мікроелектронної технології, спростити технологію виготовлення перетворювачів в мікровиготовленні, використання яких дозволить вирішити ряд існуючих проблем вимірювання у різних галузях науки і техніки.

З другого боку проаналізовано стан розвитку компенсаційних пристроїв. Як показано у роботах П.М.Таланчука, розвиток типових схем ішов від побудови пристроїв з масовою компенсацією, тобто з допомогою вантажа, який переміщується. Однак ці схеми були громіздкі, дуже чутливі до всяких збурень. Подальшим розвитком

було використання компенсаційних пристроїв з електромагнітною і електростатичною компенсацією та використанням як високочутливих оптичних, механотронних, ємкісних і електромагнітних (диференційно-трансформаторних) індикаторів неузгодженості. На цих принципах побудовані і випускаються промисловістю перетворювачі для вимірювання різних механічних величин, таких як тиск, прискорення, переміщення. Подальшим розвитком компенсаційних схем і підвищення їх чутливості є використання ефекту надпровідності у колах зворотного зв'язку і використання надчутливих оптикоелектронних і надпровідних квантових інтерферометричних перетворювачів (СКВІД). Поєднання принципу компенсації і надчутливих індикаторів неузгодження дозволяє одержати нову якість і побудувати надчутливі, як одноканальні, так і багатоканальні пристрої.

У роботі розвиваються і досліджуються ці напрямки, як в надпровідному, так і в звичайному виконанні.

Використання мікропроцесорів у досліджуваних пристроях, як показали результати дослідження, дозволило досягти принципово нових можливостей БКПМВ і обґрунтувати нові варіанти конструктивної реалізації.

У першому розділі сформульовані також задачі, які вимагають вирішення.

Другий розділ присвячений математичному опису та розробці загальної математичної моделі БКПМВ і її досліджень.

Побудову загальної математичної моделі здійснено з використанням рівнянь Лагранжа II-го роду, загальних теорем динаміки і принципу Д'Аламбера для твердого тіла.

У загальному вигляді перетворювач шести координат у першому випадку можливо представити у вигляді чутливого елемента заданої конфігурації, який підвішений у просторі і включає 6-ть пружних і демпфуючих елементів (див. рис. 1). Таким чином, ми приходимо до класичної просторової моделі твердого тіла. Із теоретичної механіки відомо, що така модель описується шістьма рівняннями, три із яких описують лінійні переміщення тіла маси M по координатах x, y, z і три кутів α, β, γ :

$$m \ddot{x} - h_x \dot{x} + 2 \cdot K_x \cdot x + 2 \cdot K_x \cdot y \cdot \gamma - 2 \cdot K_x \cdot z \cdot \beta - 2 \cdot K_y \cdot \gamma \cdot y + 2 \cdot K_y \cdot \gamma^2 \cdot x - \\ - 2 \cdot K_y \cdot \alpha \cdot z + 2 \cdot K_z \cdot z \cdot \beta + 2 \cdot K_z \cdot x \cdot \beta^2 - 2 \cdot K_z \cdot y \cdot \alpha \cdot \beta = Q_x^B,$$

$$\begin{aligned}
m \cdot \ddot{x} \cdot \ddot{y} + 2 \cdot K_x \cdot \dot{x} \cdot \dot{y} - 2 \cdot K_x \cdot x \cdot \dot{y} + 2 \cdot K_x \cdot \dot{x} \cdot y + 2 \cdot K_y \cdot x \cdot \dot{y} + 2 \cdot K_y \cdot \dot{x} \cdot y^2 - \\
- 2 \cdot K_y \cdot \dot{x} \cdot \beta \cdot \dot{y} - 2 \cdot K_z \cdot \dot{x} \cdot \alpha - 2 \cdot K_z \cdot x \cdot \alpha \cdot \beta + 2 \cdot K_z \cdot y \cdot \alpha^2 = Q_y^B, \\
m \cdot \ddot{z} - \ddot{z} + 2 \cdot K_x \cdot \dot{z} + 2 \cdot K_x \cdot x \cdot \beta - 2 \cdot K_x \cdot y \cdot \alpha - 2 \cdot K_y \cdot y \cdot \beta \cdot \dot{y} - 2 \cdot K_y \cdot x \cdot \beta + \\
+ 2 \cdot K_y \cdot \dot{z} \cdot \beta^2 + 2 \cdot K_z \cdot y \cdot \alpha - 2 \cdot K_z \cdot x \cdot \alpha \cdot \gamma + 2 \cdot K_z \cdot \dot{z} \cdot \alpha^2 + mg = Q_z^B, \\
J \cdot (\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}) - \ddot{\alpha} + (2 \cdot K_y \cdot y - 2 \cdot K_y \cdot \dot{y} \cdot x + 2 \cdot K_y \cdot \alpha \cdot \dot{z}) \cdot (\dot{z} - 1) - \\
- (2 \cdot K_z \cdot \dot{z} + 2 \cdot K_z \cdot x \cdot \beta - 2 \cdot K_z \cdot y \cdot \alpha) \cdot (y + 1) + 2 \cdot C_x \cdot \alpha = M_\alpha^B, \\
J \cdot \ddot{\beta} - \ddot{\beta} + 2 \cdot K_x \cdot (x + y \cdot \dot{y} - \dot{z} \cdot \beta) \cdot (\dot{z} - 1) + \\
+ 2 \cdot K_z \cdot (\dot{z} - y \cdot \alpha + x \cdot \beta) \cdot (x - 1) + 2 \cdot C_y \cdot \beta = M_\beta^B, \\
J \cdot \left(\ddot{\gamma} + \ddot{\alpha} \cdot \frac{\beta}{1 + \alpha^2 + \beta^2} \right) - \ddot{\gamma} + \frac{2 \cdot K_x}{1 + \alpha^2 + \beta^2} (x + y \cdot \dot{y} - \dot{z} \cdot \beta) \cdot (y - 1) + \\
+ \frac{2 \cdot K_y}{1 + \alpha^2 + \beta^2} (y - x \cdot \dot{y} + \dot{z} \cdot \alpha) \cdot (-x - 1) + 2 \cdot C_z \cdot \gamma = M_\gamma^B,
\end{aligned}
\tag{1}$$

регіструючи три поздовжні і три кутові переміщення, ми визначаємо положення ЧЕ в просторі. Конструктивні схеми, розглянуті в розділах 5 і 6.3 дисертації.

По аналогічній схемі будуться перетворювачі для вимірювання трьох координат. Однак для побудови 6-ти компонентних перетворювачів вона використовується обмежено. Схеми, які більш детально описують перетворювачі, реалізує друга запропонована модель.

В другому випадку для компенсаційної схеми перетворювача механічних величин маємо схему з 12-ма пружними елементами (рис. 2).

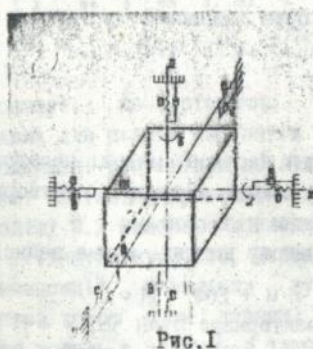


Рис. 1

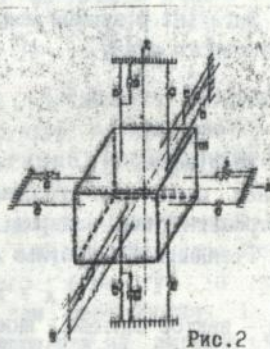


Рис. 2

$$\begin{aligned}
m \cdot \ddot{x} + th_x \cdot \dot{x} + \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot x + \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot y_l \cdot r - \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot z_l \cdot \beta &= Q_x, \\
m \cdot \ddot{y} + th_y \cdot \dot{y} + \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot y + \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot z_l \cdot \alpha - \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot x_l \cdot r &= Q_y, \\
m \cdot \ddot{z} + th_z \cdot \dot{z} + \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot z + \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot x_l \cdot \beta - \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot y_l \cdot \alpha &= Q_z, \\
J \cdot \ddot{\alpha} + th_{\alpha} \cdot \dot{\alpha} - \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot y \cdot z_l + \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot z \cdot y_l + C_{\alpha} \cdot \alpha - \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot y_l^2 \cdot \alpha - \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot z_l^2 \cdot \alpha + \\
+ \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot x_l \cdot \beta \cdot y_l + \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot x_l \cdot r \cdot z_l &= M_{\alpha}, \\
J \cdot \ddot{\beta} + th_{\beta} \cdot \dot{\beta} + \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot x \cdot z_l - \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot z \cdot x_l + \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot y_l \cdot \alpha \cdot x_l + \sum_{l=1}^4 C_{\beta} \cdot \beta \\
- \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot z_l^2 \cdot \beta - \sum_{l=1}^4 K_z^l \cdot x_l^2 \cdot \beta - \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot y_l \cdot r \cdot z_l &= M_{\beta}, \\
J \cdot \ddot{r} + th_r \cdot \dot{r} - \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot x \cdot y_l + \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot y \cdot x_l + \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot z_l \cdot \alpha \cdot x_l + \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot z_l \cdot \beta \cdot y_l \\
+ \sum_{l=1}^4 C_r \cdot r - \sum_{l=1}^4 K_x^l \cdot y_l^2 \cdot r - \sum_{l=1}^4 K_y^l \cdot x_l^2 \cdot r &= M_r.
\end{aligned} \tag{2}$$

Як бачимо, ці рівняння співпадають по структурі і відрізняються тільки членом по пружності.

Загальні рівняння можуть бути записані у вигляді рівнянь просторового стану.

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u, \\
\dot{y} &= C \cdot x,
\end{aligned} \tag{3}$$

Із рівнянь (1), (2) одержані часткові моделі перетворювачів з пружним підвісом, а також компенсаційних перетворювачів з електромагнітним, надпровідниковим підвісом.

Рівняння (3) у більш загальному вигляді можна записати:

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + F \eta z + M \cdot \phi,$$

де x - вектор змінних, який характеризує стан ЧЕ, $x \in R^3$; u - вектор керуючих сигналів (струмів), $u \in R^1$; z - вектор кінематичних збурень, $z \in R^2$; ϕ - збурююча функція типу білого шуму одиничної

інтенсивності, $\sigma \in R^1$; A, B, F, M - постійні матриці відповідних розмірностей.

Математична модель для пружного підвісу співпадає з (1).

Для електромагнітного підвісу описується:

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x} + h_x \cdot \dot{x} + K_{11} \cdot x - K_{15} \cdot \beta + K_{16} \cdot \gamma &= B \cdot I_x + Q_x, \\ m \cdot \ddot{y} + h_y \cdot \dot{y} + K_{22} \cdot y + K_{24} \cdot \alpha - K_{26} \cdot \gamma &= B \cdot I_y + Q_y, \\ m \cdot \ddot{z} + h_z \cdot \dot{z} + K_{33} \cdot z - K_{34} \cdot \alpha + K_{35} \cdot \beta &= B \cdot I_z + Q_z, \end{aligned} \quad (4)$$

$$J \cdot \ddot{\alpha} + h_{\alpha} \cdot \dot{\alpha} - K_{42} \cdot y + K_{43} \cdot z + K_{44} \cdot \alpha + K_{45} \cdot \beta + K_{46} \cdot \gamma = B \cdot I_{\alpha} \cdot C + M_{\alpha},$$

$$J \cdot \ddot{\beta} + h_{\beta} \cdot \dot{\beta} + K_{51} \cdot x - K_{53} \cdot z + K_{54} \cdot \alpha + K_{55} \cdot \beta + K_{56} \cdot \gamma = B \cdot I_{\beta} \cdot C + M_{\beta},$$

$$J \cdot \ddot{\gamma} + h_{\gamma} \cdot \dot{\gamma} - K_{61} \cdot x + K_{62} \cdot y + K_{64} \cdot \alpha + K_{65} \cdot \beta + K_{66} \cdot \gamma = B \cdot I_{\gamma} \cdot C + M_{\gamma},$$

тут

$$I_x = [I_1 + I_2 - (I_3 + I_4)],$$

$$I_y = [I_5 + I_6 - (I_2 + I_4)].$$

Для підвісу з надпровідною магнітною системою система рівнянь має вигляд і співпадає з одержаною раніше В.В.Козорізом математичною моделлю:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \frac{1}{\mu} \cdot (F_1^0 + K_{11} \cdot x_1 + K_{15} \cdot x_5 + K_{16} \cdot x_6 + Q_1), \\ \ddot{x}_2 &= \frac{1}{\mu} \cdot (F_2^0 + K_{22} \cdot x_2 + K_{24} \cdot x_4 + K_{26} \cdot x_6 + Q_2), \\ \ddot{x}_3 &= \frac{1}{\mu} \cdot (F_3^0 + K_{33} \cdot x_3 + K_{34} \cdot x_4 + K_{35} \cdot x_5 + Q_3), \\ \ddot{x}_4 &= \frac{1}{J} \cdot (M_1^0 + K_{42} \cdot x_2 + K_{43} \cdot x_3 + K_{44} \cdot x_4 + K_{45} \cdot x_5 + K_{46} \cdot x_6 + M_1), \\ \ddot{x}_5 &= \frac{1}{J} \cdot (M_2^0 + K_{51} \cdot x_1 + K_{53} \cdot x_3 + K_{54} \cdot x_4 + K_{55} \cdot x_5 + K_{56} \cdot x_6 + M_2), \\ \ddot{x}_6 &= \frac{1}{J} \cdot (M_3^0 + K_{61} \cdot x_1 + K_{62} \cdot x_2 + K_{64} \cdot x_4 + K_{65} \cdot x_5 + K_{66} \cdot x_6 + M_3). \end{aligned} \quad (5)$$

Аналіз показує, що рівняння (1-5) дозволяють одержувати окремі моделі для різних варіантів і структур перетворювачів. Це дозволяє одержані результати досліджень (1)-(5) моделей переносити на їх окремі варіанти, проводити узагальнення.

В розділі 2.2 виконано дослідження моделі (узагальненої) на стійкість і ідентифікуємість. Перед тим, як перейти до синтезу схеми компенсації поведінки чутливого елементу, а також перетворювача треба бути певним, що сам перетворювач і його математична модель є стійкі, а також відповісти на питання чи є

можливість ідентифікувати і контролювати її поведінку.

Проведено також аналіз стійкості моделей. Результати дослідження моделі на стійкість показали стійкий характер вільних коливань моделі.

В 2.2.3 проведено аналіз ступеню ідентифікації і керованості БКПМБ. Це пов'язано з обмеженням числом параметрів, які доступні для вимірювання і керування, а також дозволяє вибрати потрібний склад і тип індикаторів розузгодження. Від їх кількості залежить точність і конструкторська реалізація перетворювачів механічних величин, а також дозволяє на початковому етапі конструювання уникнути некоректності в алгоритмах обробки інформації. Дослідження ідентифікованості і керованості виконано на основі критерія Р.Калмана з допомогою формування матриці ідентифікуємості і обчислення її рангу.

Однак наявність у матриці повного рангу говорить тільки про факт ідентифікації, але не дає ніякої інформації про точність ідентифікації оцінок самих змінних, що є важливим при побудові багатоконтурного компенсаційного ланцюга. Попередні висновки про якість відновлення системи перетворювача БКПМБ і, отже, про якість роботи компенсаційної системи можна одержати на основі аналізу сингулярних чисел матриці спостережливості. Аналіз сингулярних чисел дозволяє встановити не тільки факт, але і ступінь ідентифікації. Далі під ступенем ідентифікуємості прийемо ступінь близькості заданої повністю ідентифікуємої системи до системи, яка не повністю ідентифікуєма, у якій матриця ідентифікуємості має більш низький ранг $\text{rang } U < n$.

Для оцінки ступеня ідентифікуємості вектора стану чутливого елементу, БКПМБ залишемо його лінеаризовані рівняння:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{11} + b_{11}x_{11} + c_{11}x_1 + c_{15}\alpha_2 - c_{16}\alpha_3 &= \kappa(i_1 + i_2 - i_7 - i_8) + F_1, \\ \dot{x}_{22} + b_{22}x_{22} + c_{22}x_2 - c_{24}\alpha_1 + c_{26}\alpha_3 &= \kappa(i_3 + i_4 - i_9 - i_{10}) + F_2, \\ \dot{x}_{33} + b_{33}x_{33} + c_{33}x_3 + c_{34}\alpha_1 - c_{35}\alpha_2 &= \kappa(i_5 + i_6 - i_{11} - i_{12}) + F_3, \\ -c_{42}x_2 + c_{43}x_3 + \dot{x}_{44} + b_{44}\alpha_1 + c_{44}\alpha_1 - c_{45}\alpha_2 - c_{46}\alpha_3 &= \kappa(i_1 - i_2 - i_7 + i_8) + M_1, \\ c_{51}x_1 - c_{53}x_3 - c_{54}\alpha_1 + \dot{x}_{55} + b_{55}\alpha_2 + c_{55}\alpha_2 - c_{56}\alpha_3 &= \kappa(i_1 - i_4 - i_9 + i_{10}) + M_2, \\ -c_{61}x_1 + c_{62}x_2 - c_{64}\alpha_1 - c_{65}\alpha_2 + \dot{x}_{66} + b_{66}\alpha_3 + c_{66}\alpha_3 &= \kappa(i_5 - i_6 - i_{11} + i_{12}) + M_3, \end{aligned} \quad (6)$$

де x_i ($i=1,3$) - координати поступального переміщення ЧЕ; α_i - координати кутових відхилень; a_{kk}, b_{kk}, c_{ki} ($k,i=1,6$) - постійні коефіцієнти відповідно інерційних, диссипативних і пружних сил;

i_m ($m=1,12$) - струм у ланцюгах компенсації; κ - коефіцієнт електроmechanічного зв'язку; F_j , M_j - сили і моменти збурення.

Електромагнітні процеси у ланцюгах виконавчих механізмів описуються наступними рівняннями для випадку ненадпровідного підвісу:

$$\begin{aligned} L \frac{d i_{z\mu-1}}{dt} + R i_{z\mu-1} &= U_{z\mu-1} - \kappa_1 \dot{x}_\mu - \kappa_2 \dot{\alpha}_\mu, \\ L \frac{d i_{z\mu}}{dt} + R i_{z\mu} &= U_{z\mu} - \kappa_1 \dot{x}_\mu - \kappa_2 \dot{\alpha}_\mu, \\ L \frac{d i_{z\mu+5}}{dt} + R i_{z\mu+5} &= U_{z\mu+5} + \kappa_1 \dot{x}_\mu - \kappa_2 \dot{\alpha}_\mu, \\ L \frac{d i_{z\mu+6}}{dt} + R i_{z\mu+6} &= U_{z\mu+6} + \kappa_1 \dot{x}_\mu - \kappa_2 \dot{\alpha}_\mu, \quad \mu=\overline{1,3}, \end{aligned} \quad (7)$$

де змінні u з різними нижніми індексами - керуючі напруги на затискачах котушок відповідних зворотних виконавчих елементів; L, R - індуктивність і активний опір кожної котушки.

Ми бачимо, що стан цієї системи (6), (7) характеризується змінними $x_1, x_2, \alpha_1, \alpha_2, i_m$. Компоненти вектора i_m стану доступні безпосередньому вимірюванню. Аналіз рівнянь показує, що всяка зміна величини струму у будь-якому з 12-ти виконавчих елементів впливає на моду системи, тому (6), (7) ідентифікуються по вимірюванню хоч би одного струму i_m .

Рівняння (6), (7) мають високу розмірність. Але враховуючи, що постійні часу $\frac{L}{R}$ електромагнітних виконавчих механізмів (для ненадпровідного підвісу), набагато менші постійних часу механічних коливань ЧЕ, то можна сказати, що вплив динаміки виконувачів перетворювачів на параметри механічного руху системи незначний і його можна не враховувати.

Прийmemo в рівняннях (7) $L \frac{d i}{dt} = 0$, одержимо для струмів перетворювачів алгебраїчні вирази, які підставляємо у рівняння (4) з метою виключення змінних i_m . В результаті у рівняннях (3) величини коефіцієнтів a_{kk}, c_{kl} не зміняться, а кожний із коефіцієнтів b_{kk} збільшиться на величину $\frac{4\kappa^2}{R}$. Це означає, що у наближенні дія компенсаційного ланцюга проявляється у підвищеному розсіянні енергії механічних коливань ЧЕ по відповідній координаті.

Аналіз методів попереднього визначення коефіцієнтів характеристичного багаточлена $\det(\lambda E - U^T \cdot U)$, де E - одинична матриця, показали, що рекурентний алгоритм Фадєєва чисельно нестійкий, а форма подання визначника у вигляді лінійної

комбінації мінорів нижчого порядку є дуже трудомістка.

Найбільш повно відповідають цим вимогам методи матричних ортогонально-подібних перетворень.

Аналогічним чином проведено аналіз керованості системи.

У третьому розділі виконано дослідження компенсаційного БКПМВ, впливу ланцюга зворотнього зв'язку, а також розглянуто задачі синтезу системи керування.

Оскільки для побудови багатокординатного перетворювача потрібно дослідити один канал чи роботу перетворювача на одній координаті, то для цього було виконано структурне моделювання на ПЕОМ РС АТ (З86). Перетворювач був представлений у вигляді наступної блок-схеми (рис. 3).

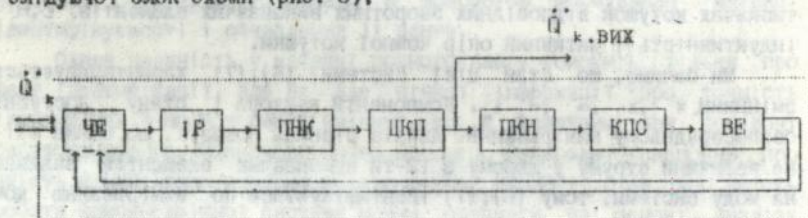


рис. 3.

де ЧЕ - чутливий елемент перетворювача; ІР - індикатор розузгодження; ПНК - перетворювач напруги у код; ЦКП - цифровий коректуючий пристрій; ПКН - перетворювач код-напруга; КПС - керований підсилювач струму; ВЕ - виконувачий елемент.

Голова схеми полягає у наступному. При наявності на вході БКПМВ збурення (наприклад, прискорення - бортової качки) на виході чутливого елемента виникає сигнал розузгодження, який із аналогового перетворюється у код (при моделюванні розглядався 20-розрядний ПНК) і надходить до входу цифрового коректуючого пристрою. ЦКП надає системі необхідні характеристики якості. Оброблена в ЦКП інформація перетворюється у аналоговий сигнал за допомогою м-розрядного ПКН. Цей сигнал є входним сигналом керованого підсилювача струму. Вихід КПС під'єднаний до входу ВЕ. При подачі струму на ВЕ, утворює сила (електромагнітна чи електростатична) повертає ЧЕ у початкове положення, компенсуючи, таким чином, механічну силу збурення $\ddot{Q}_k$.

Побудова ланцюга зворотнього зв'язку перетворювача здійснена у відповідності з рівнянням:

$$m \cdot \ddot{Q}_k + \frac{d L_{12}}{d x} \cdot \dot{I}^z = 0,$$

де m – маса ЧЗ БКПМВ; I – струм.

Як початкові параметри моделювання взяті: $m = 0,18$ кг.;

$\frac{\partial L_{12}}{\partial x} = 0,0018 \frac{\text{ГН}}{\text{м}}$ – взаємна індуктивність котушок компенсаційного ланцюга прийнята, як const; $T_C = 0,002$ с – електрична постійна часу; T_m – електромеханічна часова константа.

Лінійна частина руху ЧЗ описувалась передаточною функцією:

$$W_{\text{л.ч.}}(P) = \frac{1}{T_C \cdot T_m \cdot P^2 + T_m \cdot P + 1}.$$

Нелінійна частина ЧЗ описувалась квадратичним виразом:

$$P_{\text{вих}} = K \cdot J^2, \quad \text{де} \quad K_L = \frac{\partial L_{12}}{\partial x}.$$

Робота системи при наявності нелінійної ланки є настійною, тому у ЦКП включені блоки нелінійної і пропорційної ланки:

$$K_K = \frac{1}{K_{\text{ПКН}} \cdot K_L}.$$

де $K_{\text{ПКН}}$ – коефіцієнт передачі ПКН; K_L – коефіцієнт передачі КЛ.

Модель одного контура БКПМВ показана на рис. 4.

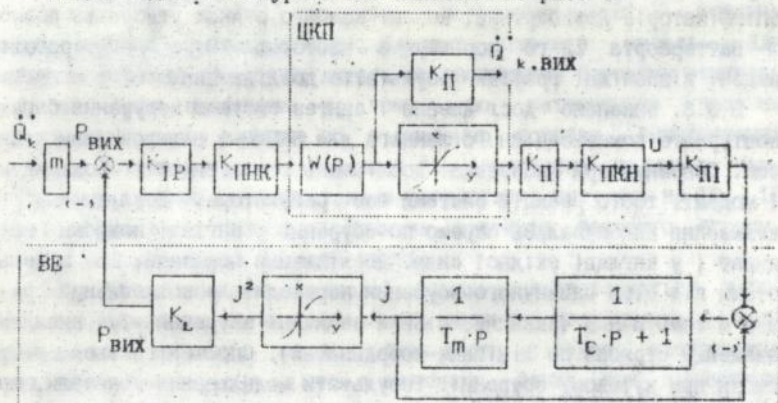


рис. 4.

Результати моделювання показали стійкість роботи синтезованого БКПМВ. Досліджено вплив розрядності ПКН. При $R_{\text{ПКН}} = r$ крива помилки містить складову височастотного шуму.

Зміна розрядності вхідного перетворювача веде до значного збільшення помилки, що наочно характеризується конкретним прикладом моделювання.

Зміна величини коефіцієнта зворотнього ланцюга також істотно

впливає на точність вимірювання. Так, при зміні коефіцієнта на 2% помилка змінюється в 1,8%, а на 3% - помилка збільшується до 6%. Зміна коефіцієнта K_{II} на 2% веде до збільшення помилки на 3,6%, а на 5% - до 11%.

На базі проведеного моделювання визначена чутливість БКПМВ до зміни коефіцієнтів складових і вказана найбільша чутливість БКПМВ до зміни коефіцієнтів K_{II} і K_K . На базі проведених досліджень розроблені рекомендації щодо синтезу ланцюга компенсації.

При схемотехнічній реалізації БКПМВ вимагається визначення найменшого числа вимірювачів струму (струм i_m) до тих пір, поки зберігається прийнятна точність ідентифікації положення ЧБ. Від точності положення залежить і точність вимірювання вектора механічної величини (прискорення). Дослідження показали, що, як і треба було очікувати, при вимірюванні і трьох струмів замість одного значно збільшується точність ідентифікації змінних x_1, α стану ЧБ. Для перевірки було виконано синтез двох асимптотичних ідентифікаторів Лвенбергера, кожені кожного з яких утворюють розподіл Ваттерборга 12-го порядку з частотою 10 с⁻¹. У роботі наведені відповідні графіки результатів дослідження.

В 3.3. виконано дослідження і синтез системи керування багатоконтурного компенсаційного ланцюга для БКПМВ з надпровідним підвісом. Основним при проведенні досліджень є властивості розімкнутої моделі, тобто реакція системи без регулятора. Дослідження і моделювання виконувались окремо по збуренню у вигляді похибки координат і у вигляді вхідної сили. Дослідження показали, що модель системи під дією одиничного збурення переходить у коливальний режим з математичним чеканням, рівним величині збурення (у випадку проведення стрибка по лінійних координатах). Спостерігається ріст похибки при кутовому збуренні. Результати моделювання показали, що по кутовим координатам система є розімкнутою і до неї можна застосовувати традиційний підхід. Тобто можливо використовувати сигнал похибки кутової координати для побудови П-, ПІ-, ПІД-регулятора.

Результати моделювання показують, що похибки стають незначними при коефіцієнті пропорційності помилка-струм $1 \cdot E_4$ і використанні П-регулятора.

По лінійних переміщеннях система є замкнутою і спроби охопити її ПІ- чи ПІД-регулятором призводять до розносу. Для побудови регулятора, у цьому випадку, повинні бути використані нетрадиційні

принципи. Одним з таких підходів є цифровий демпфер. Особливістю є використання як керуючого сигналу не функції, а її похідної. Обробка зв'язку по похідній забезпечує вихід ЧЕ на усталений режим. Показано, що задача обробки одиничного збурення по лінійних координатах досягається використанням демпфера, а по кутових - введенням пропорційного регулятора.

Для випадку інтегрального закону керування (по інтегралу від помилки із скидом значення при зміні знака похибки) ЧЕ входить у режим усталених коливань. Зменшення збурення приводить до збільшення швидкості розходження і до збільшення частоти відповідних коливань.

При пропорційному законі регулювання збільшується коливальність ЧЕ. Із збільшенням коефіцієнта пропорційності амплітуда коливань падає, а частота росте. Використання демпфера дозволяє стабілізувати цей режим.

Для стабілізації збурення сили при нульовій похибці необхідно використовувати інший алгоритм керування. Він повинен використовувати врівноваження базових струмів моделі. Для прийняття рішення про необхідність врівноваження базовими струмами необхідно бути впевненим у тому, що математичне чекання перехідного процесу зміщене по відношенню похибки. Використання для цього усталених значень приведе до надзвичайно великого часу регулювання, оскільки стабілізація регулювання настає на 10...16 точках, після чого можлива одинична корекція базового струму, наступна можлива через 10...16 тактів.

Тому для збільшення швидкості регулювання пропонується алгоритм, заснований на оцінці середнього значення координати у ході перехідного процесу, яким обирається півсума екстремумів перехідного процесу. Ця оцінка є зміщеною. Однак при сходимості процесу значення зміщення зменшується до наперед заданої точності. При використанні оптимального демпфера виділення екстремумів є важким, тому з одного боку коефіцієнт демпфування зменшується для одержання коливального процесу, а з другого - система переходить у режим вимушених коливань з підвищеною частотою завдяки використанню пропорційного регулятора. Даний алгоритм є базовим при побудові регулюючого алгоритма.

Синтез цифрових, оптимальних по швидкодії, систем управління (компенсації) розглянуто в розділі 3.3.2. Важливим для побудови регуляторів є питання реалізуємості (з однієї сторони) і

реалізованості керування квазіоптимальних алгоритмів керування (з другої сторони). При введенні обмеження на керуваний вплив необхідний час, за який ЧЕ може бути переведений із заданого початкового стану у нульовий, буде великим. Це пояснюється тим, що із-за обмежень система не може розвивати достатньо великих зусиль керування (компенсації), які потрібні на деяких інтервалах для одержання такої ж швидкодії, як і в системі без обмежень. Для знаходження оптимальної по швидкодії послідовності обмеженого керування використовують метод лінійного програмування, однак для його реалізації потрібні великі потужності. Застосування варіаційних методів також обмежено для сучасної техніки і не дозволяє реалізувати системи керування вище 4-го порядку. Для нашого випадку БКІМВ з надпровідним підвісом, який є нелінійним і нестационарним, ці методи неприйнятні. Тому при побудові квазіоптимального регулятора використано наступний алгоритм:

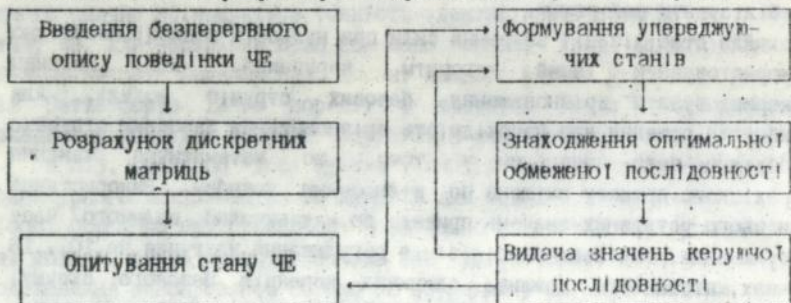


рис. 5.

Для системи n -го порядку будь-який вектор n -мірного простору можна уявити як лінійну комбінацію n -лінійно-незалежних векторів 1, таким чином, ЧЕ із початкового положення може бути переведений у положення рівноваги не більше як за n інтервалів. Для систем з транспортними запізненнями ефективним є використання упереджених координат стану. Впровадження упереджувача координат дозволяє компенсувати запізнення і побудову оптимальних алгоритмів. Загальною рисою їх є постійність коефіцієнтів моделі, які дозволяють визначати як матрицю трансформації змінних стану $\mathbf{A}$, $\mathbf{Q}$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_0 + \mathbf{Q} \cdot \mathbf{u}_1, \\ \mathbf{x}_2 &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{Q} \cdot \mathbf{u}_2 = \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{x}_0 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{u}_1 + \mathbf{Q} \cdot \mathbf{u}_2, \end{aligned}$$

так і її зворотню матрицю $\mathbf{A}^{-1}$, що дозволяє розраховувати оптимальне керування відповідно з

$$x_0 = -R^{-1} \cdot Q \cdot u_1 - R^{-m} \cdot Q \cdot u_m,$$

чи $v_1 = -R^{-1} \cdot Q$, одержуємо

$$x_0 = v_1 \cdot u_1 + v_2 \cdot u_2 + \dots + v_m \cdot u_m.$$

Цей алгоритм можна реалізувати для БКІМБ без надпровідного електромагнітного підвісу.

У випадку, коли БКІМБ має ЧЕ з надпровідним електромагнітним підвісом, то ми маємо систему, яка описується рівняннями із змінними коефіцієнтами, і які залежать від змінних стану. Розглянутий метод синтезу компенсаційного кола не підходить і одним з можливих варіантів реалізації є використання моделі об'єкту для визначення упереджуваного стану, що дозволяє вирішувати рівняння для розрахунку квазіоптимальних збурень. Однак цей метод із-за великого об'єму розрахунків моделі, яку потрібно неодноразово перерахувати на кожному кроці для розрахунку керуючої послідовності використовувати недоцільно. Тому при наявності випадкових збурень на вході системи сине оптимального керування стає проблематичним. В цьому разі можливе керування на основі похибок. Базове рівняння, реалізуюче ПИД-регулятор, побудований на аналізі похибок системи має вигляд:

$$Y_n = K_{C1} (E_n - E_{n-1}) + \frac{T}{T_1} \cdot K_{C2} E_n + \frac{K_{C3} T_n}{6T} \cdot (E_n + 3E_{n-1} - 3E_{n-2} - E_{n-3}),$$

де E_n - похибка на n -му такті; T - тривалість інтервалу між регульованими; T_1 - час відновлення; T_D - коефіцієнт розузгодження; K_C - коефіцієнт зв'язку складових.

Для моделювання системи керування (компенсаційного зв'язку) був вибраний програмний пакет для інженерів і наукових робітників Lab Windows (LW) фірми National Instruments. Описуюча БКІМБ математична модель була запрограмована у середовищі пакета. Великі можливості LW робить його зручним інструментом дослідника. Дякуючи вбудованим в LW механізмам конвертування програми із однієї мови у другу після одержання кінцевої версії програми на BASIC вона перетворюється в C і оптимізується по швидкості.

В розділі 4 проведено дослідження напруженого і термо-деформаційного стану ЧЕ. Дослідження напружено і термо-деформаційного стану ЧЕ були проведені з використанням програмного комплексу FEM.TOOLS, який призначений для чисельного моделювання термомеханічних процесів у тривимірному просторі при статичних і динамічних навантаженнях. Розрахунок розподілу деформацій було виконано на ПЕОМ IBM PC/AT 386/387 з тактовою частотою 40 мГц., ОЗУ 4 мб і ВЗУ

120 мб і реальною швидкістю 4 млн. оп./с.

Розрахунки виконувались з допомогою кінцево-елементних програм і включали етап підготовки дискретної моделі ЧЕ і відповідно граничних умов, геометричне моделювання, а також і постпроцесорну обробку отриманих результатів з ціллю їх зручного наочного подання. Геометричне моделювання ЧЕ в середовищі ПК FEM.TOOLS виконується за допомогою системи автоматизованого проектування Auto CAD 10/11 у вигляді набору точок і ліній. Вибір необхідної частоти сітки кінцевих елементів здійснюється при досягненні деякого компромісу між існуючими ресурсами ЕОМ (оперативною пам'яттю) і потрібною точністю рішення. Як показали проведені дослідження, для моделювання ЧЕ найбільш доцільно використовувати шестигранні квадратичні елементи. Один із варіантів дискретної моделі фрагмента ЧЕ показано на рис. 6.

Враховуючи значну нерегулярність конструкції у цілому, а також особливості використання в ПК FEM.TOOLS алгоритма оптимальної перенумерації вузлових невідомих (зворотній алгоритм Катхилл-Макки з вибором початкового вузла по способу Гібса) і схеми зберігання матриці жорсткості у пам'яті ЕОМ, обмежуємося при розрахунках тільки симетричною частиною чутливого елементу.

Дослідження напружено-деформаційного стану виконано при навантаженнях, які можуть бути прикладені на ЧЕ у випадку вимірювання великих прискорень компенсаційним методом. У цьому разі чутливий елемент знаходиться у навантаженому по 6-ти координатам стані, які є наслідками компенсаційних сил і моментів. Враховуючи складність і симетричність конструкції, для наступних досліджень використовуємо фрагмент конструкції чутливого елементу, який навантажений осьовими і поперечними силами, які також створюють вигинаючий і крутячі моменти. Фрагмент вважається кінематично закріпленим по трьом взаємно-перпендикулярним граням. Розрахункова схема не є симетричною і розрахунки потрібно виконувати враховуючи тримірну модель. Проведені дослідження включали етап підготовки дискретної моделі задачі і граничних умов, а також чисельного моделювання і постпроцесорної обробки результатів з метою їх зручного і наочного подання.

Для знаходження якісної картини розподілу деформації розглянуті прикладені до торців навантаження 10 і 5 кг. і матеріал $E=2 \cdot 10^6$ кг/см² та $\mu=0,3$.

Аналіз результатів дослідження дозволяє зробити висновок, що найбільш навантаженими є елементи центральної хрестовини і тому треба враховувати її міцнісні властивості.

При побудові прецизійних перетворювачів потрібно також враховувати деформації чутливого елементу силами компенсації.

В 4.2. розглянуто вплив температури і характер її розподілу на чутливому елементі. Це важливо тому, що при охолодженні конструкції, а також при експлуатації можуть виникати градієнти температури, які можуть привести до деформації чутливого елементу і виходу його із ладу. Процедура знаходження картини розподілу температурних напруг включає послідовне рішення 2-х задач статички – теплопровідності і пружності. Для задачі пружності температурні деформації розглядаються як зовнішні навантаження.

Характер розподілу температури у конструкції проявляється більш наочно коли розсікти тіло площиною і зобразити ізосмути (або ізолінії шукваної функції у розрізі).

Як і раніше, чисельне моделювання виконувалось з використанням програмного комплексу FEM TOOLS. Були розглянуті два варіанти розрахунку конструкції чутливого елементу, які відповідають двом різним схемам розподілу температурних навантажень. В обох випадках припускалось, що чутливий елемент розміщений у резервуарі, який містить газоподібну речовину при криогенній температурі. Для визначення якісної картини задавалась температура 100° . На одному із торців елементу для обох варіантів розрахунку задавався потік, рівним – 200. На всіх інших поверхнях конструкції припускається умова конвективного теплообміну. Температура тіла у початковому стані припускалась рівною нулю.

Обидва варіанти розрахунків виконані на тих же сітках кінцевих елементів, які були використані для пружного розрахунку. Результати чисельного моделювання для обох випадків (розподіл температури, три компоненти переміщень і напруг та інтенсивність напруг) показують, що зміна граничних умов на торцях чутливого елементу практично не впливають на характер теплового і напружено-деформованого стану у тих зонах конструкції, які були небезпечні при статичному аналізі. Найявні зони винятково великих напруг у точці кріплення елементу обумовлені головним чином характером прийнятих тут граничних умов

жорсткого защемлення, що викликає появу великих розтягачих напруг. При розрахунку у цілому всієї конструкції ця гранична умова буде відсутня і, отже, напругу у даній зоні можна не враховувати.

Важливим питанням при виконанні досліджень термо- і напружено-деформаційного стану чутливого елементу з використанням МКЕ є вірний вибір дискретної моделі досліджуваного елементу, а саме тип використовуваних кінцевих елементів (лінійних, квадратичних та інших), їх кількість і ступінь густоти. При цьому потрібно досягнути компромісу між потрібною точністю результатів розрахунків і доступними ресурсами ЕОМ (пам'яттю і часом вирішення задачі). Найбільш прості і по цій причині частіше використовуються шестигранні тримірні кінцеві елементи з лінійним законом інтерполяції досліджуваної функції на границях елементу. Однак, як показує аналіз, використання таких елементів веде до значного збільшення кількості самих елементів, і коли переміщення і температури ще можливо обчислити з прийнятною точністю, то досить достовірних деформацій і напруг (чи градієнтів температур) на елементах даного типу практично одержати тяжко, особливо коли має місце згин. По цій причині розрахунки виконувались на сітках із шестиграних двадцятивузлових елементів з квадратичним законом інтерполяції заданої функції на них. Кількість таких елементів лімітувалась розмірами оперативної пам'яті ЕОМ - 4 мб. Приклад дискретної моделі приведений на рис. 6. Сітка включає 96 квадратичних елементів, має 603 вузли, а матриця жорсткості при пружному розрахунку - 1809 рівнянь з половиною ширини стрічки - 936.

В 4.3. розглянуто вплив пружності конструкції чутливого елементу на працездатність БКПМВ. В цьому випадку потрібно враховувати сторонні ступені рухомості чутливого елементу, які призводять до виникнення коливань системи на різних частотах, що може спричинити непрацездатність БКПМВ.

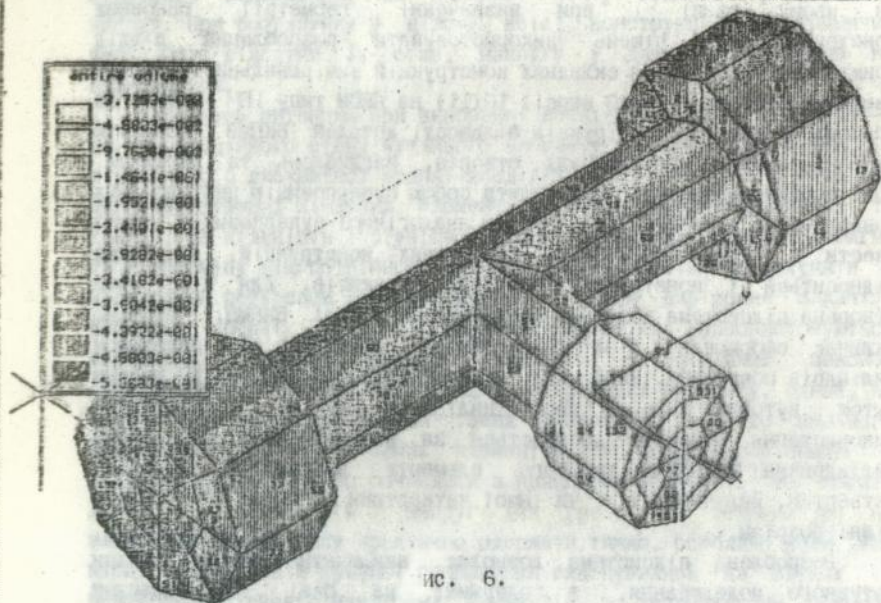
В розділі 5 досліджені питання синтезу БКПМВ і розглянуто методику тримірного моделювання.

Конструктивно БКПМВ є складними просторовими конструкціями, які включають корпус, у якому переміщується чутливий елемент, підвішений на електромагнітному, надпровідному чи статичному підвісі. Побудова просторової конструкції (аксонометрії), пов'язано з труднощами, особливо на етапі ескізного проектування. Рационально

на цьому етапі, при визначенні геометрії основних конструкторських рішень використовувати розроблений підхід тривимірного моделювання складних конструкцій вимірвальних приладів засобами системи AutoCAD версії 10(11) на ПЕОМ типу IBM PC/AT. Це обумовлено тим, що конструкцію більшості деталей БКПМВ повністю визначає система циліндричних отворів, заглиблень та порожнин. Тоді тривимірною моделлю буде являти собою суперпозицію циліндричних поверхень та їх ліній перетину. До аналогічної суперпозиції можна звести і ряд просторових стержневих конструкцій, до яких відноситься і конструкція чутливих елементів. Для цієї мети створена підсистема розробки геометричної моделі БКПМВ. Система включає сформовану бібліотеку типових елементів з перетином циліндрів обертання. Наприклад, перетин двох циліндрів під прямим кутом, кутовий перетин двох циліндрів і т.і. Можливість використання розрізів досягається за рахунок того, що кожна циліндрична поверхня типового елемента задана з чотирьох четвертин. Вилучення тієї чи іншої четвертини дозволяє моделювати різні розрізи.

Розроблена підсистема дозволяє виключати окремі етапи натурного моделювання, а одержані на базі цих моделей аксонометричні та перспективні зображення з вилученими лініями невидимого контуру, а також побудова напівпрозорої моделі, виконаної як би із прозорого матеріалу, дозволяє наочно бачити її всі внутрішні деталі і їх зістиковку, підвищити просторове уявлення і ефективність праці конструкторів. Розроблена підсистема може мати самостійне прикладне значення для тривимірного моделювання інших приладів і технічних об'єктів. Побудовані з допомогою розробленої підсистеми БКПМВ показані на рис. 7.

Синтез БКПМВ виконувався з допомогою приведеної підсистеми, яка є більш раціональною у порівнянні з системами моделювання в автоматизованих системах, які програмно забезпечують так зване "твердотіле" моделювання та апаратно реалізовані на графічних станціях. Основою синтезу були схеми вимірювання 6-ти координат (прискорень) однокомпонентними приладами (акселерометрами). Дослідження і аналіз таких схем показали, що для побудови приладу, який би однозначно вимірював би три лінійні прискорення і три кутові, потрібно чутливий елемент, закріплений у просторі і 6-ть індикаторів на кожну з координат. У технічній літературі описана велика кількість приладів для вимірювання трьох лінійних



ИС. 6.

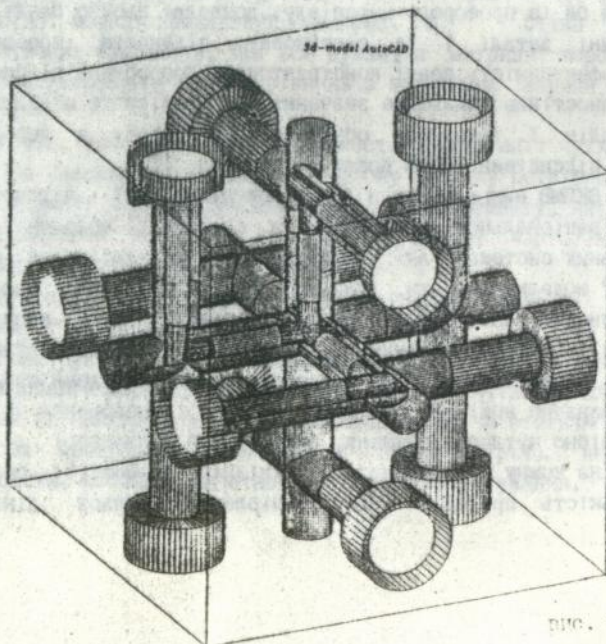


РИС. 7.

прискорень, але щодо вимірювання 6-ти такі відомості практично відсутні. Хоч відомо декілька публікацій про 6-ти компонентні перетворювачі сили, принцип роботи та ідеологія яких не підходить для побудови розглянутого класу приладів.

Розглянувши просторові схеми включення одноканальних акселерометрів, було синтезовано декілька просторових конструкцій 6-ти компонентних приладів (див. рис. 7.). По-перше, це просторова конструкція на пружному підвісі, на електромагнітному підвісі, а також конструкція в інтегральному виконанні.

У розділі 6 розглянуті питання практичної реалізації і використання БКПМВ. З цієї метою проведено дослідження можливості використання БКПМВ у системах інерційної навігації. Синтезовані алгоритми знаходження параметрів інерційної навігації (широти і довготи) при використанні БКПМВ. Проведено моделювання розробленого алгоритма і показана його працездатність у системах інерційної навігації. Наведені також експериментальні дослідження перетворювачів і їх елементів.

В розділі 6.2. на основі аналізу елементної бази країни і країн близького зарубіжжя розроблені системи керування БКПМВ. Розробка системи мала два напрямки. По-перше, це системи керування для використання БКПМВ у стаціонарних умовах, наприклад, у робото-технічних системах, у стаціонарних системах дослідження та інших, які мають у своєму складі ПЕОМ.

Другим напрямком була розробка спеціалізованих мікроконтролерів, призначених для БКПМВ на рухомих об'єктах.

Схема реалізації модульної системи (контролера) керування по першому напрямку розроблена на базі мікро-ЕОМ 1810 і включає керуючу мікро-ЕОМ, модуль ПЗУ, модуль аналогово-цифрового і цифро-аналогового перетворювача, а також модуль джерел живлення.

Аналіз технічної літератури показує, що є багато різних розробок систем керування з використанням мікро-ЕОМ. Однак використання дорогих і високопродуктивних мікро-ЕОМ не завжди економічно виправдано і обгрунтовано.

Поява ж нової елементної бази однокристальних ЕОМ серії К1816, які містять на одному кристалі всі вузли ЕОМ і мають систему команд, яка орієнтована на задачі керування і контролю, дозволяє синтезувати дешеві керуючі системи БКПМВ з використанням всіх переваг цифрової обробки сигналів. Структурна схема модульного ва-

ріанту мікроконтролера на базі K1816BE48 являє собою функціонально закінчений модуль із всіма необхідними вузлами для нарощування системи шляхом підключення модулів функціонально-логічного розширення, побудованих на базі периферійних ВІС серії K580.

Для мобільних систем, які призначені для встановлення на рухомих об'єктах розроблений спеціалізований контролер на базі мікро-ЕОМ КР1816 з числом програмованих дискретних каналів вводу/виводу, рівних 48, об'ємом ПЗУ – 8 Кбайт і об'ємом ОЗУ – 2 Кбайт.

В 6.2.4. коротко розглянуті запропоновані схеми зіستиковки одноканальних перетворювачів механічних величин при дослідженні їх статичних і динамічних характеристик.

Розроблені контролери можуть мати і самостійне практичне використання для керування різними іншими суміжними процесами, чи об'єктами (вагодозвуча техніка і інші).

В 6.3. розглядаються характеристики розроблених нових конструктивних варіантів БКПМВ і перспективи їх подальшого розвитку.

Розроблено дві базові конструкції з електромагнітними звичайним і надпровідним підвісом. Як індикатори розузгодження використані оптоелектронні перетворювачі, диференційно трансформаторні, а також СКВІДИ.

Для проробки конструкції БКПМВ виготовлено одноканальні перетворювачі з надпровідним і звичайним електромагнітним підвісом, які включають чутливий елемент, відповідну електромагнітну систему підвісу, індикатор розузгодження і систему обробки інформації, а також 6-ти координатні перетворювачі із звичайним електромагнітним і надпровідним криогенним підвісом.

На базі проведених досліджень можна прогнозувати широке впровадження розроблених перетворювачів механічних величин у практику. Окремі результати роботи використані у промисловості, що підтверджується відповідними актами.

У додатку приведено опис розробленої підсистеми геометричного тримірного моделювання БКПМВ; листінги розроблених програм і короткий опис вживаних ПК Lab Windows і FEM TOOLS; результати чисельних розрахунків перехідних характеристик; схеми одноплатного контролера на основі однокристальної мікро-ЕОМ КР 1816 кола керування БКПМВ і акти впровадження результатів дисертації у промисловість і учбовий процес.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В дисертації проведено дослідження теоретичних і прикладних питань синтезу, розробки і використання нового класу БКІМВ, які можна розглядати, як новий напрям в розвитку перетворювачів механічних величин, яке має велике народно-господарське значення.

Основні результати і висновки роботи одержані автором самостійно полягають у наступному:

1. Розроблені наукові та технічні основи створення нового класу перетворювачів механічних величин, на основі яких побудовані нові структури і схеми таких пристроїв.

2. Одержані узагальнені математичні моделі нового класу перетворювачів, розглянуті їх часткові моделі і проведені дослідження на стійкість, ідентифікуємість (керувальність).

3. Проведені дослідження і їх результати і розроблені алгоритми керування системи зі зворотним компенсаційним зв'язком, а також дослідження роботи системи з різними типами систем керування і оптимальний їх вибір, які дозволяють проводити оптимальну розробку і оптимальний вибір таких систем.

4. Розроблено методологію синтезу і проектування БКІМВ, а також доказано можливість розробки 6-ти координатних інерційних перетворювачів механічних величин на базі принципу компенсації, що має велике значення для створення таких приладів.

5. Розроблена методологія і підсистема геометричного тривимірного моделювання, яка є більш раціональною у порівнянні з системами твердотілого моделювання і яка може використовуватися і для моделювання інших складних об'єктів.

6. Досліджено деформаційний і термдеформаційний стан чутливого елементу з допомогою методу кінцевих елементів. Проведені дослідження дозволяють грамотно вибрати конструктивні розміри чутливого елементу, врахувати вплив температури і деформації. Розроблена методика може також використовуватись для дослідження інших об'єктів. Визначено вплив перехрестних зв'язків та інших параметрів системи на статичні і динамічні характеристики.

7. Проведені дослідження показали можливість використання БКІМВ у системах інерційної навігації і це є подальшим розвитком чисто акселерометричних інерціальних систем навігації. Використання БКІМВ, як показав аналіз дозволяє підвищити метрологічні і технічні характеристики таких систем, а виконання

БКПМВ з надпровідним (криогенним) підвісом дозволяє досягти гранично великих чутливостей до 10^{-9} г и нижче.

8. Розроблені два напрямки розвитку БКПМВ з використанням ЕОМ та мікропроцесорної техніки. Показана можливість розробки БКПМВ як для стаціонарних, так і для рухомих об'єктів. Показана доцільність використання для першої групи об'єктів БКПМВ з керуванням від ЕОМ, а для другої – від спеціалізованих мікроконтролерів. Проведено обґрунтування і доцільність використання елементної бази країни, тобто побудова контролерів на основі однокристальної ЕОМ К1816.

9. Аналіз розроблених конструктивних варіантів БКПМВ показав, що напрямками розвитку приладів є їх виготовлення з електромагнітним звичайним виконанням, а також з надпровідним криогенним електромагнітним підвісом для надчутливих систем вимірювання механічних величин. У якості індикаторів розузгодженості доцільно використовувати оптоелектронні, електромагнітні і ємкісні для БКПМВ із звичайним електромагнітним підвісом і оптоелектронні, електромагнітні і СКВІД.

10. Розроблені алгоритми і програми дослідження БКПМВ, які дозволяють ефективним чином проводити подальше удосконалення, проектування і синтез нових конструкцій перетворювачів.

Основні результати дисертації опубліковано у наступних роботах:

1. Гераїмчук М. Д. Синтез і моделювання багатокомпонентних перетворювачів механічних величин. /Монографія/ Київ, 1994. - 195 с. - Укр. - Деп. у ДНТБ України N 1068 - Укр. 94. від 03.06.94.
2. Gueraltchouk M., Bokerio P. Metrologie et methodes des mesure dans l'industrie. Universite de Annaba. Institut Genie Mecanique. (Resume du cours). Annaba, 1986, 120 с.
3. Гераїмчук М. Д., Таланчук П. М., Чиликин А. В. Сравнение контроллеров построенных на основе КР580ВМ0 и КР1816ВЕ41. Журнал "Приборы и системы управления", 1992, N7, с. 28-29.
4. Гераїмчук М. Д., Горбатенко В. В. Адаптер виброчастотных преобразователей. Вестник КИИ, серия "Приборостроение", К., Вып. 23, 1993.
5. Гераїмчук М. Д., Свирид А. И. Компенсационный преобразователь угла поворота с цифровой индикацией. Вестник КИИ, "Приборостроение", 1983, вып. N13, с. 47-48.
6. Гераїмчук М. Д., Таланчук П. М., Звягинцев Ю. М. Система напуска газа для снятия метрологических характеристик приборов абсолют-

- ного и парциального давления. Вестник КПИ, "Приборостроение", К., 1978, №8, с. 40-42.
7. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М. и др. О расширении диапазона измерения компенсационных датчиков ГСП. Вестник КПИ, "Приборостроение", № 6, 1976, с. 48-51
 8. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М. и др. О некоторых путях расширения рабочего диапазона компенсационных приборов за счет понижения нижнего предела измерений. В сб. "Теория и разработка первичных преобразователей для измерения нестационарных величин". "Знание", К., 1974, с.19-20.
 9. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М. Автоматический манометр с электростатической компенсацией. В сб. "Теория и разработка первичных преобразователей для измерения нестационарных величин", "Знание", К., 1974, с. 20-22.
 10. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М. и др. Стабилизация абсолютного давления газовой пробы с высокой точностью. В сб. "Автоматизированная система газового анализа доменного и конверторного производства". "Знание", К., 1974, с. 22.
 11. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М. Приборы для измерения абсолютного давления разреженных газов. В сб. "Приборы и методы контроля химико-физических свойств веществ". "Знание", К., 1974, с. 32.
 12. Гераимчук М.Д., Иванов Ю.Е. К анализу степени наблюдаемости многомерной электромеханической колебательной системы. Вестник КПИ, сер. "Приборостроение" Вып. 24. 1994.
 13. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М. Манометр абсолютного давления. Авт. св. СССР №516927, оп. 15.07.77 г. Б.И. № 21.
 14. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М., Дашковский А.А. Дросселирующее устройство. Авт. св. СССР №567912, оп. 25.08.77 г. Б.И. № 29.
 15. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М., Дашковский А.А. Дросселирующее устройство. Авт. св. СССР №567911, оп. 25.08.77 г. Б.И. № 29.
 16. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М. и др. Манометр абсолютного давления. Авт. св. СССР №502259, оп. 05.02.76 г. Б.И. № 5.
 17. Гераимчук М.Д., Таланчук П.М., Островой Ю.Д. Дросселирующее устройство. Авт. св. СССР №496452, оп. 25.12.75 г. Б.И. № 47.
 18. Гераимчук М.Д., Зубарев В.Ф., Пустовойт Ю.М. Методы измерения толщины пленок жидких металлов. Преприят ИАЭ - 3857/8. М. 1983, 16 с.
 19. Гераимчук М.Д. Динаміка багатокomпонентних вимірювань. Тези доповідей І Міжнародного симпозіуму Українських інженерів-механіків у Львові. 1993, Львів, Україна - с. 248.
 20. Гераимчук М.Д., Козориз В.В. Разработка чувствительных элементов на новых физических принципах. Тези доповідей н.-т. конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми космічних досліджень", Житомир, 1993, с.113.
 21. Гераимчук М.Д., Козориз В.В. Новые направления в разработке измерительных преобразователей механических величин. Тезисы док-

- ладов международной н.-т. конференции "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (Датчик-93), Гурафф, 1993, с.21.
22. Козориз В.В., Гераимчук М.Д. Исследование и устойчивость многокоординатных измерителей. Тезисы докладов Украинской конференции "Моделирование и исследование устойчивости систем", часть I., Киев, 1993 г., с.64-65.
 23. Гераимчук М.Д., Особенности построения системы стабилизации положения чувствительного элемента. Материалы н.-т. конференции с международным участием, Винница-Николаев, 1993, с. 23.
 24. Гераимчук М.Д., Построение следящей системы многокомпонентных измерителей. Материалы 2-й н.-т. конференции стран СНГ "Контроль и управление в технических системах", Винница, 1993 г. с.105-106.
 25. Гераимчук М.Д., Козориз В.В. Математическое моделирование и исследование системы регулирования для измерителей со сверхпроводящим подвесом. Материалы 2-й н.-т. конференции стран СНГ "Контроль и управление в технических системах", Винница, 1993г. с.107-109.
 26. Гераимчук М.Д. Анализ и синтез сложных измерительных устройств с микропроцессорной компенсационной обратной связью. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции "Системный анализ, моделирование и управления" (Системный анализ - 93), Ташкент, 1993, с. 52.
 27. Гераимчук М.Д., Козориз В.В., Морговский Г.А., Чеборин О.Г. Состояние и возможности разработки высокочувствительных гравиметров, на основе новых физических принципов. Сборник рефератов докладов международной научной конференции "Геофизика и современный мир", (9-13 августа 1993 г.) М., 1993, с.289.
 28. Гераимчук М.Д., Морговский Г.А. Исследование значения информации о гравитационном поле при гравиметрической съемке морского дна. Сборник рефератов докладов Международной научной конференции "Геофизика и современный мир", (9-13 сентября 1993 г.) М., 1993, с.289.
 29. Гераимчук М.Д. Тенденції розвитку перетворювачів механічних величин. Тези доповідей I-ї Української конференції з автоматичного керування "Автоматика-94", 18-23 травня, 1994р. К. Ч.2. с. 474.
 30. Гераимчук М.Д., Иванов Ю.Е. Методика исследования степени наблюдаемости (управляемости) линейных систем высокой размерности. Тези доповідей I-ї Української конференції з автоматичного керування "Автоматика-94", 18-23 травня, 1994р. К. Ч.1. с. 131.
 31. Гераимчук М.Д., Козориз В.В. Вимірковальні інерційні прилади з надпровідним електромагнітним підвісом. Материалы симпозиума с международным участием "Наука и предпринимательство" Львов, 1994. с. 21.
 32. Гераимчук М.Д. Багатокоординатні інерційні перетворювачі прискорень. Материалы симпозиума с международным участием "Наука и предпринимательство" Львов, 1994. с. 74-75.
 33. Гераимчук М.Д., Козориз В.В. Исследование и синтез регуляторов для управления преобразователями со сверхпроводящим подвесом.

Тезисы докладов Украинской конференции "Моделирование и исследование устойчивости систем" 16-20 мая 1994, с. 35.

34. Melnik I., Geraiimchuk. Control of microdisplacements using optoelectronic sensors. Proc. SPIE. V.2066, 1993. Conference. "Optical Tools for Manufacturing and Advanced Automation", Boston, Massachusetts, USA, 7-10.09.93.

Гераймчук М.Д. Синтез и моделирование многокоординатных преобразователей механических величин.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.01 - методы и приборы измерения механических величин, Киевский политехн. ин-т, Киев, 1994.

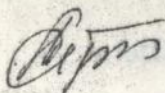
Защищается 42 научные работы, которые содержат теоретические исследования, вопросы моделирования и синтеза многокомпонентных преобразователей механических величин, также результаты экспериментальных исследований. Разработаны новые концепции и принципы построения и синтеза МКПМВ, их структуры и схемные реализации. Приводятся результаты математического описания и обобщенные модели МКПМВ, результаты моделирования, а также данные о использовании основных результатов диссертации на производстве. Geraiimchuk M.D. Synthesis and modelisation of polycordination transformers of mechanical value.

Dissertation on obtaining of academic degree of doctor of technical science on speciality 05.11.01 - methods and instruments for measuring of mechanical values, Kiev politechnical institut, Kiev, 1994.

The 42 scientific publications, which contain theoretical investigation, questions of modelisation and synthesis polycordination transformers of mechanical value, and results of experimental investigation are maintained. The new conceptions and principles of construction and synthesis MCTMV, their structure and scheme realizations have elaborated. The results of mathematical description and generalization modelos MCTMV, results of modelisation, and datas about utilization of main results of dissertation on production are conducted.

Ключові слова:

вимірювання механічних величин, багатокординатні перетворювачі і прилади.



КУМ.21.11.94.Зам.835-1101

AB 31.381