МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ

На правах рукопису

КИРИЧУК Юрій Володимирович

УДК 624.072.3

АВТОМАТИЗОВАНА ПРИЛАДОВА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА

05.11.01 - прилади та методи вимірювання механічних величин

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

> Науковий консультант: Заслужений діяч науки й техніки України, д.т.н., професор Безвесільна Олена Миколаївна

Одеса - 2016

3MICT

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ У ГАЛУЗІ	
ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-	
ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ (ІВС)	23
 Аналітичний огляд робіт у галузі засобів та методів вимірювання механічних величин інформаційно- 	
вимірювальних систем	24
1.2. Постановка розв'язуваної у дисертації наукової проблеми	48
1.3. Основні принципи та запропоновані підходи до організації, побудови та забезпечення точності систем керування	
інформаційно-вимірювальних систем рухомих об'єктів	53
1.4. Математична модель інерціальної інформаційно-	
вимірювальної системи	58
1.4.1. Рівняння руху і блок-схема системи стабілізації	58
1.4.2. Рівняння руху і блок-схема інформаційно-вимірювальної	
системи	61
1.4.3. Рівняння руху і блок-схема для вимірювання аномалій	
прискорення сили ваги	63
1.5. Основні наукові та практичні результати дисертації	66
1.6. Висновки до розділу 1	69

2.1. Георія пооудови системи керування (СК) лінією візування	
інформаційно-вимірювальної системи та алгоритми локації	
рухомих об'єктів	73
2.2. Методи забезпечення точності системи керування IBC	88
2.2.1. Функціональна схема СК ІВС для забезпечення точності	
визначення лінії візування ІВС	. 89
2.2.2. Синтез параметрів елементів і пристроїв системи	
керування ІВС при кутових збуреннях об'єкта	.92
2.2.3. Дослідження вібростійкості системи керування IBC за	
тангажем	.99
2.2.4. Синтез елементів опори системи керування IBC за	
курсом в умовах багатократних ударних впливів	106
2.3. Висновки до розділу 2	122
РОЗДІЛ З. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
CUCTEM ΚΕΡΥΒΑΗΗЯ ΕΠΕΜΕΗΤΙΒ Ι ΠΡИСТРОЇВ IBC	
che i Elvi KEI y Diviniui, Estevici i i di ne i i di di de i	125
3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128 128
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128 128
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128 128
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128 128 128 128
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128 128 128 128 129 132
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128 128 128 128 129 132
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128 128 128 128 129 132 136
 3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС	125 125 128 128 128 128 129 132 136 136

	3.3.5.	Технічні характеристики вимірювальних засобів 1	40
	3.3.6.	Вимірювання методом вторинного еталону 1	40
	3.3.7.	Тарування вібровимірювальної апаратури1	41
	3.3.8.	Зняття амплітудно-частотної характеристики 1	45
	3.3.9.	Зняття амплітудної характеристики 1	47
	3.3.10.	Визначення амплітуди коливань 1	48
3.4	. Висно	овки до розділу 3 1	50

РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ

4.4. J	Висновки	до розділу 4		170
--------	----------	--------------	--	-----

5.1. Метод	експериментального	дослідження	похибок	нового	
автома	гизованого вимірювача	а кутів			172

5.2.	Методика	обробки	на ЕО	Μ	результатів	експериментів	щодо	
	досліджен	ня похиб	ок вимі	рю)вача кутів			180

5.3.	Засоби	високоточних	вимірювань	кутів	виставки	
	інформаці	йно-вимірювальн	их елементів			184
5 1	Duonopun	no popular 5				102

5.4. Висновки до розділу 5	
----------------------------	--

РОЗДІ	Л 6. МЕТОДИ СТРУКТУРНОЇ ТА ПАРАМЕТРИЧНОЇ	
	ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ	
	ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИ	X
	ПАРАМЕТРІВ ІВС	193
	6.1. Методи прямого і модифікованого перебору	
	6.2. Метод покоординатного спуску	
	6.3. Метод градієнта	
	6.4. Метод параметричної оптимізації	
	6.5. Приклад практичного використання методів параметри	ичної
	оптимізації	
	6.6. Висновки до розділу 6	
ВИСН	ОВКИ	
СПИС	ОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
дода	тки	
	Додаток А. Акти впровадження	305
	Додаток Б. Програма пошуку екстремуму цільової функції мет	годом
	модифікованого прямого перебору	309
	Додаток В. Програма оптимізації цільової функції системи ме	тодом
	градієнта	
	Додаток Г. Програма для ідентифікації динамічних	
	характеристик IBC рухомих об'єктів	
	Додаток Д. Програма для дослідження методів адаптивної	
	ідентифікації IBC	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

*x*₁, *y*₁, *x*₂, *y*₂ – координати крапок візування об'єктів пошуку (цілей);

 B_1, B_2 – крапки візування об'єктів пошуку;

 β_1, β_2 – кути візування об'єктів пошуку з рухомого об'єкту по тангажу;

$$\alpha_1, \alpha_2$$
 – кути візування об'єктів пошуку з рухомого об'єкта за курсом;

$$\gamma$$
 — кут крену носія;

X_u, *Y_u* – координати об'єкта пошуку (цілі);

D – дальність до об'єкта пошуку у прямокутній системі координат;

V – швидкість руху об'єкта носія;

ΔX_{*u*}, ΔY_{*u*} – помилки обчислення координат об'єкта пошуку у прямокутній системі координат;

 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_1, \Delta y_2, \Delta \beta_1, \Delta \beta_2$ – повні помилки вихідних даних;

 $\Delta X_{u}(\Delta x_{1}, \Delta x_{2}, \Delta y_{1}, \Delta y_{2}, \Delta \beta_{1}, \Delta \beta_{2}), \Delta Y_{u}(\Delta x_{1}, \Delta x_{2}, \Delta y_{1}, \Delta y_{2}, \Delta \beta_{1}, \Delta \beta_{2})$ – повна помилка визначення координати об'єкта пошуку методом багаторазової пеленгації;

 σ^2 – дисперсія кутів візування об'єктів; $\sigma(x_u), \sigma(y_u)$ – средньоквадратична помилка вимірювання кута пеленгації об'єкта;

 Δσ – бажана точність стабілізації лінії візування по одній осі стабілізації;

 σ^* – кутовий розмір спостережуваного об'єкта;

$$\Gamma^*$$
 — кратність оптичної системи ІВК;

φ – роздільна здатність системи «прилад - око»;

X_BY_BZ_B – система координат об'єкта носія, до якої прив'язана лінія візування і корпус IBK;

$X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$	 – система координат гіроплатформи (внутрішньої рами СК);
$X_H Y_H Z_H$	– система координат зовнішньої рами СК;
БНП	– бортовий інформаційно-вимірювальний прилад;
БЦОМ	– бортова цифрова обчислювальна машина;
ВД	– виконавчий двигун;
BP	– внутрішня рама;
ВСП	– високоточний слідкуючий привід;
ГД	– головне дзеркало;
ГОН	– генератор опорної напруги;
ГС	– гіростабілізатор;
дкп	– дискретний коригувальний пристрій;
ДК	– датчик кута;
дкп	– датчик кута прецесії;
ДКШ	– датчик кутової швидкості;
EOM	– електронна обчислювальна машина;
КЛ	– кільцевий лазер;
МВК	– метод вузлової конденсації;
ІВК	– інформаційно-вимірювальний комплекс;
IBC	– інформаційно-вимірювальна система;
HP	– зовнішня рама;
ОКА	– об'ємний скінченно-елементний аналіз;
ОП	 обчислювальний пристрій;
ПЕ	– пружний елемент;
ΠН	– пульт наведення оператора;
ПК	– прицільний комплекс;
ПСТ	– прискорення сили тяжіння;
PO	– рухомий об'єкт;
СК	– система керування;
СПК	– система прямокутних координат;

- СТС складна технічна система;
- ТЦО термічні цикли оброблення;
- ЦДШ цифровий датчик швидкості;
- ЦОСЛ центральна обчислювальна система літака;
- ЄГСПК єдина глобальна система прямокутних координат;
- IBC інформаційно-вимірювальна система;
- (X₁,X₂,...,X_N)=X внутрішні параметри системи, що розглядаються на даному етапі синтезу (чи аналізу) системи;
- Q(X) цільова функція;
- G(X) вектор градієнта;
- СТС складна технічна система;
- ВКФ взаємна кореляційна функція;
- ЧЕ чутливий елемент

ВСТУП

Актуальність теми

Інформаційно-вимірювальна безпека незалежної України великим чином залежить від точності засобів та методів вимірювання механічних величин (широта, довгота, курс, швидкість, прискорення та інші) інерціальних інформаційно-вимірювальних систем (IBC) сучасних рухомих об'єктів (вертольоти, безпілотні літальні апарати, аерокосмічні апарати та інші).

Сучасні рухомі об'єкти мають значно більші швидкості, на них діють значно більші перевантаження та неконтрольовані механічні збурення (удари, вібрації). Тому вимоги до точності засобів та методів вимірювання визначених вище механічних величин IBC стали значно вищими.

Тому забезпечення підвищення точності сучасних інерціальних інформаційно-вимірювальних систем рухомих об'єктів є найважливішою проблемою сучасності, вирішення якої забезпечує інформаційно-вимірювальну безпеку України.

Підвищення точності сучасних ІВС залежить від багатьох факторів.

Першим фактором є створення та дослідження прецизійних систем керування (СК) ІВС РО.

Це обумовлює необхідність розробки теорії та принципів побудови систем керування, елементів і пристроїв інформаційно-вимірювальних систем, що забезпечують: високу точність наведення до 1' (існуючі IBC забезпечують точність наведення більше 3'); високу точність стабілізації лінії візування, похибка яких не більше 20" (існуючі системи стабілізації забезпечують похибку стабілізації більше 60"); можливість роботи в умовах дії дестабілізуючих факторів зовнішнього середовища: широкого спектра високочастотних коливань об'єкта носія – від 5 до 500 Гц (існуючі системи керування забезпечують роботу в діапазоні від 20 до 40 Гц).

Тому актуальною є задача створення та дослідження прецизійних систем керування IBC PO.

Другим фактором є точність визначення кутів підвищення точності системи керування (СК) ІВС шляхом використання нейронних мереж для зменшення інструментальних похибок навігаційних елементів нової ІВС.

Третім фактором є точність визначення кутів початкової наземної виставки навігаційних елементів (акселерометрів, гравіметрів) при зборці IBC. Реальна точність виставки осей чутливості навігаційних елементів у відомих IBC не є достатньо високою (1'). Тому актуальною є задача розробки та дослідження нових методів та засобів попередньої прецизійної автоматизованої виставки навігаційних елементів IBC (до 0,3") ще до юстировки.

Четвертим фактором є необхідність на стадії проектування IBC для забезпечення заданої точності IBC використовувати методи параметричної оптимізації.

Основний зміст запропонованих методів оптимізації IBC полягає у визначенні таких параметрів досліджуваної IBC, при яких значення показників точності параметрів системи будуть найкращими.

Таким чином, задача використання методів оптимізації параметрів IBC є актуальною.

Вирішення визначених вище задач забезпечує вирішення загальної важливої наукової проблеми підвищення точності вимірювання механічних величин (широти, довготи, курсу, швидкості та інших) сучасних IBC рухомих об'єктів.

Тому тема дисертації "Автоматизована приладова інформаційновимірювальна система" є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження і розробки, узагальнені у дисертації, виконувались у рамках науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, які проводились

відповідно до планів НДР між кафедрою приладобудування НТУУ «КПІ» і Міністерством освіти і науки України:

- тема № 2252-Ф, «Теорія та принципи побудови системи вібро- і ударозахисту приладів навігації та орієнтації літальних апаратів» (номер державної реєстрації 0198U001345, 1998р.): здобувачеві належать розділи, в яких виконано приведення системи рівнянь, що описують роботу системи ударо- і віброзахисту до машинного вигляду, зручного для моделювання за допомогою ЕОМ та проведення випробувань макета нової системи ударо- і віброзахисту і обґрунтування можливості її застосування у складі ІВС літального апарат;

- тема № 2433-Ф, «Пошуки шляхів підвищення точності автоматичних кутомірних засобів» (номер державної реєстрації 01000U000894, 2000р.): здобувачеві належить розділи в яких: запропоновано метод калібрування для розробленого у даній роботі автоматизованого вимірювача кута на основі лазерного гіроскопа;

- тема № 2638-ф «Узагальнення і розвиток теорії та експериментальних основ створення гравіметричних засобів вимірювання з динамічним настроюванням» (номер державної реєстрації 0103000237, 2003р.): здобувачеві належить розділ 3 в якому досліджується за допомогою ЕОМ поведінка IBC при впливі на нього збурюючи факторів різного характеру (частоти, амплітуди) і виявлення найбільш небезпечних режимів його роботи;

- тема № 2803-ф «Теорія й принципи побудови сучасного екологічного обчислювального інтегрального діагностичного комплексу із застосуванням нанотехнологій і нейронних мереж» (номер державної реєстрації 0105U001085, 2005р.): здобувачеві належить розділ 3, в якому досліджено вплив параметрів збурень і власних параметрів гірогравіметра на роботу діагностичного комплексу за допомогою ЦОМ;

- тема № Д3/173-2005, «Розробка і дослідження нового динамічнонастроюваного гравіметра для прецизійних навігаційних та гравіметричних

систем» (номер державної реєстрації 0103U000237, 2005р.): здобувачеві належить розділ 2 в якому розроблено математичну модель похибки вимірювання кутів; проведено аналіз складових похибки вимірювань кутів;

- тема № 21 «Дослідження нового динамічно настроюваного гравіметра для прецизійних навігаційних систем» (номер державної реєстрації 0209U002127, 2009р.): здобувачеві належить розділ, в якому проведено аналіз типів чутливих елементів сучасних прецизійних навігаційних систем;

- тема № 25 "Розробка теорії і принципів побудови засобів вимірювання двовимірних механічних величин" (номер державної реєстрації 0109U001873, 2009р.): здобувачеві належать розділи 4 і 5, в яких розглянуто способи моделювання тривимірних випадкових величин та обробки результатів їх сумісного впливу;

- тема №33 "Наукові основи та фундаментальні дослідження приладової системи для вимірювання механічних величин з цифровими відеозображеннями" (номер державної реєстрації 0112U001793, 2012р.): здобувачеві належить розділ 4, в якому викладено основні принципи використання алгоритмічних методів обробки вимірювальної інформації у приладовій системі для визначення механічних величин;

- тема №2411ф "Науково-теоретичні дослідження нової прецизійної інерціальної навігаційної системи в екстремальних умовах з використанням нейронних мереж" (номер державної реєстрації 0111U000714, 2011р.): здобувачеві належить розділ 12, в якому викладено основні принципи використання нейронної мережі у комплексі орієнтації і навігації АГС;

- тема № К`ЗА-83 «Система вібро- та ударозахисту гіростабілізованої платформи» (номер державної реєстрації 0113U005692, 2014р.): здобувачеві належить розділ 2, в якому отримано математичну модель системи;

- тема № К`ЗА-277 «Система вібро- та ударозахисту приладів типу КВГ» (номер державної реєстрації 0114U005347, 2014р.): здобувачеві належить

розділ 2, в якому досліджено взаємний вібраційний вплив чутливих елементів (ЧЕ) один на одного через систему віброзахисту;

- тема К`ЗА-364 «Новий прецизійний чутливий елемент стабілізатора озброєння» (номер державної реєстрації 0115U002089, 2015р.): здобувачеві належить розділ 2, в якому проаналізовано сучасний стан проблеми, наведено функціональну схему, викладено принцип дії нового ЧЕ стабілізатора;

- тема К`ЗА-390 «Дослідження нового прецизійного чутливого елементу стабілізатора озброєння» (номер державної реєстрації 0115U000210, 2015р.): здобувачеві належить розділ 1, в якому проведено моделювання впливу параметрів збурень на роботу ЧЕ стабілізатора;

- тема № К`ЗА-277 «Попередня прецизійна виставка навігаційних чутливих елементів навігаційного комплексу стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки» (номер державної реєстрації 0115U007197, 2015р.): здобувачеві належить розділ 1, в якому забезпечено підвищення точності виставки вимірювальних осей акселерометрів IBC.

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є вирішення важливої наукової проблеми підвищення точності вимірювання механічних величин IBC шляхом використання запропонованих прецизійних нових засобів та методів.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні основні задачі:

1. Проаналізувати результати наукових досліджень і розробок у галузі створення систем керування (СК) бортових інформаційно-вимірювальних систем, що вирішують завдання пошуку і локації об'єктів;

2. Розробити та впровадити методику синтезу та методи удосконалення СК на основі адекватної умовам функціонування математичної моделі об'єкта керування за критеріями заданої точності в умовах дії збурень;

3. Розробити метод дослідження похибок вимірювання кутів виставки чутливих елементів на платформі запропонованим новим вимірювачем кутів

(ВК) з кільцевим лазером, розробити методику ідентифікації параметрів моделі його похибок;

4. Обґрунтувати доцільність використання нейронних мереж для зменшення інструментальних похибок навігаційних елементів IBC;

5. Запропонувати, на стадії проектування прецизійної ІВС для забезпечення заданої точності ІВС використовувати методи параметричної оптимізації.

Об'єкт досліджень дисертації: процес вимірювання механічних величин сучасної інформаційно-вимірювальної системи шляхом використання запропонованих прецизійних засобів та методів.

Предмет досліджень дисертації: запропоновані прецизійні засоби та методи вимірювання механічних величин інформаційно-вимірювальної системи.

Методи досліджень: використано методи електронного моделювання динамічних систем рухомих об'єктів, теорії автоматичного керування та регулювання, теоретичної механіки та прикладної теорії гіроскопів, теорії коливань, цифрового моделювання на ЕОМ, експериментальні, статистичної обробки результатів, аналіз методів інтелектуальних обчислень на основі штучних нейронних мереж, теорії ймовірності, теорії систем та системного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено та досліджено нові методи удосконалення системи керування (СК) інформаційно-вимірювальної системи для вимірювання механічних величин:

- розроблено уточнену математичну модель ГС головного дзеркала (ГД), проведено аналіз динамічних характеристик якої та ідентифікацію її параметрів, що дозволило встановити вплив конструктивних елементів на точність стабілізації та визначити параметри (жорсткості стрічкових передач, жорсткості пружин натягу і сили натягу), при яких додаткові похибки стабілізації при вібраціях будуть значно меншими (амплітуда коливань ГД у діапазоні 20-70 Гц та 150-200 Гц не перевищує 1,4', а на інших частотах не перевищує 40'');

- отримано математичні рівняння поведінки елементів ГС (ричага натяжувателя та інших), формули, алгоритми оцінки амплітуд коливань елементів конструкції СК. Показано, що амплітуда коливань залежить від маси і плеча ричага натяжувателя стрічок, зменшення відстані між віссю ричага та центром маси ричага приводить до зменшення амплітуди в 1,4 рази та зсуву резонансної частоти до 320 Гц;

- отримано формульні оцінки середньоквадратичних похибок, що викликані неточністю кутів візування за курсом (встановлено, що при точності визначення координат 20" максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 5 м або 0,025 % від дальності на відміну од відомих IBC, у яких при точності визначення координат 60" максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 12 м або 0,06 % від дальності), застосовуючи методи та спрощені алгоритми визначення координат об'єктів локації у системі прямокутних координат на підставі багаторазового вимірювання кута візування об'єкта за курсом з рухомого носія;

2. Розроблено та досліджено новий засіб удосконалення системи керування інерціальної інформаційно-вимірювальної системи:

- уперше запропоновано введення у конструкцію опори головки наведення оригінальних сталевих цапф із гумовими втулками, армованими мідними втулками. Це забезпечує експлуатаційний захист СК ІВС за рахунок

зменшення швидкостей удару, амплітуди і часу загасання перехідного процесу при ударі;

3. Розроблено та досліджено новий метод дослідження похибок вимірювання кутів за допомогою нового вимірювача кута з кільцевим лазером. Показано, що цей метод забезпечує попередню наземну прецизійну виставку навігаційних елементів IBC зі значно більшою точністю (0,3"), ніж відомі вимірювачі кута (1');

4. Розроблено та досліджено новий засіб - високоточний автоматизований вимірювач кута (ВК) з кільцевим лазером (патент України) більшої точності (0,3") за рахунок введення у математичну модель ВК додаткових поправок від впливу кутової швидкості обертання Землі, дрейфу масштабного коефіцієнту КЛ, використання методу калібрування та більшої швидкодії за рахунок повної автоматизації вимірювань кутів за допомогою ЕОМ.

5. Запропоновано використовувати апарат нейронних мереж для зменшення інструментальних похибок навігаційних елементів IBC;

6. Запропоновано застосовувати методи параметричної оптимізації для збільшення точності вимірювань механічних параметрів досліджуваної IBC на стадії проектування IBC з наведенням конкретного чисельного прикладу для конкретної інформаційно-вимірювальної системи.

Наукові результати отримані автором особисто і є основою для вирішення поставленої наукової проблеми.

Практичне значення одержаних результатів:

1. На основі структурного та параметричного методів, виконано аналіз базової структури системи керування лінією візування IBC, її основних підсистем та елементів для рішення завдань забезпечення заданих характеристик (точності стабілізації, дальності впізнавання, точності виставки осей чутливості навігаційних елементів) з урахуванням умов функціонування в

нормальних і екстремальних умовах (граничні значення температури, кутових та лінійних вібрації), а саме:

- виконано синтез параметрів елементів і пристроїв IBC при впливі кутових збурень носія, отримано математичні рівняння поведінки головного дзеркала гіростабілізатора та показано, що на певних частотах кутових збурень носія виникає додаткова похибка стабілізації, зменшення якої до необхідної величини можливе шляхом вибору жорсткості стрічкових передач, жорсткості пружин натягу і сили натягу;

- виконано синтез IBC при лінійних збуреннях носія. Отримано математичні рівняння, алгоритм оцінки амплітуди коливань та умов виникнення квазіколивань елементів конструкції IBC. Показано, що амплітуда коливань головного дзеркала залежить від маси важеля натяжувателя і плеча важеля натяжувателя стрічок. Запропоновано замінити матеріал важеля натяжувателя на матеріал зі зменшеною питомою вагою;

- запропоновано введення у конструкцію опори оригінальних сталевих цапф із гумовими втулками, армованими мідними втулками для забезпечення точності та швидкодії роботи IBC за рахунок зменшення швидкостей удару, амплітуди і часу загасання перехідного процесу при ударі;

2. Встановлено експериментально, що похибка стабілізації лінії візування при амплітуді коливання до 1g складає до 20";

3. Запропоновано використовувати нейронні мережі для зменшення інструментальних похибок навігаційних елементів нової ІВС;

 Розроблено метод дослідження похибок вимірювання кутів за допомогою нового вимірювача кута з кільцевим лазером для попередньої наземної виставки навігаційних елементів IBC;

5. Запропоновано на стадії проектування прецизійної ІВС для досягнення необхідної точності визначення навігаційних параметрів використовувати методи параметричної оптимізації.

Результати досліджень дисертації впроваджено у ВАТ "Наукововиробничий комплекс" "Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського", НВК "Фотоприлад" м. Черкаси при дослідженні шляхів покращення тактикотехнічних характеристик існуючих інерціальних ІВС, а також впроваджено у дослідні зразки виробів.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес кафедри метрології та метрологічного забезпечення Одеської державної академії технічного регулювання та якості.

За результатами роботи отримано: 5 патентів України на корисну модель.

Особистий внесок здобувача

Основні теоретичні положення дисертації розроблено разом з науковим консультантом. Дослідження та вирішення конкретних задач, які було наведено вище, належать особисто автору.

У наукових працях, написаних у співавторстві із Безвесільною О.М., Ткаченко С.С., Добржанським О.О., Нечаєм С.О. безпосередньо дисертантові належить наступне:

 у роботах [2; 43; 44; 50] - розроблено методи та спрощені алгоритми визначення координат об'єктів у системі прямокутних координат;

 у роботах [2; 40–41; 45–49] - розроблено методи забезпечення точності систем управління інформаційно-вимірювальнних систем;

– у роботах [1; 121–123; 147; 172–179] - розроблено математичну модель СУВ для захисту IBC, проведено необхідні розрахунки, дослідженно на ЕОМ поведінку нової СУВ при впливі на неї ударних і вібраційних навантажень, виявлено найбільш небезпечні режими її роботи;

– у роботах [180–208] – розроблено методи дослідження похибок вимірювання кутів за допомогою нового вимірювача кута з кільцевим лазером.

– у роботах [3] – проаналізовано відомі методи оптимізації, надано рекомендації щодо доцільності використання параметричної оптимізації з метою забезпечення заданої точності параметрів IBC.

 у матеріалах винаходів і патентів [13-17] ідеї винаходів належать співавторам однаковою мірою.

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень, представлені у дисертації, висвітлено на таких конференціях: МНТК "Прогресивна техніка і технологія" (Севастополь, 2001р.), Международный научно-методичний семинар "Перспективы развития приборостроения" (Славское, 2001 р.), МНТК "Приладобудування" (Київ, 2006 р.), VI наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" (Київ, 2007 р.), III науково – технічна конференція ЖДТУ "Інформаційно – комп'ютерні технології" (Житомир, 2007 р.), XXXII науково –практична міжвузівська конференція присвячена дню університету ЖДТУ (Житомир, 2007 р.), VII МНТК "Приладобудування: стан і перспективи" (Київ, 2008 р.), XXXIII науково – практична міжвузівська конференція присвячена дню університету (Житомир, 2008 р.), МНТК молодых учених, аспирантов и студентов "Прогрессивные направления развития машиноприборостроительных отраслей и транспорта-2008" (Севастополь, 2008 р.), I міжнародна науково-практична конференція. "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2008)" (Київ, НАУ, 2008 р.), Міжвідомча науково-практична конференція «Сучасні проблеми захисту інформації з обмеженим доступом» (Київ, НАУ-НАСБУ, 2008 р.), XXXIV науково практична міжвузівська конференція присвячена дню університету (Житомир, 2009 р.), VII наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей (Київ, 2009 р.), II міжнародна науковопрактична конференція "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2009)" (Київ, НАУ, 2009 р.), міжнародна науково-технічна конференція

"Автоматизация: проблемы, идеи, решения (АПИР) 2009" (Севастополь, СНТУ, 2009 р.), МНТК "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами" (Київ, НУХТ, 2009 р.), V МНТК "Інформаційно-комп'ютерні технології 2010" (Житомир, ЖДТУ, 2010 р.), МНТК "Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення" (Севастополь, СНТУ, 2010 р.), VI НПК "Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні" (Київ, НТУУ «КПІ», 2010 р.), 4 МНТК "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2011)" (Київ, НАУ. 2011), XXXVI НПМК, присвяченої Дню науки, (Житомир, ЖДТУ, 2011), Перша НК "Теоретичні та прикладні аспекти розвитку нових автоматизованих технологій і дослідження матеріалів" ТНТУ імені Івана Пулюя (факультету комп'ютерних технологій), (Тернопіль, 2011), НТК «Современные технологии в системах управления и вооружении» посвященная 60-летию высшего образования в городе Коврове, (Россия, Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. ДЕГТЯРЕВА, 2012р., Всеукраїнська наукова Інтернетконференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (Тернопіль: Тайп, 2014р.), Всеукраїнської науковопрактичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої дню науки. (Житомир, ЖДТУ. 2014.), Х НПК "Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні" (Київ, НТУУ «КПІ», 2014.), VII міжнародна науково-практична конференція "Якість технологій - якість життя" Перемишль) №1/4, 2014, наукових семінарах кафедри (Польща, м. приладобудування НТУУ "КПІ" (Київ, 2008-2015 рр.).

Впроваджено наступні результати роботи:

1. Математична модель й алгоритми розрахунку координат об'єктів пошуку в системі прямокутних координат при багаторазовому візуванні кута за курсом об'єкта пошуку на обраній базі локації й алгоритм оцінки

середньоквадратичної помилки для визначення точності локації й класу точності датчиків вимірювання кутів візування системи керування IBC.

2. Математична модель впливу елементів системи стабілізації (головного дзеркала, важеля натяжувателя, гіростабілізатора) на похибку IBC; алгоритм оцінки амплітуди коливань й умови виникнення квазіколивань елементів конструкції СК.

3. Математична модель поведінки головного дзеркала гіростабілізатора.

4. Математична модель опори гіростабілізованого головного дзеркала за курсом і тангажем з врахуванням істотних нелінійностей у з'єднаннях, міцності елементів конструкції (в умовах вібрацій і ударних навантажень), що дозволила вибрати структуру, елементи й з'єднання, що забезпечили довгострокову експлуатацію без геометричної деформації робочих поверхонь опори.

Публікації

Основні результати дисертації опубліковані в 99 наукових праць, із них 4 монографії, 10 статей у закордонних фахових журналах, 1 стаття у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 45 статей у наукових фахових журналах, що входять до переліку ВАК України, 34 публікацій у матеріалах і тезах конференцій, 5 патенти України на винаходи; ряді наукових статей у науково-технічних виданнях, ряді звітів по науководослідним і дослідно конструкторським роботам.

Структура дисертації:

Дисертація складається із вступу, 6 розділів, висновків, додатків і містить 351 сторінок друкованого тексту, 79 рисунків, 32 таблиці, 5 додатків і список використаних літературних джерел, що нараховує 302 найменуваня.

У першому розділі проведено аналітичний огляд робіт в області існуючих систем керування інерціальних інформаційно-вимірювальних систем,

аргументовано актуальність розв'язуваної науково-технічної проблеми та сформульовано задачі даної дисертації.

У другому розділі розроблено методи та спрощені алгоритми визначення координат об'єктів у системі прямокутних координат (СПК) на основі вимірювання кутів візування об'єкта пошуку за курсом з рухомого носія, з траєкторією руху, що забезпечує багаторазове візування об'єкта. Розроблено та досліджено базові структури системи керування ПК і функціональні кінематичні схеми елементів, пристроїв, що входять до їх складу.

У третьому розділі проведено оцінку середньоквадратичних похибок візування, викликаних похибками датчиків кута системи керування IBC, і визначено вимоги до точності вимірювання датчиків кута. Визначено режими роботи систем керування IBC і вироблені вимоги до показників якості системи керування для кожного з режимів роботи, до основних елементів і пристроів.

У четвертому розділі розроблено методику проведення експериментальних досліджень гіростабілізованої головки СК ІВС і підтверджено теоретичні розробоки, зроблених в розділах 1 та 2.

У п'ятому розділі запропоновано використовувати нейронні мережі для зменшення інструментальних похибок нової IBC та інших навігаційних елементів системи.

У пятому розділі розроблено програму обробки результатів експериментів по дослідженню похибки нового вимірювача кута; розглянуто деякі перспективні засоби для високоточних вимірювань кутів.

У **шостому розділі** запропоновано на стадії проектування прецизійної ІВС для забезпечення необхідної точності визначення інформаційновимірювальних параметрів ІВС використовувати методи параметричної та структурної оптимізації.

У загальних висновках сформульовано основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, що представлені у дисертації.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ У ГАЛУЗІ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Прискорення пошуку та визначення координат рухомих об'єктів в екстремальних умовах, пов'язаних з лісовими пожежами, гірськими зсувами та обвалами, весняними паводками, аваріями на АЕС, наслідками терористичних актів; проведення геологічної розвідки при розробленні кадастру Землі; спостереження за наземними, повітряними та надводними просторами; уточнення та розроблені сучасних морських і річкових навігаційних карт вимагають створення бортових систем навігації та керування рухом; створення систем спостереження за наземними, повітряними та надводними просторами із застосуванням навігаційних систем, встановлених на рухомих об'єктахносіях (вертольотах, літаках, наземних рухомих засобах, річкових і морських кораблях).

Одним із сучасних напрямків побудови навігаційних систем літальних апаратів 5-го покоління є застосування у складі IBC високочутливих оптикоелектронних приладів зі стабілізованим полем зору, що забезпечують цілодобове виконання завдань. Існуючі оптико-електронні прилади навігаційних систем мають невеликі дальності виявлення та локації об'єктів пошуку, у результаті недостатньої точності, малого діапазону керуючих швидкостей, недостатньої завадостійкості та надійності. Вони не можуть бути використані в сучасних навігаційних системах рухомих об'єктів.

Усі ці причини обумовлюють необхідність розроблення теорії та принципів побудови систем керування, елементів і пристроїв навігаційних систем, що забезпечують: високу точність наведення до 1' (існуючі IBC забезпечують точність наведення не більше 3'); високу точність стабілізації лінії візування, похибка яких не більше 20'' (існуючі системи стабілізації забезпечують похибку стабілізації 60''); можливість роботи в умовах дії

дестабілізуючих факторів зовнішнього середовища: широкого спектра високочастотних коливань об'єкта носія — від 5 до 500 Гц (існуючі системи керування забезпечують роботу в діапазоні від 20 до 40 Гц).

У зв'язку із цим, мета даного розділу: аналітичний огляд робіт в області існуючих систем керування інерціальних навігаційних систем, аргументовано актуальність розв'язуваної науково-технічної проблеми та сформульовано задачі даної дисертації.

1.1. Аналітичний огляд робіт у галузі засобів та методів вимірювання механічних величин навігаційних систем

На керовані чутливі елементи навігаційних систем, розташовані на рухомому об'єкті (РО), діють зовнішні механічні збурення по трьом осям, спричинені динамікою РО, вібраціями приводних механізмів носія, впливами вітру, дисбалансом рухомих частин.

Завдання керування вирішуються шляхом створення теорії систем наведення та - систем стабілізації. Теорія проектування програмних систем наведення розроблена видатними вченими: Бабаевим А.А., Бесекерским В.А., Булгаковим Б.А. [24; 27-30; 32]; теорія лінійних і нелінійних систем наведення розроблена Костюком В.И., Вороновим А.А., Солодовниковим B.B., Чемодановим Б.К., Лакотой Н.А. [35; 63; 74; 79], теорія цифрових слідкуючих приводів розроблена Бесекерским В.А., Федоровим С.М., [28; 34]; теорія гіроскопічних систем стабілізації розроблена Павловським М.А., Пельпором Д.З., Одинцовим А.А., Самотокіним Б.Б., Бубликом Г.Ф., Збруцьким О.В., Рижковим Л.М., Безвесільною О.М., Бондарем П.М., Граммером Р., Ривкіним С.С., Ройтенбергом Я.Н., Фабрикантом Е.А., Сайдовим П.І. [7-8; 25; 33; 36-37; 50-51; 60-62; 65-67; 69; 70; 72-75; 77], теорія оптимальних систем керування -Беллманом Р., Болтянским В.Г., Гостьовим В.І., Єськовим Д.І. та інші [26; 31; 36; 39; 80].

Видатні досягнення у галузі розроблення та дослідженя IBC мають наукові школи Росії м. Москва, м. Санкт-Петербург та України м. Київ.

Кращими у галузі створення елементів і систем керування інерціальними навігаційними системами рухомих об'єктів є наступні основні організації у Росії: ЦКБ Красногорского механічного заводу (виріб 9С475 для об'єкта МІ-24), Новосибірське оптичне об'єднання ім. Леніна (виріб «Иртиш» для об'єкта Т-80) та в Україні: НВК "Фотоприлад", м. Черкаси, ВАТ "Наукововиробничий комплекс" "Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського".

За кордоном розробленням навігаційних систем із застосуванням оптичних електронних систем займаються фірми США, Франції, Великобританії, Німеччини, Швеції, Японії, такі, як International Laser Systems, США (Notth-hrop, Aeronitronix Ford), Sounder Associates, CBS Zabs, Perhin-Elmer, Resalab, Martin-Marietta, Rochwell-International, RCA, Texas Instruments, Naval Air Development, IBM, Filco-Ford, Thomson CSF, Хьюз, Белл та інш.

Завдання стабілізації лінії візування виконується або стабілізацією всієї IBC [24; 39; 54; 56; 66; 67], або - стабілізацією її чутливого елемента [30; 32; 34; 38; 39; 69; 70; 77; 82-99].

Перший напрямок вимагає вибору металоємних конструкцій і високоточних приводів великої потужності, високоточних гіроскопічних платформ і часто застосовується при створенні IBC спостережних і прицільних комплексів з встановленням їх на стабілізовану платформу.

Другий напрямок більш поширений. Він пов'язаний з побудовою систем керування і по різному виконується: зі стабілізацією головного дзеркала, оптичної призми, рівнобіжних плоско-паралельних пластин, оптичних клинів. В основу цього напрямку покладено принцип прямої стабілізації за допомогою гіростабілізатора вздовж кожної осі та пов'язаного з ним чутливого елемента (головного дзеркала) [19; 60-62; 65] (рис. 1.1).

Побудувати гіростабілізатор можна за однією з наступних схем: з безпосередньою стабілізацією; із силовою або індикаторною стабілізацією

(рис. 1.2). Конструктивно гіростабілізатор може виконуватись на 3ступеневому гіроскопі, на 2-ступеневому гіроскопах, на спарених гіроскопах.



Рис. 1.1. Системи керування навігаційної системи або навігаційного комплексу



Рис. 1.2. Схема побудови гіростабілізаторів

Аналіз відомих джерел [66; 77; 82-99] показує, що най ефективнішим методом стабілізації чутливого елемента (головного дзеркала або призми) є схема, показана на рис. 1.3, що є схемою силового гіростабілізатора на 2ступеневих гіроскопах [87].



Рис. 1.3. Стабілізація поля зору ІВС за допомогою головного дзеркала

Головне дзеркало (ГД) *1* встановлене на осі обертання під кутом 45° до лінії візування та розміщене у зовнішній рамі *2* гіроплатформи. Гіростабілізатор (ГС) *4* розміщений у цій рамі. На осі ГС встановлено шків. Для узгодження кута повороту механічної та оптичної систем передатне відношення шківів ГС і ГД дорівнює 1:2. Поворот ГД здійснюється за допомогою стрічкової передачі *3*. Зовнішня рама ГС розміщується на одному або двох підшипниках і забезпечує поворот ГД у горизонтальній площині (за курсом).

Відома також схема побудови ГС із застосуванням безлюфтового передавання руху від ГС до ГД [83] (рис. 1.4). У цій схемі для передачі руху по тангажу застосовані два сектори *1* та *2*, які – передають рух від гіроскопа *4* через сектор *2*, колеса *3* на сектор *1* і головне дзеркало *5*. Кінематичний зв'язок

з дзеркалом, (див. рис. 1.4) забезпечується за допомогою встановлення на сектор *1* колеса *2*, металевих стрічок *3* та *4*, виконаних за схемою на рис. 1.5. Для зменшення впливу інерції головного дзеркала на динаміку системи запропоновано компенсатори інерції ГД шляхом встановлення додаткових інерційних вантажів. Така передача виключає люфт і підвищує жорсткість конструкції, але може стати джерелом коливань при наявності вібраційних збурень, елементів IBC. Схеми із силовою стабілізацією поля зору застосовуються для невеликих дзеркал ГД, що мають малі моменти інерції, в основному для одноканальних оптичних систем.



Рис. 1.4. Схема передачі руху від гіроскопа до дзеркала без люфту: 1, 2 – робочі сектора, 3 – колесо, 4 – гіроскоп, 5 – головне дзеркало

Площа головного дзеркала системи наведення та стабілізації багатоканальних IBC (включаючи канал денного бачення, канал нічного бачення, канал дальнометрірування, пеленгаційний канал, канал реєстрації дій оператора) у два-три рази більша, що спричинює значне збільшення маси та моментів інерції рухомої конструкції СК.

Основною системою стабілізації та наведення в цьому випадку є схема рис. 1.5 із застосуванням триступеневого гіроскопа та слідкуючих двигунів

рамок, які є виконавчими елементами високоточних приводів по кожній рамці [94, 95]. Принцип функціонування СК ІВС полягає у наступному. Гіроскоп 1 розміщений у внутрішній рамці 2, а за допомогою осей 4, 5 він також розміщується у зовнішній рамці 1. Головне дзеркало 6 за допомогою осі 7 також розміщене в зовнішній рамі 3. Передавання руху від гіроскопа 1 до ГД 6 здійснюється за допомогою шківів (важелів) 8 та 9 і стрічкової передачі. Передавальне відношення останньої приймається 1:2, що необхідно для узгодження кутів повороту механічної системи (гіроскопа) і оптичної системи (кута відбиття променя від головного дзеркала). У конструкцію приладу додатково введені слідкуючі рамки, 10 та 11. За допомогою цих рамок можливе переміщення внутрішньої та зовнішньої рамки відносно внутрішньої рами або корпусу приладу за допомогою двигунів 13 та 14. Для забезпечення вимірювання кутів неузгодженості внутрішніх елементів і зовнішніх введені потенціометри 15 та 18. Додатково на кожній слідкуючій рамці встановлені моментні двигуни 18, 19 і датчики кута 21, 22. Сигнали від датчиків кута 21, 22 надходять через підсилювачі 23, 24 на двигуни слідкуючих рамок 13, 14. Під час подачвання сигналів керування в пристрій керування 20 спрацьовують граничні пристрої 25, 26 і сигнал через підсилювачі 23, 24 забезпечує наведення слідкуючих рамок у потрібному напрямку. Після зняття сигналів керування граничні пристрої підключають моментні двигуни, які забезпечують підслідковування рамок за гіроскопом у двох площинах. Роль слідкуючих рамок полягає в ліквідації тертя по осях керування та створення більших кутів огляду. Положення цих слідкуючих рамок забезпечується за допомогою моментних систем. Запропонована система керування дає змогу переміщати головне дзеркало з малою швидкістю – кілька кутових хвилин у секунду і з великою швидкістю – кілька десятків градусів у секунду. Можливе спільне використання двох приладів – один у льотчика, другий – в оператора. Даний пристрій дозволяє пілотові та операторові, перебуваючи нерухомо перед приладом спостереження, спостерігати обрій у діапазоні до 360°.



Рис. 1.5. Функціональна схема системи керування ІВС



Рис. 1.6. Схема кінематична вузла передачі руху: 1 – сектор, 2 – паразитне колесо, 3,4 – металеві стрічки

Розглянута схема системи стабілізації ГД забезпечує стабілізацію великих дзеркал, конструктивно складна, схильна до значних відхилень (уводов) при відсутності керуючих сигналів і має більші помилки стабілізації при включенні та вимиканні приводів слідкуючих рамок.

Двоосний оптичний шарнір може бути реалізований за допомогою двох призм A и B (рис. 1.7, а), або двох дзеркал 2 та 3 (рис. 1.7, б), з'єднаних із внутрішньою або зовнішньою рамкою [85]. Лінія візування, відбиваючись від граней дзеркал (призм) 2 та 3, змінює напрямок на перпендикулярний і може бути виведена вертикально вниз або нагору. Пристрій забезпечує щодо вертикальної осі повний панорамний огляд, а щодо горизонтальної осі – кути прокачки – $\pm 45^{\circ}$. Зі збільшенням кута повороту навколо вертикальної осі в окулярі повертатиметься зображення. Для усунення цього явища пропонується між дзеркалом і перехрестям встановлювати призму Валластона, що обертається, або призму Пехана та електропривод для повороту цієї призми.



Рис. 1.7. Схеми пристроїв стабілізації лінії візування:

1 – гіроскоп, 2, 3 – призми, 4 – зовнішня рамка, 5 – корпус, б – внутрішня рамка, 7 – перехрестя у фокальній площині оптичної системи,
8, 9, 10 – лінії візування, 11 – дзеркало

Двовіснний оптичний шарнір застосовується для забезпечення просторового візування з великими кутами керування лінією візування (рис. 1.8). Він виконаний за допомогою двох просторово розміщених дзеркал *1* (курсу) і *2* (тангажа). Стабілізація кожного дзеркала здійснюється своїм приводом (на рис. 1.8 не показано).



Рис. 1.8. Схема стабілізації ліній візування за допомогою двоосного оптичного шарніра

При необхідності розроблення головки IBC малих розмірів, керування може здійснюватися від зовнішнього прецизійного гіроскопа (рис. 1.9) [97].

Електропривід побудований на високоточних датчиках кута 10, 12; синхронного зв'язку 13, 15; датчиках моменту 7, 8; підсилювачах 14, 16 і дозволяє передати керуючі сигнали за курсом і тангажем від прецизійного гіроскопа 9 на стабілізуючий гіроскоп 1 і через важелі 3, 4 на головне дзеркало 2. Системам стабілізації та наведення, побудованим на одному гіроскопі, властиві більші швидкості відведення. У патенті [88] запропоновано два гіроскопи, один із яких забезпечує стабілізацію головного дзеркала, а інший – компенсацію похибок, обумовлених зоною нечутливості, що властива для рухомих з'єднаннь у вигляді люфту в моментних двигунах або у вигляді зони нечутливості механічної характеристики при малих сигналах керування.



Рис. 1.9. Схема керування дзеркалом від прецизійного гіроскопа

Для зменшення похибок – на гіроскопічну платформу встановлено два спарених гіроскопи *6*, *7* (рис. 1.10), вектори гіроскопічних моментів H₁ i H₂ спрямовані паралельно та зустрічно. Головне дзеркало *4* розміщене в зовнішній рамі і його рух за тангажем забезпечується за допомогою стрічкової передачі *5*.

Стабілізація лінії візування здійснюється за допомогою приводів стабілізації (розвантаження), які включають датчики 10, 11, підсилювачі 18, 19 моментні датчики 14, 15. Наведення здійснюється оператором за допомогою пульта наведення 20. Сигнали керування надходять на підсилювачі 21, 22 і датчики моменту 12, 13.



Рис. 1.10. Функціонально-кінематична схема системи керування IBC на двох спарених гіроскопах

Різновидом схеми керування лінією візування IBC із застосуванням головного дзеркала є схема на рис. 1.11. Гіроплатформа 1 встановлена в рамі, що обертається за курсом. Головне дзеркало 4 розташоване у рамці, що обертається за тангажем. Як стабілізуючий пристрій, застосовуються два спарених гіроскопи 2 та 3, кожний з яких містить двигун наведення 4 та 4_1 , гіромотор 5 та 5_1 , датчики кута прецесії 6 та 6_1 . Переміщення напрямку векторів кінетичних моментів гіроскопів H₁ і H₂ здійснюється за рахунок подачі напруги з пульта наведення 7 через підсилювальні пристрої 8 та 8_1 на двигуни наведення 4 та 4_1 . Відмінністю даного кінематичного рішення є

необхідність введення двох стрічкових передач і двох секторів для передачі руху від гіроплатформи до головного дзеркала. Не зважаючи на деяку складність конструктивного рішення, дана схема добре себе зарекомендувала на практиці.

Схеми СК (див. рис. 1.10 і рис. 1.11) добре зарекомендували себе в експлуатації та можуть бути взяті за аналоги при побудові системи керування IBC. На базі даної структури системи керування розроблена апаратура керування 9С475, що розміщується на російських вертольотах МІ-24У и К-252 ТБ (морський варіант) і вертольоті МІ-8. Система керування забезпечує керування на кутах візування за курсом ±60° і за тангажем від +15 до -20°, зі швидкостями наведення: максимальною – 2,5 °/с, мінімальною – 0,07 °/с и с помилкою стабілізації 0,2 мл.рад.



Рис. 1.11. Кінематична схема системи керування головним дзеркалом із двома стрічками та двома секторами
Маса оптичного приладу з урахуванням електроблоків дорівнює 170 кг.

У патенті Великобританії [82] йдеться про головне дзеркало, стабілізоване обертовою масою з одним рухомим відбивачем (рис. 1.12, а) або про два дзеркала, стабілізованих кожне своєю обертальною масою (рис. 1.12, б). Дзеркала закріплюються на зовнішній рамці обертальної маси. Зв'язок дзеркала з іншою віссю обертальної маси – стрічковий.



Рис. 1.12. Структурна схема СК оптичного приладу IBC

а) – з одним рухомим дзеркалом; б) – із двома рухомими дзеркалами:

- 1 дзеркало, 2 вісь обертання дзеркала, 3 вал, 4 опора, 5 обертальна маса, 6 – зв'язок між обертальною масою та дзеркалом, 7 – основа,
- 9 оптична система із приймачем, 10 друге дзеркало, 11 вісь повороту дзеркала 10

Даний винахід рекомендується застосовувати для стабілізації лінії візування оптичної або телевізійної апаратури, він може встановлюватися на літаках, наземних рухомих об'єктах, судах, космічних кораблях – там, де потрібне безперервне спостереження за об'єктами. Коли основа 7, на якій змонтована оптична система з передавальною телевізійною камерою 9, робить кутові рухи, спричинені коливаннями носія або з інших причин, навколо горизонтальної осі, перпендикулярної до оптичної траєкторії, маса 5

обертається внаслідок швидкого обертання тіла, зберігаючи вісь обертання незмінною у просторі. Дзеркало *1* під дією компенсуючого обертального моменту, робить кутові рухи щодо основи 7. Таким чином, лінія візування системи, спрямована на об'єкт пошуку, залишається практично не відхиленою. Ступінь обертання маси 5 і дзеркала *1* залежить від коефіцієнта передавання зв'язку *6* і моментів інерції маси 5 і дзеркала *1*.

Замість дзеркал можна застосовувати оптичні призми, що працюють як дзеркала. Для збільшення кута візування за обрієм до 360° у патенті [83] запропоновано панорамну схему оптичного приладу (рис. 1.13). Дзеркало з'єднане з гіроскопом за допомогою металевих стрічок, шківів, зубчастої передачі або моментного електроприводу для наведення візирного променя за кутом місця об'єкта спостереження. Регулювання положення гіроскопа та оптичного променя за азимутом здійснюється разом з ковпаком, що обертається щодо корпусу оптичного приладу. На рис. 1.13 позначено: 1 – гіроскоп; 2 – плоске дзеркало; 3,5 – ковпаки; 4 – поворотна призма Пехана; 6 – дзеркальна трубка Галілея, призматична зорова труба; 8 – пристрій Наведення стабілізація головного формування сітки. та дзеркала 2 здійснюється керованим гіроскопом 1, що витримує напрямок візування незмінним при відсутності сигналу наведення та забезпечує наведення лінії візування шляхом повороту дзеркала як за обрієм, так і у вертикальній площині (за тангажем). Наявність другого ковпака 5 захищає прилад від зовнішніх впливів: пилу, бруду, вітрових та інших навантажень, однак вимагає введення додаткового слідкуючого електропривода. В наслідок більших кутів повороту візирної осі в окулярі відбувається поворот зображення. Для компенсації цього розвороту слід в оптичну схему приладу вводити призму Пехана, поворот якої необхідно узгодити з поворотом ковпака 3 за допомогою додаткового електроприводу. До даного електропривода ставляться вимоги щодо точності та діапазону забезпечення швидкостей наведення.



Рис. 1.13. Стабілізований пристрій панорамного бачення

Відомі у літературі електроприводи [90] забезпечують похибку не менш 3'. Запропоновано пристрій, розроблений фірмою СФИМ (Франція), за назвою APX M397 і встановлений на вертольоті Во.105 (РАН-1) «Газель» [95] (рис. 1.14). Система APX M397 забезпечує зону огляду за азимутом ±120°, за курсом місця від +28° до -24°; оптична система має кратність збільшення Γ =3,2* і Γ =10,6*.

Швецька фірма «Сааб-Сканія» для французького розвідувального вертольота «Газель» розробила подібну оптичну систему за назвою «Геліос». Оптична система має два режими для перемикання кратності: Г=3* і Г=10*. Кутова швидкість повороту оглядової головки за азимутом становить 100 °/с. Оптична система може містити лазерний дальномір або лазерний покажчик цілі, що розширює навігаційні можливості рухомого об'єкта.



Рис. 1.14. Вертоліт Во.105 (РАН-1) «Газель» з чутливим оптичним навігаційним комплексом АРХ М397

Фірма «Фераніті» запропонувала конкурсний варіант: подібну оптичну систему AF 532 і систему для розміщення над кабіною вертольота. Кратність оптичного збільшення сктановить $\Gamma=10^*$. Кут повороту лінії візування за азимутом дорівнює ±120°, і за кутом місця ±30°.

Ураховуючи можливість вертольотів літати на дуже малих висотах і пристосовуватися до умов місцевості, що підвищує надійність застосування вертольотів у складних умовах, ряд фірм запропонував розміщувати навігаційні комплекси над втулкою вертольота. Фірма «Хьюз» для вертольота 500MD розробила над втулковий навігаційний комплекс MMS, що включає низькорівневу телевізійну систему та лазерний дальномір (рис. 1.15, а) [97]. Система додатково може комплектуватися Іч-системою. Виходячи з заявлених характеристик, оптичний електронний прилад навігаційного комплексу має оптичну систему з перемикальною кратністю $\Gamma=3^*$ і $\Gamma=10^*$; стабілізовану турель (платформу), з можливістю наведення за азимутом ±110° і за кутом місця ±30°. Точність стабілізації, виходячи з дальності виявлення об'єктів пошуку (2000–3000) м, становить не вище (1–1,5)'.



Рис. 1.15. Навігаційна система (комплекс) MMS, розміщений над втулкою вертольота Хьюз MD

Фірмою «Мартін-Марієтта» для цього ж вертольота розроблено надвтулковий навігаційний комплекс із оптичним електронним приладом. Він включає низькорівневу телевізійну передавальну камеру із системою автосупроводження та лазерним дальноміром-цілепокажчиком (рис. 1.15, б). На цьому комплексі збільшено кути наведення за азимутом до ±160°, зменшено кути місця до ±10°, збільшено кількість перемикань кратності оптичної системи: $\Gamma=2,5^*$, 10^{*}, 14^{*} та 20^{*}, що дало можливість виявляти об'єкти розміром 3x3 м на дальності до 5000 м. З цього випливає, що помилка стабілізації лінії візування зменшена до (20-30)". Навігаційний комплекс конструктивно виконаний у вигляді двох блоків: над втулковий блок і блок, кабіні вертольота. Для розмішений V розширення функціональних можливостей вертольота вночі фірма «Мартін-Марієтта» планувала доповнити навігаційний комплекс Іч-системою.

Фірмою СФИМ для вертольота «Жираф» (базовий вертоліт В. 105) розроблена надвтулкова прицільно-оглядова система «Офелія». Система «Офелія» встановлюється на гіростабілізованій платформі PGS 600 і має два

ступені вільності. Вона являє собою подальший розвиток системи «Венюс» і включає Іч-систему «Каліпсо» фірми ТRT, Тв-систему та лазерний далекомір фірми Силас. Іч-система працює в діапазоні 8-13 мкм і забезпечує роздільну здатність 0,12 мрад та 0,45 мрад. Тв-система має поле зору 0,75°, і працює в діапазоні 0,5-0,9 мкм, тобто в денному та ближньому червоному спектрі. Капсула являє собою кулю діаметром 600 мм і розміщається над втулкою вертольота. Маса надвтулкового блоку дорівнює 122 кг, маса блоку системи в кабіні – 70 кг. Гіроплатформа забезпечує огляд за азимутом $\pm 120^\circ$, а за кутом місця від -30° до $\pm 20^\circ$, рис. 1.16.

Фірма «Макдоннел Дуглас Астронотікс» розробила для розвідувального вертольота Белл 406 стабілізовану оглядово-прицільну систему АНІР, рис. 1.17. Система включає денний приціл 3, лазерний дальномір-цілепокажчик 1, систему підсвічування оптичної системи 6, автоколіматор 2, нічний приціл 5, теплообмінник 8, механізм автоматичної зміни кратності об'єктива оптичної системи 4, телескопічну опору 7.



Рис. 1.16. Надвтулковий НК, що встановлюється на вертольоті В-105

Фірма СФИМ розробила оглядово-прицільну систему нічного бачення «Венус» для вертольота Sa.368 [96]. Він включає Іч-датчик, що працює в далекому Іч–діапазоні спектра, які встановлені на гіростабілізованій платформі. Вся апаратура розміщена у середині сфери діаметром 600 мм.



Mast Mounted Sight

Рис. 1.17. Оглядово-прицільна система ІВС для вертольота Белл 406

Телевізійна камера відділена від основної системи. Окремо встановлена ширококутна Іч–система, що дає змогу попередньо виявляти більші об'єкти до перемикання на Іч-датчик з вузьким полем зору. Це забезпечує розпізнавання об'єктів. Передбачається, що надалі ця система доопрацьовуватиметься для використання в надвтулковому варіанті. Іч-система призначена для виявлення об'єктів, має широке поле зору (11,4х5,7)° та вузьке поле зору (2,7х1,35)°. ІКсистема для виявлення об'єктів має широке поле зору ±4° і вузьке поле ±0,5°. Платформа забезпечує наведення візирного променя за азимутом на ±110° і за кутом місця від -30° до +20°. Дальність виявлення об'єктів 4000 м, розпізнавання – 2000 м. Виходячи із цих характеристик, помилка стабілізації перевищує 1'. Дані про діапазон швидкостей наведення відсутні.

Фірма «Хьюз» розробила оглядово-прицільну систему XM 65 (рис. 1.18) [98]. Він включає гіростабілізований телескопічний приціл з оптичним збільшенням $\Gamma^{*}=2,6^{*}$, полем зору 30°, і забезпечує наведення лінії візування за азимутом на кутах $\pm 110^{\circ}$ і за тангажем від $\pm 30^{\circ}$ до -60° . Швидкість перекидання головки приладу, розміщеного в носовій частині вертольота, становить 100 °/с. Максимальна швидкість наведення лінії візування не перевищує 3 °/с. Точність спостереження в режимі зависання (при мінімальних вібраціях) становить 0,07 мрад. Канал розпізнавання об'єктів має поле зору 4,6° і збільшення Г=12,6*. Конструктивно система XM 65 має два оптичних вікна. У лівій частині системи розміщена оптика візуального каналу та канал Ічпеленгатор. У правій частині оглядово-прицільної IBC розташовані лазерні далекомір і цілепокажчик. Телескопічна оглядово-прицільна станція може працювати з нашоломним прицілом. Електронна частина приладу розміщена в електронних блоках. Модифікація цієї станції в надвтулковому варіанті Великобританії «Lynx». виконана для вертольота Для розширення функціональних можливостей у цій модифікації розширені кути у вертикальній площині від +60° до -30°.



Рис. 1.18. Оглядово-прицільна IBC XM 65

Для важких армійських вертольотів (АН-64 та інші) американські фірми Martin-Marietta та Nort-hrop розробили IBC із оглядово-прицільною системою TADS/PNVS (рис. 1.19). Система TADS – призначена для виявлення, захоплення та цілеуказання об'єктів у денних умовах бачення 1; PNVS- ПК блок 3, що вирішує навігаційні завдання в нічних умовах на невеликій висоті пілотування. Обидві системи встановлені в тунельних носових турелях. Відео індикатори встановлені у кожного члена екіпажа. Система TADS включає оптичну, Тв, Іч- і лазерну дальнометричну системи. Система PNVS призначена вирішення завдань у нічних умовах, а також завданнь навігації для (пілотування та виявлення об'єктів), при відсутності підсвічування об'єктів місячним світлом. Іч-система розташована на гіростабілізованій поворотній платформі. Для забезпечення керування лінією візування обидві системи розміщені В центральному кардановому підвісі 2. Основні технічні характеристики системи TADS/PNVS наведені в таблиці 1.1. Виходячи із заявленої дальності дії системи, помилка системи стабілізації не перевищує (50-60)".



Рис. 1.19. Оглядово-прицільна система TADS/PNVS для вертольота АН-64

Таблиця 1.1

№ п/п	Характеристика	TADS	TADS
1	Кут огляду, град		
	- за азимутом	±110	±90
	- за кутом місця	+30-60	+20-45
2	Поле зору, град		
	для телевізійної системи:		
	- вузька	0,9	-
	- широка	4,0	—
	для оптичної системи:		
	- вузька	4,0* (16*)	_
	- широка	18,0* (3,5*)	-
3	Іч-система, град		
	- вузька	3,1	—
	- середня	10,1	30x40
	- широка	50	_
4	Maca, кг	250	_
5	Дальність дії, км		
	- виявлення	5–6	2,5
	- розпізнавання	2,5	_
6	Робоча освітленість, лк.	10 ⁻⁴ при нічному	При відсутності
		небі, затягнутому хмарами	місячного світла

Порівняльні характеристики систем TADS/PNVS

Розвязання навігаційних завдань рухомими об'єктами у нічних умовах виконується двома шляхами.

Перший шлях полягає в застосуванні оптико-електронних перетворювачів з високим коефіцієнтом підсилення та працюючих у діапазоні спектра 0,6–0,9 мкм.

Другий напрямок пов'язаний зі створенням тепловізійних систем, які основані на застосуванні теплових приймачів, що працюють у діапазоні 8– 14 мкм, тобто в тепловому діапазоні. Освітленість об'єктів світлом зірок або відбитим місячним світлом низька та вимагає використовувати оптичні елементи більших діаметрів – 160–200 мм, що спричинює застосовування стабілізуючих елементів (дзеркала, призми) у кілька разів більших розмірів, ніж для систем денного бачення (денних приладів). Тепловізійні системи, через роботу в спектральному діапазоні 8–14 мкм, складно стикуються з денними системами, що працюють у спектральному діапазоні 0,4–0,7 мкм. У природі відсутні оптичні матеріали, що добре пропускають світло в такому широкому спектральному діапазоні. Штучно створені керамічні матеріали добре пропускають теплове випромінювання, але погано пропускають спектр видимого випромінювання.

Це змушує розроблювачів приладів проектувати оптичні прилади навігаційних систем у вигляді двох роздільних приладів. Так фірми «Мартін-Марієтта» та СФИМ розробили навігаційні оптичні системи у вигляді двох роздільних систем TADS/PNVS та «Венюс». Розділення систем IBC на ранньому етапі конструювання дало змогу розмістити частини системи в різних частинах носія, включаючи носову частину фюзеляжу, бокові ніші фюзеляжу, над кабіною та над втулкою несучих гвинтів вертольота.

Завдяки аналізу вітчизняних і закордонних джерел побудови навігаційних систем, простежується тенденція збільшення дальності виявлення та розпізнавання об'єктів удень на дальності 5000–20000 м (існуючі комплекси

забезпечують 3000-5000 м) і уночі — до 5000-8000 м (існуючі комплекси забезпечують — 1500-2500 м), як на земній поверхні, так і у повітрі. Це вимагає значного підвищення технічних характеристик IBC: помилка наведення не більше 1' (помилка існуючих СК IBC не менш 3') і точності стабілізації лінії візування (помилка не більше 20'' (відомі системи стабілізації забезпечують помилку стабілізації не менш 60''); збільшення максимальних швидкостей наведення до $30 \,^{\circ}$ с (відомі – до $3,5 \,^{\circ}$ с); забезпечення мінімальних швидкостей не вище $0,025 \,^{\circ}$ с (існуючі — $0,05 \,^{\circ}$ с), що спричиняє до розширення діапазону швидкостей до 3000 (існуючі системи забезпечують — 100).

Ускладнюються зовнішні умови роботи: температурний діапазон від – 60 °C до +75 °C (існують від –40 °C до +50 °C); збільшуються вібраційні збурення з боку об'єкта носія від 0,5 g до 1–2 g і розширюються діапазон частот від 5 до 500 Гц.

1.2. Постановка розв'язуваної у дисертації наукової проблеми

Рішення надзвичайно важливої народногосподарської проблеми попередження, локації та швидкій ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (техногенних, екологічних катастроф, терористичних актів) не можливе без сучасних навігаційних засобів, що забезпечують швидке виявлення об'єктів пошуку на земній або водній поверхні і як можна більш швидке визначення їх координат. Оперативне розвязання зазначених задач покладається на рухомі носії (вертольоти, літаки, космічні кораблі, безпілотні літальні апарати, наземну техніку), оснащені ефективними навігаційними системами або комплексами, до складу яких включають чутливі оптичні електронні прилади, які забезпечують виявлення, і обчислення координат об'єктів пошуку. З урахуванням постійно зростаючих масштабів та більшої частоти на техногенних, екологічних катастроф і терористичних актів, актуальність

удосконалення та створення ефективних засобів постійно збільшується. Сучасні навігаційні системи збільшують ефективність використання технічних засобів удень і уночі як на малих, так і на більших відстанях (більше 5 км) до об'єкта пошуку.

Розширення умов застосування засобів виявлення та розпізнавання об'єктів, як удень, так і уночі, стало можливим завдяки розвитку та широкому застосуванню навігаційних систем із сучасними системами керування (наведення, стабілізації та високоточних слідкуючих приводів), чутливих елементів IBC із перемикаємою кратністю каналів бачення нічних приладів (нічних телевізійних або тепловізійних), елементів систем оброблення візуальної інформації, систем визначення координат рухомих об'єктів, лазерних далекомірних систем і систем лазерного підсвічування цілей. У зв'язку з постійною зростаючою необхідністю підвищення дальності та цілодобового виявлення та розпізнавання об'єктів пошуку, основною проблемою, що виникає перед розроблювачами IBC, є проблема підвищення точності, швидкодії, розширення діапазону швидкостей систем керування та зменшення величини перерегулювання чутливих елементів в екстремальних умовах їх застосування (широкого спектра збурень і впливу температур).

Підвищення точності, дальності цілодобового виявлення та локації об'єктів пошуку систем керування ІВС є великою науково-технічною проблемою, що має важливе народногосподарське значення.

Аналіз літературних даних показав, що кращими у галузі створення елементів і систем керування навігаційними системами рухомих об'єктів є навігаційні комплекси, створені у ЦКБ Красногорського механічного заводу (виріб 9С475 для об'єкта МІ-24), у Новосибірському оптичному об'єднанні ім. Леніна (виріб «Иртиш» для об'єкта Т-80); наукові заділи, створені в Московському Державному технічному училищі ім. Баумана (В.В. Солодовниковим, Е.П. Поповим, Б.К. Чемодановим, Д.С. Пельпором), вченими – теоретиками В.А. Бесекерським, Я.З. Ципкиним, Б.А. Булгаковим, Г.О.

Фабрикантом [30; 33; 35; 80; 96; 98], українськими вченими (М.А. Павловським, А.А. Одинцовим, Б.Б. Самотокиним, О.М. Безвесільною, А.В. Збруцьким, Л.М. Рижковим, Г.Ф. Бубликом, В.В. Мелешко та іншими) [25; 46; 61-63; 66; 74; 75].

Значний внесок у розвиток систем керування IBC зробили учені та компанії США, Франції, Великобританії, Німеччини, Швеції, Японії (фірми International Laser, Systems, North-hrop, Aeronitronix, Ford, Sonder Associates, CBS Zabs, Martin Marietta, Texas Instruments, IBM, Filco-Ford, Хьюз, Белл та інші).

Однак, у літературі недостатньо робіт, у яких було б вирішено проблему підвищення точності, та широкого діапазону швидкостей керування в екстремальних умовах роботи (широкий діапазон зовнішніх вібраційних і температурних збурень) одночасно; не розроблено принципи та наукові основи теорії створення систем керування IBC.

Рішення зазначеної проблеми становить предмет досліджень даної дисертації.

Наведемо основні характеристики інерціальних навігаційних систем, виготовлених Раменським приладобудівним КБ

Інерціальна навігаційна система IIBC-2000

Інерціальна навігаційна система IIBC-2000 забезпечує визначення пілотажно-навігаційних параметрів і призначена для використання у якості бортового датчика навігаційної інформації для нових вертольотів і літаків.

Інерціальна навігаційна система IIBC-2000 виконана у вигляді моноблоку, що складається з гіростабілізованої платформи на базі динамічно настроюваних гіроскопів, сервісної електроніки, обчислювача, блока інтерфейсу. Комплектується з магнітометром, передбачена можливість інтеграції зі супутниковою навігаційною системою (СІВС).

Таблиця 2

ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ						
Похибки (2σ):						
координат	3,7 км/г (режим ИІВС) и 40м (режим СІВС)	Sector Sector				
шляхової швидкості	2,0 м/с (режим ИІВС) и 0,2 м/с (режим СІВС)					
крену, тангажу	0,1°					
істинного курсу	0,1°/год	Рис. 1.5. Інерціальна				
Час готовності		навігаційна система				
з гірокомпасуванням	15 хв	IIBC-2000				
по заданому курсу	10 хв					
Напруга живлення	27В (основне джерело)/115В, 400Гц (обігрів)					
Споживаєма	150 Вт тах по постійному струму					
потужність	1000 ВА – по змінному струму					
Габаритні розміри	385х264х195мм					
Maca	23 кг					

Інерціальна навігаційна система І-21

Інерціальна навігаційна система I-21 – автономна автоматична система, що використовується для керування літака. Висока точність обчислень досягається застосуванням прецизійних акселерометрів і поплавкових гіроскопів. Важливою особливістю системи є незалежність навігації у відносному руху навколо Землі, включаючи полярні райони. Система зберігає працездатність при довільній орієнтації літака. Використовується на кількох типах летальних апаратів, включаючи такі, як РУСЛАН і МРІЯ.

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ					
Похибка визначення:					
місцеположення літака, км/год	3,7				
складової шляхової швидкості, км/год	12,6				
істинного курсу, град	(0,2±0,025T)				
крену і тангажу, град	0,1				
Час готовності, хв	15				
Маса, кг	50				
Споживаємий струм:					
по ланкам обігріву	115В, 400 Гц – 10 А				
по основним ланкам	115В, 400 Гц – 3 А				



Рис. 1. 6 Інерціальна навігаційна система І-21

Інерціальна навігаційна система І-21 використовувалась при авіаційних гравіметричних вимірюваннях у рамках вказаних вище НДР. У розділах 2-7 дисертації запропоновано засоби та методи підвищення точності ІВС, в результаті характеристики І-21 мають наступний вигляд, див. табл. 2. Можна констатувати, що точність визначення навігаційних параметрів ІВС І-21 стала вища у 3 рази.

Таблиця 4

Похибка стабілізації І-21	20″	60″
Похибка наведення,'	1	3
Спектр височастотних коливань носія, Гц	5-500	20-40
Шляхова швидкість v, м/с	0,05	0,15
Курс к, хв.	1,43	3,00
Географічна широта, кут.хв.	0,5	1,5
Висота, м	3,3	10
Вертикальна швидкість, м/с	$0,5^{-}10^{2}$	1.10^{2}
Вертикальне прискорення, м/с ²	10 ⁻⁵	3.10-5
Шлях, м	1,5	4,5
Похибка стабілізації осі чутливості	5	15
гравіметра АГС, кут.хв.		

Таким чином, у літературі відсутні роботи, у яких було б вирішено проблему підвищення точності шляхом:

- удосконалення системи керування IBC, яка забезпечує похибку стабілізації лінії візування до 20";
- використання запропонованого нового підходу забезпечення точності елементів, пристроїв і систем керування ІВС;
- використання розробленого графічного методу визначення вимог до параметрів СК;
- використання запропонованої базової функціональної схеми СК лінією
 візування з використанням двоступеневих зустрічно спрямованих гіроскопів, з
 компенсацією похибок по третій осі;
- використання розробленої СУВ для покращення експлуатаційного захисту гіростабілізатора IBC від ударів з гарантуванням заданої точності;
- використання нового запропонованого методу дослідження похибок нового прецизійного вимірювача кутів для попередньої високоточної наземної виставки навігаційних елементів IBC;
- використання на стадії проектування прецизійної IBC методів параметричної та структурної оптимізації.

1.3. Основні принципи та запропоновані підходи до організації, побудови та забезпечення якості систем керування навігаційних систем рухомих об'єктів

На підставі проведеного аналізу відомих структурних схем IBC розроблено структурну схему системи керування розробленої IBC (рис. 1.20). Вона включає: системи наведення за курсом (К), наведення за тангажем (Т), систему стабілізації за курсом, стабілізації за тангажем. З огляду покращення параметрів IBC, у неї додатково введені: високоточний слідкуючий привід (ВСП) оптичної призми Дове (компенсує розворот зображення в окулярі

оператора при наведенні лінії візування за курсом); цифрові високоточні слідкуючі приводи дзеркала нічного приладу бачення за курсом і тангажем, слідкуючий привід розвороту передавальної камери (компенсує розворот зображення у телевізійній камері нічного бачення (ТВн) при розвороті дзеркала за курсом); центральний високоточний слідкуючий привід (ЦВСП); бортову ЦОМ визначення координат в єдиній географічній системі прямокутних координат (ЕГСПК).

Розглянуту структурну схему системи треба доповнити системою математичних моделей та алгоритмів елементів і пристроїв, що забезпечують необхідні показники точності СК, і розрахунку елементів, що забезпечують визначення необхідних параметрів елементів і пристроїв.

Основні результати проведених досліджень запропонованої структурної схеми викладено у роботах автора [2; 40-50] та у наступних розділах дисертації.



Рис. 1.20. Структурна схема системи керування ІВС

З огляду на багатофункціональність, багатозв'язність оптичних, електронних і високоточних механічних елементів, пристроїв і систем керування, систем стабілізації та високоточних аналогових і цифрових слідкуючих приводів в умовах розміщення їх у складі рухомих об'єктів, рекомендується дотримуватись таких основних принципів проектування:

перший – принцип системного проектування та забезпечення виконання основних функціональних завдань рухомого об'єкта без обмеження умов застосування (кутів візування, дальності локації об'єктів бачення, швидкостей і прискорень наведення лінії візування, точності);

другий – принцип функціональної незалежності та узгодження різнорідних систем у складі IBC із урахуванням особливостей систем об'єкта носія;

третій – *принцип керованості систем керування IBC зверху вниз*, тобто необхідно створювати системи керування з урахуванням пріоритету вищої ланки;

четвертий – принцип простоти та практичної доцільності побудови складових систем IBC, керуючих механічними, оптичними та електронними елементами та пристроями, тобто із всіх можливих рішень варто застосовувати найпростіше;

п'ятий – принцип суперпозиції, що застосовується при проектуванні розімкнутих систем для забезпечення необхідної точності наведення лінії візування каналів IBC в умовах невизначеності траєкторії руху об'єкта пошуку, але при відомих діапазонах зміни мінімальних і максимальних швидкостей і прискорень керування;

шостий – принцип створення структур керування по відхиленню від заданого процесу, застосовується при проектуванні систем стабілізації та високоточних діючих приводів для забезпечення точності і стійкості наведення лінії візування денного та нічного каналів IBC в умовах впливу високочастотних вібраційних та ударних збурень, при заздалегідь заданих максимально можливих амплітудах, діапазонах частот і прискорень;

сьомий – принцип ідентифікації математичних моделей, що застосовуються для дослідження багатозв'язних неоднорідних систем,

визначення умов та алгоритмів коригувальних ланок, які забезпечують необхідну точність і стійкість систем керування лінії візування IBC в екстремальних умовах роботи (вібрації, широкого діапазону температур від –60 °C до +75 °C);

восьмий принцип спостережування параметрів CK, ЩО _ етапах різних IBC застосовуються на створення систем керування (настроювання, випробування та в умовах експлуатації);

дев'ятий – принцип мінімізації маси, габаритів і витрат при поетапному створенні систем керування IBC;

десятий – принцип перетворення структур, що застосовуються при створенні систем стабілізації та високоточних слідкуючих приводів, які забезпечують оптимізацію параметрів систем, елементів і пристроїв для досягнення необхідної точності, стійкості та діапазону регулювання;

одинадцятий – принцип поетапного досягнення результату (нарощування характеристик СК IBC);

дванадцятий – принцип виконання нових завдань (удосконалювання показників і модернізації елементів, пристроїв, систем стабілізації та високоточних слідкуючих приводів);

тринадцятий – принцип побудови інтегрованої системи керування IBC *і системи підтримки прийняття рішень* з вбудованим інтелектом, які генерують варіанти рішень в умовах невизначеності, широкого діапазону швидкостей і робочих температур;

чотирнадцятий – *принцип адаптивності (пристосовності та параметричного самонастроювання*), що забезпечує зміну структури, параметрів коригувальних ланок, коефіцієнтів підсилення та алгоритми, які визначають показники якості систем керування IBC.

Розглянуті підходи до створення систем керування IBC відрізняються від відомих рішень [24, 37-39], *передбачають виконання наступних етапів проведення комплексу заходів*, що включають процес синтезу:

1. Побудови базової структури системи керування приладу денного бачення, принцип дії якої заснований на використанні двох двоступеневих гіроскопів із зустрічно спрямованими кінетичними моментами, розмішених у двоступеневому кардановому підвісі, відомих конструктивних рішень і перспектив поліпшення показників якості завдяки структурним доповненням (введення високоточного приводу слідкуючого кільця, високоточного слідкуючого приводу призми Дове та пристрою компенсації помилки збурень по третій осі), що забезпечують задану точність керування лінією візування вздовж трьох осей.

2. Побудови базової структури системи керування приладу нічного бачення, принцип дії якої заснований на використанні цифрових високоточних слідкуючих приводів, що забезпечують керування лінією візування низькорівневої телевізійної або тепловізійної систем бачення за курсом і по тангажу, і високоточного слідкуючого приводу розвороту зображення при повороті головного дзеркала за курсом.

3. Формування гранично припустимих вимог до систем керування на підставі аналізу функціональних можливостей як складових частин структури системи керування, так і на підставі визначення характеристик елементів і пристроїв, що забезпечують функціонування систем керування.

4. Вибору раціональних за складом та можливостями комплексу методів виявлення, локації об'єктів пошуку та визначення координат об'єкта в прямокутній системі координат з рухомого об'єкта-носія IBC, граничних показників якості елементів і пристроїв: кратності оптичної системи, помилки системи стабілізації як багатопараметричної функції, що залежить від розміру об'єкта пошуку, відстані до нього, яскравості об'єкта та фону, прозорості атмосфери, забезпечених адекватністю математичних моделей, точністю розрахунків з урахуванням значної різнорідності фізичних процесів у системах керування, багатопараметричного характеру елементів і пристроїв, а також заданих рівнів зовнішніх збурень (температур і вібрації).

5. Визначення способів структурного синтезу прямих і зворотних зв'язків сигнальних каналів базової структури системи керування, що забезпечують досягнення необхідних показників точності та стійкості завдяки коригувальним і компенсуючим впливам.

6. Створення елементів, пристроїв і систем, що реалізують компенсуючі і коригувальні зв'язки, які забезпечують досягнення заданих показників якості (високомоментних магнітоелектричних датчиків, широтно-імпульсних підсилювальних пристроїв, що забезпечують високий к.к.д. використання рівень високий бортових джерел живлення), а також внутрішньої (конструктивної та електричної) і зовнішньої (температурної, механічної) сумісності вузлів системи керування (мінімальні розміри та маса).

1.4. Математична модель інерціальної навігаційної системи

У літературі [30-34, та інші] по ГС та IBC немає рівнянь руху і блок-схем основних компонентів - систем стабілізації, навігації.

Метою цього параграфу є розробка математичної моделі IBC. Для цього треба знайти рівняння руху і побудувати блок-схеми систем стабілізації, навігації.

1.4.1. Рівняння руху і блок-схема системи стабілізації

Система стабілізації (СС) у ІВС призначена забезпечувати збіг вимірювальної осі Z-Z акселерометра з довідковою вертикаллю. Систему стабілізації можна побудувати фізично і аналітично. Фізичний спосіб побудування СС має такі переваги порівняно з аналітичним: здійснюється у вигляді простіших, ніж у разі аналітичного способу, компенсаційних схем; усуває вплив на акселерометр ІВС прискорень, перпендикулярних до осі чутливості приладу; в разі аналітичного способу побудови СС потребує обмеженого часу обчислень і вищої точністі інерціальних компонентів СС. З урахуванням перелічених переваг фізич-

ного способу побудови СС надалі матимемо на увазі використання в IBC саме цього способу побудови СС гравіметра.

У роботі [11] знайдено вирази вихідних сигналів f_x, f_y лінійних акселерометрів, установлених на горизонтальній стабілізованій платформі (ГСП), орієнтованій у географічній системі координат, осі чутливості яких спрямовані на північ і на схід відповідно:

$$\begin{aligned} f_x &= -(2\dot{r}\dot{\phi}_c + r\ddot{\phi}_c)\cos\chi + (\ddot{r} - r\dot{\phi}_c^2)\sin\chi - 2r\omega_3\dot{\lambda}\cos\varphi_c sn\varphi - r\dot{\lambda}\cos\varphi_c\sin\varphi + \aleph g; \\ f_y &= 2r\dot{\phi}_3\omega_3\sin\varphi_c + 2r\dot{\phi}_c\dot{\lambda}\sin\varphi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda}\cos\varphi_c - r\ddot{\lambda}\cos\varphi_c - 2\dot{r}\omega_3\cos\varphi_c - \upsilon g, \end{aligned}$$
(1.1)

- де *χ*, *ν* кути між нормалями до еліпсоїда і геоїда відповідно в меридіональному перерізі та в площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана;
 - g прискорення сили ваги;
 - *r* радіус місцезнаходження рухомої системи;
 - $\varphi, \varphi_{\rm c}\,$ географічна та геоцентрична широти відповідно;
 - χ відхилення від вертикалі;
 - *ω*₃ кутова швидкість обертання Землі;
 - λ довгота місця.

Якщо платформа виставлена абсолютно точно в положення вертикалі, то горизонтальні компоненти прискорення сили ваги дорівнюють нулю. Вважаючи, що $\aleph g = -\upsilon g = 0$, перепишемо рівняння (1.1) у вигляді

$$f_{x} = -(2\dot{r}\dot{\phi}_{c} + r\ddot{\phi}_{c})\cos\chi + (\ddot{r} - r\dot{\phi}_{c}^{2})\sin\chi - 2r\omega_{3}\dot{\lambda}\cos\varphi_{c}\sin\varphi - r\dot{\lambda}\cos\varphi_{c}\sin\varphi;$$

$$f_{y} = 2r\dot{\phi}_{c}\omega_{3}\sin\varphi_{c} + 2r\dot{\phi}\dot{\lambda}\sin\varphi_{c} - 2\dot{r}\dot{\lambda}\cos\varphi_{c} - r\ddot{\lambda}\cos\varphi_{c} - 2\dot{r}\omega_{3}\cos\varphi_{c}$$
(1.2)

Здійснивши за допомогою БЦОМ компенсацію прискорень

$$-2r\omega_{3}\dot{\lambda}\cos\varphi_{c}\sin\varphi - r\dot{\lambda}\cos\varphi_{c}\sin\varphi = 0;$$

$$2r\dot{\varphi}_{c}\omega_{3}\sin\varphi_{c} + 2r\dot{\varphi}_{c}\dot{\lambda}\sin\varphi_{c} - 2\dot{r}\omega_{3}\cos\varphi_{c} - 2\dot{r}\dot{\lambda}\cos\varphi_{c} = 0,$$

знехтувавши у (1.2) складовими другого порядку малості та вважаючи $\chi=0$, дістанемо

$$f_x = -r\ddot{\varphi}_c; f_y = -r\ddot{\lambda}\cos\varphi_c.$$
(1.3)

Якщо кожний з сигналів f_x і f_y (за показаннями акселерометрів) помножити на r^{-1} , проінтегрувати і помножити на -1, то на виході відповідних каналів дістанемо ϕ і $\lambda \cos \phi$ (рис. 5.1). Сигнал ϕ можна використовувати для керування стабілізованою платформою відносно осі x, спрямованої на північ; сигнал $\lambda \cos \phi$ - для керування стабілізованою платформою відносно осі y, спрямованої на схід.

Малі відхилення нормалі (осі z) платформи від вертикалі призводять до проектування компонентів питомої сили на осі чутливості горизонтальних акселерометрів A_x і A_y . Вихідні сигнали ϕ і $\lambda \cos \phi$ використовують для керування платформою, яка повертається доти, доки ці компоненти не дорівнюють нулю. Азимутальні дані $k + \omega_3 \sin \phi + \lambda \sin \phi$ також можна знайти шляхом орієнтації стабілізованої платформи відносно осей керування X і Y (рис. 1.21). Стабілізована платформа, побудована таким чином, подібна до маятника Шулера з періодом 84,4 хв. Похибки виставки осей чутливості акселерометрів, дрейф акселерометрів та інші чинники зумовлюють похибки виставлення вертикалі CC. Ці питання розглянуто в спеціальній літературі, а в даній роботі не аналізуються.



Рис. 1.21. Система стабілізації ІВС

Якщо сигнали швидкості змін широти і довготи ще раз проінтегрувати, а потім підсумкові значення широти і довготи ввести в БЦОМ для обчислення прискорень, що компенсуються за сигналами акселерометрів, то дістанемо систему інерціальної навігації ІВС.

1.4.2. Рівняння руху і блок-схема інформаційно-вимірювальної системи

Розрізняють три основних типи навігаційних систем для літаків: 1) що вимірюють прискорення або швидкість об'єкта і таким чином визначають поточне положення (системи інерціальної навігації, допплерівські навігаційні системи); 2) в яких положення об'єкта визначається безпосередньо за допомогою зовнішніх джерел інформації (наземні або супутникові радіонавігаційні системи); 3) які є комбінацією двох попередніх типів систем.

Тому за джерело навігаційної інформації у подальшому вважатимемо IBC. Розглянемо рівняння руху і побудуємо блок-схему такої IBC (рис. 1.22).



Рис. 1.22. Схема системи інерціальної навігації

Чутливі елементи питомої сили IBC (акселерометри) встановлюють на ГСП, роботу якої описано вище (див. п. 1.4.1). Звернувшись до рис. 1.21, побачимо, що виміряні вихідні сигнали акселерометрів після ділення на r^{-1} , інтегрування, врахування початкових умов, зміни знаку є кутовими швидкостями відносно північної і східної осей:

$$\omega_x = \dot{\varphi};$$
$$\omega_y = \dot{\lambda} \cos \varphi.$$

Помноживши ω_y на sec φ і проінтегрувавши результат, дістанемо довготу λ (з урахуванням заданого початкового значення довготи). Проінтегрувавши ω_x та з урахуванням заданого значення широти, дістанемо широту φ .

Добутки ω_x, ω_y на *r* відповідають північній та східній складовим швидкості літака.

Результати наведених операцій передаються у БЦОМ. Описана функціональна схема є моделлю недемпфіруваного маятника Шулера з періодом 84,4 хв. (різні способи демпфірування власних коливань таких систем описано в спеціальній літературі і в цій роботі не розглядаються).

1.4.3. Рівняння руху і блок-схема для вимірювання аномалій прискорення сили ваги

У роботі [11] знайдено наступне рівняння руху авіаційної гравіметричної системи (АГС) для визначення аномалій прискорення сили ваги (інформація про гравітаційні аномалії необхідна для розвідки корисних копалин – нафти, газу, урану, золота; для корекції інерціальних навігаційних систем рухомих об'єктів та інш.), яка побудована на основі описаних вище IBC та ГС

$$\Delta g = f_z + E + A - \ddot{h} - \gamma_0 \tag{1.4}$$

де f_z - вихідний сигнал гравіметра (третього акселерометра, встановленого на

ГСП, вісь чутливості якого збігається з довідковою вертикаллю);

Е - поправка Етвеша;

А - поправка за висоту;

γ₀ - довідкове прискорення сили ваги;

 $E = V^{2}r^{-1}\{1 - 2e[1 - 2\cos^{2}\varphi(1 - 2^{-1}\sin^{2}k)]\} + 2V\omega_{3}\sin k\cos\varphi - 2\dot{h}er^{-1}V\cos k\sin 2\varphi;$ $A = 2\gamma_{0}hr^{-1} + \omega_{3}^{2}\cos^{2}\varphi;$ $\gamma_{0} = 9,78049(1 + 0,0052884\sin^{2}\varphi - 0,0000059\sin^{2}2\varphi);$

h - висота місцезнаходження літака над еліпсоїдом;

V - горизонтальна складова шляхової швидкості літака;

- е стиск еліпсоїда;
- *k* курс літака.

Добуте рівняння руху АГС (1.4) відрізняється од відомих такими додатковими членами: $2\dot{h}er^{-1}V\cos k\sin 2\varphi$, похибка від неврахування впливу яких становить близько 1 мГл; $\omega_3^2\cos^2\varphi$, похибка, від неврахування впливу якого становить близько 2,67 мГл. Вплив указаних додаткових членів слід враховувати у разі вимірювань Δg з точністю 1..3 мГл =(1-3)10⁻⁵ м/c².

Математичну модель АГС, описану виразом (1.4), можна реалізувати блок-схемою (рис. 1.3). При побудуванні блок-схеми на рис. 1.23 було враховано такі співвідношення

$$V = r\dot{\lambda}\cos\varphi(\sin k)^{-1};$$

$$V_n = V\cos k = r\dot{\phi};$$

$$V_E = V\sin k = r\dot{\lambda}\cos\varphi,$$

де V_N, V_E - відповідно північна та східна складові шляхової швидкості літака.

Отже, поставлені задачі розв'язано: добуто рівняння руху, побудовано блок-схеми стабілізації, навігації та визначення аномалій прискорення сили ваги.



Рис. 1.23. Система визначення аномалій прискорення сили ваги

Особливості побудови, досліджень, розрахунків АГС розглянуто в спеціальній літературі [11 та інші], а в даній роботі не аналізуються.

1.5. Основні наукові та практичні результати дисертації

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено та досліджено нові методи удосконалення системи керування (СК) інерціальною навігаційною системою:

- отримано математичне рівняння поведінки головного дзеркала гіростабілізатора та показано, що на певних частотах кутових збурень носія виникає додаткова похибка стабілізації (що не враховується у відомих роботах), зменшення якої до необхідної величини можливе шляхом вибору жорсткості стрічкових передач, жорсткості пружин натягу і сили натягу (амплітуда коливань ГД у діапазоні 20-70 Гц та 150-200 Гц, не перевищує 1,4', а на інших частотах не перевищує 40'');

- отримано математичні рівняння поведінки елементів СС (ричага натяжувателя та інших), формули, алгоритми оцінки амплітуд коливань елементів конструкції СК. Показано, що амплітуда коливань залежить від маси і плеча ричага натяжувателя стрічок, зменшення відстані між віссю ричага та центром маси ричага приводить до зменшення амплітуди в 1,4 рази та зсуву резонансної частоти до 320 Гц;

- розроблено методи та спрощені алгоритми визначення координат об'єктів локації у системі прямокутних координат на підставі багаторазового вимірювання кута візування об'єкта за курсом з рухомого носія. Отримано формульні оцінки середньоквадратичних похибок, що викликані неточністю кутів візування за курсом (встановлено, що при точності визначення координат 20" максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 5 м або 0,025 % від дальності на відміну од відомих ІВС, у яких що при точності визначення координат 60" максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 12 м або 0,06 % від дальності).

2. Розроблено та досліджено новий засіб удосконалення системи керування (СК) інерціальною навігаційною системою:

- уперше запропоновано введення у конструкцію опори головки наведення оригінальних сталевих цапф із гумовими втулками, армованими мідними втулками. Це забезпечує експлуатаційний захист СК ІВС за рахунок зменшення швидкостей удару, амплітуди і часу загасання перехідного процесу при ударі.

3. Розроблено та досліджено новий засіб - нову систему ударо- і віброзахисту (авторське свідоцтво України), в якій розглянуто одноосну систему віброзахисту із сухим тертям, що обмежує на заданому рівні максимальні прискорення тіла при одиночних ударах великого рівня і максимальних прискореннях при вібраціях.

4. Розроблено та досліджено нові методи удосконалення СУВ:

- на відміну од відомих систем віброзахисту, отримано математичну модель нової СУВ, в якій враховано нелінійність сухого тертя і характеристик плоскої пружини, вплив зміни параметрів СУВ і збурюючих факторів, проведено аналіз і чисельну оцінку їх впливу на ефективність СУВ;

- проведено математичне моделювання на ЕОМ роботи нової СУВ згідно з розробленими алгоритмом і програмою, визначено найбільш несприятливий резонансний режим роботи СУВ ($\omega = \omega_0$), встановлено, що найбільш несприятливою для СУВ є смуга частот з 37 Гц до 57 Гц;

- проведено математичне моделювання на ЕОМ методом скінчених елементів поведінки плоскої пружини, однієї з головних складових СУВ, що дозволило отримати характеристики і визначити параметри плоскої пружини при значних її прогинах. Встановлено, що характеристика плоскої пружини лінійна, при умові, що відношення висоти до довжини плоскої пружини мале: чим менше це відношення, тим характеристика більш лінійна. Підтверджено, що неточність розміщення плоскої пружини не впливає на амплітуду лінійних коливань при ударі, а амплітуда кутових коливань гіростабілізатора 17";

- доведено, що неточність розміщення амортизаторів та їх різна жорсткість не впливають на амплітуду лінійних коливань при ударі, а амплітуда кутових коливань гіростабілізатора 30";

- розроблено методику та рекомендації експериментальних випробувань нової СУВ. Уперше перевірено складові СУВ на наявність механічних ушкоджень (тріщини, вм'ятини) - особлива увага зверталась на місця концентрації напруг. Отримано таблиці і графіки. Наведено склад обладнання, необхідного для проведення експериментів.

- аналітично та експериментально підтверджено, що розроблений новий засіб, СУВ, забезпечує задані експлуатаційні характеристики при збереженні необхідної точності. Експериментально підтверджено теоретичні висновки.

Обґрунтовано доцільність використання нової СУВ для покращення експлуатаційного захисту гіростабілізатора з гарантованим збереженням точності.

5. Розроблено та досліджено новий метод дослідження похибок вимірювання кутів за допомогою нового вимірювача кута з кільцевим лазером (КЛ). Показано, що цей метод забезпечує попередню наземну прецизійну виставку навігаційних елементів IBC зі значно більшою точністю (0,3"), ніж відомі вимірювачі кута (1').

6. Обґрунтовано доцільність використання нового засобу високоточного автоматизованого вимірювача кута (ВК) (патент України) більшої точності од відомих вимірювачів кута за рахунок введення у математичну модель ВК додаткових поправок від впливу кутової швидкості обертання Землі, дрейфу масштабного коефіцієнту КЛ, використання методу калібрування.

7. Уперше запропоновано застосування методів параметричної оптимізації для збільшення точності вимірювань механічних параметрів IBC на стадії проектування IBC з наведенням конкретного чисельного прикладу для конкретної навігаційної системи.

Наукові результати отримані автором особисто і є основою для вирішення поставленої наукової проблеми.

Практичне значення одержаних результатів

1. Обґрунтовано, що розроблені та досліджені методи (нові математичні моделі нових пристроїв, елементів – головного дзеркала, ричага натяжувателя стрічок та інші) та засоби (конструкція опори, стрічкові передачі, пружини натягу, важеля натяжувателя) забезпечили удосконалення системи керування ІВС (точність стабілізації 20", можливість роботи при широкому спектрі високочастотних коливань об'єкта носія – від 5 до 500 Гц та інші).

2. Обґрунтовано, що розроблена та досліджена нова СУВ забезпечує експлуатаційний захист гіростабілізатора IBC від ударів та вібрацій із гарантуванням заданої точності (забезпечує необхідне зменшення амплітуди діючих ударних прискорень у 8-9 разів порівняно з відомими у 2-3 рази, гарантує повний захист від резонансів).

3. Обґрунтовано, що розроблений та досліджений новий метод дослідження похибок вимірювання кутів за допомогою нового засобу вимірювача кута з кільцевим лазером забезпечує попередню наземну прецизійну виставку навігаційних елементів IBC (0,3").

4. Показано на прикладі для реальної IBC, що запропоновані методи параметричної оптимізації забезпечують задану, більшу у 3 рази од відомих IBC, точність визначення навігаційних параметрів IBC.

1.6. Висновки до розділу 1

1.6.1. Особливості відомих розробок в області систем керування прецизійних інерціальних навігаційних систем рухомих об'єктів полягають у тому, що системи керування створюються індивідуально під кожну конструкцію ІВС та об'єкта-носія. Відомі вертольотні та літакові СК ІВС

забезпечують виявлення та розпізнавання об'єктів на незначній дальності (не більше 5000 м), мають невисоку точність керування (до 0,2 мрад), обмежені максимальні кути наведення (до ± 55 °), обмежені швидкості наведення (до 3 °/с) і швидкості переключення лінії візування (до 10 °/с), працюють в обмеженому діапазоні температур (від -20 °C до ± 40 °C), при обмежених амплітудах вібрацій (до 0,5 g).

Актуальною, але недостатньо розробленою проблемою є створення спеціалізованих систем керування навігаційних систем сучасних рухомих об'єктів для вирішення задач попередження та ліквідації наслідків техногенних, екологічних катастроф і терористичних актів.

1.6.2. Запропоновано новий підхід до організації і забезпечення якості елементів, пристроїв і систем керування IBC, заснований на:

- побудові базової структури системи керування IBC на основі аналізу та синтезу відомих закордонних і вітчизняних рішень в області технічних систем даного класу із обліком досягнутих показників функціонування, відомих конструкторських рішень і перспектив поліпшення якості показників;

- формуванні гранично допустимих вимог до систем керування на основі аналізу функціональних можливостей, як складових частин системи керування, так і на підставі певних характеристик елементів і пристроїв, що забезпечують функціонування системи керування;

- виборі раціональних за складом і можливостями комплексу методів і максимально припустимих показників якості елементів і пристроїв математичних моделей, що забезпечують необхідну адекватність, точність розрахунків, з урахуванням значної різнорідності фізичних процесів у системах керування, багатопараметричного характеру елементів і пристроїв; застосувань способів структурного синтезу прямих і зворотних зв'язків сигнальних каналів базової структури системи керування. Це забезпечує досягнення необхідних показників точності та стійкості завдяки коригувальним і компенсуючим впливам;

- *створенні системи елементів*, що реалізують, компенсують, коригують зв'язки і забезпечують задану точність і діапазон керованих швидкостей, а також високий рівень внутрішньої та зовнішньої сумісності вузлів системи.

1.6.3. Розроблено математичні моделі IBC, CC, АГС, які відрізняються од відомих додатковими поправками, похибка від неврахування яких недопустимо велика (3,67 мГл). Отримано рівняння руху, визначено блок-схеми всіх основних компонентів: системи стабілізації, навігації, АГС.

1.6.4. Розроблено математичну модель, яка, на відміну від відомих, дає змогу автоматизувати процес обчислень аномалій прискорення сили ваги безпосередньо під час польоту літака, що набагато підвищує швидкодію АГС.

1.6.5. Матеріали розділу відображено у публікаціях автора [2; 40; 50].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРІЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ

IBC PO – повинна забезпечувати швидке виявлення об'єкта на значній відстані та визначати кутові координати для точної прив'язки об'єкта у системі прямокутних координат (СПК). Роботи Корольова В.М., Збруцького О.В. присвячені розробці та підвищенню точності навігаційних комплексів зовнішнього ціле вказування наземних рухомих об'єктів (танків ті інших). Відомі роботи вчених Малишева В.В., Ружицького Е.І., в яких описуються статичні методи вимірювання кутових координат у системі СПК по двох координатах візування при точній прив'язці кожної з крапок у прямокутній системі координат. Якщо ж вимірювання координат об'єкта виконуються використання точних методів реєстрації координат об'єкта носія під час візування об'єкта пошуку, розробки спеціальних алгоритмів розрахунку координат об'єкта. У відомій літературі вирішення даної задачі не має. Вирішення даної задачі є метою даного розділу.

При створенні сучасних бортових навігаційних систем спостереження з чутливими оптичними електронними комплексами, призначених для пошуку, виявлення та локації об'єктів, що перебувають у зоні надзвичайних ситуацій, виникають такі *задачі*, що вимагають:

- розробити методи та спрощені алгоритми визначення координат об'єктів у системі прямокутних координат (СПК) на основі вимірювання кутів візування об'єкта пошуку за курсом з рухомого носія, з траєкторією руху, що забезпечує багаторазове візування об'єкта;

- дослідити базові структури системи керування ПК і функціональні кінематичні схеми елементів, пристроїв, що входять до їх складу;
- оцінити середньоквадратичні похибки візування, спричинені похибками датчиків кута системи керування ІВС і визначити вимоги до точності вимірювання датчиків кута;

- визначити перелік і зміст вимог до показників точності елементів і пристроїв, що входять у систему;

- визначити режими роботи систем керування IBC і виробити вимоги до показників точності системи керування для кожного з режимів роботи, до основних елементів і пристроів.

При розроблені функціональної та кінематичної схем системи керування IBC доцільно спиратись на використання двох двоступеневих зустрічно спрямованих гіроскопів з компенсацією похибок вздовж третьої осі, що забезпечує високу точність наведення лінії візування по трьох осях. За характеристиками системи визначаються вимоги до вимірювальних (датчики кута прецесії, датчики візування) і виконавчих елементів (датчики моменту, двигуни стабілізації), пристроїв компенсації похибки, спричиненої збуреннями вздовж третьої осі (крену) СК IBC, елементів конструкції гіростабілізованної головки.

Розвязання цих задач відображено у працях автора [2; 40-50].

2.1. Теорія побудови системи керування (СК) лінією візування інформаційно-вимірювальної системи та алгоритми локації рухомих об'єктів

Навігаційна система або комплекс, встановлений на рухомому носії – вертольоті або літаку, має забезпечувати швидке виявлення та розпізнавання об'єктів на значній відстані та визначати кутові координати для точної прив'язки об'єкта у системі прямокутних координат (СПК). Відомі [56; 68] статичні методи вимірювання кутових координат у системі СПК по двох координатах візування при точній прив'язці кожної з крапок у прямокутній

системі координат. Якщо ж координати об'єкта вимірюються рухомою системою, виникають додаткові труднощі, що вимагають використання точних методів реєстрації координат об'єкта носія під час візування об'єкта пошуку, розроблення спеціальних алгоритмів розрахунку координат об'єкта.

Для визначення координат об'єкта у СПК використовується інформація, що надходить від IBC і системи бортових навігаційних приладів (БНП) у бортову цифрову обчислювальну машину (БЦОМ). Система БНП дає змогу визначити положення носія IBC і PO у СПК у будь-який момент часу, тобто видає інформацію $x_B = x_B(t)$, $y_B = y_B(t)$, а IBC визначає кути візування об'єкта, тобто його кутові координати щодо рухомої системи координат, пов'язаної з носієм. Для визначення координат об'єкта слід мати хоча б дві різні точки зчитування кутів візування, а відстань між цими точками – базу локації пеленгації – використати в якості відсутнього лінійного елемента обчислення координат.

Загальна ідея вирішення завдання прив'язки координат об'єкта у СПК полягає в наступному: нехай B_1 , B_2 - точки візування на базі B_1B_2 ; x_1 , y_1 , x_2 , y_2 – їх координати; β_1 , β_2 – кути візування. Тоді X_{μ} , Y_{μ} – координати, об'єкта (цілі) однозначно визначаються шляхом обчислень (рис. 2.1). Безпосередньо з геометричних співвідношень :

$$X_{II} = x_2 + D_2 \cos \beta_2; Y_{II} = y_2 + D_2 \sin \beta_2,$$
(2.1)

де D_2 – дальність B_2O .

На підставі теореми синусів, запишемо

$$\frac{D_2}{\sin \alpha} = \frac{B}{\sin(\beta_1 - \beta_2)}, \quad B = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (2.2)$$

де $B = B_1, B_2 - лінійна база пеленгації, що може бути реалізована за допомогою траєкторії руху носія типу «віраж-<math>\infty$ ».

3 рис. 2.1 а можна одержати

$$\alpha = 180^{0} - \beta_{1} - \psi, \qquad (2.3)$$

$$\mu = \arcsin \frac{y_{1} - y_{2}}{B} = \arccos \frac{x_{1} - x_{2}}{B}.$$

Тоді

$$D_2 = F \frac{\sin \alpha}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} = F \frac{\sin(\beta_1 + \psi)}{\sin(\beta_1 - \beta_2)},$$
(2.4)

$$\sin \alpha = \sin(180 - \beta_1 - \psi) = \sin(\beta_1 + \psi) = \sin \beta_1 \cos \psi + \cos \beta_1 \sin \psi, \qquad (2.5)$$

$$E \sin \alpha = E \sin \beta_1 \cos \psi + E \cos \beta_1 \sin \psi = -\frac{x_2 - x_1}{E} E \sin \beta_1 + \frac{y_2 - y_1}{E} E \cos \beta_1 = (y_2 - y_1) \cos \beta_1 - (x_2 - x_1) \sin \beta_1.$$
(2.6)



Рис. 2.1. Обчислення координат об'єкта у СПК

Остаточно

$$D_2 = [(y_2 - y_1)\cos\beta_1 - (x_2 - x_1)\sin\beta_1] \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)},$$
 (2.7)

i

$$X_{u} = x_{2} + \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} [(y_{2} - y_{1})\cos\beta_{1} - (x_{2} - x_{1})\sin\beta_{1}]\cos\beta_{2},$$

$$Y_{u} = y_{2} + \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} [(y_{2} - y_{1})\cos\beta_{1} - (x_{2} - x_{1})\sin\beta_{1}]\sin\beta_{2}.$$
(2.8)

Формули (2.8) є розвязання поставленої завдачі. Доведемо, що формули (2.8) не залежать від геометричних особливостей трикутника B_1B_2O . Для цього розглянемо альтернативний варіант розташування точок B_1B_2O (рис. 2.1, б):

$$\frac{\overline{B}}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} = \frac{D_2}{\sin\alpha}, \ \alpha = \frac{\pi}{2} - (\psi + \beta_1),$$
(2.9)

$$\sin \alpha = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \psi - \beta_1 \right) = \cos(\psi + \beta_1) = \cos \psi \cos \beta_1 - \sin \psi \sin \beta_1 =$$
(2.10)

 $= \cos \beta_1 \frac{y_2 - y_1}{B} - \sin \beta_1 \frac{x_2 - x_1}{B},$

$$\cos\psi = \frac{y_2 - y_1}{B}, \ \sin\psi = \frac{x_2 - x_1}{B},$$
 (2.11)

$$D_2 = \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} [(y_2 - y_1)\cos\beta_1 - (x_2 - x_1)\sin\beta_1].$$
(2.12)

Звідси визначимо координати об'єкта у СПК

$$X_{u} = x_{2} + \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} [(y_{2} - y_{1})\cos\beta_{1} - (x_{2} - x_{1})\sin\beta_{1}]\cos\beta_{2},$$

$$Y_{u} = y_{2} + \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} [(y_{2} - y_{1})\cos\beta_{1} - (x_{2} - x_{1})\sin\beta_{1}]\sin\beta_{2}.$$
(2.13)

що, як бачимо, збігається з виразом (2.8).

Отже, на підставі отриманих виразів можна зробити такі висновки:

1. Вираз (2.13) є розвязання задачі прив'язки координат нерухомого спостережуваного об'єкта в СПК за даними x_1 , x_2 , y_1 , y_2 , β_1 , β_2 , визначального положення точок візування та лінії візування. Отримані формули дають змогу отримати співвідношення, що визначають похибки прив'язки залежно від похибок даних.

2. Розвязання аналогічної задачі у разі рухомого з певною швидкістю об'єкта є складнішим завданням, що вимагає спеціального дослідження. У загальному випадку, рух носія стосовно вимірюваного об'єкта дуже впливає на точність прив'язки як у динамічному (з описом руху об'єкта), так та у статистичному (з визначенням миттєвого положення об'єкта) варіантах розвязання задачі.

Грубе оцінювання положення об'єкта можна отримати однією візирною точкою. Розглянемо такий випадок.

Нехай *В* – нерухома точка візування; *O*₁, *O*₂ – два положення об'єкта, що рухається зі швидкістю *V* за час *t*. Тоді за теоремою синусів запишемо

$$\frac{O_2 B}{\sin(\beta_2 - \beta_1)} = \frac{Vt}{\sin(\beta_2 - \beta_1)};$$
(2.14)

$$O_2 B = \frac{Vt \cos \beta_1}{\sin(\beta_2 - \beta_1)}; \tag{2.15}$$

$$x_{2} = x_{B} + O_{2}B\cos\beta_{2} = x_{B} + \frac{\cos\beta_{1}\cos\beta_{2}}{\sin(\beta_{2} - \beta_{1})}Vt,$$

$$y_{2} = y_{B} + \frac{\cos\beta_{1}\cos\beta_{2}}{\sin(\beta_{2} - \beta_{1})}Vt.$$
(2.16)

Розглянемо питання точності розвязання задачі прив'язки в системі СПК, виходячи з алгоритму (2.13) для визначення координат об'єкта. Вважаючи вихідними функціональні залежності

$$X_{u} = f(x_{1}, x_{2}, y_{1}, y_{2}, \beta_{1}, \beta_{2});$$

$$Y_{u} = \varphi(x_{1}, x_{2}, y_{1}, y_{2}, \beta_{1}, \beta_{2}),$$
(2.17)

і ґрунтуючись на лінійній теорії чутливості, отримаємо вираз для похибок координат, які обчислюватимемо за формулами:

$$\Delta X_{u} = f'_{x_{1}} \Delta x_{1} + f'_{y_{1}} \Delta y_{1} + f'_{x_{2}} \Delta x_{2} + f'_{y_{2}} \Delta y_{2} + f'_{\beta_{1}} \Delta \beta_{1} + f'_{\beta_{2}} \Delta \beta_{2};$$

$$Y_{u} = \varphi'_{x_{1}} \Delta x_{1} + \varphi'_{y_{1}} \Delta y_{1} + \varphi'_{x_{2}} \Delta x_{2} + \varphi'_{y_{2}} \Delta y_{2} + \varphi'_{\beta_{1}} \Delta \beta_{1} + \varphi'_{\beta_{2}} \Delta \beta_{2},$$
(2.18)

де Δx_1 , Δx_2 , Δy_1 , Δy_2 , $\Delta \beta_1$, $\Delta \beta_2$ – похибки вихідних даних;

 $f'_{x_1}, f'_{y_1}, f'_{x_2}, f'_{y_2}, f'_{\beta_1}, f'_{\beta_2}, \varphi'_{x_1}, \varphi'_{y_1}, \varphi'_{x_2}, \varphi'_{y_2}, \varphi'_{\beta_1}, \varphi'_{\beta_2}$ — похідні функцій *f* і φ по

відповідній змінній.

Диференціюючи вираз (2.13) по кожній зі змінних, отримаємо:

$$f'_{x_1} = \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \sin\beta_1 \cos\beta_2;$$
(2.19)

$$f'_{x_2} = 1 - \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \sin\beta_1 \cos\beta_2; \qquad (2.20)$$

$$f'_{y_1} = -\frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \cos\beta_1 \cos\beta_2;$$
(2.21)

$$f'_{y_2} = \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \cos\beta_1 \cos\beta_2;$$
(2.22)

$$f'_{\beta_1} = \frac{\cos\beta_2}{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)} \left[-(y_2 - y_1)\cos\beta_2 + (x_2 - x_1)\sin\beta_2 \right];$$
(2.23)

$$f'_{\beta_2} = \frac{\cos\beta_1}{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)} \left[-(y_2 - y_1)\cos\beta_1 + (x_2 - x_1)\sin\beta_1 \right];$$
(2.24)

$$\varphi'_{x_1} = -\frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \sin\beta_1 \cos\beta_2; \qquad (2.25)$$

$$\varphi'_{x_2} = -\frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \sin\beta_1 \sin\beta_2; \qquad (2.26)$$

$$\varphi_{y_1}' = -\frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \cos\beta_1 \cos\beta_2; \qquad (2.27)$$

$$\varphi_{y_2}' = 1 + \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \cos\beta_1 \cos\beta_2; \qquad (2.28)$$

$$\varphi_{\beta_1}' = \frac{\sin \beta_2}{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)} \Big[-(y_2 - y_1) \cos \beta_2 + (x_2 - x_1) \sin \beta_2 \Big]; \qquad (2.29)$$

$$\varphi_{\beta_2}' = \frac{\sin \beta_2}{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)} [(y_2 - y_1)\cos \beta_1 + (x_2 - x_1)\sin \beta_1].$$
(2.30)

Запишемо вираз для оцінювання впливу похибок вихідних даних на
 $\varDelta X_{I\!I}$:

$$\Delta X_{u}(\Delta x_{1}) = \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \sin\beta_{1} \cos\beta_{2} \Delta x_{1}; \qquad (2.31)$$

$$\Delta X_{u}(\Delta x_{2}) = \left[1 - \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})}\sin\beta_{1}\cos\beta_{2}\right]\Delta x_{2}; \qquad (2.32)$$

$$\Delta X_{\mu}(\Delta y_1) = -\frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \sin\beta_1 \cos\beta_2 \Delta y_1; \qquad (2.33)$$

$$\Delta X_{u}(\Delta y_{2}) = \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \sin \beta_{1} \cos \beta_{2} \Delta y_{2}; \qquad (2.34)$$

$$\Delta X_{u}(\Delta \beta_{1}) = \frac{\cos \beta_{2}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} [-(y_{1} - y_{2})\cos \beta_{2} + (x_{1} - x_{2})\sin \beta_{2}] \Delta \beta_{1}; \quad (2.35)$$

$$\Delta X_{u}(\Delta \beta_{2}) = -\frac{\cos \beta_{1}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} [-(y_{2} - y_{1})\cos \beta_{1} + (x_{2} - x_{1})\sin \beta_{1}] \Delta \beta_{2}. \quad (2.36)$$

Оцінимо вплив похибок вихідних даних на величину $\Delta Y_{\mathcal{U}}$:

$$\Delta Y_{\mu}(\Delta x_1) = \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \sin\beta_1 \sin\beta_2 \Delta x_1; \qquad (2.37)$$

$$\Delta Y_{\mu}(\Delta x_2) = -\frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \sin\beta_1 \sin\beta_2 \Delta x_2; \qquad (2.38)$$

$$\Delta Y_{\mu}(\Delta y_1) = -\frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \cos\beta_1 \sin\beta_2 \Delta y_1; \qquad (2.39)$$

$$\Delta Y_{\mu}(\Delta y_2) = \left[1 + \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \cos\beta_1 \sin\beta_2\right] \Delta y_2; \qquad (2.40)$$

$$\Delta Y_{\mu}(\Delta \beta_{1}) = -\frac{\sin \beta_{2}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} [(y_{1} - y_{2})\cos \beta_{2} - (x_{1} - x_{2})\sin \beta_{2}] \Delta \beta_{1}; \quad (2.41)$$

$$\Delta Y_{u}(\Delta \beta_{2}) = \frac{\sin \beta_{1}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} [(y_{2} - y_{1})\cos \beta_{1} - (x_{2} - x_{1})\sin \beta_{1}] \Delta \beta_{2}. \quad (2.42)$$

Вираз для сумарних (повних) похибок $\Delta X_{\mathcal{U}}$, $\Delta Y_{\mathcal{U}}$ має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta X_{u} (\Delta x_{1}, \Delta y_{1}, \Delta x_{2}, \Delta y_{2}, \Delta \beta_{1}, \Delta \beta_{2}) &= \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \sin \beta_{1} \cos \beta_{2} \Delta x_{1} + \\ &+ \left[1 - \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \sin \beta_{1} \cos \beta_{2} \right] \Delta x_{2} + \left[\frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \cos \beta_{1} \cos \beta_{2} \right] \times \end{aligned}$$
(2.43)
$$\times (-\Delta y_{1} + \Delta y_{2}) + \frac{\cos \beta_{2}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} [-(y_{2} - y_{1}) \cos \beta_{2} + (x_{2} - x_{1}) \sin \beta_{2}] \Delta \beta_{1} + \\ &+ \frac{\cos \beta_{1}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} [(y_{2} - y_{1}) \cos \beta_{1} - (x_{2} - x_{1}) \sin \beta_{1}] \Delta \beta_{2}; \\ \Delta Y_{u} (\Delta x_{1}, \Delta y_{1}, \Delta x_{2}, \Delta y_{2}, \Delta \beta_{1}, \Delta \beta_{2}) &= \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \sin \beta_{1} \sin \beta_{2} (\Delta x_{1} - \Delta x_{2}) - \\ &- \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \sin \beta_{2} \cos \beta_{1} \Delta y_{1} + \left[1 + \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \cos \beta_{1} \sin \beta_{2} \right] \Delta y_{2} + \\ &+ \frac{\sin \beta_{2}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} [-(y_{2} - y_{1}) \cos \beta_{2} + (x_{2} - x_{1}) \sin \beta_{2}] \Delta \beta_{1} + \\ &+ \frac{\sin \beta_{1}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} [(y_{2} - y_{1}) \cos \beta_{1} - (x_{2} - x_{1}) \sin \beta_{1}] \Delta \beta_{2}. \end{aligned}$$

Формули (2.43) і (2.44) визначають вагове значення кожного компонента у складі загальної похибки. Формули модульних значень похибок мають вигляд:

$$\begin{aligned} \left| \Delta X_{u} \right| &\leq \left| \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \right| \sin \beta_{1} \cos \beta_{2} | \left(\Delta x_{1} \right| + |\Delta x_{2}| \right) + |\Delta x_{2}| + \\ &+ \left| \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \cos \beta_{1} \cos \beta_{2} \right| \left(\Delta y_{1} \right| + |\Delta y_{2}| \right) + \\ &+ \left| \frac{\cos \beta_{2}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} \left[-(y_{2} - y_{1}) \cos \beta_{2} + (x_{2} - x_{1}) \sin \beta_{2} \right] | \Delta \beta_{1} | + \\ &+ \left| \frac{\cos \beta_{1}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} \left[(y_{2} - y_{1}) \cos \beta_{1} - (x_{2} - x_{1}) \sin \beta_{1} \right] | \Delta \beta_{2} |; \end{aligned}$$

$$(2.45)$$

$$\begin{aligned} \left| \Delta Y_{u} \right| &\leq \left| \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \right| \sin \beta_{1} \sin \beta_{2} | \left(\Delta x_{1} \right| + |\Delta x_{2}| \right) + |\Delta y_{1}| + \\ &+ \left| \frac{1}{\sin(\beta_{1} - \beta_{2})} \sin \beta_{2} \cos \beta_{1} \right| \left(\Delta y_{1} \right| + |\Delta y_{2}| \right) + \\ &+ \left| \frac{\sin \beta_{2}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} \left[-(y_{2} - y_{1}) \cos \beta_{2} + (x_{2} - x_{1}) \sin \beta_{2} \right] \left| \Delta \beta_{1} \right| + \\ &+ \left| \frac{\sin \beta_{1}}{\sin^{2}(\beta_{1} - \beta_{2})} \left[(y_{2} - y_{1}) \cos \beta_{1} - (x_{2} - x_{1}) \sin \beta_{1} \right] \left| \Delta \beta_{2} \right|. \end{aligned}$$
(2.46)

Для аналізу точності формування кутів візування доцільно використовувати вирази

$$X_{\mu} = x_2 + \frac{1}{\sin\gamma} \left[\Delta y \cos\beta_1 - \Delta x \sin\beta_2 \right] \cos\beta_2; \qquad (2.47)$$

$$Y_{\mu} = y_2 + \frac{1}{\sin\gamma} [\Delta y \cos\beta_1 - \Delta x \sin\beta_1] \sin\beta_2, \qquad (2.48)$$

де $\gamma = \beta_2 - \beta_1, \ \Delta x = x_2 - x_1, \ \Delta y = y_2 - y_1,$ (2.49)

$$B = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \ \frac{\Delta x}{\Delta y} = tg\psi, \qquad (2.50)$$

$$\psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right), \ \beta_1 + \alpha + \psi = 90^\circ.$$
(2.51)

Положення трикутника на площині (див. рис. 2.1) однозначно визначається параметрами Δx , Δy , β_1 , β_2 , x_1 , y_2 або E, α , γ , ψ . Для зменшення кількості незалежних параметрів фіксуємо ψ . Тоді перебір параметрів E, α , визначить будьякі типи трикутників на площині. Не обмежуючи спільності, можна прийняти $\psi = 0$, тоді

$$\Delta x_{y} = 0, \quad \Delta y = \mathcal{B},$$

$$\beta_{1} + \alpha = 90^{\circ}, \quad \beta_{1} = 90^{\circ} - \alpha,$$

$$\beta_{2} = \beta_{1} - \gamma, \qquad \beta_{2} = 90^{\circ} - (\alpha + \gamma).$$
(2.52)

Вирази для визначення координат об'єкта набува вигляду

$$X_{u} = \mathbf{x}_{2} + \frac{1}{\sin \gamma} [E\sin \alpha] \sin(\alpha + \gamma),$$

$$Y_{u} = \mathbf{y}_{2} + \frac{1}{\sin \gamma} [E\sin \alpha] \cos(\alpha + \gamma),$$
(2.53)

Якщо σ^2 – дисперсія кутів візування об'єктів, то дисперсії величин $\sigma^2(X_{II})$ і $\sigma^2(Y_{II})$ визначатиміться формулами

$$\sigma^{2}(X_{u}) = \sigma^{2}\left[\left(X_{u}\right)_{\alpha}^{2} + \left(X_{u}\right)_{\gamma}^{2}\right], \qquad (2.54)$$

$$\sigma^{2}(y_{\mu}) = \sigma^{2}\left[\left(y_{\mu}\right)^{2}_{\alpha} + \left(y_{\mu}\right)^{2}_{\gamma}\right], \qquad (2.55)$$

де

$$\left(X_{u}\right)'_{\alpha} = \frac{d}{d\alpha} X_{u}, \left(X_{u}\right)'_{\gamma} = \frac{d}{d\gamma} X_{u}$$
(2.56)

$$(y_{\mu})'_{\alpha} = \frac{d}{d\alpha} y_{\mu}, (y_{\mu})'_{\gamma} = \frac{d}{d\gamma} y_{\mu}.$$
 (2.57)

Виходячи з формул (2.55) і (2.56) з урахуванням (2.53), обчислимо

$$\begin{aligned} \left(x_{u}\right)'_{\alpha} &= \frac{1}{\sin\gamma} \mathcal{B}[\cos\alpha\sin(\alpha+\gamma) + \sin\alpha\cos(\alpha+\gamma)] = \\ &= \frac{1}{\sin\gamma} \mathcal{B}\sin(2\alpha+\gamma), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(x_{u}\right)'_{\gamma} &= \mathcal{B}\sin\alpha\frac{\cos(\alpha+\gamma)\sin\gamma - \sin(\alpha+\gamma)\cos\gamma}{\sin^{2}\gamma} = \mathcal{B}\frac{\sin^{2}\alpha}{\sin^{2}\gamma}, \qquad (2.59) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(y_{u}\right)'_{\alpha} &= \frac{1}{\sin\gamma} \mathcal{B}[\cos\alpha\sin(\alpha+\gamma) - \sin\alpha\sin(\alpha+\gamma)] = \\ &= \frac{1}{\sin\gamma} \mathcal{B}\cos(2\alpha+\gamma), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(x_{u}\right)'_{\gamma} &= \mathcal{B}\frac{-\sin(\alpha+\gamma)\sin\gamma - \cos(\alpha+\gamma)\cos\gamma}{\sin^{2}\gamma} = \\ &= -\mathcal{B}\frac{\sin\alpha}{\sin^{2}\gamma}\cos\alpha. \end{aligned}$$

$$\end{aligned}$$

Уведемо нормовані величини A_x , A_y :

$$A_x = \frac{1}{\sin^2 \gamma} \sqrt{\sin^2 \gamma \sin^2 (2\alpha - \gamma) + \sin^4 \alpha} , \qquad (2.62)$$

$$A_{y} = \frac{1}{\sin^{2} \gamma} \sqrt{\sin^{2} \gamma \cos^{2}(2\alpha + \gamma) + \sin^{2} \alpha \cos^{2} \alpha} . \qquad (2.63)$$

Результати дослідження амплітуди нормованих показників A_x (2.62) і A_y (2.63) як функцій змінних α та γ наведено на рис. 2.2, а, б. Тоді

$$\sigma(x_u) = \sigma \mathcal{B} A_x,$$

$$\sigma(y_u) = \sigma \mathcal{B} A_y.$$
(2.64)

Уведемо нормовані величини B_x , B_y :

$$B_x = A_x \frac{\sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)};$$
(2.65)

$$B_{\gamma} = A_{\gamma} \frac{\sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)}.$$
 (2.66)

Результати дослідження амплітуди нормованих показників B_x (2.65) і B_y (2.66) як функцій змінних α і γ наведено на рис. 2.3, а, б.

Тоді

$$\sigma(x_u) = \sigma DB_x, \qquad (2.67)$$

$$\sigma(y_u) = \sigma DB_v. \tag{2.68}$$

Застосовуючи теорему синусів, запишемо

$$\frac{B}{\sin\gamma} = \frac{D}{\sin(\alpha + \gamma)},\tag{2.69}$$

де *D* – дальність об'єкта.



Рис. 2.2. Дослідження амплітуди нормованих показників A_x (2.62) і A_y (2.63) як функцій змінних α та γ



Рис 2.3. Дослідження амплітуди нормованих показників як функцій змінних α та γ : а – B_x – вираз (1.65) і б – B_y – вираз (1.66)

Тоді

$$(x_{\mu})'_{\alpha} = E \frac{\sin(2\alpha + \gamma)}{\sin\gamma};$$
 (2.70)

$$(x_{u})'_{\gamma} = E \frac{\sin^{2} \alpha}{\sin^{2} \gamma}; \qquad (2.71)$$

$$(y_{\mu})'_{\alpha} = E \frac{\cos(2\alpha + \gamma)}{\sin\gamma};$$
 (2.72)

$$\left(y_{\mu}\right)_{\gamma} = -B \frac{\sin \alpha}{\sin^{2} \gamma} \cos \alpha \,. \tag{2.73}$$

Запишемо дисперсії похибок по кожній координаті:

$$D_{nox}(x_{y}) = \sigma^{2}(x_{y}) = \sigma^{2} B^{2}(\sin^{2} \gamma \sin^{2}(2\alpha + \gamma) + \sin^{4} \alpha) \frac{1}{\sin^{4} \gamma}, \qquad (2.74)$$

$$D_{nox}(y_{\mu}) = \sigma^2(y_{\mu}) = \sigma^2 \mathcal{B}^2(\sin^2 \gamma \cos^2(2\alpha + \gamma) + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha) \frac{1}{\sin^4 \gamma}.$$
 (2.75)

Отже, середньоквадратичне значення похибок визначення координат об'єкта по кожній з координат можна обчислити з виразів:

$$\sigma(x_{u}) = \sigma E \frac{1}{\sin^{2} \gamma} \sqrt{\sin^{2} \gamma \sin^{2} (2\alpha + \gamma) + \sin^{4} \alpha}; \qquad (2.76)$$

$$\sigma(y_{\mu}) = \sigma E \frac{1}{\sin^2 \gamma} \sqrt{\sin^2 \gamma \cos^2(2\alpha + \gamma) + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} . \qquad (2.77)$$

Аналіз середньоквадратичних значень похибок методом моделювання проводився за умови зміни дальності D і бази E від 1000 м до 20000 м і точності знімання кутових координат $\sigma = 0,1$ мрад (20"), 0,2 мрад (41"), 0,3 мрад (62"). Результати розрахунків наведено на рис. 2.4, а – для $\sigma(x_{il})$ та рис. 2.4, б – для $\sigma(y_{il})$. Результати дослідження показують, що при точності визначення координат 20" максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 5 м або 0,025 % від дальності на відміну од відомих IBC, у яких що при точності визначення координат 60" максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 12 м або 0,06 % від дальності.

Проведені дослідження дають можливість зробити наступні висновки:

- запропоновано методику розрахунку координат об'єкта, яка полягає у вимірюваннях кутових координат візування тільки кутів курсу IBC, встановленого на рухомому носії, вона спрощує алгоритм обчислення координат об'єкта пошуку, зменшує завантаження БЦОМ в 2-3 рази, але вимагає робити рух стосовно об'єкта за вибраним законом типу «віраж-∞»;



Рис. 2.4. Дослідження середньоквадратичної похибки обчислення координат об'єкта в СПК: Д – дальність; Б – база

- отримано вирази оцінювання середньоквадратичних похибок визначення координат об'єкта в СПК, які дозволили знизити вимоги до точності датчиків кута візування за курсом у 2 рази, чим знижено вартість IBC і підвищено технологічність серійного виготовлення; отримано результати, які можна застосувати при розроблені нових оптичних приладів, встановлюваних на рухомих носіях для вимірювання координат об'єктів у СПК або в інших системах координат.

Запропоновано оригінальний метод визначення координат об'єктів до нанесення їх на топографічні карти в прямокутній системі координат шляхом візування кутового положення об'єкта навігаційною системою (комплексом) з рухомого носія, що здійснює локацію об'єктів пошуку вздовж траєкторії типу «віраж-∞» та отримано математичні вирази для розрахунку координат об'єкта в СПК на основі багатократного вимірювання тільки однієї координати курсу.

2.2. Методи забезпечення точності системи керування ІВС

Розглядається задача якісного аналізу базової структури системи управління лінією візування IBC, її пристроїв і елементів, необхідних для розвязання задач забезпечення заданих характеристик і високих показників якості систем наведення (точності, стійкості тощо) і стабілізації лінії візування з урахуванням нелінійних ефектів і умов функціонування в нормальних і спеціальних умовах (удар, вібрації) [27; 30; 34; 58; 78; 110].

Задача якісного аналізу розвязується, виходячи з необхідності (порівняно з аналогами): забезпечення двократного підвищення точності стабілізації лінії візування за курсом і тангажем (до 20") при дії збурень з боку об'єкта-носія в широкому спектрі частот (від 0,1 до 500 Гц) вздовж трьох осей: курсу, тангажу і крену; забезпечення точності стабілізації лінії візування (похибка не більше 20") у спеціальних умовах – в діапазоні робочих температур (від –60 °C до +75 °C); визначення граничних вимог по допустимим величинам дисбаланса елементів конструкції, моментів тертя і пружності елементів.

2.2.1. Функціональна схема СК ІВС для забезпечення точності визначення лінії візування ІВС

В оптичних електронних приладах IBC наведення і стабілізація ліній візування відбувається завдяки введенню в їх склад керуємих гіростабілізаторів, які забезпечують наведення та просторову стабілізацію поля зору.

Для розвязання задач наведення вони повинні включати канали, що забезпечують малу похибку наведення – до 20" (у аналогів до кількох кутових хвилин [67]), широкого діапазону швидкостей – до 3000 (у аналогів 50-100), наведення на малих швидкостях – до 0,01-0,005 °/c (у аналогів 0,05-0,075 °/c), забезпечення максимальних швидкостей – до 30 °/c (у аналогів 4,5 °/c).

Системи керування IBC мають забезпечувати такі режими роботи: програмний (від бортової БЦОМ), ручний (від оператора), напівавтоматичний або такий, що коррегується (від БЦОМ і оператора одночасно з пріоритетом оператора), від нашоломного приладу пілота і автоматичний (від телевізійного координатора).

Основним режимом керування для них є напівавтоматичний і ручний режими роботи, які забезпечує оператор і БЦОМ. Оператору, як ланці системи наведення, властиве запізнювання і тремор рук, пов'язані з його внутрішніми характеристиками і зовнішніми вібраціями носія оптичного приладу (ОП).

Функціональна схема СК ІВС (рис. 2.5) побудована на базі двоступеневого гіростабілізатора і включає канали наведення за курсом і тангажем. ГС складається з внутрішньої рамки (гіроплатформи 1), зовнішньої рами 2 і корпусу 3, 4. У зовнішній рамі встановлено гіростабілізоване головне дзеркало 5, яке через стрічкову передачу 6 зв'язане з гіроплатформою 1. На гіроплатформі 1 встановлено два двоступеневих гіроскопа 7 (тангажа) і 8 (курса), кожний з яких включає гіроскопи 9 і 10, датчики моменту 13, 14 і датчики непогодженості (розугодження) 11, 12. По осям карданового підвісу

встановлені розвантажувальні двигуни 15 (по тангажу) і 16 (по курсу) і датчики кута ГС 17 (по тангажу) і 18 (по курсу). ГС, що керується, виконує два завдання: компенсує збурюючий момент хитання, спричинене хитанням носія, тобто стабілізує поле зору, і переміщує головне дзеркало, наводить лінію візування оптичного приладу в потрібному напрямі. Стабілізація, тобто компенсація збурюючого моменту, який виникає від дії носія, відбувається завдяки підсиленню напруги непогодженості, що виникає в датчиках 11 або 12 і підсиленого підсилювачами розвантаження за тангажем 19 і курсом 20, і двигунів стабілізації, що розвивають моменти, які компенсують збурюючі зовнішні моменти. Канал наведення має пульт наведення 21, підсилювачі наведення за тангажем 22 і курсом 23 і датчики моментів 13 (за тангажем) і 14 (за курсом), рис. 3.1. Оператор 24 поворотом ручок пульта наведення оператора (ПН) переміщує датчик наведення, вихідна напруга якого надходить на підсилювач і датчик моменту, створюючи керуючий момент вздовж осі наведення. Це спричинює прецесію гіроскопів 9 (за тангажем) і 10 (за курсом). Внаслідок прецесії виникає неузгодженість у датчиках 11, 12. З датчиків непогодженості кута прецесії знімається напруга, пропорціональна куту повороту гіровузла 8 (за курсом) і 9 (за тангажем), яка подається на підсилювач 19 (за тангажем) і 20 (за курсом), а потім на двигуни розвантаження 15, 16. Двигуни розвантаження створюють момент, що в сумі з гіроскопічним моментом компенсує збурюючий момент.



Рис. 2.5. Функціональна схема СК IBC, що має канали наведення і стабілізації головного дзеркала

2.2.2. Синтез параметрів елементів і пристроїв системи керування ІВС при кутових збуреннях носія

Система керування IBC має складні електромеханічні системи стабілізації, системи наведення та високоточні слідкуючі приводи. Система стабілізації та наведення будуються на базі гіроскопічних стабілізаторів. Для збільшення дальності виявлення об'єктів слід збільшувати оптичну кратність і точність стабілізації гіростабілізаторів. У літературі [30] розглядаються питання забезпечення точності системи стабілізації IBC без збурення носія. Реально підчає встановлювання IBC на рухомі об'єкти на них діють збурення в широкому діапазоні частот, що значно ускладнює завдання забезпечення необхідної точності стабілізації та вимагає додаткових досліджень.

Розглянемо питання аналізу точності стабілізації головного дзеркала гіростабілізатора та впливу на цей показник окремих елементів його конструкції, зокрема, вплив жорсткості пружини стрічок передавання кутового руху від ГС до головного дзеркала і величини припустимого зусилля натягу стрічок.

Базову кінематичну схему СК ІВС за тангажем наведено на рис. 2.6, а вигляд з боку механізму передавання руху – рис. 2.7. СК забезпечує стабілізацію поля зору через ГД за допомогою металевих стрічок Л1, Л2, які розміщені на шківах $Ш_{\Gamma C}$ і $Ш_{\Gamma A}$. Для забезпечення певного натягу стрічок у механізм натягу введено ричаг Г и пружину П. Натяг стрічок забезпечується підбиранням жорсткості пружини, жорсткості стрічок і положення ричага.

Зовнішні високочастотні збурення створюють додатковий змушений рух ГД і ГС і знижують точність стабілізації ГД. Для аналізу похибки стабілізації ГД розглянемо передавання руху від ГС на ГД рис. 2.7 у вигляді диференціальних рівнянь. Для зручності складання рівнянь руху ГД коливання зовнішньої рамки замінимо еквівалентними за своїм впливом коливаннями

гіроплатформи. У загальному вигляді рівняння руху головного дзеркала має вигляд

$$I_{\Gamma \Pi} \ddot{\beta}(t) = M_{\Gamma \Pi}(t), \qquad (2.78)$$

де $\beta(t)$ – кут повороту головного дзеркала,

 $I_{\Gamma \square}$ – сумарний момент інерції дзеркала ГД, шківа $III_{\Gamma \square}$ і ричага щодо осі 0;

 $M_{\Gamma \Pi}(t)$ – сумарний момент сил, які діють на ГД, що дорівнює

$$M_{\Gamma \mathcal{I}}(t) = F(t)R + M_D, \qquad (2.79)$$

де R – радіус шківа $Ш_{\Gamma Д}$, встановленого на осі ГД;

F(t) – сила, що діє на дзеркало з боку стрічок;

M_D – демпфуючий момент, пропорційний швидкості повороту ГД
 (моментом тертя в підвісі ГД і моментом дисбалансу ГД щодо осі О нехтуємо через їх малу величину).







Рис. 2.7. Кінематична схема передавання руху від ГС на ГД

Сила, що діє на ГД із боку стрічок,

$$F(t) = c_2 \Delta x(t) - c_1 Y_1 \beta_2(t), \qquad (2.80)$$

- де c_1 жорсткість пружини П;
 - с₂ жорсткість стрічок Л1, Л2;
 - $\Delta x(t)$ деформація стрічок;
 - $\beta_2(t)$ кут повороту ричага навколо O_2 ;
 - Y₁ відстань між віссю пружини в механізмі натягу та віссю O₂ повороту ричага Г.

Деформація стрічок

$$\Delta x(t) = R_1 \beta_1(t) - R \beta(t) - Y_2 \beta_2(t), \qquad (2.81)$$

де $\beta_1(t)$ – кут повороту гіроплатформи навколо O_1 ;

 Y_2 – радіус натягу стрічок ричага Pщодо осі ${\it O}_2$;

 R_1 – радіус шківа гіроплатформи Ш_{ГД};

R – радіус шківа Ш_{ГД}, встановленого на головному дзеркалі.

Для узгодження кутів повороту гіроплатформи та оптичної лінії візування слід виконати умову $R = 2R_1$.

Демпфуючий момент

$$M_{\mathcal{I}} = D_1 \beta_1(t), \qquad (2.82)$$

де D_1 – коефіцієнт демпфірування.

3 урахуванням формул (2.81–2.82), вираз (2.79) набув вигляду

$$M_{\Gamma \mu}(t) = c_2 R\{[0,5\beta_1(t) - \beta(t)]R\} - Y_2 \beta_2(t) - c_1 R Y_1 \beta_2(t) - D_1 \beta(t).$$
(2.83)

З урахуванням (2.83) рівняння (2.79) для руху ГД має вигляд

$$J_{\Gamma \not \exists} \ddot{\beta}(t) + D_1 \dot{\beta}(t) + c_2 R^2 \beta(t) + R(c_2 Y_2 + c_1 Y_1) \beta_2(t) = 0.5 c_2 R^2 \beta_1(t).$$
(2.84)

Рівняння руху ричага навколо осі *О*₂

$$J_{p}\ddot{\beta}_{2}(t) = M_{p}(t),$$
 (2.85)

де J_p – момент інерції ричага щодо осі O_2 ;

 $M_{p}(t)$ – момент зовнішніх сил, прикладених до ричага,

$$M_{p}(t) = F_{1}(t)Y_{2} - M_{02}(t) - \dot{M}_{A}, \qquad (2.86)$$

де $M_{02}(t) = c_1 Y_1 \Delta y(t)$ – момент від дії пружини із жорсткістю c_1 ;

 $\Delta y(t) = Y_1 \beta_2(t)$ – деформація пружини П;

 $F_1(t) = c_2 \Delta x(t)$ – сила деформації пружини П, де $\Delta x(t)$ визначається з виразу (2.81).

 $M_{\mathcal{A}} = D_2 \dot{\beta}_2(t)$ – сила демпфірування, що залежить від швидкості ричага, де D_2 – коефіцієнт демпфірування ричага.

Підставивши ці значення у вирази (2.85), (2.86), одержимо:

$$J_{P}\ddot{\beta}_{2} + D_{2}\dot{\beta}_{2}(t) + (c_{2}Y_{2}^{2} + c_{1}Y_{1}^{2})\beta_{2}(t) + c_{2}RY_{2}\beta(t) = 0,5c_{2}RY_{2}\beta_{1}(t). \quad (2.87)$$

Величина хитання гіроплатформи дорівнює

$$\beta_1(t) = \Theta_0 \sin \omega t \,. \tag{2.88}$$

Перша та друга похідні від функції $\beta_1(t)$

$$\dot{\beta}_1(t) = \Theta_0 \omega \cos \omega t , \qquad (2.89)$$

$$\ddot{\beta}_1(t) = -\Theta_0 \omega^2 \sin \omega t \,. \tag{2.90}$$

Отже, змушений рух головного дзеркала описується наступною системою лінійних диференціальних неоднорідних рівнянь із постійними коефіцієнтами:

$$J_{\Gamma \not \Box} \ddot{\beta}(t) + D_1 \dot{\beta}(t) + c_2 R^2 \beta(t) + R(c_2 Y_2 + c_1 Y_1) \beta_2(t) = 0.5 c_2 R^2 \beta_1(t), \quad (2.91)$$

$$J_{P}\ddot{\beta}_{2} + D_{2}\dot{\beta}_{2}(t) + (c_{2}Y_{2}^{2} + c_{1}Y_{1}^{2})\beta_{2}(t) + c_{2}RY_{2}\beta(t) = 0,5c_{2}RY_{2}\beta_{1}(t).$$
(2.92)

Виділяючи з рівняння системи (2.91) величину β , двічі її диференціюючи за часом і підставляючи отримані вирази β , $\dot{\beta}$ і $\ddot{\beta}$ в (2.92) отримаємо рівняння руху ГД навколо осі *O*:

$$J_{\Gamma \mu} J_{\rho} \beta^{(4)} + (J_{\rho} D_{1} + J_{\Gamma \mu} D_{2}) \beta^{(3)} + + [J_{\rho} c_{2} R^{2} + D_{1} D_{2} + J_{\Gamma \mu} (c_{2} Y_{2}^{2} + c_{1} Y_{1}^{2})] \beta^{(2)} + + [D_{2} c_{2} R^{2} + D_{1} (c_{2} Y_{2}^{2} + c_{1} Y_{1}^{2})] \beta^{(1)} + c_{1} c_{2} R^{2} Y_{1} (Y_{1} - Y_{2}) \beta = = 0.5 c_{2} R^{2} \ddot{\alpha}_{1} + 0.5 D_{2} c_{2} R^{2} \dot{\alpha}_{1} + 0.5 c_{1} c_{2} R^{2} (Y_{1}^{2} - Y_{1} Y_{2}) \alpha_{1}.$$

$$(2.93)$$

Підставивши вирази (2.88), (2.89) у рівняння (2.91), одержимо рівняння, що описує поведінку елементів ГС і ричага механізму натягу стрічок залежно від параметрів ГС (Y_1 , Y_2 , D_1 , D_2 , c_1 , c_2 , R), амплітуди хитання, спричинене поведінкою носія:

$$J_{\Gamma \mu} J_{\rho} \beta^{(4)} + (J_{\rho} D_{1} + J_{\Gamma \mu} D_{2}) \beta^{(3)} + + [J_{\rho} c_{2} R^{2} + D_{1} D_{2} + J_{\Gamma \mu} (c_{2} Y_{2}^{2} + c_{1} Y_{1}^{2})] \beta^{(2)} + + [D_{2} c_{2} R^{2} + D_{1} (c_{2} Y_{2}^{2} + c_{1} Y_{1}^{2})] \beta^{(1)} + c_{1} c_{2} R^{2} Y_{1} (Y_{1} - Y_{2}) \beta = = 0.5 c_{2} R^{2} [c_{1} Y_{1} (Y_{1} - Y_{2}) - J_{\rho} \omega^{2}] \Theta_{0} \sin \omega t + 0.5 D_{2} c_{2} R^{2} \omega \Theta_{0} \cos \omega t.$$

$$(2.94)$$

Отримана модель дає можливість досліджувати властивості проектованих ГС, оцінювати вплив усіх суттєвих параметрів і, таким чином, виконувати завдання аналізу системи. Зокрема, за допомогою даної моделі було отримано наступні розрахункові дані при проектуванні конкретних ГС, рис. 3.4.

При значеннях $Y_1 = 9,8$ мм, $Y_3 = 2,2$ мм, $I_{\Gamma \square} = 3$ гсм·с², $I_P = 0,013$ гсм·с², R = 32 мм, $Y_2 = 16$ мм, а також при варіації параметрів c_1, c_2, D_1, D_2 і при різних частотах коливань ω було досліджено амплітуду φ похибки ГД.

Також було досліджено вплив пружини різної жорсткості: $c_{1,2} = 0,125$ кг/мм (пружина N1), $c_{1,2} = 0,225$ кг/мм (пружина N2), $c_{1,3} = 1,0$ кг/мм (пружина N3), $c_{1,4} = 0,005$ кг/мм (пружина N4), $c_{1,5} = 0,003$ кг/мм (пружина N5) і $c_{1,6} = 0,01$ кг/мм (пружина N6).

Залежність похибки стабілізації головного дзеркала від частоти для наведених типів пружин показано на рис. 2.8.

Розвязання рівняння (2.94) при різних значеннях сили натягу та стрічок і жорсткості стрічок c_2 дає змогу визначити залежність похибки стабілізації головного дзеркала від жорсткості стрічок, сили натягу та частоти коливань основи ГС (результати досліджень показано на рис. 2.9).



Рис. 2.8. Залежність похибки стабілізації ГД від частоти зовнішніх коливань при різній жорсткості пружин:

 $2-c_{1,2}=0,225\,$ кг/мм (пружина N2), $4-c_{1,4}=0,005\,$ кг/мм (пружина N4) і 5 $-c_{1,5}=0,003\,$ кг/мм (пружина N5)

На рис. 2.8, 2.9, на частотах від 80 до 120 Гц та 140 – 210 Гц спостерігається квазірезонансне збільшення похибки стабілізації. Перше збільшення амплітуди коливань є наслідком квазірезонансу платформи ГС, а друге – квазірезонансу головного дзеркала. Електронне моделювання дало можливість оцінити роль жорсткості пружини ричага натягувача, жорсткості стрічок механізму передачі руху та сили їх натягу, що приводить до необхідності контролювати ці величини при роботі ГС.

Моделювання дозволило також провести дослідження з вибору жорсткості та довжини пружини механізму натягача (таблиця 2.1). В результаті досліджень було запропоновано наступне: пружина П N5 із жорсткістю $c_{1,5} = 0,003$ кг/мм і стрічка із силою натягу 175 г. Амплітуда коливань ГД у діапазоні 20-70 Гц та 150-200 Гц (див. рис. 2.8) не перевищує 1,4', а на інших частотах – 40".



Рис. 2.9. Залежність похибки системи стабілізації від сили натягу стрічок

Таблиця 2.1

Визначення жорсткості пружини для забезпечення припустимих амплітуд

вібрацій

Сила,	Π	ереміш	цення і	Жосткість пружини,			
	№ 1	N⁰2	N <u>∘</u> 3	N <u>∘</u> 4	№ 5	№ 6	KI/MM
25	_	_	_	_	_	_	№1-0,125
50		_	_	_			№2-0,025
100	_				_		Nº3- 1
125	3	_	_	11	6		№4-0,005
150	26			42	85	_	-
175	60	_	_	82	200	_	№5-0,003
200	75	_	5	143	_	_	№6-0,01
225	75	—	10	243	_	_	_
250	90	—	15	—	-	5	_
275	_	_	20	_	_	30	_

	300	120	—	_	—	—	52	_
--	-----	-----	---	---	---	---	----	---

Практичним результатом досліджень є багатопараметричний синтез елементів конструкції ГС, що дозволило вибрати або розрахувати твердість пружин, твердість стрічок і силу натягу стрічок, залежно від амплітуди та частоти збурюючих коливань. Встановлено наявність квазірезонансного збільшення похибки стабілізації в діапазоні високих частот. Все це дало можливість виробити вимоги до елементів конструкції системи стабілізації, що забезпечують задану точність стабілізації ГД.

В результаті проведених конструктивних, схемних удосконалень, забезпечено: високу точність наведення до 1' (існуючі IBC забезпечують точність наведення більше 3'); високу точність стабілізації лінії візування 20" (існуючі системи стабілізації забезпечують похибку стабілізації більше 60"); можливість роботи в умовах дії дестабілізуючих факторів зовнішнього середовища: широкого спектра високочастотних коливань об'єкта носія — від 5 до 500 Гц (існуючі системи керування забезпечують роботу в діапазоні від 20 до 40 Гц)

2.2.3. Дослідження вібростійкості системи керування IBC за тангажем

Система керування (наведення та стабілізації) ІВС включає складні механічні та електронні пристрої. При встановленні ІВС на рухомий носій на нього діють зовнішні збурення у широкому діапазоні частот, які часто призводять до резонансних явищ і порушення точності та працездатності СК. Для досліджуваного класу СК ІВС, забезпечення вимог до точності (помилка стабілізації не більше 20") у діапазоні зовнішніх коливань від 1 до 400 Гц є досить важким завданням. Досягнення високої точності завдяки підвищенню добротності та введення коригуючих підсилювачів зумовлює позитивні

результати у діапазоні низьких частотних збурень. Появу похибок на високих частотах поки ще не досить досліджено. У зв'язку із цим розглянемо питання оцінювання впливу окремих елементів конструкції ГС на точність системи стабілізації, а саме, питання про вплив незбалансованості конструкції механізму натягу стрічок для передачі кута від ГС на ГД.

Кінематичну схему пристрою передавання кутового руху на головне 2.10. Стабілізація поля показано на рис. зору дзеркало оператора забезпечується завдяки стабілізації головного дзеркала за допомогою передачі кутового руху за допомогою металевих стрічок Л₁, Л₂, розміщених на шківі шків головного дзеркала Ш_{ГЛ}. Основним гіростабілізатора Ш_{ГС}, на елементом конструкції, що вносить незбалансованість, є ричаг R, що стрічок. Передбачається при прискоренні забезпечує натяг ЩО W. спрямованому уздовж осі повороту зовнішньої рами ГС, на ричаг R діє сила, прикладена до центра мас (ЦМ) *F*. Ричаг створює навколо осі O_2 на плечі Y_4 змінний за знаком момент, що стискає або розтягує пружину П, тобто приведе до ослаблення або натягу стрічки Л₁ і Л₂, що, у свою чергу, призводить до додаткових коливань дзеркала навколо своєї осі обертання О за тангажем.



Рис. 2.10. Кінематична схема механізму передачі руху від ГС на ГД

Для обертального руху ричага *R* навколо осі *O*₂, відповідно до теореми про зміну кінетичного моменту руху ричага, маємо

$$\frac{dK_0}{dt} = \overline{L}_0, \qquad (2.95)$$

де K_0 – вектор кінетичного моменту ричага відносно осі O_2 ;

 L_0 – вектор головного моменту зовнішніх сил, що діють на ричаг.

Рух ричага в системі координат, пов'язаної із зовнішньою рамкою ГС, запишемо у вигляді рівняння в проекціях на вісь, що проходить через вісь *O*₂ перпендикулярно до площини, у якій обертається ричаг:

$$\frac{d\overline{K}_0}{dt} = \frac{d(I_0\dot{\beta}_2)}{dt} = I_0\ddot{\beta}_2; \qquad (2.96)$$

$$L_{0} = Y_{4}F_{0}\cos(\omega t + \varphi) - C_{1}(\varDelta l_{1} + \beta_{2}Y_{1})Y_{1} + C_{2}(\varDelta l_{2} - \beta_{2}Y_{2})Y_{2} + C_{2}Y_{2}(\varDelta l_{3} - \beta_{2}Y_{2}) + M_{0}sign(\dot{\beta}_{2}),$$
(2.97)

де $F_0 \cos(\omega t + \varphi)$ – гармонійна сила, що діє на ричаг R при дії прискорення W на

- ГС із частотою ω паралельно важелю R;
- φ зсув фази коливань при дії сили F_0 на ричаг R;
- С₁, С₂ жорсткість пружини та стрічок, відповідно;
- l_1, l_2, l_3 початкові деформації пружини та стрічок, відповідно;
- M_0 момент сухого тертя відносно осі O_2 (при $\dot{\beta}_2 > 0$, $M_0 > 0$, а при $\dot{\beta}_2 < 0$ $M_0 < 0$;
- Y₁ відстань між віссю кутового повороту ричага *R* і центром установлення пружини П;
- Y_2 відстань від центра осі ричага до стрічки натягу Π_1 і Π_2 ;
- β_2 кут повороту ричага *R* навколо осі O_2 .

Опором, пропорційним швидкості руху стрічки, зневажаємо у зв'язку з його малістю порівнянно з моментом тертя в опорах дзеркала. До початку дії вібрацій мала місце рівність:

$$C_1 \Delta l_1 Y_1 = C_2 \Delta l_2 Y_2 + C_2 \Delta l_3 Y_3, \qquad (2.98)$$

де Y₃ – відстань від осі повороту ричага до осі внутрішньої рами ГС (осі головного дзеркала). Рівняння (2.96) з урахуванням (2.97), (2.98) набуває вигляду

$$I_0\ddot{\beta}_2 + \left[C_1Y_1^2 + C_2\left(Y_2^2 + Y_3^2\right)\right]\beta_2 + M_0 sign\dot{\beta}_2 = Y_4F_0\cos(\omega t + \varphi). \quad (2.99)$$

Для розвязання цього рівняння позначимо:

$$C_1 Y_1^2 + C_2 \left(Y_2^2 + Y_3^2 \right) = C_0.$$
 (2.100)

Нехтуючи проміжком у зубчастій передачі ричага натягу R, можна прийняти $\Delta l_2 = \Delta l_3$, тоді вираз (2.100) має вигляд

$$C_1 Y_1^2 + 2C_2 \left(Y_2^2 \right) = C_0.$$
(2.101)

Якщо врахувати, що $p^2 = \frac{C_0}{I_0}$ – квадрат частоти власних коливань та

ввести заміни $a = \frac{M_0}{C_0}$, $A_0 = \frac{F_0 Y_4}{C_0}$, $A_0 p^2 = \frac{F_0 Y_4}{C_0} \frac{C_0}{I_0}$ при $0 \le t \le \pi/\omega$, де $\beta_2' \le 0$, то

рівняння (2.99) набуває вигляд

$$\ddot{\beta}_2 + p^2 \beta_2 - a p^2 = A_0 p^2 \cos(\omega t + \varphi).$$
(2.102)

Розвязуючи рівняння (2.97) на кожному напівперіоді, можна одержати рівняння руху ричага. Найцікавішими є амплітудні значення кутових коливань ричага. Із цією метою визначимо загальний розвязок рівняння (2.102) у вигляді

$$\beta_{2} = C_{1} \cos pt + C_{2} \sin pt + a + \frac{A_{0} \cos(\omega t + \varphi)}{1 - \left(\frac{\omega^{2}}{p^{2}}\right)},$$
(2.103)

де C_1 , C_2 – константи, визначені з початкових умов:

$$t = 0, \quad \beta_2 = A, \quad \dot{\beta}_2 = 0, t = \pi/\omega, \quad \beta_2 = -A, \quad \dot{\beta}_2 = 0.$$
(2.104)

Підставляючи значення (2.104) в (2.103), одержимо рівняння, з якого можна визначити амплітуду *А* коливань ричага:

$$A = \frac{\sqrt{A_0^2 - A^2 \left[\frac{p}{\omega} \cdot tg \frac{\pi p}{2\omega} \left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)\right]^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)}.$$
(2.105)

З використанням позначень з (2.102), вираз (2.105) набуде до вигляду:

$$A = \frac{\sqrt{F_0^2 Y_4^2 - M_0^2 \left[\left(\frac{p}{\omega} - \frac{\omega}{p} \right) \cdot tg \frac{\pi p}{2\omega} \right]^2}}{\left[C_1 Y_1^2 + C_2 \left(Y_2^2 + Y_3^2 \right) \right] \left(1 - \frac{\omega^2}{p^2} \right)}.$$
 (2.106)

Якщо маса ричага *m*, амплітуда вібрацій (при цьому x_0 амплітуда прискорення дорівнює x_0^2), то

$$F_0 = mx_0 \omega^2. (2.107)$$

Тоді в остаточному вигляді формулу для визначення амплітуди кутових коливань ричага запишемо так:

$$A = \frac{\sqrt{m^2 x_0^2 \omega^4 Y_4^2 - M_0^2 \left[\left(\frac{p}{\omega} - \frac{\omega}{p} \right) \cdot tg \frac{\pi p}{2\omega} \right]^2}}{\left[C_1 Y_1^2 + C_2 \left(Y_2^2 + Y_3^2 \right) \right] \left(1 - \frac{\omega^2}{p^2} \right)}.$$
 (2.108)

Металеву стрічку можна представити як пружний елемент, що має нескінченно велику жорсткість в одному напрямку та нульову – в іншому. У разі ослаблення стрічки (коли пружина стискається, $C_2 = 0$), маємо

$$A = \frac{\sqrt{m^2 x_0^2 \omega^4 Y_4^2 - M_0^2 \left[\left(\frac{p}{\omega} - \frac{\omega}{p} \right) \cdot tg \frac{\pi p}{2\omega} \right]^2}}{C_1 Y_1^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{p^2} \right)}.$$
 (2.109)

В області резонансу при $\omega \rightarrow p$ маємо [54]

$$\lim_{\omega \to p} \left(\frac{p}{\omega} - \frac{\omega}{p} \right) tg \frac{\pi p}{2\omega} =$$

$$= \lim_{\omega \to p} \frac{-2\omega \sin \frac{\pi p}{2\omega} + \left(p^2 - \omega^2 \right) \left(-\frac{\pi p}{2\omega^2} \right) \cos \frac{\pi p}{2\omega}}{p \cos \frac{\pi p}{2\omega} + \frac{\pi p}{2\omega^2} \sin \frac{\pi p}{2\omega} \omega p} = -\frac{4}{\pi}.$$
(2.110)

З урахуванням (2.110) для резонансної області, формула (2.109) набуде вигляду:

$$A = \frac{\sqrt{m^2 x_0^2 \omega^4 Y_4^2 - M_0^2 \frac{4^2}{\pi^2}}}{C_1 Y_1^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)}.$$
 (2.111)

Коливання ричага можуть виникнути тільки за умови

$$\frac{1}{4}mx_0\omega^2 Y_4\pi \ge M_0.$$
 (2.112)

Амплітуда коливання головного дзеркала, що розрахована за формулою (2.109) і показана на рис. 2.11 (характеристика 1), на резонансній частоті 280 Гц досягає 1,5', що перевищує припустимі значення. Як видно з формули (2.109), амплітуда коливань залежить від маси ричага та відстані від його осі повороту до лінії закріплення пружини натягу стрічок. Звідси випливає рекомендація про зменшення абсолютної величини похибки за допомогою заміни матеріалу ричага на метал зі зменшеною питомою вагою та зменшення плеча Y_4 , а також зменшенням відстані між віссю ричага та центром маси ричага. На практиці це зумовлює до зменшення амплітуди в *1,4 раза* та зсув резонансної частоти до 320 Гц (рис. 2.11, характеристика 2). Ці рекомендації було реалізовано в дослідних зразках СК ІВС.



Рис. 2.11. Дослідження зміни коливань ГД залежно від величини незбалансованості ричага

2.2.4. Синтез елементів опори системи керування IBC за курсом в умовах багаторазових ударних впливів

Особливістю розроблення систем керування навігаційних систем, розташованих на рухомих носіях (літаках, вертольотах, кораблях, катерах, рухомих наземних машинах), є необхідність погодження зв'язку оптичного елемента із системою керування IBC і корпусом приладу. Складність розвязання цієї задачі спричинена більшим діаметром апертури оптичного променя (діаметр апертури становить від 150 мм до 250 мм), високими ударними збуреннями 0,5-2,0g, широким діапазоном високочастотних збурень від 5 до 500 Гц, обмеженими масою та габаритами головки керування та системи керування в цілому.

Завданням досліджень при розробленні системи керування навігаційного комплексу є: вибір конструктивної схеми опори, що забезпечує пропущення апертури оптичних променів великого діаметра; розроблення математичної моделі системи керування для дослідження її параметрів, забезпечення віброударної міцності та надійності її елементів і пристроїв, що виключають руйнування матеріалу та заклинювання опор, і забезпечення мінімальних маси та габаритів головки системи керування.

Як схема опори можуть розглядатися варіанти: опори із силовим підшипником кочення або ковзання [52, 71] та опори з металевим кільцем і роликами, установленими з гарантованими проміжками. Схеми опор з підшипниками кочення або ковзання мають більшу масу, великий момент статичного тертя (що перевищує 300 г·см) і не забезпечують регулювання проміжку в з'єднанні. Конструктивну схему, що включає металеве кільце та регульовані ролики (най кращою є схема із застосуванням трьох роликів R1– R3, встановлених під кутом 120°) представлена на рис. 2.12 і дозволяє забезпечити високу просторову точність, установлювати бажаний зазор у з'єднанні та регулювати момент тертя. На рис. 2.12 а позначено: *I* – металеве кільце, нерухомо з'єднане із зовнішньою рамою гіростабілізатора, що включає

головне дзеркало 4, гіростабілізатор 5 і зовнішню раму, разом встановлені в опорно-радіальний шарикопідшипник і підковоподібну опору 2; 3 – ролики, 6 – корпус оптичного приладу, з'єднаний з рухомим носієм. На рухомому носії, внаслідок знакозмінних збурень корпуса носія у з'єднанні виникають періодичні коливання деталей.



Рис. 1.12. Структурна схема компонування системи керування навігаційного комплексу з головним дзеркалом і гіростабілізатором

Для проведення теоретичного аналізу процесів, що відбуваються у з'єднанні, слід розробити розрахункову схему з'єднання. Схема повинна бути як можна простіше, але при цьому не повинна спотворювати реальну картину процесів, що відбуваються. Запропонована наступна розрахункова схема рис. 2.13.



Рис. 2.13. Розрахункова модель системи керування оптичного приладу за курсом у режимі вібраційних впливів

На схемі систему керування в режимі вібраційних впливів можна представити у вигляді зосередженої маси гіростабілізатора m і маси ролика, жорстко встановлених у корпус приладу (точніше, зовнішні кільця шарикопідшипника, установленого на тверду опору, нерухомо пов'язану з корпусом приладу). Маса m розділена з роликами проміжком δ_p .

Оскільки нижню опору виконано у вигляді опорно-радіального підшипника, її модель можна зобразити у вигляді шарнірної опори, що має можливість робити переміщення на кут φ . Зважаючи на те, що реальний проміжок розглянутої конструкції $\delta_p = 0,03$ мм, а плече L=280 мм, кут повороту буде малим. При цьому траєкторія руху наведеної маси *m* буде близька до прямолінійної, що дає змогу з великою ймовірністю схему на рис. 2.13, а перетворити у модель, показану на рис. 3.9, б. Виходячи із прийнятої конструкції, накладемо на модель такі обмеження:

1. Обидва обмежники рухаються за гармонійним законом $s = f \sin \omega t$;
2. На тіло в порожнині діє сила тертя (або інша сила), що дорівнює $C^*\dot{x}^*$;

3. Приймемо, що коефіцієнт відновлення швидкості при ударі з кожного боку обмежується однаково.

Для переходу від реальної конструкції до моделі зведемо масу СК до точки удару. Відповідно до методики, запропонованої в [10], і з урахуванням рис. 2.13 в, запишемо

$$m_{36} = \sum m_i \left(\frac{\underline{A}_i}{\underline{A}_0}\right)^2 + \int_0^{l_n} \left(\frac{\underline{A}}{\underline{A}_0}\right)^2 dm, \qquad (2.113)$$

де *m*₃₆ – зведена маса.

m_i – елементи розподіленої маси;

 $\frac{\Delta_i}{\Delta_0}, \frac{\Delta}{\Delta_i}$ – відношення переміщень відповідно *i*-ї зосередженої маси m_i та

елемента \varDelta_0 точка удару при заданому русі системи.

Коефіцієнт зведення системи буде дорівнювати

$$K_{_{36}} = \frac{m_{_{36}}}{m_{_{1C}}},$$
 (2.114)

де $m_{\Gamma C}$ – маса ГС.

Нехай прогини системи розподіляються як і при статичному навантаженні, тоді згідно з [64] запишемо:

$$\Delta = \Delta_0 \frac{1}{2} \left[3 \left(\frac{x}{l} \right)^2 - \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right].$$
(2.115)

Підставивши (2.115) в (2.113), визначимо $m_{_{36}}$:

$$m_{36} = \int_{0}^{l} \left(\frac{\Delta}{\Delta_{0}}\right) q \cdot dx = \int_{0}^{l} \frac{1}{2} \left[3\left(\frac{x}{l}\right)^{2} - \left(\frac{x}{l}\right)^{2}\right] q \cdot dx =$$

$$= q \frac{1}{\Delta_{0}} \int_{0}^{l} \left[3\left(\frac{x}{l}\right)^{2} - \left(\frac{x}{l}\right)^{2}\right] dx = K_{36} \cdot ql$$
(2.116)

$$m_{_{36}}=K_{_{36}}m_{\Gamma C},$$

де $K_{_{36}} = 0,25$, $m_{\Gamma C} = 12,5$ кг.

Визначимо розрахункову зосереджену масу

$$M_p = km_{36},$$

де *m*_{зв} – маса гіростабілізатора ГС, наведена до місця удару;

k = 1,25 – коефіцієнт безпеки (неруйнування елементів конструкції) при ударі.

У разі застосування розрахункової схеми СК з абсолютно твердими обмеженнями зведена маса тіла визначається з виразу

$$M' = \lim_{M_2 \to \infty} M = \lim_{M_2 \to \infty} \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} = M_1.$$
(2.117)

Отже, маса СК, зведена до точки удару при обмеженні твердими упорами (абсолютно тверді обмеження), дорівнює M (рис. 2.13 б) (для розглянутого випадку СК $M = M_P = K_{36} = KK_{36}m_{\Gamma C} = 0,25 \cdot 12,5 \cdot 1,25 = 4$ кг).

Для з'ясування процесів, які відбуваються при зіткненні тіл, що рухаються, і проведенні розрахунку діючих контактних напруг, скористаємося формулами Герца і методикою [64]. Максимальну контактну силу визначимо з виразу

$$\mathbf{F} = C_1^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4} M \upsilon_0^2\right)^{\frac{2}{5}},$$
(2.118)

де М – зведена маса зіткнених тіл;

 $C_1 = \frac{2}{3} \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) -$ коефіцієнт, що характеризує геометрію зіткнених

тіл;

*v*₀ – максимальна швидкість зіткнених тіл;

 D_1, R_1 – діаметр і радіус кільця;

*D*₂, *R*₂ – діаметр і радіус роликів,

 $E = E_1 = E_2$ — модуль пружності матеріалу деталей (для сталі $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ H/мм}^2$),

 $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ – коефіцієнт Пуассона ($\mu = 0,3$).

Амплітуда максимальних деформацій визначиться за умови, що $\dot{x} = 0$;

$$\mathbf{x} = \left(\frac{5}{4}\frac{Mv_0^2}{C_1}\right)^{\frac{2}{5}}.$$
 (2.119)

Час тривалості удару au визначимо з виразу

$$\tau = 2.9 \left(\frac{5}{4} \frac{M}{C_1}\right)^{\frac{2}{5}} \nu_0^{-\frac{2}{5}}.$$
(2.120)

Контактні напруги σ_k визначимо за формулою [94]

$$\sigma_{k} = 0,798 \sqrt{\frac{\frac{F}{E} \frac{D_{1} + D_{2}}{D_{1}D_{2}}}{\frac{1 - \mu_{1}^{2}}{E_{1}} + \frac{1 - \mu_{2}^{2}}{E_{2}}}E}.$$
(2.121)

При $E = E_1 = E_2$ і $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ вираз (2.121) набуде вигляду

$$\sigma_k = 0.6 \sqrt{\frac{F}{l} E \frac{D_1 + D_2}{D_1 D_2}}, \qquad (2.122)$$

де *l* – довжина лінії контакту (*l*=4 мм).

Проведемо розрахунок швидкості удару. У прийнятій розрахунковій моделі (рис. 2.13 б) маса M коливається в абсолютно твердих обмеженнях (точніше, корпус приладу робить коливальні рухи стосовно маси M). При амплітуді коливань корпусу приладу більшій за значення встановленого проміжку $S \ge \delta_p$ виникатиме удар роликів (корпусу приладу) о металеве кільце. Для з'ясування процесу, що відбувається, приймемо такі умови:

1) удар тіл є прямим і центральним;

2) швидкості тіл до удару та після удару змінюються тільки за значенням та при цьому зберігають свої напрямки;

 з) час зіткнення тіл дуже малий порівнянно з періодом руху системи, а ефект зіткнень оцінюватиметься коефіцієнтом відновлення швидкості при ударі;

4) вважатимемо, що рух системи в інтервалах між зіткненнями описується лінійними диференціальними рівняннями.

Прийняті умови руху корпусу приладу *та* накладені обмеження спричинюють рух тіла *т* у системі координат $x^*0\tau$ за гармонійним законом з періодом 2π і початковою фазою руху φ (рис. 2.14). За умови система стає нелінійною та зумовлює удар тіл. Особливістю пошуку $S \ge \delta_p$ бажаного рішення в нелінійній системі є потреба опису її періодичних режимів. Припустимо, що в нелінійній системі виникає симетричний режим руху з ударами об обидва обмежувачі. Період повного руху можна уявити як рух на двох інтервалах, що мають однакову тривалість, але відрізняються тільки напрямком руху тіла та корпусу (рис. 2.13, б). Отже, мають виконуватися такі умови:

$$X^* = -x^* \left(t + \frac{1}{2}T \right), \quad x^* = -x^* \left(t + \frac{1}{2}T \right), \tag{2.123}$$

де *X*^{*} – координата руху корпусу приладу (порожнини на рис. 2.13 б), причому, координата записується в реальній формі;

 x^* – координата руху вантажу *М*.

Ці умови назвемо умовами симетрії. Розглянемо умову руху тіла в період між ударами, вона матиме вигляд

$$m\ddot{x}^* + C^* \dot{x}^* = 0, \qquad (2.124)$$

або в безрозмірній формі

$$\ddot{x} + c\dot{x} = 0$$
. (2.125)



Рис. 2.14. Діаграма процесу зіткнення тіл у моделі СК ІВС

Це рівняння має розвязок

$$x = c_1' e^{p_1 \tau} + c_2' e^{p_2 \tau}, \qquad (2.126)$$

 $\exists e \ x = \frac{x^*}{a}, \ \tau = \omega t, \ c = \frac{c^*}{m\omega},$

а – амплітуда коливань корпусу (порожнини);

 p_1, p_2 – корні характеристичного рівняння (2.125).

Для розглянутої моделі

$$p^2 + pc = 0. (2.127)$$

При $p_1 = 0$, p + c = 0, $p_2 = -c$, тоді координата руху матиме вигляд

$$x = c_1 e^{-c\tau} + c_2. (2.128)$$

Для дослідження руху маси *m* (вантажу) доповнимо закон руху маси законом руху корпусу і рівнянням удару. Отримана система рівнянь описує рух зіткнених тіл з урахуванням нелінійності руху:

$$\begin{cases} x = c_1 e^{-c\tau} + c_2, \\ X = \sin(\tau + \varphi), \\ \upsilon - \cos \varphi = -R(u - \cos \varphi), \end{cases}$$
(2.129)

де $X = x^*/a$ – амплітуда руху;

 φ – фаза удару;

v і и – швидкості руху (див. рис. 2.14);

*c*₁, *c*₂ – довільні постійні.

Для розвязання системи рівнянь (2.129) запишемо граничні умови руху тел. Для першого напівперіоду, коли маса рухається від лівої стінки порожнини до правої, граничні умови матимуть вигляд

$$X = \sin \varphi; \ x = -\delta + \sin \varphi; \ \dot{x} = \upsilon; \ при \ \tau = 0;$$

$$X = -\sin \varphi; \ x = \delta - \sin \varphi; \ x = u; \ при \ \tau = \pi l, \qquad (2.130)$$

де $\delta = S/a$.

Аналогічно, використовуючи умови симетрії, можна записати граничні умови для другого напівперіоду руху:

$$X = -\sin\varphi; \ x = \delta - \sin\varphi; \ \dot{x} = -\upsilon; \ при \ \tau = \pi l;$$

$$X = \sin\varphi; \ x = -\delta + \sin\varphi; \ x = -u; \ при \ \tau = \pi l.$$
(2.131)

Враховуючи граничні умови, і використовуючи закони руху корпусу та маси ГС і рівняння їх удару, знайдемо вираз для визначення швидкостей v і u як функції фази зіткнення φ :

$$x = c_1 e^{-c\tau} + c_2,$$

$$\dot{x} = \frac{dx}{d\tau} = -cC_1 e^{-c\tau};$$
(2.132)

при $\tau = 0$, $\dot{x} = -C_1 c = v$, (2.133)

при
$$\tau = \pi l$$
, $\dot{x} = -cC_1 e^{-\pi lc} = u$, (2.134)

при
$$\tau = \pi l$$
, $\upsilon = -\dot{x}(0) = C_1 c$. (2.135)

3 рівняння удару маємо

$$\upsilon = -Ru + R\cos\varphi + \cos\varphi, \qquad (2.136)$$

або

$$\upsilon = -Ru + (R+1)\cos\varphi. \tag{2.137}$$

Розглянемо процес удару за умови $\tau = \pi l$. Для цього підставимо отриманий вираз для υ і u з (2.134) і (2.135) у рівняння удару (2.137) та отримаємо

$$C_{1}c = -R(-cC_{1}e^{-\pi lc}) + \cos\varphi(R+1).$$
 (2.138)

Перетворимо вираз (2.61) до вигляду

$$C_{1}c = RcC_{1}e^{-\pi lc} + \cos\varphi(R+1), \qquad (2.139)$$
$$C_{1}c(1 - RcC_{1}e^{-\pi lc}) = \cos\varphi(R+1).$$

З останнього визначимо

$$C_1 = \frac{R+1}{c\left(1 - \operatorname{Re}^{-\pi lc}\right)} \cos \varphi \,. \tag{2.140}$$

Але, з іншого боку, v і u рівні за модулем, причому

$$v = C_1 c_1,$$

 $u = -C_1 c e^{-\pi l c}.$ (2.141)

Підставивши значення С₁ в (2.141) отримаємо

$$\upsilon = \frac{R+1}{1 - \text{Re}^{-\pi lc}},$$

$$u = -\frac{(R+1)e^{-\pi lc}}{1 - \text{Re}^{-\pi lc}}\cos\varphi.$$
 (2.142)

Знак мінус для u у виразі (2.142) показує, що швидкості дорівнюють одна одній за модулем та мають різні напрямки руху. Вираз (2.142) визначає значення швидкостей маси ГС у безрозмірній формі у функції фази φ . Для переходу до дійсних значень швидкостей слід отримані вирази помножити на величину амплітуди коливань α і частоту коливань ω .

Якщо

$$x = \frac{x^*}{a}, \ \frac{\partial \tau}{\partial t} = \omega, \ \dot{x} = \frac{dx}{\partial \tau};$$

тоді $\dot{x}^* = \frac{dx}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{dt} a = \dot{x} \omega a$.

Як видно з виразів (2.141) і (2.142), віброударний режим може існувати тільки при деяких значеннях фази та при певних граничних умовах. Однак, для запобігання неприпустимого зношування поверхонь зіткнених тіл слід визначити максимальні напруги, які виникатимуть за умови, що $\cos \varphi = 1$.

Розрахунки максимальної контактної сили, максимальної деформації, часу зіткнення, максимальних контактних напруг були проведені па підставі формул (2.118) і (2.119) за такими даними: наведена маса M=4 кг, коефіцієнт безпеки K=1,25, радіус кільця $R_1 = 0,08$ м, модуль пружності сталі ШХ15 $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/мм², довжина лінії контакту l=4 мм, проміжки між кільцем і роликами $\delta_p = 0,03$ мм. Як частоти коливань були прийняті такі частоти: 5; 6,25; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 31,5; 40,0; 50.0;60,0; 80,0; 100,0; 125,0; 160,0; 200,0; 250,0; 315,0; 400,0: 500,0 Гц.

Максимальні контактні напруги, що виникають у металевому кільці при коливаннях (ударах) як функція частоти, показані на рис. 2.15, де: характеристика 1 – зміна максимальних контактних напруг при прискоренні 1*g*; характеристика 2 – при прискоренні 2*g*.



Рис. 2.15. Зміна контактних напруг у металевому кільці опори

Для виключення небезпечних режимів, що призводять до руйнування поверхні контактуючих тіл (без урахування удару), існують рекомендації з обмеження припустимих контактних напруг. Згідно з [54] припустимі контактні напруги не повинні перевищувати 500-600 мПа, а згідно з [72] – 1500-1800 мПа. Перші рекомендації отримані автором шляхом теоретичних доведень, а другі – набором експериментальних даних. Однак, такий розмах амплітуди припустимих напружень ускладнює їхнє практичне застосування. Як бачимо, вони отримані для різних умов використання та різних методів їх вимірювання. Дотримуючись рекомендацій [72], їх можна застосувати та при розгляді процесів зіткнення контактних тел. При цьому має виконуватися умова

$$[\sigma_k] \approx (0, 4 - 0, 5) \sigma_{ep}, \qquad (2.143)$$

де σ_{ep} – граничні контактні напруги, що призводять до руйнування поверхні матеріалу при ударі. Нижня границя рекомендується для матеріалів з вуглецевих сталей, а верхня – для матеріалів з легованих сталей. У разі застосування деталей зі сталі ШХ15 σ_{ep} = 2200 мПа. Виходячи з (2.143), максимальна напруга при періодичних ударах не повинна перевищувати $[\sigma_k] = 0.5 \cdot 2200 = 1100$ мПа ($[\sigma_k]$, (рис. 2.15, характеристика – 3). З характеристики 2, рис. 2.15, видно, що при частотах коливань менше 215 Гц і прискоренні 2g, а також на частотах нижче 125 Гц при прискоренні 1g (характеристика 1), можливі руйнування поверхні тіл, що контактують, які на практиці призводить до утворення рисок і лунок на поверхні металу, до підвищення моменту тертя в з'єднанні та заклинювання верхньої опори СК IBC.

Для уточнення нижньої границі припустимого напруження розроблено та випробувано зразок опори, виконаний з матеріалу сталь ХВГ15 з конструктивними параметрами: l = 14 мм, $D_1 = 160$ мм, $D_2 = 28$ мм. Прикладалося зусилля $F_{yo} = 3857$ Н на фіксованих частотах збурювання f = 40, 125, 500 Гц і із прискоренням 2g. Проводилося 10^5 циклів навантаження. Результати випробувань показали, що на частотах 40 та 125 Гц, спостерігалася деформація поверхневого шару кільця у вигляді прямокутних лунок заввишки *L*=(3,38–3,04) мм і завширшки *B*=(0,18–0,288) мм.

Іншою причиною виникнення корозії поверхні кільця може бути виникнення умови типу «сухе тертя», що виникає в з'єднанні при багаторазовому вклинюванні ролика в кільце.

При цьому відбувається порушення граничного шару змащення та механічне зіткнення вершин мікроповерхонь, їхнє дифузійне зчеплення та наступне руйнування поверхні. Подібне руйнування поверхні спостерігається в підшипниках кочення при відсутності достатнього змащення, що називається «помилковим бринелюванням».

Для підвищення межі напруги поверхні кільця запропоновано додаткове технологічне підвищення міцності та чистоти поверхонь дотичних деталей. Для цього були застосовані технологічні прийоми: введення термічних циклів оброблення (ТЦО), алмазне вигладжування та борування поверхні кільця.

Аналіз існуючих методів ТЦО дозволив для сталі ХВГ рекомендувати наступний вид ТЦО у вигляді трьох режимів: нагрівання, нормалізації та відпустку деталі, що зберігає твердість поверхні на рівні НRС 60. При реалізації режиму 1 здійснювався віджиг при t° =(480–510) °C протягом 4–5 год з наступним охолодженням на повітрі. Для реалізації режиму 2: загартовували деталі при температурі t° =(820–850) °C з наступним охолодженням у маслі; оброблювали деталі холодом при температурі t° =-(50–80) °C протягом 1–2 год з повторним охолодженням на повітрі; а також відпусткали деталі при температурі t° =(160–180) °C протягом 4-5 годин, з наступним охолодженням на повітрі. У режимі 3 здійснювалася стадія стабілізації, що полягає в нагріванні деталі до температури t° =(160–170)°C протягом 4–5 год з наступним охолодженням на повітрі.

Іншим технологічним прийомом підвищення міцності поверхні кільця є оброблювально-зміцнююче оброблення поверхні кільця пластичними деформаціями ковзної по ній інструментом – вигладжування закріпленим в оправу алмазним кристалом [72]. Цей технологічний прийом дозволяє зменшити виступи шорсткості поверхні та одночасно зміцнити поверхню шару та підвищити точність розмірів і форму деталі. Особливістю різного вигладжування є: надзвичайно висока твердість робочого цементу, низький коефіцієнт тертя по металу, високий ступінь чистоти, висока теплопровідність робочого елемента.

Режим вигладжування є таким: радіус алмазу *R*=0,5 мм, зусилля $P_v = (8,5-9,5)$ кгс, подача S=(0,03-0,05) мм/об, при швидкості 300 об/хв. Система охолодження СОЖ-масло «Індустріальне 20», зусилля пружини вигладжування – 3 кг/мм. Алмаз в оправі встановлюється під кутом $\alpha = 3^{\circ}$ (вправо), $\beta = 5^{\circ}$ (вниз). Вигладжування відбувається за один прохід. Для якісного проведення вигладжування тарується пружина механізму притиснення алмаза та контролюються: якість поверхні алмазу, і величина биття шпинделя верстату (має не перевищувати 0,01–0,02 мм. Забезпечується щільна посадка деталі на оправу, перевіряються параметри деталі до проведення вигладжування: биття, твердість, шорсткість, розмір зовнішнього діаметра деталі, твердість супорту, якість промивання деталі після шліфування. Після проведення вигладжування контролюються такі параметри: шорсткість точність поверхні, точність розміру кільця, форми (овальність, колесоподібність, несиметричність).

Борування поверхні кільця здійснюється шляхом покриття аморфним бором (Fe₂B). Технологія покриття складається в нагріванні деталі до температури 860–870 °C у водневому середовищу. Мікроповерхня борування шару підвищується до 13670–16670 Н/мм². Твердість серцевини деталі (не покритої бором) становить 38–40 HRC. Товщина шару бора – 0,8 мм. При

боруванні розміри деталі збільшуються, що слід враховувати при виготовленні деталі кільця.

Застосування запропонованих способів вирішує проблему, але вимагає додаткового підвищення собівартості виготовлення деталей і збільшення технологічного часу виготовлення.

Третій спосіб полягає у підборі коефіцієнта демпфірування C^* при змінній \dot{x}^* у рівнянні (4.124) і обмеженні швидкостей удару υ і u, обумовлених згідно виразів (4.142), за умови, що $\cos \varphi = 1$. В якості змінних можна розглядати коефіцієнт відновлення швидкості R і постійну C^* . Це реалізується завдяки уведенню в конструкцію опор додаткових деталей з матеріалів, що забезпечують гасіння швидкості удару (мідні шайби, гумові армовані шайби та інші). Для оцінювання запропонованих рішень були виготовлені зразки деталей (роликів) зі сталі ШХ15 (штатні цапфи з ($C^* = 6$ кг/мкм), зразки зі штатними цапфами та мідними шайбами ($C^* = 0,276$ кг/мкм) і зразки зі штатними втулками. Результати випробувань запропонованих рішень показано на рис. 2.16.



Рис. 2.16. Динамічний процес зіткнення кільця та цапф опори СК ІВС

Як видно з діаграм на рис. 2.16, а, застосування сталевих кілець та цапф (сталь ШХ15) при наявності проміжків у з'єднанні δ_p зумовлює велику

амплітуду удару ($F_{\text{max}} = 8660$ H) та великий час згасання удару в з'єднанні ($t_1 = 40$ мс); введення мідних шайб у конструкцію цапф не зменшує силу удару (амплітуду), але зумовлює появу постійної часу нарощування сили удару, яка дорівнює 2,5 мс (рис. 2.16 б), що знижує швидкість тіл при ударі.

Введення гумових прокладок завтовшки 2 мм, армованих мідними втулками, зменшує амплітуду удару в 2 рази та призводить до зменшення постійної часу загасання удару в 2 рази (рис. 2.16, в).

Четвертий спосіб полягає в обмеженні амплітуди вібраційних впливів за допомогою розроблення та установлення пристроїв, побудованих на дворежимних амортизаторах. Елементи амортизаторів обрані з умови гасіння вібрацій в 1,5–3 рази.

На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Запропоновано оригінальну схему верхньої опори системи керування, що складається з металевого кільця та трьох роликів, виконаних у вигляді шарикопідшипників, встановлених на металевих цапфах, з пристроєм регулювання гарантованого проміжку в з'єднанні, що забезпечує простоту зборки та необхідну надійність з'єднання.

2. Вибрано розрахункову схему опори та її математичну модель для проведення теоретичного оцінювання процесів,що відбуваються у з'єднанні при високочастотних збуреннях; розраховано контактну напругу в елементах конструкції та визначено найбільшу силу стискання та контактного тиску, а також максимальні швидкості співудару кільця та роликів при гармонійних ударних коливаннях елементів конструкції.

3. Проаналізовано і вибрано матеріали елементів опори. Як матеріал кільця рекомендовано леговану сталь ХВГ15, що має високу межу стомлюваності міцності та можливість додаткового поліпшення поверхні.

4. Розрахунковим шляхом та експериментально *підтверджено, що при перевантаженнях 1g та 2g і частотах до 630 Гц та 10^5 циклах навантаження*

з'являються риски та лунки на кільці опори, що збільшує момент опору та призводить до заклинювання опори.

5. Запропоновано та випробувано додаткові методи технологічного поліпшення поверхні кільця, які полягають у застосуванні триразової термообробки (нагрівання, нормалізація та відпустка) деталі кільця, алмазного вигладжування та борування поверхні деталі, що дозволило підвищити припустиме напруження та забезпечити надійне з'єднання та виключити утворення лунок і загнивання опори.

6. Запропоновано введення в конструкцію сталевих цапф гумових втулок, армованих мідними втулками, що забезпечує надійність роботи СК ІВС в наслідок зменшення швидкостей удару, амплітуди та часу загасання перехідного процесу при ударі.

2.3. Висновки до розділу 2

2.3.1. На підставі аналізу умов і режимів функціонування системи керування IBC визначено перелік і зміст вимог до показників точності елементів і пристроїв систем.

2.3.2. За аналізом існуючих рішень щодо створення систем керування ІВС розроблено методи та спрощені алгоритми визначення координат об'єктів у СПК на підставі багаторазового вимірювання кута візування об'єкта за курсом з рухомого носія, що виконує задану траєкторію.

2.3.3. Для визначення вимог до точності елементів і пристроїв IBC отримано формульне оцінювання середньоквадратичних похибок, що спричинені неточністю кутів візування за курсом.

2.3.4. Обрано функціональну схему системи керування лінією візування, принцип дії якої полягає у використанні двоступеневих зустрічно спрямованих гіроскопів, з компенсацією похибок вздовж третьої осі.

Це забезпечує можливість досягнення високої точності наведення лінії візування вздовж трьох осей для денного каналу бачення та цифрових високоточних слідкуючих приводів для керування лінією візування нічного каналу бачення.

Показано, що слід зменшити помилку стабілізації у 2 рази; забезпечити вібро- і ударостійкість елементів і пристроїв СК ІВС у широкому діапазоні вібрацій, що виникають на об'єкті, забезпечити мінімальні маси елементів і пристроїв СК ІВС.

На підставі структурного та параметричного методів проаналізовано базову структуру системи керування лінією візування IBC, її основні підсистеми та елементи для виконання завдань забезпечення заданих характеристик і високих показників точності системи наведення (точності, діапазону швидкостей наведення та інших) з урахуванням нелінійних ефектів та умов функціонування в нормальних і екстримальних умовах (граничні значення температури, кутових та лінійних вібрацій), а саме:

– виконано синтез параметрів елементів і пристроїв систем стабілізації при впливі кутових збурень носія; отримано математичні рівняння поведінки головного дзеркала гіростабілізатора та показано, що на певних частотах кутових збурень носія виникає додаткова похибка стабілізації, зменшення якої до необхідної величини можливе шляхом вибору твердості стрічкових передач, твердості пружин натягу і сили натягу;

– виконано синтез системи стабілізації ІВС при лінійних збуреннях носія. Отримано математичні рівняння наведення елементів системи стабілізації (головного дзеркала, ричага натягача, гіростабілізатора); алгоритм оцінювання амплітуди коливань та умов виникнення квазіколивань елементів конструкції СК. Показано, що амплітуда коливань залежить від маси ричага натягача і плеча ричага натягача стрічок. Для зменшення амплітуди коливань головного дзеркала запропоновано замінити матеріал ричага натягача на матеріал зі зменшеною питомою вагою;

– запропоновано введення в конструкцію опори оригінальних сталевих цапф із гумовими втулками, армованими мідними втулками. Це забезпечує надійність роботи СК IBC завдяки зменшенню швидкостей удару, амплітуди і часу загасання перехідного процесу при ударі.

2.3.6. Результати, отримані в даному розділі відображено у роботах авторів [2; 40-50].

РОЗДІЛ З

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ, ЕЛЕМЕНТІВ І ПРИСТРОЇВ ІВС

У даному розділі наведено відомості про практичні розробки та результати експериментальних досліджень, виконаних на основі описаних у попередніх розділах принципових рішень.

Метою цього розділу є розроблення методики проведення експериментальних досліджень гіростабілізованої головки СК ІВС і підтверджено теоретичні положення, зроблені у розділах 1 та 2.

Основні задачі розділу є:

– запропонувати методику і засоби проведення вимірювань при експериментальних дослідженнях;

– підтвердити достовірність технічних характеристик.

Розв'язання поставлених задач відображення у роботах авторів [2; 40 та інших].

3.1. Гіростабілізована головка СК ІВС

Конструктивно головку СК IBC розроблено в декількох варіантах: варіант 1 (рис. 3.1), варіант 2 (рис. 3.2) і варіант 3 (рис. 3.3).

На рис. 3.1 гіростабілізована головка є литим корпусом, у якому розташовано гіростабілізатор ГС 2, аретир 3 і відбиваюче дзеркало 4.

Вхідне вікно закрите захисним склом 5, що забезпечує більші кути огляду за тангажем. З'єднання з корпусом здійснюється за допомогою стикувального фланця, у якому є вихідний отвір для пропущення оптичних променів. Ущільнення забезпечує герметичність усередині головки і, тим самим, захищеність ГС 2 від впливу зовнішнього середовища. Підвіс ГС у

корпусі *1* здійснюється, з одного боку, на підшипниковій опорі, що виключає осьовий люфт, і, з іншого боку, на оригінальній чотири роликовій опорі, що допускає осьові переміщення зовнішньої рами. Внаслідок такого підвісу температурні розширення не призводять до значних осьових навантажень на опори.



Рис. 3.1. Конструкція головки СК ІВС, варіант 1









Конструкція ГС 2 являє собою зовнішню раму 6, у якій розташована внутрішня рама – платформа 7 і головне дзеркало 8 на титановій підкладці стільникової конструкції (для зменшення моменту інерції ГС.) Зв'язок між й дзеркалом здійснюється через стрічкову передачу платформою 3İ співвідношенням 1:2, яка має стрічковий механізм натягу, що включає шків головного дзеркала 9, механізм натягу й шків гіростабілізатора 13. На платформі 7 встановлено два двоступеневих гіроскопи, причому їхні вектори кінетичних моментів спрямовано паралельно й зустрічно. Вздовж осей стабілізації ГС 2 встановлено синусно-косинусні обертальні трансформатори 10 і двигуни розвантаження 11. Електричний зв'язок по електричних ланцюгах між рухомою й нерухомою частинами стабілізатора здійснюється за допомогою вузла 12 гнучких токопідводів. Недоліком конструкції СК IBC, варіанта 1, з'явилася складність розміщення датчиків кута й двигуна розвантаження в одній площині й на одній і тій самій осі, що призвело до додаткового екранування гіроскопічного й ускладнило виводи живлення датчика кута вузла (токопідводів).

У варіанті 2 (рис. 3.2) ці проблеми частково вирішені завдяки рознесенню розташування датчиків кута (позиція 6) і двигуна розвантаження (позиція 15) на протилежних боках внутрішньої рами. У внутрішню раму встановлено платформу, а також консольно встановлено головне дзеркало 2. У верхній частині головки уведено привід головки 7, що через передачу 8 забезпечує поворот всієї зовнішньої рами, установленої на підшипнику 4.

Конструкція головки СК IBC, варіант 2, має кращі характеристики в порівняно з варіантом 1. Вона дала можливість виявити недоліки конструкції як за міцністю в різних режимах роботи, так і за вібростійкістю.

Основні позитивні рішення попередніх варіантів було перенесено в конструкцію головки СК ІВС варіанта 3, що, в основному, була дороблена у зв'язку зі зміною компонування ІВС на об'єкті. У варіанті 3 головки СК ІВС (рис. 3.3) додатково опущено нижню опору завдяки введенню кронштейна 8,

що поліпшило вібростійкість конструкції. Датчики кута повороту зовнішньої рами й двигун розвантаження 10 розміщені в нижній опорі кронштейна й мають досить зручний доступ при настроюванні й ремонті. Введення кронштейна поліпшило характеристики вібростійкості й значно зменшило масу головки. Для зменшення моменту інерції головне дзеркало виконане на берилієвій підкладці стільникової конструкції із застосуванням плівкового скла на поверхні.

3.2. Експериментальне дослідження характеристик системи керування IBC

3.2.1. Стенди і устаткування для проведення експериментальних перевірок СК IBC

Важливим етапом створення систем керування IBC є практичне підтвердження основних характеристик: точності (припустимої похибки) стабілізації, стійкості при впливі як керуючих і збурюючих впливів з боку об'єкта-носія IBC, так і зовнішнього середовища: вітру, температури, вібрацій та інших.

Експериментальні дослідження СК IBC виконувались у кілька етапів:

1. Підтвердження необхідних параметрів електронних пристроїв: електронних підсилювачів, що коригують пристрої.

2. Підтвердження необхідних параметрів прецизійних механічних і оптико-механічних пристроїв (гіроскопів, гіростабілізаторів, механічних і оптико-механічних пристроїв системи стабілізації та слідкуючих приводів).

Для проведення випробувань елементів, пристроїв та СК IBC на перших трьох етапах потрібне розроблення спеціальних стендів і стендового устаткування. В їх состав входять:

1. Стенди для проведення випробувань СК у складі IBC на вібростійкість у вертикальній і горизонтальній площинах. Випробування полягають у підтвердженні припустимої похибки стабілізації і роздільної здатності сигналів бачення при впливі зовнішніх вібрацій у широкому діапазоні частот від 20 Гц до 500 Гц і амплітуд, що забезпечують прискорення від 0,1 до 5g.

2. Оптичні коліматори, призначені для формування оптичного променя, направленого на головне дзеркало денної або нічної системи бачення, що мають оптичну сітку із ціною розподілу 1", на яку проектується відбитий від головного дзеркала промінь, амплітуда коливань якого пропорційна розмаху похибки стабілізації гіростабілізатора. Оптичний коліматор (ціна розподілу 3") використовується при оцінюванні похибки стабілізації, вібростійкості СК ІВС на вібростендах вертикальних або горизонтальних вібрацій.

3. Вимірювальні та записуючі пристрої і прилади, що служать для вимірювання параметрів СК ІВС (електронні датчики, погоджувальні підсилювачі) і запису цих сигналів на жорсткий або магнітний носії.

3.2.2. Методика проведення експериментальних досліджень СК ІВС

Для проведення експериментальних досліджень СК IBC було створено експериментальну установку.



Рис. 3.4. Функціональна схема експериментальної установки

Похибка стабілізації перевірялась на частотах 20, 56, 80–100 Гц, при прискоренні 1 і 2g. Випробування на вібростійкість СК IBC проводились на вібростенді з вертикальною вібрацією при жорсткому закріпленні СК IBC у рамі-кубі і введенні вертикального динамічного розвантаження. Вимірювання похибки стабілізації виконувались в центрі поля і на кутах $\alpha = \pm 30^\circ$ і $\pm 50^\circ$ за курсом і кутами ($\beta = 0^\circ$; $\pm 10^\circ$ за тангажем). Похибка стабілізації за курсом і за тангажем не перевищувала 20".

Розроблена програма випробувань складалась з наступних основних етапів:

- перед випробувальна підготовка, перевірка і калібрування приладів і систем;

- серія ударних імпульсів;

- реєстрація вимірювальної інформації;

- після випробувальна перевірка і калібрування приладів і опрацювання результатів вимірів.

До перед випробувальної підготовки, перевірки і калібрування входять у собі: настроювання приладів і стенда; кріплення випробувального пристрою з кубом і куба зі столом стенда, датчика перевантажень, установленого на прилад, що досліджується; перевірка взаємодії всіх блоків СУВ.

Після проведення експерименту перевіряли і калібрували прилади. Устаткування встановлювалось в неробоче положення, вимикались джерела живлення.

У таблиці 3.1 наведено результати випробувань СК IBC на вібростійкість.

Таблиця 3.1

No	п	00010001	Похибка стабілізації			
JNº ⊐/⊐	11	араметри	(кут. хв.)			
11/11	Курс	Тангаж	Головка №1	Головка №2		
1		0 град	0,3/0,33	0,33/0,33		
2	0 град	Нагору, 10 град	0,2/0,4	0,2/0,3		
3		Вниз, 10 град	0,2/0,4	0,2/0,33		
4	DEPODO	0 град	0,3/0,33	0,2/0,33		
5	вправо	Нагору,10 град	0,2/0,5	0,30/0,33		
6	зотрад	Вниз, 10 град	0,4/0,5	0,33/0,33		
7		0 град	0,33/0,33	0,33/0,33		
8		Нагору, 10 град	0,3/0,4	0,2/0,3		
9	зотрад	Вниз 10, град	0,3/0,4	0,3/0,3		
10	VIIDO	0 град	0,33/0,33	0,33/0,32		
11	ултво	Нагору, 10 град	0,33/0,5	0,33/0,33		
12	зотрад	Вниз, 10 град	0,33/0,5	0,3/0,33		
13	in a	0 град	0,33/0,4	0,3/0,33		
14	ултво 20 гран	Нагору, 10 град	0,3/0,4	0,3/0,3		
15	зотрад	Вниз, 10 град	0,3/0,38	0,3/0,3		

Перевірка системи керування IBC на вібростійкість при прискоренні 1g/2g

При дослідженні вібростійкості головки №2 спостерігався резонанс по тангажу на частоті 180 Гц. Для його усунення в конструкцію головки №3 були введені зміни (розділі 2), що привели до зменшення похибки стабілізації в 1,4 рази (помилка стабілізації не перевищувала 20″).

3.3. Тарування вібровимірювальної апаратури прецизійних IBC

Вимірювання параметрів вібрації на літальних апаратах виконуються для визначення вібраційних характеристик літальних апаратів, їх силових установок, спеціального обладнання.

На підставі узагальнення досвіду, вимірювані параметри, в основному, мають наступні значення:

- вібрації: по амплітуді 0,01...500 мм;

- частоти: І-й діапазон 0...300 Гц,

II-й діапазон 20...5000 Гц;

– перевантаження: по амплітуді 0,1...20 g.

У практиці вібровимірювання застосовується вібро апаратура, основні дані якої наведені у табл. 3.2.

Структурні схеми вібровимірювальної апаратури наведено на рис. 3.5, 3.6.

Призначення та принцип дії індуктивних акселерометричних датчиків вібрації (AB-44, AB-45, ДУ-5), індукційних датчиків вібрації (MB-22, MB-23, MB-25)

Індуктивні акселерометричні датчики вібрації призначено для перетворення механічних коливань, що виникають в горизонтальній або

вертикальній площині, в електричну напругу, пропорційну амплітуді віброприскорення.

Індукційні датчики вібрації призначено для перетворення швидкості сталої лінійної вібрації, що виникає в горизонтальній або вертикальній площині, в електричну напругу.



Рис. 3.5. Структурна схема вібровимірювальної апаратури з підсилювачем



Рис. 3.6. Структурна схема вібровимірювальної апаратури

без підсилення

Таблиця 3.2

Основні технічні дані апаратів для вимірювання параметрів вібрації

кннэпанж впэqэжД			27B		27В; 115В 400Г ц	115B	400 н	11 SB	4001	ਸ		1	27B	
वायव	лядшнТ		MB-22		AB-44 MB-22		AB-45		AB-46		ду-5	ДВ-1	дп-2, дп-3	9-III
HO RHHS iTOC	сяпа іД аонтурад аншүн		1.2:48:16:32: 64	5	1.2.48.16.32: 64	1.5	1:2,5:5:10:50		1+2	0		20 - 1 3 2	1+2	<u>v</u> a
	Чутивість	ρ _j ≥10 mA/g	ρ _s ≥150 m.Å/mm	Dr ≥3 mA/mm.Fu	ρ _j ≥0,3 m≜/g	$\rho_j = 0,75 \text{ MA/g}$	$\rho_{V} = 0,015 \text{ meVmm} \Gamma \mu$	$\rho_j = 76,2 \text{ MA/g}$	$\rho_s = 773 \text{ meVmm}$	$\rho_V = 7,83 \text{ MeV/MM} \cdot \Gamma \eta$	$\rho_j \ge 0.5 \mathrm{MA/g}$	$\rho_{\rm S} \ge 5$ mA/mm	$ ho_{s} \ge 2$ med/mm $ ho_{s} \ge 1$ med/mm	$\rho_{p} \ge 0,75 \div 30 \text{ mA/str/ptrb}^{2}$
प्रमामक वृद्यः	aorqimri B ameqan	Віброприск.	Bibposmin,	Вібропвидк	Віброприск	Віброприск.	Віброшвид.	Віброприск.	Bibposmin,	Віброшвид.	Віброприск.	Bi6po3mint.	Відн.змін.	Тиск
прювання	по частоп		15÷300 Гц		0+40Гц	0+70Fu "J"	0+zul ¤"J" 3+70Γ¤ "V"		30÷500		0+200	10+120	0+120 0+120	0÷120
Діапазон вил	по перевантаженн ю	0,5÷10g"J"	0,01+1MM "S"	Δ.», 	16g		20g "J"	0÷10g"J"	0+1 MIM "S" 20 - 500	7+310 MIM/c	0,1+35+45g	0+2+2,5mm	0+8+12 mm 0+16+25 mm	$0,01+30{\rm kr/cm^2}$
идшигоо	ң інтнqяда Т (мм)	355x215x145	255x160x60 105x50x45	250x150x120	355x215x145 250x295x252 52x100x103 250x150x120 200x140x60	396x265x165	290x125x90	315x253x163	390x235x25		250x167x182 125v116v165			
ه)	Bara (1	3	23, 23	۲.	41, 6	25	ŕ		15			Ş	5,5	
ain	3 кенел		с С		е т		4		4			ŝ	9	
кння иду	кния аунэмйя Н ндүтя дяль		ДВ-43		AB-44		AB-43		AB-46		Ĩ	AM	с-9ИВ	
I	шŴ	ĵ-	4		2.	ю, 4,		5.						

Датчики розраховані на роботу в комплекті, що має інтегруючі та диференцюючі пристрої.

Тому їх можна використати для вимірювання не тільки швидкості вібрації, але і для вимірювання віброприскорення та віброзміщення.

В основу роботи датчиків вібрації (МВ-22, МВ-23, МВ-25) покладено закон електромагнітної індукції. При перетинанні полем постійного магніту витків котушки, жорстко пов'язаної з корпусом датчика, у ній індуктується ЕРС (*E*), пропорційна швидкості відносного руху, мВ

$$E = B \cdot n \cdot l \cdot V \cdot 10^{-5}$$

де: В – магнітний потік, Гс;

l – середня довжина витка в сантиметрах, см;

V – швидкість вібрації, см/с;

n – кількість витків.

Оскільки для вибраної конструкції $B \cdot n \cdot l \cdot 10^{-5} = K$ – постійна, то ЕРС, що наводиться в обмотці, пропорційна швидкості вібрації: $E = K \cdot V$.

Для забезпечення нерухомого положення магніту в корпусі датчика, що вібрує із частотою та амплітудою вимірюваної вібрації, власна частота його коливань має бути значно нижче частоти досліджуваних коливань.

Основною величиною, що характеризує індукційний датчик, є його чутливість « ρ_V », мВ/(мм·Гц)

$$\rho_V = \frac{E}{S \cdot f} \; ,$$

де Е – ЕРС, що індуктується в котушці датчика, мВ;

S – амплітуда вібрації, мм;

f-частота вібрації, Гц.

3.3.1. Тарувальне устаткування

До тарувального устаткування належать: вібраційні стенди, генератори звукової частоти, мікроскопи, апаратура для вимірювання амплітуди віброзміщення і віброприскорення.

Для тарування датчиків вібровимірювальної апаратури на низьких частотах від 2 Гц до 40 Гц застосовуються механічні вібраційні стенди відцентрового або ексцентрикового типів.

Для частот від 20 Гц до 5000 Гц сьогодні найпоширенішими стендами є електродинамічні.

Типи вібростендів, що рекомендують для тарування вібровимірювальної апаратури, їх основні технічні характеристики наведено у табл. 3.4 і 3.4.

3.3.2. Вимірювання параметрів вібрації робочого столу вібростенда

При таруваннях вібровимірювальної апаратури слід застосовувати зразкові вимірювальні апарати, які дозволяють контролювати параметри вібрації, що створюються вібраційним стендом, з точністю, в три рази вищою за точність апаратури, яку потрібно тарувати. Похибка вимірювань апаратури, що застосовується у цей час, становить не більше 5 % від величини вимірюваного прискорення.

Для синусоїдальних коливань залежність між амплітудою, частотою і прискоренням визначається за формулою:

$$J_j = \frac{S \cdot f^2}{250},$$
 (3.1)

де J_i – прискорення коливального руху в одиницях земного прискорення, g;

f – частота коливання, Гц;

S – амплітуда коливань, мм.

Таблиця 3.4

Вібраційні стенди (механічні)

NeNe III	Тип стенду	Діапазон частот, Гц	Діапазон амплітуд переміщення, мм	Максимальне прискорення, g	Максимальна вага випробуваного виробу, кг	Коеф. нелінійних перекручень, %	Розмір вібростолу, мм	Виробник
1.	BMC-2,5 – 3	0,1- 2,5	5-500	12,5	3	4	200×200	п/с 1401
2	BMC-3-5	0,5-5	5-100	10	3	4	Ø205	Російська
3	BMC-25-5	4-25	1-25	62,5	5	3	Ø200	Федерація
4	BM-30-15	3-30	0-50	20	15	3	300×400	
5	"Консолідейтед"	2-40	0-25	20	4,5	3,5	_	Дженерал- Електрик США

3.3.3. Вібраційні стенди (електродинамічні)

Таблиця 3.5

Вібраційні стенди (електродинамічні)

№ пп	Тип стенду	п стенду но на		Мах вага пробуваних обів у кг при оискоренні	іскорення, g	нелінійних учувань, %	а частота – ої частини атора, Гц	рухливої вібратора, кг	Виробник	
$\mathbb{N}_{\overline{0}}$		Діапазо	H и и и и и и и и и и и и и и и и и и и		Мах при Коеф. перекр		Власна рухом вібра	Вага частини		
1	ВЭДС -10	20- 2000	6	2,5	_	100	5	30	0,15	
2	ВЭДС-50	5-5000	7,5	10	2,5	100	5	20	1,7	п/с 1401
3	ВЭДС-100	20-500	7,5	22	_	100	5	20	2,6	Російська Федерація
4	ВЭДС-200	5-5000	12,5	45	6	100	5	20	4,9	

№ пп	Тип стенду	н частот, Гц	плітуда, мм	вил виро пр	Мах вага випробуваних виробів у кг при прискоренні		нелінійних учувань, %	а частота – ої частини атора, Гц	рухливої вібратора, кг	Виробник
N		ностина и и и и и и и и и и и и и и и и и и		В Макс	Мах при	Коеф. перекр	Власна рухом вібра	Вага частини		
5	«Асканія»	10-600	8	_	5	10	5	_	_	Німеччина
6	8/600A Goodmans	5-1000	12,7		10	60	3-4	_	2,5	
7	390A Goodmans	10- 4000	5	_	0,5	30	3-4	_		Англія
8	V- 47 Goudmuns	10- 1000	25	_	0,1	_	3-4	_	_	

3.3.4. Абсолютний метод вимірювання амплітуди вібрації

При абсолютному методі вимірювання параметрів вібрації амплітуда вібрації вимірюється пристроями, в основу роботи яких покладено вимірювання довжини; частота безпосередньо задається калібрувальним генератором; прискорення визначається розрахунковим шляхом.

Амплітуда вібрації на частотах 2–5 Гц іноді досягає великих значень порядку 25–300 мм. Най простішим і доступнішим способом вимірювання таких амплітуд є масштабна лінійка.

Під час тарування апаратури на частотах понад 8 Гц і амплітудах від 5 до 25 мм можна застосувати мірний клин.

При висоті клина h=50 мм і базі L=100 мм похибка відліку становить не більше 0,5 мм.

Для вимірювання амплітуди віброзміщення застосовується також індикатор. Похибка вимірювання індикатором становить 0,01 мм у діапазоні від 0,01 до 10 мм.

При вимірюванні малих амплітуд 0,01-2,0 мм най зручніше користуватися мікроскопами типу МИР-1м, МИР-2м, МПВ-1 МБИ-4.

Область ще менших амплітуд можна вимірювати за допомогою інтерферометра.

Однак робота з інтерферометром є складною в наслідок нестійкості інтерференційної картини, що обумовлена нестійкою стабільністю у часі амплітуди вібрації існуючих вібростендів.

Частота коливань безпосередньо для стенда задається генератором. Діапазон роботи та точностні характеристики деяких з них наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

№ пп	Найменування приладу	Тип	Діапазон частот, Гц	Похибка
1	Генератор низьких частот	2012	0,1–1000	± 1% <i>f</i> ≥10 Гц ± 2% <i>f</i> <10 Гц ± 0,01 Гц
2	Прецизійний генератор	Тесла	11-22000	± 0,05%

Характеристики точності генераторів

Характеристики вимірювальних засобів, що побудовані за принципі вимірювання довжини і область їх застосування при вимірюванні амплітуди вібрації наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Характеристики вимірювальних засобів на принципі вимірюванні довжини

Тип вимірювального пристрою	Робочий діапазон, мм	Точності відліку, мм	Спосіб вимірювання	Діапазон частот, Гц
Масштабна лінійка	30–300	1	контактний	2–5
Катетометр	5-500	0,1	безконтактний	2–20
Мірний клин	5-50	0,5 на базі 100 мм	безконтактний	8–20
Індикатор	0,01–10	0,01	контактний	2–20

Тип вимірювального пристрою	Робочий діапазон, мм	Точності відліку, мм	Спосіб вимірювання	Діапазон частот, Гц
Мікроскопи МИР-1, МИР-2	0,01–6	0,036×0,0026	безконтактний	5–100 (5–200)
Мікроскопи МПВ-1, МБИ-4	0,002–2	0,002	безконтактний	10–200
Прецизійний вібродатчик з вольтметром	0,1–100	3%	контакт, діапазон.	$100-5 \cdot 10^3$

3.3.5. Технічні характеристики вимірювальних засобів, область їх застосування

Частота, що задається стенду, може визначатися і за фігурою Ліссажу.

Для цього слід мати калібрований індукційний датчик, зразковий генератор низької частоти, електронний осцилограф (типу Э0-7).

Від зразкового генератора та від каліброваного датчика подається напруга на вхід електронного осцилографа. На екрані, на кожній фіксованій частоті, спостерігається стійка фігура Ліссажу.

Похибка вимірювань прискорень при абсолютному методі вимірюванні не перевищує 5 %.

3.3.6. Вимірювання методом вторинного еталона

Вібровимірювальна апаратура на частотах, що перевищують 200 Гц для контролювання амплітуди засобів вимірювань з безпосереднім відліком або не дає достатньої точності, або є складнішою і не забезпечує оперативного вимірювання при таруванні.

У цьому випадку параметри вібрації вимірюються методом вторинного еталона: амплітуда розраховується зі співвідношень формули (3.1), частота визначається за допомогою вімірювача часу, що оцінює час на фотопапері, прискорення вимірюється за допомогою вимірювача прискорень, відкаліброваного абсолютним методом.

Діапазон роботи та характеристики точності деяких типів вимірювачів прискорення наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

		- I	I	r · · · ·	
			Діапа	зон роботи	Похибка
№ п/п	Найменування вимірювача	Тип	по	ПО	вимірювання
			частоті	прискоренню	ПО
			Гп	σ	прискоренню,
			14	δ	%
1	Дистанційний вимірювач вібрації	ДИВ-ЗБ	10-500	0-20	5
2	Віброметр- акселерометр	ИАЭ	1-370	0-10	5

Характеристики вимірювачів прискорення

Частота вібрації встановлюється по частотоміру стенда, а на осцилограмі знімається запис оцінки часу від таймер. Діапазон роботи та характеристики точності таймерів (електрогодинників), що застосовуються при таруванні, наведено у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

№ п/п	Найменування приладу	Тип	Діапазон оцінок часу, с	Похибка вимірювання часу, %
1	Електрогодинники	M4-62	0.1; 1.0	± 1
2	Відліковувач часу	M4-65	0.01; 0.1; 1.0; 10	-0,5

Характеристики таймерів (електрогодинників)

3.3.7. Тарування вібровимірювальної апаратури

Тарування вібро вимірювальної апаратури призначено для визначення залежності між даними апаратури та дійсними параметрами вібрації.

Тарування виконувалось для кожного комплекту вібровимірювальної апаратури, а в комплекті – для кожного каналу окремо.

Результати тарування оформлювались у вигляді тарувальних графіків, які є залежністю записаних на осцилограмі параметрів вібрації від дійсних величин.

Саме тому, тарування полягає ЩО чутливому елементу y вібровимірювальної апаратури, вібродатчику, **i**3 задаються коливання заздалегідь відомою частотою і амплітудою, а показання від вібродатчика фіксуються шлейфовим осцилографом на фотопапері або фотострічці.

Вигляд тарувальної характеристики залежить від часу експлуатації, вимірювальної схеми і комбінації датчиків та реєструючих приладів. Тому, через певні проміжки часу, проводимо тарування апаратури. Як правило, тарування вібровимірювальної апаратури виконувалось до проведення вимірювань на об'єкті та після закінчення вимірювань і демонтажу апаратури з об'єкта.

Тарування апаратури перед вимірюванням проводилось для перевірки віброапаратури, підбору чутливості її каналів і дільників. Тарувальні графіки використовуються для оцінювання параметрів вібрації на носії. Тарування апаратури після вимірювання є робочим і виконується в діапазонах параметрів вібрації, близьких до дійсних, що мали місце в ході вимірювань.

Якщо цикл вимірювань великий і перевищує шість місяців, то через шість місяців треба провести *проміжне тарування*.

Проміжне тарування може бути проведене і у тому випадку, коли датчики та апаратура працюють в особливо тяжких умовах.

Тарування виконується для визначення тарувальної кривої і перевірки похибки апаратури.

При таруванні вібровимірювальної апаратури, як правило, знімається амплітудно-частотна або амплітудна характеристика вимірювального каналу.

(датчик, підсилювач і погоджуючий пристрій, осцилограф) у заданому діапазоні частот або при їх окремих фіксованих значеннях.

Амплітудно-частотну характеристику каналу змінюють у діапазоні, що не перевищує робочий діапазон частот даного типу апаратури (при цьому амплітуду параметра вибирають близькою до реальної).

Зняття амплітудної характеристики – на частотах, близьких до очікуваних на об'єкті (амплітуди вібрації вибирають близькими до реальних, діючих на об'єкті).

Амплітудно-частотна та амплітудна характеристики вимірювального каналу значною мірою залежать від характеристик застосовуваних шлейфів. Для вібровимірювальної апаратури ВИ6-5МА застосовується III тип шлейфа, для AB-43, AB-44, AB-45, – IV тип.

Працювати дозволяється тільки із тарованими комплектами апаратур при наявності, тарувальних графіків оформлених на кожний канал.

Для тарування вібровимірювальної апаратури слід мати:

1. Заявку на дані апаратуру із вказівкою діапазонів реєстрації вихідних параметрів даних апаратури;

2. Комплект вібраційної апаратури, що пройшов регламентні роботи та перевірку;

3. Тарувальні вібростенди;

4. Перевірений осцилограф;

5. Пристрій для вимірювання амплітуди, перевантаження та частоти вібрації.

При прийомі апаратури необхідно перевірити:

1. Комплектність (по формуляру);

2. Стан апаратури по записах у формулярах і виконання регламентних робіт;

3. Зовнішній огляд (відсутність механічних ушкоджень, справність кабелів, штирьових рознімачів);

4. Працездатність під струмом.

При виявленні несправностей (відсутність комплектуючих виробів, незадовільний зовнішній вигляд, непрацюючий канал та непрацююча інша апаратура) все це повертають для ремонту і оцінюють стан у формулярі на апаратуру або виписують бракувальний лист.

Монтаж вібровимірювальної апаратури при таруванні виконується за тією же схемою, що вибрана для проведення вимірювань на об'єкті; схему необхідно складати за допомогою стандартних сполучних кабелей.

Вібродатчики до робочого столу вібраційного стенда жорстко кріпляться за допомогою спеціальних кронштейнів, при цьому необхідно витримувати наступні умови:

 – маса кронштейна і датчика не повинна перевищувати припустиме навантаження для даного типу вібростенда;

 – конструкція кронштейна і спосіб кріплення кронштейна та вібродатчика не повинні вносити викривлень у процес вимірювань параметрів вібрації;

– напрямок осі чутливості вібродатчика має строго збігатись з напрямком коливань робочого столу;

– положення робочого столу вібростенда має відповідати робочому положенню вібродатчиків (вертикальне або горизонтальне). Особливо цю умову необхідно дотримувати при таруванні вібродатчиків, що мають низьку власну частоту коливань рухомої системи (датчики типу MB-22, MB-23, AB-44);

- жорсткість кронштейна із встановленим на ньому вібродатчиком має бути такою, щоб частота його власних коливань перевищувала верхній діапазон частоти вимірюваних коливань не менш ніж в 2–3 рази і не була б кратній йому.
Власна частота кронштейна визначається однократним постукуванням по кронштейну в напрямку вимірюваних коливань із одночасним виміром власних коливань кронштейна із встановленим на ньому датчиком.

По закінченні підготовчих і монтажних робіт перевіряють правильність виконаних робіт і проводять комплексну перевірку всієї схеми під струмом, для чого апаратуру включають на прогрів і виконують балансування погоджувальних пристроїв, встановлюють необхідний масштаб запису на осцилографі, вибирають рід роботи (зсув, швидкість або прискорення) і т.д.

Метою комплексної перевірки є:

перевірка працездатність всієї схеми у цілому;

перевірка роботи підсилювачів (погоджувальних пристроїв);

- перевірка роботи осцилографа (освітленість та інше);

перевірка системи керування апаратурою (дистанційне включення протягування, перемикання груп датчиків);

- визначення статичної чутливості кожного каналу.

Параметри вібрації за допомогою шлейфового осцилографом записують на фотопапір або фотоплівку. Швидкість протягання вибирають, виходячи з діапазону вимірюваних частот. Щільність запису на осцилограмі не повинна перевищувати одне коливання на 1 см для частот понад 50 Гц і одне коливання на 1 см для частот до 50 Гц.

При проведенні тарування всі дані заносяться до протоколу тарування.

3.3.8. Зняття амплітудно-частотної характеристики

Амплітудно-частотна характеристика вимірювального каналу – це залежність чутливості апаратури (або величини, пропорційної їй) від частоти вимірюваних синусоїдальних коливань.

При знятті характеристики весь діапазон вимірюваних частот розбивають на ряд фіксованих значень (як правило, на 10–12 точок). Для

кожного значення частоти підраховують необхідні параметри вібрації робочого стола вібростенда, які вибирають так, щоб розмах запису на фотопапері був не менш 30–40 мм. При кожному значенні частоти дають витримку 3-5 с і виконують прописка кадру.

При обробленні запису для кожної із частот визначають по осцилограмі подвійну амплітуду (розмах) запису. Оскільки амплітуда, частота і прискорення коливального руху робочого столу вібростенда відомі, то чутливість апаратури визначають за формулою:

а) за прискоренням (режим «Ј»)

$$\rho_j = \frac{2A_{3an}}{2J_j}\alpha, \quad (\text{MM/g});$$

б) за швидкістю (режим «*V*»)

$$ρ_V = \frac{2A_{3an}}{2Sf} α$$
, (MM/(MM·Γц));

в) по зсуву (режим «*S*»)

$$\rho_S = \frac{2A_{3an}}{2S} \alpha$$
, (MM/MM);

де 2А_{зап} – подвійна амплітуда (розмах) запису на осцилограмі, мм;

 $2J_{j}$ – подвоєна величина прискорення робочого столу вібростенда, g;

2S – подвоєне значення амплітуди коливання робочого стола вібростенда, мм;

f – частота коливань робочого столу вібростенду, Гц;

 α – коефіцієнт розподілу дільника.

Амплітудно-частотні характеристики знімають при номінальних перевантаженнях для даного типу вібраційної вимірювальної апаратури.

Перевантаження не повинне перевищувати максимально-допустиме значення для кожного типу датчика вібро вимірювальної апаратури.

Амплітудно-частотна характеристика будується для кожного каналу конкретного датчика. На робочій ділянці характеристика має бути лінійною в межах норм ТУ.

Графіки амплітудно-частотних характеристик використаної вібро апаратури показано на рис. 3.7, 3.8.



Рис. 3.7. Амплітудно-частотні характеристики датчика вібрацій МВ-22



Рис. 3.8. Амплітудно-частотна характеристика датчика прискорень ДУ-5

3.3.9. Зняття амплітудної характеристики

Амплітудна характеристика вимірювального каналу – це залежність вихідної величини (струм або 1 мм запису) від амплітуди зсуву або прискорення вимірюваних синусоїдальних коливань.

Амплітудну характеристику знімають на частоті, близькій або збігаючій зі значенням частоти, реально діючої на об'єкті, при амплітудах або прискореннях, не перевищуючих технічні дані апаратури.

Кількість точок запису має бути не менше трьох на весь діапазон робочих амплітуд або прискорень. Запис виконується на ділянках, що забезпечують розмах запису на фотопапері не менше 30–40 мм. При кожному значенні амплітуди або прискорення дають витримку 3–5 с і виконують прописку кадру. При обробленні запису для кожного значення амплітуди або прискорення визначають розмах запису на фотопапері.

За відомим значенням амплітуди або прискорення коливального руху робочого стола вібростенда і розмахом запису на фотопапері будують амплітудні характеристики, що виражають залежність вигляду:

$$2A_{3an} = \varphi(2S);$$

або, при записі прискорення:

$$2A_{3an} = \varphi(2J_j).$$

Графіки амплітудної характеристики вимірювального каналу вібро апаратури показано на рис. 3.9, 3.10.

Амплітудну характеристику знімають для перевірки лінійності вимірювального каналу апаратури, а також для визначення на заданій частоті величини прискорення.

3.3.10. Визначення амплітуди коливань

Визначення розмаху коливань (подвійної амплітуди) виконується вимірювачем або шаблоном. При цьому слід враховувати:

– розмах коливань має бути максимальним, що най частіше зустрічається на кадрі (не менше трьох раз);

– зміна розмаху коливань повинна мати місце на ділянці кадру, розташованій не менше, ніж за 30 мм від його границь;

 при визначенні розмаху коливань слід звертати увагу на товщину лінії запису. Вимірювання виконують між лініями, проведеними посередині променя.



Рис. 3.9. Амплітудна характеристика датчика вібрації МВ-22



Рис. 3.10. Амплітудна характеристика датчика прискорень ДУ-5

3.4. Висновки до розділу 3

3.4.1. Викладено методики і рекомендації щодо проведення експериментальних досліджень системи керування IBC у складі рухомих об'єктів, наведено склад обладнання, необхідного для проведення експериментів.

3.4.2. Проведено експериментальні дослідження системи керування IBC, що підтверджують доцільність практичної реалізації запропонованої схеми.

3.4.3. У результаті експериментальних досліджень було встановлено, що похибка стабілізації лінії візування при амплітуді коливання до 1g становить до 20".

3.4.4. Підтверджено достовірність отриманих теоретичних положень.

3.4.5. Запропоновано методику тарування вібровимірювальної апаратури. Наведено прилади та датчики, які використовуються при дослідженнях на ударо- і вібростійкість до зовнішніх факторів.

3.4.6. Результати, отримані в цьому розділі, відображено у роботах авторів [2; 40–50].

РОЗДІЛ 4

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПОХИБОК

У відомій літературі практично не розглянуто можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування і комплексування автоматизованої приладової системи, використання яких призводить до суттєвого підвищення точності IBC.

Рівень цих вимог постійно зростає, що спонукає до створення досконалішої IBC нового типу.

Метою цього розділу є використання нейромережі для зменшення впливу інструментальних похибок системи на вихідний сигнал автоматизованої приладової IBC.

Основними задачами розділу є:

1. Провести дослідження варіантів використання нейромереж у задачі апроксимації нелінійних рівнянь визначення навігаційних координат IBC та значення ПСТ за допомогою ЧЕ.

2. Отримати результати чисельних досліджень нейронних мереж у відповідності з розробленими алгоритмами..

Розв'язання перерахованих задач відображено у працях [121–123; 147; 172–179].

4.1. Використання нейронної мережі у дослідженнях автоматизованої автоматизованої приладової системи із ЧЕ

У п. 1.4 ідентифіковано основні складові автоматизованої приладової системи: ЧЕ, інерціальна інформаційно-вимірювальна система (IBC), вимірювачі висоти, двовісна платформа та БЦОМ. Як бачимо, від точності IBC та ЧЕ у значній мірі і залежить точність визначення координат об'єкту.

У відомій літературі практично не розглянуто можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування і комплексування автоматизованої приладової системи, використання яких призводить до суттєвого підвищення точності визначення навігаційних праметрів.

Для високоточної автоматизованої приладової системи використання нейронних мереж дозволяє якісно покращувати модель стану інструментальних похибок, оскільки дозволяє врахувати нелінійності у перетворенні вимірювань [22].

Проведемо дослідження варіантів використання нейромереж у задачі апроксимації нелінійних рівнянь визначення навігаційних координат IBC та значення ПСТ за допомогою ЧЕ. Наведемо дві схеми моделювання і використання роботи нейромережі, призначеної для вирішення поставленої задачі.

Схема на рис. 4.1,а реалізує алгоритм ідеальної роботи автоматизованої автоматизованої приладової системи, друга схема (рис. 4.1,б) – алгоритм функціонування, що крім того враховує сигнали, що компенсують вплив похибок ЧЕ та IBC на їх вихідні параметри.

У *першому випадку* (рис. 4.1,а) нейромережа апроксимує перехідну матрицю. Матриця відповідає рівнянням інерціальної навігації.



б)

Рис. 4.1. Блок-схема нейромережі: а) апроксимуючої алгоритм функціонування автоматизованої приладової системи: X_k, V_k – навігаційні координати; ΔX_k, ΔV_k – похибки визначення навігаційних координат; ω_k, n_k – кутова швидкість та ПСТ; б) прямого розповсюдження моделі

інструментальних похибок ЧЕ та IBC:

 Δn_k , $\Delta \omega_k$ – похибки визначення ПСТ та кутової швидкості

Функціонування нейромережі у режимі настроювання відбувається наступним чином. На вхід нейромережі поступають вектори, що складаються з навігаційних координат X_k , V_k , параметрів орієнтації та вимірювань n_k та ω_k без врахування похибок вимірювання (ідеальних значень прискорення сили тяжіння

(ПСТ) і абсолютної кутової швидкості) на момент часу t. Вихід нейромережі порівнюється з обчисленим на БЦОМ точним рішенням рівнянь руху автоматизованої приладової системи для моменту часу *t*+ Δt . Алгоритм навчання нейромережі настроює її параметри. Настроювання виконується з метою - мінімізувати похибки визначення навігаційних координат ΔX_k , ΔV_k між виходом нейромережі і точним (ідеальним) значенням, заданим на відповідній сітці. Сітка створена можливими значеннями навігаційних координат і вимірюваних величин. В основному режимі роботи на вхід нейромережі поступають навігаційні параметри і сигнали вимірювань. Ha виході нейромережі отримуємо навігаційні параметри і параметри орієнтації на наступний момент часу. Таким чином, нейромережа апроксимує алгоритм ідеальної роботи приладової IBC.

У другому випадку (рис. 4.1,б) при навчанні нейромережі на її вхід подаються вектори сформовані з датчиків системи (реальних значень параметрів). Ці вектори отримані з виміряних параметрів $X_k + \Delta X_k$, $V_k + \Delta V_k$, $n_k + \Delta n_k$, $\omega_k + \Delta \omega_k$ включають похибки вимірювання. Вихід нейромережі настроюється під ідеальні значення параметрів (т.т. без похибок). Ця схема може використовуватись В автоматизованій приладовій системі лля навігаційних параметрів періоди прогнозування y зникання сигналу супутникової навігаційної системи (СНС). При цьому процес настроювання нейромережі буде мати місце безперервно, доки СНС виробляє точні координати і значення швидкості.

Можливі схеми в яких нейромережа перетворює не алгоритм обчислення координат та значення прискорення сили тяжіння IBC, а нелінійні рівняння їх похибок. Тобто, виходами нейромережі є похибки визначення координат, швидкості та ПСТ. Інструментальні похибки, у цьому випадку, виготовлення IBC та ЧЕ можна інтерпретувати, як настроюванні параметри нейромережі.

Модель інструментальних похибок ЧЕ має вигляд:

$$\Delta n = \begin{vmatrix} A_{x0} \\ A_{y0} \\ A_{z0} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & A_{zz} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} n_{x} \\ n_{y} \\ n_{z} \end{vmatrix},$$
(4.12)

де A_{io} – систематичні похибки дрейфу; A_{ii} – похибки масштабних коефіцієнтів; A_{ji} – похибки виставки осі чутливості; n_i – проекції ПСТ на осі; i = x, y, z.

Така модель може бути представлена нейромережею прямого розповсюдження (структура мережі повністю відповідає структурі моделі). На рис. 4.2 зображено нейромережу, що апроксимує модель інструментальних похибок ЧЕ.



Рис. 4.2. Модель інструментальних похибок ЧЕ, представлена нейромережею прямого розповсюдження

Нейронна мережа представляє з себе безліч вузлів (нейронів), які об'єднуються в шари і з'єднуються між собою зв'язками (синапсами). Існує безліч видів самих нейронів і способів їх з'єднання. Поодинокі штучні нейрони з'єднуються ОДИН 3 одним різними методами. Цe можуть створює різноманітність нейронних мереж з різною архітектурою, різними правилами навчання і можливостями. Найбільш поширені з них: мережі прямого поширення (FeedForward), Мережі Хопфілда, Карти Кохонена, Машини Больцмана, Мережі на основі адаптивної Резонансної Теорії (ART), Радіальні Базисні Функції (RBF) і Каскадно-кореляційні мережі.

Найбільш просту архітектуру мають мережі прямого поширення. Вони названі так тому, що нейрони одного шару можуть бути пов'язані лише з

нейронами прилеглих шарів без зворотних і рекурентних зв'язків. Такі мережі складаються з вхідного шару, одного або більше прихованих шарів (названих так, тому що вони не мають безпосередніх зв'язків з "зовнішнім світом") і вихідного шару. За допомогою такої мережі дані перетворюються з n-мірного вхідного простору в m-мірне вихідний. Такі мережі навчаються для видачі бажаних результатів при подачі на вхідний шар зразкового результату.

Мережі прямого поширення - найбільш простий і наочний спосіб об'єднання нейронів. Він робить роботу нейронної мережі логічно прозорою і, в деяких випадках, дозволяє здійснювати аналіз досліджуваної інформації в алгоритмічній вигляді.

Обидві використовувані нейронні мережі є двошаровими мережами прямого поширення. Прихований шар складається з нейронів з передавальної функцією тангенціальною сигмоїд (рис.4.3).

Перевагою цієї функції є автоматичний контроль посилення: для слабких сигналів, коли величина *a_j* близька до нуля, крива вхід-вихід має сильний нахил, що дає велике посилення. Коли величина сигналу внутрішнього збудження стає більшою за модулем, посилення знижується. Таким чином, великі за величиною сигнали сприймаються мережею без насичення, а слабкі проходять без надмірного ослаблення.

Вихідний шар складається з лінійних нейронів (рис. 4.4).



Tan-Sigmoid Transfer Function Рис. 4.3. Нейрон з передавальною функцією тангенціальною сигмоїд



Linear Transfer Function

Рис. 4.4. Лінійні нейрони

Це обумовлено тим, що якщо у вихідному шарі використовувати також сигмоїдні нейрони, то вихідні значення будуть лежати в інтервалі від -1 до +1.

Така двошарова топологія була обрана через те, що мережа, що складається з прихованого рівня з тангенціальними нейронами і вихідного шару з лінійними нейронами, дозволяє апроксимувати будь-яку лінійну і нелінійну функції, використовуючи при цьому довільне число нейронів прихованого рівня.

У якості функцій збудження нейронів цієї мережі використовуються лінійні залежності вхід-вихід. Зміщеннями нейронів будуть систематичні компоненти дрейфів нульового сигналу ЧЕ.

Наступним кроком уточнення моделі інструментальних похибок є врахування у ній нелінійних компонентів. Це вирішується шляхом введення у мережу замість нейронів з лінійними функціями активації, нейронів з тангенціальними і сигмоідними функціями активації. Можливим є уточнення моделі похибок збільшенням числа внутрішніх шарів.

Структура моделі інструментальних похибок, у загальному випадку, ускладнюється завдяки нестабільності окремих складових.

Особливо небезпечним є наявність у структурі похибок складових, період кореляції яких є близьким до періоду зникнення сигналу приймача СНС (від 10 до 300 с). У цих умовах ефективність використання параметричної моделі похибок надзвичайно знижується.

У якості моделі автоматизованої приладової системи використовуємо настроювану нейромережу, яка постійно відслідковує змінну структуру моделей похибок.

У цьому випадку, використовують адаптивні властивості нейромережі, а саме, властивість нейромережі апроксимувати, а потім екстраполювати вхідні сигнали, що мають складну форму. При цьому, можливо варіювати складність моделі похибок задаючи структуру нейромережі,.

Нейромережа, у процесі навчання, може адаптуватись до сигналів, що описуються лінійними і нелінійними динамічними моделями.

На вхід нейромережі подаємо вимірювані ЧЕ та IBC сигнали. На виході нейромережі отримуємо координати місця розташування і швидкості об'єкта та значення ПСТ для врахування компонентів, що змінюються у часі.

Структура мережі може включати кількість вхідних нейронів, що перевищує число вимірюваних параметрів. Нейромережа, під час обчислень, постійно налаштовує свої параметри таким чином, щоб звести до мінімуму різницю свого вихідного сигналу від сигналу з похибками.

При зникненні сигналу з СНС нейромережа обчислює координати на основі вимірюваних ПСТ і абсолютних кутових швидкостей, надаючи алгоритми визначення (обчислення) координат і компенсації похибок ЧЕ та IBC.

4.2. Функціональні алгоритми автоматизованої приладової системи із ЧЕ, побудовані на базі нейронних мереж

Автоматизована приладова система включає у себе комплексну навігаційну систему (IBC та CHC). У алгоритмах IBC включені нейромрежеві структури. Рівняння орієнтації, у цьому випадку, зручно представляти у кватерніонах. Представлена модель алгоритмів (рис. 4.5), використовує дві нейронні мережі прямого розповсюдження.

Перша нейронна мережа компенсує інструментальні похибки гіроскопів та апроксимує рішення рівнянь орієнтації навігаційної системи. Друга – компенсує інструментальні похибки акселерометрів та апроксимує рішення рівнянь на одному кроці інтегрування.



Рис. 4.5. Блок – схема навігаційної системи, побудованої з використанням нейронних мереж (БА – блок акселерометрів (ЧЕ), БГ – блок гіроскопів):

 V_{xrk}, V_{yrk} – проекції швидкості об'єкта на осі географічної навігаційної системи координат на k кроку інтегрування; φ_k, λ_k – координати об'єкта на k кроку інтегрування, п_{rk}, п_{rk} – ПСТ та прискорення у навігаційній системі координат ; ω_k – абсолютна кутова швидкість у приладовій системі координат, Λ_k – кватерніон орієнтації об'єкта на k-му кроці інтегрування, m_k – кватерніон довороту на k-му кроці інтегрування; $\Psi_{k+l}, \theta_{k+l}, \gamma_{k+l}$ – кути орієнтації об'єкта (курс, тангаж, крен відповідно)

Під час навчання нейромережі на вхід подається сукупність вектор стовпців, кожен з яких містить одну з можливих комбінацій навігаційних параметрів. При цьому інтервал зміни кожного параметра розбивається на більш дрібні інтервали. Тоді довжина навчаючого вектора для нейромережі №2 будет дорівнювати m⁶, где m - кількість ітервалів кожного параметру, 6 кількість параметрів (v_{xk-1}, v_{yk-1}, ϕ_{k-1} , λ_{k-1} , n_{xreorp} , n_{yreorp}). В цьому випадку показання акселерометрів містять інструментальні похибки. Для нейромережі №1 довжина навчального вектора буде дорівнює m³, де m - число інтервалів кожного параметру, 3 – кількість параметрів параметров ω_{xk-1} , ω_{yk-1} , ω_{zk-1}).

На вихід нейромережі №2 подається послідовність, отримана рішенням диференціальних рівнянь навігації на кроці інтегрування при ідеальних значеннях показань акселерометрів.

На вхід нейромережі №1 родається послідовність, отримана рішенням рівнянь орієнтації (диференціюванням або апроксимованою параболою) на кроці інтегрування при ідеальних значеннях показань гіроскопів.

Таким чином, при роботі нейромереж на їх входи будуть подаватися результати вимірювань з похибками, а на виході будемо отримувати ідеальні значення параметрів.

У першому способі (рис. 4.5) у процесі налаштування на вхід нейромережі поступають значення кватерніона орієнтації Λ_{k-1} на попередньому кроці та виміряні значення кутових швидкостей ω_k , що містять значення інструментальних похибок. На вхід нейромережі пред'являється поточний кватерніон орієнтації Λ_k , розрахований на основі ідеальних значень кутових швидкостей.

Таким чином, нейронна мережа налаштовується на перетворення виміряних значень кутових швидкостей, що містять похибки, у дійсні значення кватерніона орієнтації. При цьому зменшується вплив інструментальних похибок IBC на параметри орієнтації, що використовуються надалі у блоку перерахунку уявного прискорення із приладової системи координат у навігаційну систему координат.

У цьому способі число компонентів навчаючого вектора буде рівним n^6 , де n – число параметрів (ω_{xk-1} , ω_{yk-1} , ω_{zk-1} , Λ_2 , Λ_3 , Λ_4). Тут Λ_2 , Λ_3 , Λ_4 – складові кватерніона орієнтації. Скалярна частина кватерніона Λ_1 знаходиться з умови нормування кватерніона:

$$\Lambda_1 = \sqrt{1 - \sum_{i=2}^4 \Lambda_i^2}$$
(4.1)

У другому способі (рис. 4.5) роботи нейромережі на її вхід поступають результати вимірювань блока ЧЕ. На вихід першої нейромережі поступає послідовність ідеальних значеннях показів ЧЕ.

Вихід нейромережі настроюється на значення кватерніона довороту між попереднім і поточним кроком інтегрування *m_k*.

Далі розраховується кватерніон на поточному кроці по формулі

$$\Lambda_k = \Lambda_{k-1} \circ m_k \tag{4.2}$$

де \circ – знак множення кватерніонів, Λ_i – кватерніон на поточному кроці, Λ_{k-1} – кватерніон на попередньому кроці.

На вхід нейромережі подаються значення навігаційних параметрів на наступному кроці, розраховані для ідеальних значень (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Блок-схема роботи нейтронної мережі: X_r – вектор координат об'єкту (φ , λ); V_r – вектор швидкості об'єкту; ε_{xr} , ε_{yr} – нев'язки нейромережі; ΔV_r , ΔX_r – прирости параметрів на кроці; Δn_r – вектор інструментальних похибок

Нейромережа реалізує перетворення вимірених значень навігаційних координат з похибками в ідеальні значення. Під час роботи нейромережі зменшується вплив інструментальних похибок ЧЕ та IBC на вихідні параметри автоматизованої приладової системи.

При роботі нейромереж їх вхідними сигналами є вимірені параметри, що включають ідеальні значення у сумі з похибками. Нейромережі перетворюють їх у вихідні параметри, наближені до ідеальних значень.

Передбачається, що інструментальні похибки IBC та ЧЕ є постійними величинами. Для врахування змінних у часі компонентів похибок, вхідний шар мережі може включати кількість нейронів, що більша кількості виміряних сигналів. Тоді обсяг навчаючої вибірки буде більшою розрахованих вище величин.

При зміні інструментальних похибок з плином часу або при зміні умов функціонування, необхідно змінити перетворення, що реалізує нейромережа. Для цього потрібно настроїти нейромережу. Для цього використовується СНС у стандартних умовах або під час руху.

Функціонування автоматизованої приладової системи із нейронними мережами, можливе у трьох режимах:

1. Під час підготовчого етапу нейронна мережа налаштовується на виміри ЧЕ та ІВС, що містять інструментальні похибки, с заданою точність.

2. Під час руху нейромережа працює в основному режимі, коли на її вхід подаються реальні виміри ЧЕ та ІВС, а на виході пройдений через нейромережу сигнал буде близьким до ідеального, якщо інструментальні похибки близькі до тих, при яких проводилась настройка нейромережі.

3. Під час руху при наявності сигналу з приймача СНС здійснюється корекція показів ІВС шляхом навчання нейтронної мережі. Після донавчання нейрона мережа буде обчислювати скореговані значення навігаційних параметрів.

4.3. Чисельні дослідження функціональних алгоритмів автоматизованої приладової системи із ЧЕ

Наведемо результати чисельних досліджень нейронних мереж у відповідності з вищенаведеними алгоритмами. Дослідження проведені на основі комплексу програм у середовищі MATLAB з використанням пакета Neural Network. Дослідження включали три чисельних експерименти. Мета експериментів полягала в оптимізації структури і складу нейромережі та дослідженні точності роботи нейромереж.

Експеримент 1. Мета – дослідження впливу кількості нейронів схованого шару у нейронних мережах на швидкість їх навчання і на точність апроксимації компонент кватерніона довороту – для нейромережі №1, навігаційних параметрів – для нейромережі №2. Нейромережі складались з трьох шарів: вхідного, вихідного і схованого. Число нейронів вхідного і вихідного шарів було рівним числу відповідно вхідних і вихідних параметрів. Функція активації нейронів цих шарів була прийняти лінійною. Варіювалось число нейронів схованого шара з тангенціальними функціями активації.

Перша нейромережа послідовно настроювалась на двох, трьох, чотирьох, п'яти, шести, сіми, вісьми і десяти нейронах схованого шару. Результати, отримані для нейронної мережі №1, представлені у табл. 4.1.

По даним табл. 4.1 побудовано графік залежності точності і швидкості навчання нейронної мережі №1 від кількості нейронів схованого шару. Графік показано на рис. 4.7.

Таблиця 4.1.

Вплив кількості нейронів схованого шару на точність і швидкість

Циото	Кількість нейронів і функція активізації нейрона					
число кроків навчання	tansig - тангенційна, purelin - лінійна					
	2 tansig,	3 tansg,	4 tansg,	5 tansg,	7 tansg,	
	3 purelin	3 purelin	3 purelin	3 purelin	3 purelin	
3	0,065487	3,79·10 ⁻⁴	9,002·10 ⁻⁵	8,415·10 ⁻⁵	6,537·10 ⁻⁵	
5	0,000451	7,71.10-5	5,034·10 ⁻⁵	4,655.10-5	3,841.10-5	
7	0,000451	1,49·10 ⁻⁵	1,896.10 ⁻⁵	$2.837 \cdot 10^{-6}$	1,247.10-5	
9	0,000450	6,35·10 ⁻⁶	9,984·10 ⁻⁶	6,988·10 ⁻⁷	5,143·10 ⁻⁷	
10	0,000451	$2,11 \cdot 10^{-6}$	7,308·10 ⁻⁷	$2,553 \cdot 10^{-7}$	1,112.10-8	
15	0,000451	1,19·10 ⁻⁹	1,084·10 ⁻⁹	$4,42 \cdot 10^{-14}$	8,11·10 ⁻¹³	
20	0,000451	1,05.10 ⁻¹⁴			$2,64 \cdot 10^{-13}$	

навчання нейронної мережі №1



Рис. 4.7. Вплив кількості нейронів схованого шару на точність і швидкість навчання нейронної мережі №1

Для нейромережі №2 результати представлені у табл. 4.2. По даним табл. 4.2 побудовано графік залежності точності і швидкості навчання нейромережі №2 від кількості нейронів схованого шару, представлений на рис. 4.8.

Таблиця 4.2.

	Кількість нейронів і функція активізації нейрона					
Число	tansig - тангенційна, purelin - лінійна					
кроків	5 tansig,	6 tansg,	7 tansg,	8 tansg,	10 tansg,	
навчання	4 purelin	4 purelin	4 purelin	4 purelin	4 purelin	
5	0,816004	0,102528	1,55961	15,02	0,353571	
10	0,401903	6,47·10 ⁻⁵	2,09.10-5	0,000164	3,47.10-6	
15	0,372794	3,03.10-5	3,16.10-6	5,85·10 ⁻⁷	2,05.10-7	
20	0,336011	1,59·10 ⁻⁵	8,97·10 ⁻⁷	2,97.10-7	1,85.10-7	
30	0,259232	4,54·10 ⁻⁶	5,34·10 ⁻⁷	1,76.10-7	1,55.10-7	
40	0,048671	$4,12 \cdot 10^{-6}$	3,56.10-7	1,39.10-7	1,21.10-7	
50	0,023537	3,75·10 ⁻⁶	3,01.10-7	1,18.10-7	1,08.10-7	

Вплив кількості нейронів сховано шару на точність і швидкість навчання нейронної мережі №2

Аналіз результатів першого експерименту дозволяє зробити наступні висновки:

- для нейронної мережі №1, апроксимуючої компоненти кватерніону повороту на кроці інтегрування, раціональним є вибір трьох тангенціальних нейронів схованого шару. Це забезпечує найбільшу точність і прийнятну швидкість навчання нейромережі;





- для нейронної мережі №2, апроксимуючої навігаційні параметри на кроці інтегрування, найбільшу точність і прийнятну швидкість навчання нейромережі забезпечує схований шар, що складається з восьми нейронів.

Експеримент 2. Мета – вивчення характеристик навченої нейронної мережі, що працює з вхідними сигналами, значення яких розташовані в інтервалах між вузлами навчаючої сітки значень.

При тестуванні навченої нейронної мережі на її вхід подавались тестуючі вектори, відмінні від використаних у навчаючій послідовності. Одночасно був розширений інтервал тестуючої сітки з тим, щоб встановити точність апроксимації налаштованої нейронної мережі на продовженні навчаючої сітки. Стосовно експерименту з нейронною мережею №1,

апроксимуючою компоненти кватерніона повороту на кроці інтегрування, у проміжних точках спостерігається збільшення похибки апроксимації приблизно у 3 рази. За межами навчаючого інтервалу похибка апроксимації швидко зростає. Результат відображено на рис. 4.9.

У результаті моделювання встановлено, що всередині навчаючого інтервалу нейронна мережа №2 з прийнятною точністю апроксимує параметри навігації. За межами ж навчаючого інтервалу похибка апроксимації починає швидко зростати. Результат відображено на рис. 4.10.



Рис. 4.9. Результат тестування нейромережі №1 у проміжних точках навчаючої сітки



Рис. 4.10. Результат тестування нейромережі №2 у проміжних точках навчаючої сітки

Експеримент 3. Мета експерименту – дослідження якості прогнозу нейронними мережами параметрів орієнтації і навігації при використанні нейромереж замість фундаментальних алгоритмів IBC. Проводилось інтегрування рівнянь орієнтації і навігації на часовому інтервалі, приблизно рівному інтервалу можливого зникання сигналів приймача СНС (до 0-2000с). Отримані нейромережеві моделі настроювались і тестувались з різними значеннями показів акселерометрів добавлялись постійна похибка A₀=10e⁻²g. Вихід моделі порівнювали з рішенням функціональних рівнянь з ідеальному випадку. Одночасно будувалось рішення функціональних рівнянь. Результати чисельного експерименту по визначению параметрів руху ЛА представлені на рис. 4.11.

Розрахунки проводились з наступними початковим умовами: v_x=50 м/c; v_y=0; n_x=0; n_y=0; nz=0; A_{0x}=0; A_{0y}=0.1 м/c²; A_{0z}=0; B_{0x}=0; B_{0y}=2.4e⁻⁵ paд/c; B_{0z}=0; ϕ =56 град; λ =37 град.



Рис. 4.11. Результати обчислення параметрів руху літального апарату (ЛА) при ідеальному рішенні, рішенні з врахуванням дрейфів гіроскопів і у нейромережевій моделі

Як видно з графіків (рис. 4.11), точність визначення місця розташування об'єкту не перевищує 10 метрів за 2000с польоту. При цьому, блок перерахунку прискорення повністю відпрацьовує вхідну похибку. Аналіз результатів чисельних експериментів показує, що точність апроксимації алгоритмів визначення орієнтації і навігації розробленою нейромережевою моделлю характеризується відносною похибкою апроксимації обчисленої швидкості, яка не перевищує 4,3%, а координат – 0,007% на інтервалі часу прогнозу 2000 с.

Нейромережа навчалася досить грубо, але при цьому вона змогла відпрацювати шуми по першому каналу, що доводить, що при більшій кількості експериментів можна знайти такі параметри блок перерахунку, при якому він буде компенсувати шуми по обох каналах.

4.4. Висновки до розділу 4

У даному розділі обґрунтовано використання нейромережевого підходу у розробки функціонування i задачах алгоритмів комплексування IBC. Проаналізовано функціонування автоматизованої автоматизованої приладової IBC з нейронними мережами у режимі підготовчого етапу та у режимі льоту ЛА. Встановлено, що використання нейромережі зменшує вплив інструментальних похибок системи на вихідний сигнал автоматизованої приладової IBC.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОПЕРЕДНЬОЇ ВИСТАВКИ НАВІГАЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІВС

Від точності попередньої виставки навігаційних елементів (акселерометрів, гравіметрів та інших) прецизійних IBC сучасних рухомих об'єктів великим чином залежить точність вимірювань таких механічних параметрів IBC, як широта, довгота, швидкість, курс та інші.

Аналіз досліджень та публікацій у галузі високоточних кутових вимірювань показав, що точність та швидкодія відомих засобів для вимірювань кута не є достатніми (1') [30]. ЦКБ «Арсенал» разом з лабораторією наукових досліджень та вимірювальних перетворювачів кафедри приладобудування (ПБ) НТУУ «КПІ», при безпосередній участі автора, розроблено високоточний повністю автоматизований кутомірний пристрій (0,3"), описаний в [14; 18].

З аналізу літератури видно, що існують методи дослідження похибок вимірювачів кута з візуальним наведенням та відліком [4; 11; 14; 18 та інших] для неавтоматизованих та півавтоматизованих вимірювачів кута. Проте, з появою нового автоматизованого вимірювача кута [14; 18] з потужними обчислювальними засобами, виникає необхідність розроблення нового методу дослідження похибок цього вимірювача кута.

Мета даного розділу:

- розробити метод дослідження похибок вимірювання кутів за допомогою нового вимірювача кута з кільцевим лазером.
 Задачі даного розділу:
- розробити програму оброблення результатів експериментів щодо дослідження похибки нового вимірювача кута;
- розглянути деякі перспективні засоби для високоточних вимірювань кутів.

Розв'язання поставлених задач відображенно у роботах автора [14; 18; 16; 196; 197; 199; 202; 203; 207; 208 та інших].

У даному розділі отримано такі нові результати:

- розроблено новий метод дослідження похибок вимірювання кутів за допомогою нового автоматизованого вимірювача кутів з кільцевим лазером;
- розроблено нову програму обробки результатів експериментів щодо дослідженню похибки нового вимірювача кутів;
- запропоновано нові схемні рішення підвищення точності вимірювань кутів.

5.1. Метод експериментального дослідження похибок нового автоматизованого вимірювача кутів

На рис. 5.1 показано новий високоточний автоматизований кутомірний пристрій [14], розроблений ЦКБ «Арсенал» разом з лабораторією кафедри ПБ НТУУ «КПІ» за участю автора.



Рис. 5.1. Новий високоточний автоматизований кутомірний пристрій

Представимо основні характеристики нового високоточного

автоматизованого кутомірного пристрою (таблиці 5.1) [14].

Таблиця 5.1.

Основні характеристики високоточного автоматизованого кутомірного

Параметри	Значення
Діапазон вимірювання кутів	0360°
Похибка вимірювання:	
систематична складова	0,5″
СКВ випадкової складової	0,18″
гранична похибка при 17	0,5″
прийомах	
Діапазон швидкості обертання	0600 об/хв
Габарити, мм	900×2100×1500
Maca	800 кг

пристрою

Розглянемо принцип дії спрощеної схеми нового вимірювача кута на основі кільцевого лазера (рис. 5.2).

Контрольовану призму 1, кути якої вимірюються, предметний стіл 2 та кільцевий лазар (КЛ) 3, встановлено на обертовому пристрої 4, який обертається з постійною швидкістю ω за допомогою електричного двигуна 5. Керування двигуном здійснюється за допомогою електропривода 6 [14].

Біля предметного столу 2 встановлено щілинний фотоелектричний автоколіматор 7. При обертанні призми 1 з обертальним пристроєм 4, від кожної її грані на виході автоколіматора 7 отримують електричні імпульси. Необхідний сигнал селекції першої грані призми отримують від блоку прив'язки 8 базової грані. За цим сигналом блоком керування 9 виділяється імпульс автоколіматора від першої грані призми 1. Цим імпульсом вмикається лічильник 10, який підраховує кількість періодів сигналу КЛ 3. Імпульс від наступної грані призми 1, отриманий на виході автоколіматора 7 вимикає лічильник 10, тим самим закінчуючи підрахунок кількості періодів сигналу КЛ 3, та вмикає лічильник 11, який починає підрахунок. Надходження імпульсу автоколіматора 7 від кожної наступної грані призми вмикає один з лічильників і вимикає інший. Інформація, отримана з лічильників 10 і 11, через пристрій зв'язку 12 передається в ЕОМ 13, де оброблюється. Також ВК оснащений цифровою відеокамерою 14, вихід якої підключено до входу комп'ютера 13 через USB інтерфейс.

Цифрову відеокамеру 14 встановлюють у такому положенні, що її об'єктив фокусується на контрольовану призму 1 і знімає на відео обертання призми. Перетворення візуальної інформації у вимірювальному каналі відбувається у кілька етапів [75]:

- формування за допомогою твердотільного перетворювача світло сигнал (ПЗЗ- матриці 14.1) двомірної дискретної функції, яка пропорційна яскравості об'єкта;
- квантування (14.2) за рівнем дискретних значень функції і формування цифрового відео зображення (14.3), що містить інформацію про яскравість дискретних точок, тобто формування двомірної дискретної функції;
- введення в комп'ютер цифрового відео зображення через інтерфейс USB 14.4;
- документування вимірювання у вигляді цифрового відео зображення.



Рис. 5.2. Спрощена схема вимірювача кута на основі кільцевого лазера

Розроблено метод проведення експериментів щодо дослідження похибок нового автоматизованого вимірювача кутів з кільцевим лазером, який має основні положення.

При обертанні за годинниковою стрілкою за перше обертання контрольованої призми у пам'яті комп'ютера записуються наступні числа:

з лічильника 10:

$$N_{1,1}^{+} = \int_{t_{1}}^{t_{2}} f_{oux}(t) dt ,$$

$$N_{1,3}^{+} = N_{1,1}^{+} + \int_{t_{3}}^{t_{4}} f_{oux}(t) dt ,$$
(5.1)

$$N_{1,n-1}^{+} = N_{1,n-3}^{+} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{oux}(t) dt;$$

з лічильника 11:

$$N_{1,2}^{+} = \int_{t_{2}}^{t_{3}} f_{eux}(t) dt ,$$

$$N_{1,4}^{+} = N_{1,2}^{+} + \int_{t_{4}}^{t_{5}} f_{eux}(t) dt ,$$

$$N_{1,n}^{+} = N_{1,n-2}^{+} + \int_{t_{n}}^{t_{n+1}} f_{eux}(t) dt ,$$
(5.2)

де перший індекс при *N* – номер оберту призми; другий – номер числа, записаного за даний оберт;

*t*₁, *t*₂,..., *t*_n – час надходження імпульсів автоколіматора, що надходять від першої, другої та інших граней призми;

$$f_{eux}(t)$$
 – частота сигналу на виході з кільцевого лазера (КЛ);

n – кількість граней призми.

За наступні оберти призми отримують числа, аналогічні числам першого оберту. Інформація на лічильниках 10, 11 перед кожним обертом зводиться до нуля. За останній М-й оберт призми за годинниковою стрілкою у пам'яті комп'ютера записуватимуться такі числа: $N_{M,1}^+, N_{M,2}^+, \dots, N_{M,n}^+$. Так само вимірюють кути призми при обертанні проти годинникової стрілки. Наприклад, за останній М-й оберт призми при обертанні проти годинникової стрілки. Наприклад, за останній М-й оберт призми при обертанні проти годинникової стрілки будуть записані числа: $N_{M,1}^-, N_{M,2}^-, \dots, N_{M,n}^-$. Однак, порядок нумерації граней призми змінюється на зворотний, що враховується при обробленні інформації.

Вимірювання проведено циклами, у яких після розгону поворотного пристрою визначено кількість періодів сигналу КЛ за кожний оберт при

обертанні в один бік і у протилежний. За один оберт КЛ проти стрілки годинника на кут 2π на його виході отримують кількість періодів:

$$N_{+} = K\omega_{t_{+}} + K\omega_{3}\sin y_{t_{+}} + F_{0}t_{+}, \qquad (5.3)$$

а при обертанні за годинниковою стрілкою:

$$N_{-} = K\omega_{t_{-}} - K\omega_{3}\sin y_{t_{-}} - F_{0}t_{-}, \qquad (5.4)$$

де К – масштабний коефіцієнт КЛ;

- *ω*, *ω*₃ кутова швидкість обертального пристрою і Землі відповідно;
- *t*₊, *t*₋ час повороту обертального пристрою на кут 2π при обертанні проти і за напрямком руху стрілки годинника відповідно;

у – широта місця, де проводяться вимірювання;

 F_0 — зсув нуля вихідної характеристики КЛ.

Різниця частот на виході КЛ при обертанні дорівнюватиме:

$$f_{gux}(t) = K[\omega(t)\cos\alpha(t) + \omega_{3z}\cos\alpha(t) + \omega_{3z}\sin\alpha(t)\cos(\theta(t) + \theta)],$$
(5.5)

де ω_{3y}, ω_{3x} – вертикальна і горизонтальна проекції ω_3 відповідно, тобто:

$$\omega_{3y} = \omega_3 \sin \psi; \ \omega_{3x} = \omega_3 \cos \psi;$$

ψ – широта місця, де роблять вимірювання;

 $\theta, \theta(t)$ – кути між горизонтальними проекціями вимірювальної осі \overline{K} КЛ і

 $\overline{\omega_3}$ на початку і у процесі вимірювання відповідно, $\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt$.

Обчислення кутів виконано з формулою:

$$\varphi_{m,1}^{+(-)} = 2\pi \frac{N_{m,i-1}^{+(-)} + N_{m,i}^{+(-)}}{N_{m,n-1}^{+(-)} + N_{m,n}^{+(-)}},$$
(5.6)

 $N_{i-1} = 0$, при i=1,

де i – номер вимірюваного кута (або номер другого індексу при N);

т – номер оберту.

Після першого оберту призми (при обертанні як у прямому, так і у

зворотному напрямках) отримано кути:

$$\varphi_{1,1}^{+(-)};\varphi_{1,2}^{+(-)};...\varphi_{1,n-1}^{+(-)}.$$
(5.7)

За М-й оберт:

$$\varphi_{M,1}^{+(-)};\varphi_{M,2}^{+(-)};...\varphi_{1,M-1}^{+(-)}.$$
(5.8)

Потім для кожного масиву обчислено середнє значення кутів, що відповідає номеру *i*:

$$\varphi_i^{+(-)} = \frac{\sum_{m=1}^{M} \varphi_{m,i}^{+(-)}}{M}.$$
(5.9)

Враховуючи, що при обертанні проти годинникової стрілки вимірюються кути ϕ_i^- , обчислюють:

$$\varphi_i^{(-)} = 2\pi - \varphi_i^{(-)}. \tag{5.10}$$

Виміряні одним прийомом кути призми визначено як:

$$\varphi_i = \frac{\varphi_i^+ + \varphi_{n-i}^{(-)}}{2}.$$
(5.11)

Об'єктом досліджень була 24-гранна призма БЦ 8725-4067 №3, дані про атестацію якої, проведеної за допомогою методу калібрування, використовують в як еталон (табл. 5.2).

Вимірювання поводились за таких умов:

- температура робочого простору $+20 \pm 1^{\circ}$ С;
- відносна вологість повітря -60 ± 10 %;
- атмосферний тиск 742 мм рт. ст.

вибирався режим «Положення об'єкта». Контрольовану призму встановлювалали в горизонтальному положенні відносно осі автоколіматора. Установка виконувалась по чотирьох взаємно перпендикулярних гранях. В меню програми вибирався режим «Плоскі кути» (F2). Задавалися значення наступних параметрів:

- кількість прийомів вимірювань n = 17;
- допуск 0,7.

Проведено 4 цикли вимірювань.

5.2. Методика обробки на ЕОМ результатів експериментів щодо дослідження похибок вимірювача кутів

Обробку результатів вимірювань проведено наступним чином.

За отриманими даними обчислювались наступні значення:

- відхилення від еталона

$$\Delta \varphi_i = \varphi_j - \varphi_{je}, \tag{5.12}$$

де φ_i – значення виміряного кута для *j*-ї грані;

 φ_{je} – значення еталонного кута для j-ї грані (j=1...23);

- середньоквадратичне відхилення для кожного кута призми, що визначають за формулою:

$$\sigma_{j} = \sqrt{\frac{\left(N_{1,j} - N_{cp.}\right)^{2} + \left(N_{2,j} - N_{cp.}\right)^{2} + \dots + \left(N_{n,j} - N_{cp.}\right)^{2}}{n-1}},$$
(5.13)

де *n* – кількість приймань вимірювань;

- середньоквадратичне значення відхилень виміряних кутів від еталона:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} \Delta \varphi_j^2}{m}}, \qquad (5.14)$$

де m – кількість виміряних кутів (m=23);

- загальне середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_{3az} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} \sigma_j^2}{m}},$$
(5.15)

де $\sigma_{_{3a2}}$ – середньоквадратичне відхилення *j*-го результату;

- максимальне відхилення від еталону $\varphi_{k \max}$ — максимальне значення систематичної похибки, де *k* — номер експерименту.

Розроблено нову програму обробки результатів експериментів, яка дала змогу автоматизувати процес обчислень похибок, тобто відхилення від еталонного значення, максимального значення похибки, середньоквадратичного відхилення похибок, загального середньоквадратичного відхилення, i обробку результатів а значить суттєво полегшити експериментів і скоротити час, потрібний для цього.

У таблиці 5.3 надано список ідентифікаторів, використаних при написанні програми для обробки результатів вимірювань.

Таблиця 5.3.

Позначення		Найменування	Оди-	Зна-			
Розрахунки	Програма		ниці	чення			
Вхідні дані							
\overline{arphi}_j	X	Масив значень	кут. с				
		експериментальних даних					
\overline{arphi}_{je}	xe	Масив значень еталонних даних	кут. с				
σ_{j}	XS	Масив значень середніх	кут. с				
		квадратичних відхилень					
		результатів (експериментальні)					
Y_{j}	ху	Масив значень відхилення	кут. с				
		результатів при обертанні за і					
		проти годинникової стрілки					
Проміжні параметри							
	a	Експериментальне значення кута	град.				

Список ідентифікаторів
Позначення		Найменування	Оди-	Зна-
Розрахунки	Програма		ниці	чення
	b	відповідно в град., кут. хв, кут. с.	кут. хв.	
	с		кут. с	
	str, str1,	Імена файлів з еталонними та		
	str2	експериментальними даними		
	i	Кількість виміряних кутів		23
	k	Ціле число		
	n	Кількість експериментів		4
	sum	Сума квадратів відхилень від	кут. с	
		еталона		
	sum1	Сума квадратів середніх	кут. с	
		квадратичних відхилень		
		<u>Вихідні параметри</u>		
$\Delta \overline{arphi}_i$	dx	Відхилення від еталона	кут. с	
$\varphi_{k\max}$	max	Максимальне відхилення від	кут. с	
		еталона в <i>k</i> -му експерименті		
$Y_{k \max}$	maxY	Максимальне значення <i>Y</i> в <i>k</i> -му	кут. с	
		експерименті		
σ	sko	Середньоквадратичне відхилення	кут. с	
		відхилень від еталона		
$\sigma_{_{3ac}}$	sko1	Загальне середньоквадратичне	кут. с	
		відхилення		

Розроблено алгоритм і програма обробки експерименту, текст програми та приклад вихідних даних програми.

Після виконання необхідних розрахунків (див. табл. 5.3) та побудови графіків (рис. 5.3, 5.4) можна зробити декілька висновків:

- систематична складова похибки нового вимірювача кута має синусоїдальну складову з періодом 120°, і визначається трьома точками опори поворотної платформи (див. рис. 5.2).
- область найменших значень знаходиться приблизно посередині графіка, тобто для значень кутів від 120° до 210°;
- максимальне значення відхилення кутів від еталонних значень за 4 цикли вимірювань становить 0,28", що свідчить про високу достовірність вимірювань;

- загальне значення СКВ зменшується з підвищенням кількості експериментів і становить 0,1" (див. рис. 5.3);
- значення середньоквадратичних відхилень, отриманих за результатами експерименту, не виходить за допустимі межі 0,1-0,2";
- максимальна різниця кутів, виміряних в першому та другому прийомах, становить 0,12".

Таблиця 5.4.

Значення параметрів, що розраховуються при вимірюваннях кутів

Параметри	Номер експерименту					
параметри	1	2	3	4		
Максимальне відхилення від еталону, "	0.24	0.28	0.27	0.26		
Максимальне відхилення при обертанні за і проти	0.12	0.08	0.09	0.08		
годинникової стрілки, "						
СКВ відхилень від еталону, "	0.11	0.12	0.13	0.12		
Загальне СКВ, "	0.14	0.14	0.15	0.10		



Рис. 5.3. Систематична складова похибки вимірювача кута



Рис. 5.4. Середньоквадратичні відхилення похибки вимірювача кута

5.3. Засоби високоточних вимірювань кутів виставки навігаційних елементів

Сучасний стан кутомірної техніки спонукає до пошуку нових областей застосування високоточних вимірювачів кута, що дозволяє, у свою чергу, підвищити точність вимірювання інших механічних величин. Однією з таких областей є гравіметричні вимірювання, де вимірювач кута може використовуватись для попередньої виставки осей чутливості гравіметра.

Для будь-якої гравіметричної системи точність вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння визначається точністю виставлення осі чутливості гравіметра, що входить до складу цієї системи в якості чутливого елемента.

Запропоновано новий спосіб вимірювання аномалій прискорень сили тяжіння [221].

Силу тяжіння у спрощеному виді можна зобзазити у вигляді матриці (5.16):

$$\vec{f} = \begin{vmatrix} \aleph g + D_1 \\ -\nu g + D_2 \\ g + D \end{vmatrix}, \qquad (5.16)$$

де № – кут між нормалями до еліпсоїда і геоїда в меридіональному перерізі;

- *v* кут між нормалями до еліпсоїда і геоїда в площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана (рис. 6.4);
- D₁, D₂, D вирази прискорень в проекціях f_x, f_y, f_z питомої сили тяжіння відповідно, вплив яких необхідно компенсувати при виставці осі чутливості гравіметричної системи, визначаються з наступних виразів

$$D_{1} = -(2\dot{r}\dot{\phi}_{c} + r\ddot{\phi}_{c})\cos\chi + (\ddot{r} - r\dot{\phi}_{c}^{2})\sin\chi - 2r\omega_{3}\dot{\lambda}\cos\varphi_{c}\sin\varphi - r\dot{\lambda}\cos\varphi_{c}\sin\varphi,$$

$$D_{2} = 2r\dot{\phi}_{c}\omega_{3}\sin\varphi_{c} + 2r\dot{\phi}_{c}\dot{\lambda}\sin\varphi_{c} - 2\dot{r}\dot{\lambda}\cos\varphi_{c} - r\ddot{\lambda}\cos\varphi_{c},$$

$$D = (2\dot{r}\dot{\phi}_{c} + r\ddot{\phi}_{c})\sin\chi + (\ddot{r} - r\dot{\phi}_{c}^{2})\cos\chi - 2r\omega_{3}\dot{\lambda}\cos\varphi_{c}\cos\varphi - r\dot{\lambda}^{2}\cos\varphi_{c}\cos\varphi,$$
(5.17)

- де *r* радіус-вектор, що визначає місцезнаходження рухомої системи в географічній системі координат;
 - φ_c широта в геоцентричній системі координат;

 - ω_3 кутова швидкість обертання Землі в інерціальній системі координат;
 - λ довгота місця;
 - *φ* географічна широта.

Запропоновану нову систему вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння [221] показано на рис. 5.5



Рис. 5.5. Система вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння

У блоці бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) 1.2 додатково розраховуються значення параметрів відхилення кутів D_1 , D_2 , Dскладових питомої сили тяжіння по трьох осях та формуються керуючі сигнали для гіростабілізованої платформи 4. В результаті гіростабілізована платформа 4 змінює свою просторову орієнтацію таким чином, щоб напрямок осі чутливості гіроскопічного гравіметра 5 збігався з напрямком місцевої вертикалі та, відповідно, з напрямком повного вектора прискорення сили тяжіння.

Отже, виконано компенсацію похибок, що спричинює відхилення осі чутливості гравіметра від положення вертикалі. При цьому, підвищилась точність вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння гравіметричною системою.

Запропоновано нову гравіметричну систему з високоточним виставленням осі чутливості гравіметра [14].

Вісь чутливості гравіметра відхиляється на деякий кут від напрямку

місцевої вертикалі (рис. 6.6). Оскільки, напрямок повного вектора прискорення сили тяжіння збігається з напрямком істинної вертикалі, то, внаслідок відхилення осі чутливості, гравіметр гравіметричної системи вимірює не істинне значення повного вектора прискорення сили тяжіння, а його проекцію на миттєве або змінне положення цієї осі чутливості.



Рис. 5.6. Відхилення осі чутливості гравіметра

Високоточне виставлення осі чутливості гравіметра 1 у тривимірному просторі забезпечується завдяки високоточному виставленню y тривимірному просторі положення площини, що відповідає поверхні корпусу гравіметра, на якій закріплені мітки 4 та світло відбиваючий елемент 7 (рис. 5.7). У цій же площині розташовано напрямок місцевої вертикалі. Це забезпечується орієнтацією тривимірному просторі попередньою В фотоелектричного автоколіматора 8.

За допомогою фотоелектричного автоколіматора 8 оцінюється відхилення цієї площини від положення, коли вона є перпендикулярною до оптичної осі фотоелектричного автоколіматора 8. Сигнал, пропорційний ступеню цього незбігу, надходить до другого входу цифрової ЕОМ 3, яка керує просторовим положенням платформи 2 так, щоб ліквідувати цей незбіг. У результаті забезпечується розташування осі чутливості гравіметра 1 у

вертикальній площині перпендикулярно до оптичної осі фотоелектричного автоколіматора 8. Однак, вісь чутливості гравіметра 1 розташована у цій вертикальній площині, але зазвичай відхиляється на деякий кут від напрямку місцевої вертикалі. Це відхилення визначають за допомогою мітки 4, відеокамери 5 та процесора 6 лінійної апроксимації мітки. Відеокамера 5 оптично пов'язана із нанесеною на корпус гравіметра 1 міткою 4 та реєструє відхилення даної мітки від напрямку місцевої вертикалі. Сигнал з відеокамери 5 надходить на вхід процесора 6 лінійної апроксимації відео зображення мітки. Після обробки, інформація з процесора 6 лінійної апроксимації відео зображення мітки надходить до першого входу цифрової ЕОМ 3, яка, в свою чергу, керує просторовим положенням платформи 2 таким чином, щоб ліквідувати незбіг мітки 4 з напрямком місцевої вертикалі.



Рис. 5.7. Гравіметрична система з високоточним виставленням осі чутливості гравіметра

Запропоновано новий спосіб виставки акселерометрів [16].

Три акселерометри 1x, 1y, 1z встановлюють на гіростабілізованій платформі 2 по трьох взаємно перпендикулярних осях. Гіростабілізовану платформу 2 встановлюють на обертальному пристрої 4 вимірювача кута з

кільцевим лазером та відеокамерою. Осі чутливості акселерометрів позначено на корпусах приладів «рисками» (рис. 5.8).



Рис. 5.8. Виставка акселерометрів по трьох взаємно перпендикулярних осях

Похибку α відхилень акселерометрів 1*x*, 1*y*, 1*z* від осей вимірюють за допомогою методу лазерної гоніометрії. Під час повороту обертального пристрою за допомогою автоколіматора визначають зовнішній кут φ між корпусами акселерометрів.

Акселерометри 1*x*, 1*y*, 1*z*, кути між якими вимірюються, гіростабілізована платформа 2 та кільцевий лазер 3, встановлено на обертальному пристрої 4, який обертається з постійною швидкістю ω за допомогою електродвигуна 5 (рис. 5.9).



Рис. 5.9. Схема виставки осей акселерометрів

Керування двигуном здійснюється за допомогою електропривода 6. Біля гіростабілізованої платформи 2 встановлено щілинний фотоелектричний автоколіматор 7, закріплений так, що його оптична вісь знаходиться перпендикулярно до граней корпусів акселерометрів. При обертанні акселерометрів 1x, 1y, 1z з обертовим пристроєм 4, від грані кожного корпусу акселерометра на виході автоколіматора 7, отримують електричні імпульси.

Необхідний сигнал селекції грані першого корпусу акселерометра 1*z*, отримують від блоку прив'язки 8. За цим сигналом блоком керування 9 виділяється імпульс автоколіматора від грані першого корпусу акселерометра 1*z*. Цим імпульсом вмикається лічильник 10, який підраховує

кількість періодів сигналу КЛ 3. Імпульс від грані наступного корпусу акселерометра 1*y*, отриманий на виході автоколіматора 7, вимикає лічильник 10, тим самим закінчуючи підрахунок кількості періодів сигналу КЛ 3, та вмикає лічильник 11, який починає підрахунок. Надходження імпульсу автоколіматора 7 від граней кожного наступного приладу вмикає один з лічильників і вимикає інший. Інформація, отримана з лічильників 10 і 11, через пристрій зв'язку 12 передається в ЕОМ 13, яка оброблює отримані данні та формує коефіцієнти для компенсації похибки *α*.

Похибку β відхилення «риски» на корпусі кожного акселерометра від горизонтального та вертикального положень вимірюють за допомогою відеокамери 14 з подальшою апроксимацією зображення (рис. 5.9).

За допомогою відеокамери 14 фіксують положення «рисок» на корпусах акселерометрів 1*x*, 1*y*, 1*z* і в ЕОМ визначають їх відхилення від напрямків осей *x*, *y*, *z*. Проводять процедуру лінійної апроксимації відео зображення «рисок» та визначають кути відхилення «рисок» на корпусах акселерометрів від осей *x*, *y*, *z* в інерціальному просторі. ЕОМ 13 оброблює отримані данні та формує коефіцієнти для компенсації похибки β .

Таким чином, виконано компенсацію похибок α та β виставки акселерометрів, що сприяє підвищенню точності визначення навігаційних параметрів.

5.4. Висновки до розділу 5

5.4.1. Розроблено новий метод дослідження похибок вимірювання кутів попередньої наземної навігаційних елементів IBC за допомогою нового автоматизованого вимірювача кута з кільцевим лазером, розроблені ЦКБ «Арсенал» разом з лабораторією вимірювальних перетворювачів НТУУ «КПІ» при участі автора.

5.4.2. Розроблено нову програму обробки результатів експериментів щодо дослідження похибок нового вимірювача кутів.

5.4.3. Експериментально досліджено систематичні та випадкові складові похибки вимірювання кутів нового вимірювача кута за новим методом. Отримано графічні залежності для систематичної та випадкової похибок вимірювання. Обґрунтовано, що систематична складова не перевищує 0,3", випадкова – 0,1".

Запропоновано нові [14–17] засоби та методи попередньої виставки навігаційних елементів IBC.

РОЗДІЛ 6

МЕТОДИ СТРУКТУРНОЇ ТА ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ІВС

У шостому розділі запропоновано на стадії проектування прецизійної ІВС для забезпечення необхідної точності визначення інформаційновимірювальних параметрів ІВС використовувати методи параметричної та структурної оптимізації.

Основний зміст запропонованих методів оптимізації ІВС полягає у визначенні таких параметрів досліджуваної ІВС, при яких значення показників точності параметрів системи будуть найкращими.

Методи оптимізації та різні окремі задачі оптимізації викладено у наукових працях Склярова И.Ф. [209], Цвиркуна А.Д. [212], Павлова А.А. [213], Саркисяна С.А. [214], Кузьмина И.В. [216], Грановського Ю.В. [217], Гуткина Л.С. [219], Гилла Ф. [218] та інших. Однак, у відомій літературі не запропоновано: який же з методів оптимізації використовувати для досягнення необхідної точності визначення інформаційно-вимірювальних параметрів інерціальної навігаційної системи РО на стадії її проектування. Не наведено конкретних прикладів використання методів оптимізації для визначення необхідних характеристик ІВС.

Детально розглянуто існуючі методи оптимізації:

- метод модифікованого прямого перебору;

- метод Гауса (метод по координатного спуска);

- метод градієнта.

Проведено процедуру визначення значень параметрів IBC заданої структури, використовуючи методи параметричної оптимізації:

- метод Хука-Дживса;

- метод Коші;

- метод Ньютона;

- метод квадратичної апроксимації.

Проведено порівняння методів, їх дослідження з побудовою відповідних графіків та таблиць.

Виявлено, що саме метод структурної та параметричної оптимізації забезпечує спрощені процедури пошуку, дозволяє скоротити обчислювальні витрати. Тобто є одним з найбільш ефективних методів структурної та параметричної оптимізації.

Запропоновано використовувати метод параметричної оптимізації параметрів СК IBC.

Розглянуто використання методів структурної та параметричної оптимізації на прикладі вирішення задачі оптимізації параметрів інерціальної навігаційної системи I-21.

Мета розділу: запропонувати один (найбільш ефективний) з методів оптимізації на стадії проектування прецизійної ІВС для досягнення необхідної точності визначення інформаційно-вимірювальних параметрів.

Задачі розділу: розглянути методи оптимізації i прямого модифікованого перебору, координатного градієнта, по спуску, параметричної оптимізації; порівняти їх і вибрати найбільш ефективний, приклад практичного використання запропонованих методів навести структурної та параметричної оптимізації.

Розвязання зазначених вище задач знайшло своє відображення у працях автора [3, 6, 10].

6.1. Методи прямого і модифікованого перебору

Задачі даного параграфа:

 – ознайомитись з методами пошуку екстремуму цільової функції, що базуються на використанні прямого перебору множини можливих рішень;

- навести алгоритми розв'язання задачі оптимізації для цільової функції двох змінних Q(X₁, X₂);
- оцінити властивості методів прямого перебору.

6.1.1. Основні теоретичні відомості

Постановка задачі оптимізації

Більшість задач, що розв'язується при синтезі та аналізі IBC (при автоматизованому проектуванні систем), формулюються як задачі оптимізації. Зміст цих задач полягає у визначенні таких параметрів досліджуваної системи, при яких значення показників точності системи будуть найкращими.

Формальна постановка задачі оптимізації ґрунтується на визначенні критерію *Q* (скалярної величини) як функції параметрів системи

$Q=Q(X_1, X_2, ..., X_N),$

де $(X_1, X_2,..., X_N)=X$ – внутрішні параметри системи, що розглядаються на даному етапі синтезу (чи аналізу) системи. Критерій Q в узагальненому вигляді характеризує точність досліджуваної системи в залежності від значень її внутрішніх параметрів таким чином, що найкращому рішенню відповідає екстремальне (мінімальне чи максимальне) значення критерію. Тому функцію Q(X) називають функцією цілі чи цільовою функцією.

Якщо на можливі значення параметрів при синтезі системи не накладається ніяких обмежень, то задача відноситься до класу задач безумовної оптимізації. Задачі цього класу формулюються такий чином: визначити значення аргументів функції Q(X):

$$X_1 = X_{1 \text{ opt}}, X_2 = X_{2 \text{ opt}}, ..., X_N = X_{N \text{ opt}}$$

такі, що

$$Q(X_{1opt}, X_{2opt}, ..., X_{Nopt}) = extr.$$

визначається Критерій 0 на основі математичної моделі досліджуваної системи. У більшості випадків він визначений неявно, оскільки як математична модель визначає зв'язок між внутрішніми і вихідними параметрами також у неявному виді. В силу цього для розв'язання оптимізаційних задач синтезу і аналізу систем слід застосовувати спеціальні Досліджуваний метод прямого перебору є найпростішим. методи. Дослідження його практичної реалізації дає змогу легше зрозуміти особливості i властивості більш складних метолів розв'язання оптимізаційних залач.

6.1.2. Опис методу прямого перебору

Усі методи рішення оптимізаційних задач синтезу і аналізу систем визначають рішення як процес пошуку оптимуму цільової функції. Для опису методів зручно використовувати геометричну модель. Тоді розвязання задачі зображують точкою в N-вимірному просторі параметрів, а цільову функцію – гіперповерхнею в N + 1-вимірному просторі.

Процес пошуку рішення здійснюється шляхом послідовного переміщення деякої точки X_{pob} (робочої точки) у просторі параметрів так, щоб кожне її нове положення відповідало наближенню до точки оптимуму, тобто до точки X_{onm} , у якій цільова функція досягає екстремуму.

Початкове положення робочої точки в задачі безумовної оптимізації можна вибрати довільно або з урахуванням апріорної інформації про властивості досліджуваної системи. Переміщення робочої точки в нове положення називають кроком пошуку. Для виконання кроку слід визначити напрямок переміщення і його величину. Для розв'язання цієї задачі на початку кожного кроку виконується дослідження поведінки цільової функції в околиці робочої точки. З цією метою обчислюється значення цільової функції в декількох точках простору параметрів, положення яких однозначно

визначається положенням робочої точки. Таким чином, розв'язання оптимізаційної задачі є багатокроковим процесом, кожен крок якого пов'язаний з виконанням таких дій (етапів):

 Пошук, який виконується з метою оцінки властивостей функції *Q* в околиці робочої точки.

2. Аналіз результатів пошуку. На цьому етапі виконується перевірка умови закінчення процесу пошуку. Умови закінчення пошуку формулюються по різному у кожному з методів, але усі вони еквівалентні умові: в заданій околиці робочої точки не існує точок, для яких значення функції Q більше (якщо екстремум є максимумом) чи менше (якщо екстремум є мінімумом), ніж $Q(X_{po\delta})$. Якщо умови закінчення пошуку не виконуються, то за результатами пошуку визначається напрямок і величина переміщення робочої точки в нове положення.

3. Переміщення робочої точки. Робоча точка одержує нові координати в просторі параметрів і цим завершується виконання кроку пошуку. Для нового положення робочої точки реалізуються перераховані етапи. Пошук продовжується доти, поки на деякому кроці не буде виконана умова його закінчення.

Розглянутий метод прямого перебору належить до методів нульового порядку, в яких для організації пошуку оптимуму використовується інформація лише про значення функції Q(X) у різних точках простору змінних.

Особливістю методу прямого перебору є те, що найбільш важливим етапом у процесі оптимізації є пошук нового положення робочої точки. Проведення пошуку у даному методі не вимагає визначення робочої точки у явному вигляді. Замість цього для виконання пошуку визначається прямокутна область, координати центру якої можна вважати координатами

робочої точки. Однак безпосередньо ці координати не використовуються в процесі пошуку.

Область простору змінних X_1 , X_2 , ..., X_N , у якій виконується пошук, називатимемо простором пошуку. Її положення визначається завдяки визначенню границь інтервалів, в межах яких можуть змінюватися значення координат точок, що належать області пошуку:

 $(X_{1\min}, X_{1\max}), (X_{2\min}, X_{2\max}), ..., (X_{N\min}, X_{N\max}).$

Пошук полягає у дослідженні деякої множини точок в області пошуку. Ця множина визначається кількістью відрізків N, на яку розбиваються інтервали зміни перемінних $(X_{i\min}, X_{i\max})$, i = 1, 2, ...N. Таке розбиття визначає вузли в області пошуку прямокутних грат. Ці вузли вибирають для обчислення значень цільової функції. Кількість вузлів грат Mвизначається виразом M = (N+1).

З цієї множини вибирають одну з точок, для якої цільова функція Q(X) має найбільше (найменше) значення серед усіх розглянутих точок області пошуку. Вибрану так точку позначатимемо T_{opt} :

$$T_{opt} = \left(X_{1opt}, X_{2opt}, ..., X_{Nopt}\right).$$

Ця точка є результатом пошуку, що досліджується. Відшуканням точки T_{opt} завершується пошук.

На етапі аналізу результатів пошуку визначається положення точки T_{opt} в області пошуку. Якщо точка T_{opt} міститься усередині області пошуку, то процес розв'язання оптимізаційної задачі завершується. При цьому точка T_{opt} є наближеним розв'язком задачі. Максимальна помилка у визначенні положення оптимуму визначається величиною кроку грат, заданих в області пошуку.

Якщо на етапі аналізу встановлено, що точка T_{opt} лежить на межі області пошуку, то це означає, що справжне положення оптимуму перебуває

за межами поточної області пошуку і пошук оптимуму слід продовжити, змістивши поточну область пошуку в нове положення. Розвязується ця задача на наступному етапі.

У даному методі на останньому етапі чергового кроку пошуку переміщується в нове положення не робоча точка, а область пошуку без зміни її розмірів. При цьому, нове положення області вибирають так, щоб поточна точка T_{opt} , визначена на даному кроці пошуку, у новому положенні області пошуку розташовувалася усередині області. Це дає змогу виключити зациклення процесу пошуку, яке може виникнути, коли точка T_{opt} є справжнім оптимумом і в новому положенні області пошуку вона також виявляється на межі цієї області.

При використанні даного методу на практиці часто визначають область пошуку настільки широкою, що вона містить точку справжнього оптимуму.

При цьому метод пошуку полягає лише у виконанні пошуку так, як це описано вище, без переміщення області пошуку. Тому далі детально описується алгоритм реалізації етапу пошуку, який у літературі часто і називають алгоритмом прямого перебору.

6.1.3. Алгоритм пошуку оптимуму для цільової функції двох змінних

Для з'ясування деталей методу пошуку докладно розглядається алгоритм пошуку для випадку, коли кількість аргументів цільової функції дорівнює двом. Нижче наведено розроблення цього алгоритму. На цій підсаві має бути отримане подання алгоритму у вигляді структурної схеми, в якій слід надати деталі даного алгоритму.

Алгоритм прямого перебору

(пошук мінімуму цільової функції)

0. Початок.

1. Визначають область пошуку шляхом задання її меж X_{1min} , X_{1max} , X_{2min} , X_{2max} . Для визначення ґраток, у вузлах яких обчислюють значення цільової функції, задають число N, що вказує кількість відрізків, на яку розбивають інтервали зміни аргументів X_1 і X_2 .

2. Значення оптимуму Q_{opt} задають таким, що дорівнює максимально великій кількості.

3. Визначають кроки граток по кожній змінній X_1 і X_2 .

4. Поточне значення координати X_1 задають таким, що дорівнює X_{1min} .

5. Поточне значення координати X_2 задають таким, що дорівнює X_{2min} .

6. Визначають $Q(X_1, X_2)$.

7. Якщо $Q(X_1, X_2) < Q_{opt}$, то значення Q_{opt} задають таким, що дорівнює $Q(X_1, X_2)$, а координати точки фіксують як поточне рішення: $X_{lopt} = X_1$; $X_{2opt} = X_2$.

8. Поточне значення змінної X_2 збільшують на величину ΔX_2 .

9. Якщо значення X_2 менше чи дорівнює значенню X_{2max} , то виконують п.6.

10. Поточне значення змінної X_1 збільшують на величину ΔX_1 .

11. Якщо значення X_1 менше чи дорівнює значенню X_{1max} , то виконують п.5.

12. Закінчення.

6.1.4. Опис методу модифікованого прямого перебору

Метод модифікованого прямого перебору дозволяє скоротити обчислювальні витрати на пошук оптимуму при збереженні загальної ідеї прямого перебору. Витрати на пошук скорочуються завдяки тому, що пошук оптимуму здійснюється в два етапи.

На *першому етапі* шукають екстремум так само, як і в методі прямого перебору, але з тією відмінністю, що значення кроку грат вибирають максимально великими. У результаті положення точки екстремуму визначають з мінімальними витратами на пошук, але з великою похибкою.

На *другому emani* уточнюють положення оптимуму так, щоб забезпечити необхідну точність розв'язання задачі оптимізації. Для цього використовують область пошуку, розташовану навколо приблизно знайденого положення оптимуму, розміри якої зменшуються відносно тієї, яка використовувалася на першому етапі. Отже, на другому етапі пошук ведеться в послідовно зменшуваних областях пошуку доти, доки не забезпечиться відшукання оптимуму з необхідною точністю.

6.1.5. Виконання досліджень

Методи дослвджуються на прикладі розв'язання задачі оптимізації цільової функції двох змінних Q(x₁, x₂), яка задана в явному вигляді. Форма подання цільової функції – поліном другого порядку:

 $Q(X_1, X_2) = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_1 X_2 + A_4 X_1 X_1 + A_5 X_2 X_2.$

Конкретний вигляд цільової функції визначають за допомогою значень коефіцієнтів полінома A₀-A₅.

Для дослідження методу пошуку екстремуму слід зробити такі кроки:

1. Ознайомитися з методом прямого перебору. Використовуючи програму, розвязати задачу при таких початкових даних:

- усі коефіцієнти полінома A₀-A₅ дорівнюють 1;

– границі області пошуку $X_{lmin} = 0, X_{lmax} = 1, X_{2min} = 0, X_{2max} = 1;$

- величина *N* дорівнює 3, а відносна похибка – 0,5;

- тип екстремуму - мінімум.

Для цих даних необхідно побудувати траєкторію пошуку як послідовність областей пошуку, що змінюються в процесі пошуку.

2. Дослідити ефективність розв'язання задачі методом прямого перебору. Ефективність досліджується на прикладі конкретної функції.

Для заданої функції проведемо пошук розв'язку при різних значеннях *N*. Побудуємо графік залежності витрат на пошук *S* від величини *N*. Визначаємо з графіка оптимальне значення *N* і відповідні цьому значенню витрати на пошук.

При виконанні досліджень використовуємо програму пошуку екстремуму цільової функції методом модифікованого прямого перебору (додаток В).

Таблиця 6.1

№ дос- ліду	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Вигляд екст- рему- му	X_{1min}	X_{1max}	X_{2min}	X_{2max}	N	Відносна похибка
1	1	1	1	1	1	1	min	0	1	0	1	3	0,5
2	0,1	0,2	3,0	0,1	0,1	1,5	min	0	1	0	1	3	0,5
3	0,1	0,2	3,0	0,1	0,1	1,5	min	0	1	0	1	3	1 Збільшення відносної похибки не впливає
4	0,1	0,2	3,0	0,1	0,1	1,5	min	0	1	0	1	5	0,5 Збільшення N впливає на збільшення точок на графіку
5	0,5	1,0	2,2	0,5	0,3	1,3	min	1	2	0	1	3	0,5

Початкові дані для дослідження

Дослідження N1

Оптимізація цільової функції системи методом модифікованого прямого перебору

Визначити функцію Q(X1 ,X2), задав коефіцієнти A0-A5 поліному Y=A0+A1*X1+A2*X2+A3*X1*X2+A4*X1^2+A5*X2^2 A0=1 A1=1 A2=1 A3=1 A4=1 A5=1 Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координаті X1: EpsX

1=0.5

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координат? X2: EpsX

2=0.5

Визначте простір пошуку оптимуму функції Q(X1,X2), задано

Границі інтервалів зміни аргументів функції:

X1min=0

X1max=1

X2min=0

X2max = 1

Вкажіть кількість відрізків N, на яке розбиваються інтервали

Зміна аргументів X1 и X2: N= 3

Крок решітки по координаті X1: DeltaX1=0.3333

Крок решітки по координаті X2: DeltaX2=0.3333

Вкажіть вид екстремуму (Max - 0/ Min -1):1

В поточній області пошуку отриманого роз`язка: X1opt=0.0000 X2opt=0.0000 Qopt=1.0000; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 16

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-0.6667 X1max:0.3333 X2min:-0.6667 X2max:0.3333 В поточній області пошуку отриманого роз'язка:

X1opt=-0.3333 X2opt=-0.3333 Qopt=0.6667; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 32

Аналіз отриманого розв`язку

Екстемум функції Q(x1,x2) лежить в середині області пошуку

Абсолютна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt не перевищує величину 0.3333 и для X2opt не перевищує величину 0.3333

Відносна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt складає величину 1.0000 и для X2opt складає величину 1.0000 Область пошуку ЗМЕНШЕНА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-0.6667 X2max:0.0000 X2min:-0.6667 X2max:0.0000

Новий крок решітки по координаті X1: DeltaX1 =0.2222

Новий крок решітки по координаті X2: DeltaX2 =0.2222

В поточній області пошуку отриманого роз`язка: X1opt=-0.3333 X2opt=-0.3333 Qopt=0.6667; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 48

Аналіз отриманого розв`язку

Екстемум функції Q(x1,x2) лежить в середині області пошуку

Абсолютна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt не перевищує величину 0.2222 и для X2opt не перевищує величину 0.2222 Відносна помилка визначення координат точки екстремуму Для X1opt складає величину 0.6667 и для X2opt складає величину 0.6667 Область пошуку ЗМЕНШЕНА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-0.5556 X2max:-0.1111 X2min:-0.5556 X2max:-0.1111 Новий крок решітки по координаті X1: DeltaX1 =0.1481 Новий крок решітки по координаті X2: DeltaX2 =0.1481

В поточній області пошуку отриманого роз`язка: X1opt=-0.3333 X2opt=-0.3333 Qopt=0.6667; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 64

Аналіз отриманого розв`язку

Екстемум функції Q(x1,x2) лежить в середині області пошуку

Абсолютна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt не перевищує величину 0.1481 и для X2opt не перевищує величину 0.1481

Відносна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt складає величину 0.4444 и для X2opt складає величину 0.4444

Рішення задачі отримано

Точний розв`язок, отриманий аналітично:

X1opt:-0.3333 X2opt:-0.3333 Qopt: 0.6667;

Вкажіть номер точки, починаючи з якої ви хочете Вивести результати пошуку: Number=2 Вкажіть кількість точок(<=46), для яких ви хочете Вивести результати пошуку: Steps=20

Таблиця 6.2

Результати дослідження 1

N	V1	V2	0	N	V1	v2	0
кроку		A2	Q	кроку			Q
1	0,000	1,000	0,000	33	-0,667	-0,667	1,000
2	0,000	1,444	0,333	34	-0,667	-0,444	0,827
3	0,000	2,111	0,667	35	-0,667	-0,222	0,753
4	0,000	3,000	1,000	36	-0,667	0,000	0,778
5	0,333	1,444	0,000	37	-0,444	-0,667	0,827
6	0,333	2,000	0,333	38	-0,444	-0,444	0,704
7	0,333	2,778	0,667	39	-0,444	-0,222	0,679
8	0,333	3,778	1,000	40	-0,444	0,000	0,753
9	0,667	0,000	2,111	41	-0,222	-0,667	0,753
10	0,667	0,333	2,778	42	-0,222	-0,444	0,679
11	0,667	0,667	3,667	43	-0,222	-0,222	0,704
12	0,667	1,000	4,778	44	-0,222	0,000	0,827
13	1,000	0,000	3,000	45	0,000	-0,667	0,778
14	1,000	0,333	3,778	46	0,000	-0,444	0,753
15	1,000	0,667	4,778	47	0,000	-0,222	0,827
16	1,000	1,000	6,000	48	0,000	0,000	1,000
17	-0,667	-0,667	1,000	49	-0,556	-0,556	0,815
18	-0,667	-0,333	0,778	50	-0,556	-0,407	0,738
19	-0,667	0,000	0,778	51	-0,556	-0,259	0,705
20	-0,667	0,333	1,000	52	-0,556	-0,111	0,716
21	-0,333	-0,667	0,778	53	-0,407	-0,556	0,738
22	-0,333	-0,333	0,667	54	-0,407	-0,407	0,683
23	-0,333	0,000	0,778	55	-0,407	-0,259	0,672
24	-0,333	0,333	1,111	56	-0,407	-0,111	0,705

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
25	0,000	-0,667	0,778	57	-0,259	-0,556	0,705
26	0,000	-0,333	0,778	58	-0,259	-0,407	0,672
27	0,000	0,000	1,000	59	-0,259	-0,259	0,683
28	0,000	0,333	1,444	60	-0,259	-0,111	0,738
29	0,333	-0,667	1,000	61	-0,111	-0,556	0,716
30	0,333	-0,333	1,111	62	-0,111	-0,407	0,705
31	0,333	0,000	1,444	63	-0,111	-0,259	0,738
32	0,333	0,333	2,000	64	-0,111	-0,111	0,815



Рис. 6.1. Результати дослідження 1: вздовж горизонталі – номер кроку; вздовж вертикалі: ▲ - Q; ◆ - X1; ■ - X2

Дослідження N2

Оптимізація цільової функції системи методом модифікованого прямого

перебору

Визначити функцію Q(X1,X2), задав коефіцієнти А0-А5 поліному

Y=A0+A1*X1+A2*X2+A3*X1*X2+A4*X1 ^2+A5*X2^2

A0=0.1

A1=0.2

A2=3

A3=0.1

A4=0.1

A5=1.5

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координаті X1: EpsX

1=0.5

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координат? X2: EpsX

2=0.5

Визначте простір пошуку оптимуму функції Q(X1,X2), задано

Границі інтервалів зміни аргументів функції:

X1 min=0

X1max=1

X2min=0

X2max = 1

Вкажіть кількість відрізків N, на яке розбиваються інтервали

Зміна аргументів X1 и X2: N= 3

Крок решітки по координаті X1: DeltaX1=0.3333

Крок решітки по координаті X2: DeltaX2=0.3333

Вкажіть вид екстремуму (Max - 0/ Min -1):1

В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=0.0000 X2opt=0.0000 Qopt=0.1000; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 16

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-0.6667 X1max:0.3333 X2min:-0.6667 X2max:0.3333

В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=-0.6667 X2opt=-0.6667 Qopt=-1.2778; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 32

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-1.3333 X1max:-0.3333 X2min:-1.3333 X2max:-0.3333

В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=-0.6667 X2opt=-1.0000 Qopt=-1.4222; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 48

Аналіз отриманого розв`язку

Екстемум функції Q(x1,x2) лежить в середині області пошуку

Абсолютна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt не перевищує величину 0.3333 и для X2opt не перевищує величину 0.3333

Відносна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt складає величину 0.5000 и для X2opt складає величину 0.3333

Рішення задачі отримано!

Точний розв'язок, отриманий аналітично:

X1opt=-0.5085; X2opt=-0.9831; Qopt=-1.4254;

Вкажіть номер точки, починаючи з якої ви хочете вивести результати пошуку: Number=0 Вкажіть кількість точок(<=46), для яких ви хочете вивести результати пошуку: Steps=46

Таблиця 6.3

N	X1	X2	Q	N	X1	X2	Q
кроку				кроку			
0	0,100	0,100	1,500	25	0,000	-0,667	-1,233
1	0,000	0,000	0,100	26	0,000	-0,333	-0,733
2	0,000	0,333	1,267	27	0,000	0,000	0,100
3	0,000	0,667	2,767	28	0,000	0,333	1,267
4	0,000	1,000	4,600	29	0,333	-0,667	-1,178
5	0,333	0,000	0,178	30	0,333	-0,333	-0,667
6	0,333	0,333	1,356	31	0,333	0,000	0,178
7	0,333	0,667	2,867	32	0,333	0,333	1,356
8	0,333	1,000	4,711	33	-1,333	-1,333	-1,144
9	0,667	0,000	0,278	34	-1,333	-1,000	-1,356

Результати дослідження 2

10	0,667	0,333	1,467	35	-1,333	-0,667	-1,233
11	0,667	0,667	2,989	36	-1,333	-0,333	-0,778
12	0,667	1,000	4,844	37	-1,000	-1,333	-1,200
13	1,000	0,000	0,400	38	-1,000	-1,000	-1,400
14	1,000	0,333	1,600	39	-1,000	-0,667	-1,267
15	1,000	0,667	3,133	40	-1,000	-0,333	-0,800
16	1,000	1,000	5,000	41	-0,667	-1,333	-1,233
17	-0,667	-0,667	-1,278	42	-0,667	-1,000	-1,422
18	-0,667	-0,333	-0,800	43	-0,667	-0,667	-1,278
19	-0,667	0,000	0,011	44	-0,667	-0,333	-0,800
20	-0,667	0,333	1,156	45	-0,333	-1,333	-1,244
21	-0,333	-0,667	-1,267	46	-0,333	-1,000	-1,422
22	-0,333	-0,333	-0,778	47	-0,333	-0,667	-1,267
23	-0,333	0,000	0,044	48	-0,333	-0,333	-0,778
24	-0,333	0,333	1,200				



Рис. 6.2. Результати дослідження 2: вздовж горизонталі – номер кроку;

вздовж вертикалі: ▲ - Q; ◆ - Х1; ■ - Х2

Дослідження N3

Оптимізація цільової функції системи методом модифікованого прямого

перебору

Визначити функцію Q(X1 ,X2), задав коефіцієнти А0-А5 поліному

Y=A0+A1*X1+A2*X2+A3*X1*X2+A4*X1 ^2+A5*X2^2

A0=0.1

A1=0.2

A2=3

A3=0.1

A4=0.1

A5=1.5

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координаті X1: EpsX

1= 1

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координат? X2: EpsX

2=1

Визначте простір пошуку оптимуму функції Q(X1,X2), задано

Границі інтервалів зміни аргументів функції:

X1 min=0

X1max=1

X2min=0

X2max = 1

Вкажіть кількість відрізків N, на яке розбиваються інтервали

Зміна аргументів X1 и X2: N= 3

Крок решітки по координаті X1: DeltaX1=0.3333

Крок решітки по координаті X2: DeltaX2=0.3333 Вкажіть вид екстремуму (Max - 0/ Min -1):1

В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=0.0000 X2opt=0.0000 Qopt=0.1000; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 16

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-0.6667 X1max:0.3333 X2min:-0.6667 X2max:0.3333

В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=-0.6667 X2opt=-0.6667 Qopt=-1.2778; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 32

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-1.3333 X1max:-0.3333 X2min:-1.3333 X2max:-0.3333 В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=-0.6667 X2opt=-1.0000 Qopt=-1.4222; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 48

Аналіз отриманого розв`язку

Екстемум функції Q(x1,x2) лежить в середині області пошуку

Абсолютна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt не перевищує величину 0.3333 и для X2opt не перевищує величину 0.3333

Відносна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1орt складає величину 0.5000 и для X2орt складає величину 0.3333

Рішення задачі отримано!

Точний розв`язок, отриманий аналітично:

X1opt=-0.5085; X2opt=-0.9831; Qopt=-1.4254;

Таблиця 6.4

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
0	0,100	0,100	1,500	25	0,000	-0,667	-1,233
1	0,000	0,000	0,100	26	0,000	-0,333	-0,733
2	0,000	0,333	1,267	27	0,000	0,000	0,100
3	0,000	0,667	2,767	28	0,000	0,333	1,267
4	0,000	1,000	4,600	29	0,333	-0,667	-1,178
5	0,333	0,000	0,178	30	0,333	-0,333	-0,667
6	0,333	0,333	1,356	31	0,333	0,000	0,178
7	0,333	0,667	2,867	32	0,333	0,333	1,356
8	0,333	1,000	4,711	33	-1,333	-1,333	-1,144
9	0,667	0,000	0,278	34	-1,333	-1,000	-1,356
10	0,667	0,333	1,467	35	-1,333	-0,667	-1,233
11	0,667	0,667	2,989	36	-1,333	-0,333	-0,778
12	0,667	1,000	4,844	37	-1,000	-1,333	-1,200
13	1,000	0,000	0,400	38	-1,000	-1,000	-1,400
14	1,000	0,333	1,600	39	-1,000	-0,667	-1,267

Результати дослідження 3

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
15	1,000	0,667	3,133	40	-1,000	-0,333	-0,800
16	1,000	1,000	5,000	41	-0,667	-1,333	-1,233
17	-0,667	-0,667	-1,278	42	-0,667	-1,000	-1,422
18	-0,667	-0,333	-0,800	43	-0,667	-0,667	-1,278
19	-0,667	0,000	0,011	44	-0,667	-0,333	-0,800
20	-0,667	0,333	1,156	45	-0,333	-1,333	-1,244
21	-0,333	-0,667	-1,267	46	-0,333	-1,000	-1,422
22	-0,333	-0,333	-0,778	47	-0,333	-0,667	-1,267
23	-0,333	0,000	0,044	48	-0,333	-0,333	-0,778
24	-0,333	0,333	1,200				



Рис. 6.3. Результати дослідження 3: вздовж горизонталі – номер кроку; вздовж вертикалі: ▲ - Q; ◆ - X1; ■ - X2

Дослідження N4

Оптимізація цільової функції системи методом модифікованого прямого

перебору

Визначити функцію Q(X1,X2), задав коефіцієнти А0-А5 поліному

Y=A0+A1*X1+A2*X2+A3*X1*X2+A4*X1 ^2+A5*X2^2

A0=0.1

A1=0.2

A2=3

A3=0.1

A4=0.1

A5=1.5

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координаті X1: EpsX

1=0.5

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координат? X2: EpsX

2=0.5

Визначте простір пошуку оптимуму функції Q(X1,X2), задано

Границі інтервалів зміни аргументів функції:

X1min=0

X1max = 1

X2min=0

X2max = 1

Вкажіть кількість відрізків N, на яке розбиваються інтервали

Зміна аргументів X1 и X2: N= 5

Крок решітки по координаті X1: DeltaX1=0.2000

Крок решітки по координаті X2: DeltaX2=0.2000
Вкажіть вид екстремуму (Max - 0/ Min -1):1

В поточній області пошуку отриманого роз`язка: X1opt=0.0000 X2opt=0.0000 Qopt=0.1000; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 36

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-0.8000 X1max:0.2000 X2min:-0.8000 X2max:0.2000

В поточній області пошуку отриманого роз'язка: X1opt=-0.6000 X2opt=-0.8000 Qopt=-1.3760; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 72

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-0.8000 X1max:0.2000 X2min:-1.6000 X2max:-0.6000 В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=-0.6000 X2opt=-1.0000 Qopt=-1.4240; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 108

Аналіз отриманого розв`язку Екстемум функції Q(x1,x2) лежить в середині області пошуку Абсолютна помилка визначення координат точки екстремуму Для X1opt не перевищує величину 0.2000 и для X2opt не перевищує величину 0.2000

Відносна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1орt складає величину 0.3333 и для X2орt складає величину 0.2000

Рішення задачі отримано!

Точний розв`язок, отриманий аналітично:

X1opt=-0.5085; X2opt=-0.9831; Qopt=-1.4254;

Таблиця 6.5

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
0	0,100	0,100	1,500	24	0,600	1,000	4,816
1	0,000	0,000	0,100	25	0,800	0,000	0,324
2	0,000	0,200	0,760	26	0,800	0,200	1,000
3	0,000	0,400	1,540	27	0,800	0,400	1,796
4	0,000	0,600	2,440	28	0,800	0,600	2,712
5	0,000	0,800	3,460	29	0,800	0,800	3,748
6	0,000	1,000	4,600	30	0,800	1,000	4,904
7	0,200	0,000	0,144	31	1,000	0,000	0,400
8	0,200	0,200	0,808	32	1,000	0,200	1,080
9	0,200	0,400	1,592	33	1,000	0,400	1,880
10	0,200	0,600	2,496	34	1,000	0,600	2,800
11	0,200	0,800	3,520	35	1,000	0,800	3,840
12	0,200	1,000	4,664	36	1,000	1,000	5,000
13	0,400	0,000	0,196	37	-0,800	-0,800	-1,372
14	0,400	0,200	0,864	38	-0,800	-0,600	-1,208
15	0,400	0,400	1,652	39	-0,800	-0,400	-0,924

Результати дослідження 4

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
16	0,400	0,600	2,560	40	-0,800	-0,200	-0,520
17	0,400	0,800	3,588	41	-0,800	-0,000	0,004
18	0,400	1,000	4,736	42	-0,800	0,200	0,648
19	0,600	0,000	0,256	43	-0,600	-0,800	-1,376
20	0,600	0,200	0,928	44	-0,600	-0,600	-1,208
21	0,600	0,400	1,720	45	-0,600	-0,400	-0,920
22	0,600	0,600	2,632	46	-0,600	-0,200	-0,512
23	0,600	0,800	3,664	47	-0,600	-0,000	0,016
48	-0,600	0,200	0,664	74	-0,800	-1,400	-1,144
49	-0,400	-0,800	-1,372	75	-0,800	-1,200	-1,340
50	-0,400	-0,600	-1,200	76	-0,800	-1,000	-1,416
51	-0,400	-0,400	-0,908	77	-0,800	-0,800	-1,372
52	-0,400	-0,200	-0,496	78	-0,800	-0,600	-1,208
53	-0,400	-0,000	0,036	79	-0,600	-1,600	-0,848
54	-0,400	0,200	0,688	80	-0,600	-1,400	-1,160
55	-0,200	-0,800	-1,360	81	-0,600	-1,200	-1,352
56	-0,200	-0,600	-1,184	82	-0,600	-1,000	-1,424
57	-0,200	-0,400	-0,888	83	-0,600	-0,800	-1,376
58	-0,200	-0,200	-0,472	84	-0,600	-0,600	-1,208
59	-0,200	-0,000	0,064	85	-0,400	-1,600	-0,860
60	-0,200	0,200	0,720	86	-0,400	-1,400	-1,168
61	-0,000	-0,800	-1,340	87	-0,400	-1,200	-1,356
62	-0,000	-0,600	-1,160	88	-0,400	-1,000	-1,424
63	-0,000	-0,400	-0,860	89	-0,400	-0,800	-1,372
64	-0,000	-0,200	-0,440	90	-0,400	-0,600	-1,200
65	-0,000	-0,000	0,100	91	-0,200	-1,600	-0,864

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
66	-0,000	0,200	0,760	92	-0,200	-1,400	-1,168
67	0,200	-0,800	-1,312	93	-0,200	-1,200	-1,352
68	0,200	-0,600	-1,128	94	-0,200	-1,000	-1,416
69	0,200	-0,400	-0,824	95	-0,200	-0,800	-1,360
70	0,200	-0,200	-0,400	96	-0,200	-0,600	-1,184
71	0,200	-0,000	0,144	97	-0,000	-1,600	-0,860
72	0,200	0,200	0,808	98	-0,000	-1,400	-1,160
73	-0,800	-1,600	-0,828	99	-0,000	-1,200	-1,340
100	-0,000	-1,000	-1,400	110	0,000	0,000	0,000
101	-0,000	-0,800	-1,340	111	0,000	0,000	0,000
102	-0,000	-0,600	-1,160	112	0,000	0,000	0,000
103	0,200	-1,600	-0,848	113	0,000	0,000	0,000
104	0,200	-1,400	-1,144	114	0,000	0,000	0,000
105	0,200	-1,200	-1,320	115	0,000	0,000	0,000
106	0,200	-1,000	-1,376	116	0,000	0,000	0,000
107	0,200	-0,800	-1,312	117	0,000	0,000	0,000
108	0,200	-0,600	-1,128	118	0,000	0,000	0,000
109	0,000	0,000	0,000	119	0,000	0,000	0,000



Рис. 6.4. Результати дослідження 4: вздовж горизонталі – номер кроку; вздовж вертикалі: ▲ - Q; ◆ - X1; ■ - X2

Дослідження N5

Оптимізація цільової функції системи методом модифікованого прямого перебору

Визначити функцію Q(X1 ,X2), задав коефіцієнти A0-A5 поліному Y=A0+A1*X1+A2*X2+A3*X1*X2+A4*X1 ^2+A5*X2^2

A0=0.5

- A1=1
- A2=2.2
- A3=0.5
- A4=0.3
- A5=1.3

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координаті X1: EpsX

1 = 0.5

Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму по координат? X2: EpsX

2 = 0.5

Визначте простір пошуку оптимуму функції Q(X1,X2), задано

Границі інтервалів зміни аргументів функції:

X1min=1X1max=2

X2min=0

X2max = 1

Вкажіть кількість відрізків N, на яке розбиваються інтервали

Зміна аргументів X1 и X2: N= 3

Крок решітки по координаті X1: DeltaX1=0.3333

Крок решітки по координаті X2: DeltaX2=0.3333

Вкажіть вид екстремуму (Max - 0/ Min -1):1

В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=1.0000 X2opt=0.0000 Qopt=1.8000; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 16

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:0.3333 X1max:1.3333 X2min:-0.6667 X2max:0.3333

В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=0.3333 X2opt=-0.6667 Qopt=-0.1333;

Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 32

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-0.3333 X1max:0.6667 X2min:-1.3333 X2max:-0.3333 В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=-0.3333 X2opt=-0.6667 Qopt=-0.5778; Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 48

Аналіз отриманого розв`язку;

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошукуХ1min.

Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях:

X1min:-1.0000 X1max:0.0000

X2min:-1.3333 X2max:-0.3333

В поточній області пошуку отриманого роз'язку:

X1opt=-1.0000 X2opt=-0.6667 Qopt=-0.7556;

Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 64

Аналіз отриманого розв`язку

Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min. Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових границях: X1min:-1.6667 X1max:-0.6667 X2min:-1.3333 X2max:-0.3333

В поточній області пошуку отриманого роз`язку: X1opt=-1.0000 X2opt=-0.6667 Qopt=-0.7556;

Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q): 80

Аналіз отриманого розв`язку

Екстемум функції Q(x1,x2) лежить в середині області пошуку

Абсолютна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt не перевищує величину 0.3333 и для X2opt не перевищує величину 0.3333

Відносна помилка визначення координат точки екстремуму

Для X1opt складає величину 0.3333 и для X2opt складає величину 0.5000

Рішення задачі отримано!

Точний розв`язок, отриманий аналітично:

X1opt=-1.1450; X2opt=-0.6260; Qopt=-0.7611;

Таблиця 6.6

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
0	0,500	0,300	1,300	25	1,000	-0,667	0,578
1	1,000	0,000	1,800	26	1,000	-0,333	1,044
2	1,000	0,333	2,844	27	1,000	0,000	1,800
3	1,000	0,667	4,178	28	1,000	0,333	2,844
4	1,000	1,000	5,800	29	1,333	-0,667	1,033
5	1,333	0,000	2,367	30	1,333	-0,333	1,556
6	1,333	0,333	3,467	31	1,333	0,000	2,367
7	1,333	0,667	4,856	32	1,333	0,333	3,467
8	1,333	1,000	6,533	33	-0,333	-1,333	-0,200
9	1,667	0,000	3,000	34	-0,333	-1,000	-0,533
10	1,667	0,333	4,156	35	-0,333	-0,667	-0,578

Результати дослідження 5

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
11	1,667	0,667	5,600	36	-0,333	-0,333	-0,333
12	1,667	1,000	7,333	37	0,000	-1,333	-0,122
13	2,000	0,000	3,700	38	0,000	-1,000	-0,400
14	2,000	0,333	4,911	39	0,000	-0,667	-0,389
15	2,000	0,667	6,411	40	0,000	-0,333	-0,089
16	2,000	1,000	8,200	41	0,333	-1,333	0,022
17	0,333	-0,667	-0,133	42	0,333	-1,000	-0,200
18	0,333	-0,333	0,222	43	0,333	-0,667	-0,133
19	0,333	0,000	0,867	44	0,333	-0,333	0,222
20	0,333	0,333	1,800	45	0,667	-1,333	0,233
21	0,667	-0,667	0,189	46	0,667	-1,000	0,067
22	0,667	-0,333	0,600	47	0,667	-0,667	0,189
23	0,667	0,000	1,300	48	0,667	-0,333	0,600
24	0,667	0,333	2,289	49	-1,000	-1,333	-0,156
50	-1,000	-1,000	-0,600	66	-1,667	-1,000	-0,400
51	-1,000	-0,667	-0,756	67	-1,667	-0,667	-0,667
52	-1,000	-0,333	-0,622	68	-1,667	-0,333	-0,644
53	-0,667	-1,333	-0,211	69	-1,333	-1,333	-0,033
54	-0,667	-1,000	-0,600	70	-1,333	-1,000	-0,533
55	-0,667	-0,667	-0,700	71	-1,333	-0,667	-0,744
56	-0,667	-0,333	-0,511	72	-1,333	-0,333	-0,667
57	-0,333	-1,333	-0,200	73	-1,000	-1,333	-0,156
58	-0,333	-1,000	-0,533	74	-1,000	-1,000	-0,600
59	-0,333	-0,667	-0,578	75	-1,000	-0,667	-0,756
60	-0,333	-0,333	-0,333	76	-1,000	-0,333	-0,622
61	0,000	-1,333	-0,122	77	-0,667	-1,333	-0,211
62	0,000	-1,000	-0,400	78	-0,667	-1,000	-0,600

N кроку	X1	X2	Q	N кроку	X1	X2	Q
63	0,000	-0,667	-0,389	79	-0,667	-0,667	-0,700
64	0,000	-0,333	-0,089	80	-0,667	-0,333	-0,511
65	-1,667	-1,333	0,156				



Рис. 7.5. Результати дослідження 5: вздовж горизонталі – номер кроку; вздовж вертикалі: ▲ - Q; ◆ - X1; ■ - X2

6.2. Метод покоординатного спуску

Задачі даного параграфа:

- ознайомитися з методом Гауса для знаходження екстремуму цільової функції, який заснований на використанні ідеї покоординатного переміщення робочої точки;
- вивчити процес розв'язання оптимізаційної задачі для цільової функції двох змінних Q(X₁, X₂);
- при розв'язанні задачі одержати залежність обчислювальних витрат на пошук розв'язку від параметрів алгоритму пошуку;
- оцінити ефективність методу Гауса.

6.2.1. Основні теоретичні відомості

Метод Гауса (метод по координатного спуска) відноситься до методів нульового порядку, в яких для організації пошуку екстремуму використовується тільки значення функції Q(X) у різних точках простору змінних. Це забезпечує зменшення загальних обчислювальних витрат на пошук екстремуму. Також у методі Гауса максимально спрощені процедури пошуку і переміщення робочої точки.

Робоча точка в цьому методі переміщується вздовж заздалегідь фіксованих напрямків, що збігаються з напрямками координатних осей. Значення відстані (кроку), на яке переміщається робоча точка, також заздалегідь фіксується. Процедура пошуку зводиться лише до обчислення значення цільової функції в кожному новому положенні робочої точки. Аналіз результатів пошуку полягає в порівнянні значень цільової функції для двох сусідніх положень робочої точки. На основі цього порівняння приймається рішення про напрямок руху (ліворуч, праворуч, догори чи донизу) і про припинення руху вздовж обраного напрямку.

228

Для прискорення руху робочої точки в напрямку екстремуму значення кроку ΔX має вибиратися досить великим. Однак це означає, що знижується точність визначення положення екстремуму. Для досягнення необхідної точності використовується така ідея; після відшукання положення екстремуму (з великим кроком) значення кроку зменшується в N раз і пошук повторюється з новим зменшеним значенням кроку, але вже в околиці точки екстремуму. Після одержання нового точнішого розв'язку крок знову зменшується в N раз. Процес пошуку йде доти, поки значення кроку не зменшиться до величини Δ_{min} , яка забезпечує необхідну точність.

6.2.2. Порядок виконання досліджень

Метод досліджується на прикладі розв'язання задачі оптимізації цільової функції двох змінних $Q(X_1, X_2)$, яка задана в явному вигляді. Форма поння цільової функції – поліном другого порядку:

 $Q(X_1, X_2) = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_1X_2 + A_4X_1X_1 + A_5X_2X_2 .$

Конкретний вигляд цільової функції визначається значеннями коефіцієнтів полінома A₀-A₅.

6.3. Метод градієнта

Задачі даного параграфа:

- ознайомитися з методом знаходження екстремуму цільової функції, що оснований на використанні її градієнта;
- дослідити процес розв'язання оптимізаційної задачі для цільової функції двох змінних Q(X₁, X₂);
- одержати залежність обчислювальних витрат на пошук екстремуму від параметрів алгоритму пошуку;

 оцінити ефективність методу градієнта шляхом порівняння обчислювальних витрат на пошук розв'язання при використанні даного методу і методів з попередніх досліджень.

6.3.1. Основні теоретичні відомості

Метод градієнта є одним з найбільш ефективних методів оптимізації, оскільки вибір точок траєкторії пошуку екстремуму здійснюється по лінії градієнта, вздовж якої цільова функція *Q* найбільш швидко змінюється.

Для опису методу використовуватимемо геометричну модель, в якій розв'язання задачі є точкою в *N*-вимірному просторі параметрів, а цільова функція є гіперповерхнею в *N*+1-вимірному просторі.

Процес пошуку розв'язку здійснюється шляхом послідовного переміщення робочої точки X_{pob} у просторі параметрів так, щоб кожне її нове положення відповідало наближенню до точки екстремуму, тобто до точки X_{onm} , у якій цільова функція досягає екстремуму.

Початкове положення робочої точки в задачі безумовної оптимізації можна вибрати довільно чи з урахуванням апріорної інформації про властивості досліджуваної системи. Переміщення робочої точки в нове положення називають кроком пошуку. Для виконання кроку слід визначити напрямок переміщення і його значення. Для розв'язання цієї задачі на початку кожного кроку виконується дослідження поводження цільової функції в околі робочої точки. З цією метою обчислюється значення цільової функції в декількох точках простору параметрів, положення яких пов'язане з положенням робочої точки.

Отже, розв'язання оптимізаційної задачі є багатокроковим процесом, кожен крок якого полягає у виконанні таких дій:

230

1. *Пошук*, який виконується з метою оцінки властивостей функції *Q* в околі робочої точки.

2. Аналіз результатів пошуку. На цьому етапі перевіряються умови закінчення процесу пошуку, які формулюються по-різному у кожному з методів, але усі вони еквівалентні такій умові: у заданому околі робочої точки не існує точок, для яких значення функції Q більше (якщо екстремум є максимумом) чи менше (якщо екстремум є мінімумом), ніж $Q(X_{pob})$. Якщо умови закінчення пошуку не виконуються, то за результатами пошуку визначається напрямок і значення переміщення робочої точки в нове положення.

3. Переміщення робочої точки. Робоча точка одержує нові координати в просторі параметрів і цим завершується виконання кроку пошуку. Для нового положення робочої точки реалізуються зазначені вище етапи. Пошук продовжується доти, поки на деякому кроці не буде виконана умова його закінчення.

Розглянутий метод градієнта належить до методів першого порядку, в яких для організації пошуку екстремуму використовується не тільки значення функції Q(X) у різних точках простору параметрів, але і значення її часткових похідних у точці $X_{po\delta}$. Ці похідні характеризують швидкість зміни функції Q вздовж напрямів координатних осей. Напрямок найбільш швидкої зміни функції Q характеризується при цьому вектором, проекції якого на координатні осі дорівнюють значенням відповідних часткових похідних функції Q. Такий вектор відомий у математичному аналізі як вектор градієнта G(X).

Якщо позначити координати робочої точки на *i*-му кроці вектором *X_i*, то зміст розглянутого методу визначається виразом:

$$X_{i+1} = X_i + G(X_i),$$

де *X*_{*i*+1} – наступна *i*+1 точка траєкторії пошуку;

 $G(X_i)$ – вектор градієнта, обчислений у точці X_i .

Даний вираз визначає процедуру пошуку максимуму функції Q (робоча точка переміщається в просторі параметрів на величину вектора градієнта). При пошуку мінімуму функції переміщення робочої точки здійснюється в бік, протилежний напрямку градієнта функції, на величину антиградієнта (тобто вектора – $G(X_i)$).

На практиці переміщення робочої точки здійснюють не на всю довжину вектора $G(X_i)$, а лише на деяку її частину, обумовлену константою h, тобто:

$$X_{i+1} = X_i + hG(X_i)$$

Умовою закінчення пошуку в даному методі може бути близькість модуля градієнта до нуля, тобто:

$$|G(X_i)| \leq eps,$$

де eps – мала величина, значення якої визначає близькість точки траєкторії пошуку до екстремуму (у точці екстремуму $G(X_{onm})=0$). Значення eps вибирається в діапазоні 0,001...0,01.

6.3.2. Виконання досліджень

Метод досліджуються на прикладі розвязання задачі оптимізації цільової функції двох змінних $Q(X_1, X_2)$, яка задана в явному вигляді. Форма подання цільової функції - поліном другого порядку:

$$Q(X_i, X_2) = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_1X_2 + A_4X_1X_1 + A_5X_2X_2.$$

Конкретний вигляд цільової функції визначається значеннями коефіцієнтів полінома A₀ - A₅.

Для дослідження методу пошуку екстремуму необхідно виконати такі кроки:

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.

2. Розв'язати оптимізаційну задачу для цільової функції.

3. За допомогою програми (додаток Г) розв'язати задачу пошуку екстремуму заданої функції при різних значеннях *h*=0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.

4. Побудувати залежність обчислювальних витрат на пошук екстремуму від значення *h* і визначити оптимальне значення *h*.

5. Для одного з варіантів розв'язання задачі побудувати траєкторію пошуку екстремуму для перших 4..5 кроків пошуку.

У програмі при пошуку мінімуму цільової функції необхідно ввести значення керуючої змінної, що дорівнює –1.

Крім того, потрібно враховувати, що обчислення часткових похідних цільової функції обчислюються в програмі чисельно, тобто шляхом обчислення відношення збільшення цільової функції до збільшення відповідного аргументу. Величину збільшення аргументу ΔX слід вибирати в діапазоні 0,001...0,0001. Величину ерѕ, що визначає умову закінчення пошуку, – в діапазоні 0,01...0,001.

У процесі пошуку екстремуму при великих значеннях h можлива ситуація, коли на кожному кроці значення цільової функції зростає (при пошуку мінімуму) чи зменшується (при пошуку максимуму). У цьому разі говорять, що процес пошуку розходиться. Розвязання задачі при такому значенні h є неможливим. Для зупинки програми в такій ситуації необхідно двічі натиснути комбінацію клавіш Ctrl+Break.

233

Таблиця 6.7

№ дос- ліду	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A_4	A ₅	Вид екс тре муму	X ₁₀	X ₂₀	ΔΧ	h	eps	Результат
1	0,1	0,2	3,0	0,1	0,1	1,5	min	0	1	0,001	0,2	0,01	
											0,4		
											0,6		
											0,8		процес
											1,0		пошуку
													розходиться
2	0,1	0,2	3,0	0,1	0,1	1,5	min	0	1	0,001	0,2	0,001	
											0,4		
											0,6		
											0,8		процес
											1,0		пошуку
													розходиться
3	0,1	0,2	3,0	0,1	0,1	1,5	max	0	1	0,001	0,2	0,01	
											0,4		
											0,6		
											0,8		процес
											1,0		пошуку
													розходиться

Початкові дані для дослідження

Дослідження N 1

Оптимізація цільової функції системи градієнтним методом

Знайдіть функцію Q(X1,X2),задав коефіцієнти А0-А5 полінома

A0=0.1

A1=0.2

A2=3

A3=0.1

A4=0.1

A5=1.5

Вкажіть вид екстремуму (Max: +1/ Min: -1):-1

Задайте допустиме відхилення градієнта от 0 - Eps:0.01

Задайте величину зміщення точки по координатним осям при визначенні:

часткових похідних dQ(X1,X2)/dXi: DeltaX =0.001

Задайте початкові? координати робочої точки:

X10=0

X20=1

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.2

Робоча точка Р с номером 54 представляє рішення

X1=-0.460; X2=-0.985; Q(X1,X2)=-1.4252;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0099;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00197, для координати X2 --0.00007

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 165

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Таблиця 6.8

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2	ModG*h
0	0,000	1,000	4,600	0,300	6,002	1,202
1	-0,060	-0,200	-0,451	0,168	2,395	0,480
2	-0,094	-0,679	-1,257	0,113	0,954	0,192
3	-0,116	-0,870	-1,386	0,090	0,380	0,078
4	-0,134	-0,946	-1,408	0,079	0,150	0,034
5	-0,150	-0,976	-1,412	0,072	0,058	0,019
6	-0,165	-0,988	-1,414	0,068	0,022	0,014
7	-0,178	-0,992	-1,415	0,065	0,007	0,013
8	-0,191	-0,994	-1,416	0,062	0,002	0,013
9	-0,204	-0,994	-1,416	0,060	-0,001	0,012
10	-0,216	-0,994	-1,417	0,058	-0,001	0,012
11	-0,227	-0,993	-1,418	0,055	-0,002	0,011
12	-0,238	-0,993	-1,418	0,053	-0,002	0,011
13	-0,249	-0,993	-1,419	0,051	-0,002	0,010
14	-0,259	-0,992	-1,419	0,049	-0,002	0,010
15	-0,269	-0,992	-1,420	0,047	-0,002	0,009
16	-0,278	-0,992	-1,420	0,045	-0,002	0,009
17	-0,287	-0,991	-1,421	0,043	-0,002	0,009
18	-0,296	-0,991	-1,421	0,042	-0,001	0,008
19	-0,304	-0,991	-1,421	0,040	-0,001	0,008
20	-0,312	-0,991	-1,422	0,039	-0,001	0,008
21	-0,320	-0,990	-1,422	0,037	-0,001	0,007

Результати оптимізації (*h*=0,2)

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2	ModG*h
22	-0,328	-0,990	-1,422	0,036	-0,001	0,007
23	-0,335	-0,990	-1,422	0,034	-0,001	0,007
24	-0,342	-0,990	-1,423	0,033	-0,001	0,007
25	-0,348	-0,989	-1,423	0,032	-0,001	0,006
26	-0,354	-0,989	-1,423	0,030	-0,001	0,006
27	-0,360	-0,989	-1,423	0,029	-0,001	0,006
28	-0,366	-0,989	-1,423	0,028	-0,001	0,006
29	-0,372	-0,988	-1,424	0,027	-0,001	0,005
30	-0,377	-0,988	-1,424	0,026	-0,001	0,005
31	-0,382	-0,988	-1,424	0,025	-0,001	0,005
32	-0,387	-0,988	-1,424	0,024	-0,001	0,005
33	-0,392	-0,988	-1,424	0,023	-0,001	0,005
34	-0,397	-0,988	-1,424	0,022	-0,001	0,004
35	-0,401	-0,987	-1,424	0,021	-0,001	0,004
36	-0,405	-0,987	-1,424	0,020	-0,001	0,004
37	-0,409	-0,987	-1,424	0,020	-0,001	0,004
38	-0,413	-0,987	-1,425	0,019	-0,001	0,004
39	-0,417	-0,987	-1,425	0,018	-0,001	0,004
40	-0,421	-0,987	-1,425	0,017	-0,001	0,003
41	-0,424	-0,987	-1,425	0,017	-0,001	0,003
42	-0,427	-0,986	-1,425	0,016	-0,001	0,003
43	-0,431	-0,986	-1,425	0,015	-0,001	0,003
44	-0,434	-0,986	-1,425	0,015	-0,001	0,003
45	-0,437	-0,986	-1,425	0,014	-0,001	0,003
46	-0,440	-0,986	-1,425	0,014	-0,000	0,003
47	-0,442	-0,986	-1,425	0,013	-0,000	0,003
48	-0,445	-0,986	-1,425	0,013	-0,000	0,003

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2	ModG*h
49	-0,447	-0,986	-1,425	0,012	-0,000	0,002
50	-0,450	-0,986	-1,425	0,012	-0,000	0,002
51	-0,452	-0,986	-1,425	0,011	-0,000	0,002
52	-0,454	-0,985	-1,425	0,011	-0,000	0,002
53	-0,456	-0,985	-1,425	0,010	-0,000	0,002
54	-0,458	-0,985	-1,425	0,010	-0,000	0,002



Рис. 6.6. Результат оптимізації параметрів IBC (*h*=0,2): ◆ - X1; ■ - X2; ▲ - Q; x - dQx1; * - dQx2; • - ModG*h

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.4

Робоча точка Р с номером 27 представляє рішення

X1=-0.464; X2=-0.985; Q(X1,X2)=-1.4252;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0094;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00377, для координати X2 --0.00013

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 84

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Таблиця 6.9

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2=6.002	ModG*h
0	0,000	1,000	4,600	0,300	6,002	2,404
1	-0,120	-1,401	-1,165	0,036	-1,212	0,485
2	-0,134	-0,916	-1,402	0,082	0,241	0,102
3	-0,167	-1,012	-1,413	0,065	-0,051	0,033
4	-0,193	-0,991	-1,416	0,062	0,008	0,025
5	-0,218	-0,995	-1,417	0,057	-0,004	0,023
6	-0,241	-0,993	-1,418	0,053	-0,001	0,021
7	-0,262	-0,992	-1,419	0,048	-0,002	0,019
8	-0,281	-0,992	-1,420	0,045	-0,002	0,018
9	-0,299	-0,991	-1,421	0,041	-0,001	0,016
10	-0,316	-0,990	-1,422	0,038	-0,001	0,015
11	-0,331	-0,990	-1,422	0,035	-0,001	0,014
12	-0,345	-0,989	-1,423	0,032	-0,001	0,013

Результати оптимізації (*h*=0,4)

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2=6.002	ModG*h
13	-0,358	-0,989	-1,423	0,030	-0,001	0,012
14	-0,370	-0,989	-1,424	0,027	-0,001	0,011
15	-0,381	-0,988	-1,424	0,025	-0,001	0,010
16	-0,391	-0,988	-1,424	0,023	-0,001	0,009
17	-0,400	-0,987	-1,424	0,021	-0,001	0,009
18	-0,408	-0,987	-1,424	0,020	-0,001	0,008
19	-0,416	-0,987	-1,425	0,018	-0,001	0,007
20	-0,424	-0,987	-1,425	0,017	-0,001	0,007
21	-0,430	-0,986	-1,425	0,015	-0,001	0,006
22	-0,436	-0,986	-1,425	0,014	-0,001	0,006
23	-0,442	-0,986	-1,425	0,013	-0,000	0,005
24	-0,447	-0,986	-1,425	0,012	-0,000	0,005
25	-0,452	-0,986	-1,425	0,011	-0,000	0,004
26	-0,457	-0,985	-1,425	0,010	-0,000	0,004
27	-0,461	-0,985	-1,425	0,009	-0,000	0,004



Рис. 7.7. Результат оптимізації параметрів IBC (h=0,4): ◆ - X1; ■ - X2; ▲ - Q; x - dQx1; * - dQx2; • - ModG*h

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.6

Робоча точка Р с номером 30 представляє рішення

X1=-0.500; X2=-0.986; Q(X1,X2)=-1.4254;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0083;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00137, для координати X2 -0.00479

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 93

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Таблиця 6.10

Результати оптимізації (*h*=0,6)

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2=6,002	ModG*h
0	0,000	1,000	4,600	0,300	6,002	3,605
1	-0,180	-2,601	2,458	-0,096	-4,819	2,892
2	-0,122	0,291	1,072	0,205	3,861	2,320
3	-0,245	-2,026	0,186	-0,052	-3,101	1,861
4	-0,214	-0,165	-0,390	0,141	2,484	1,493
5	-0,299	-1,656	-0,756	-0,025	-1,996	1,197
6	-0,284	-0,458	-0,996	0,098	1,598	0,961
7	-0,342	-1,417	-1,147	-0,010	-1,284	0,771
8	-0,336	-0,647	-1,247	0,068	1,028	0,618
9	-0,377	-1,263	-1,309	-0,002	-0,827	0,496
10	-0,376	-0,768	-1,351	0,048	0,661	0,398
11	-0,405	-1,164	-1,377	0,003	-0,532	0,319
12	-0,407	-0,845	-1,394	0,034	0,425	0,256
13	-0,427	-1,100	-1,405	0,005	-0,342	0,205
14	-0,430	-0,895	-1,412	0,025	0,274	0,165
15	-0,445	-1,059	-1,417	0,005	-0,220	0,132
16	-0,448	-0,927	-1,420	0,018	0,176	0,106
17	-0,459	-1,033	-1,422	0,005	-0,142	0,085
18	-0,462	-0,947	-1,423	0,013	0,113	0,068
19	-0,469	-1,015	-1,424	0,005	-0,091	0,055
20	-0,472	-0,960	-1,424	0,010	0,073	0,044
21	-0,478	-1,004	-1,425	0,004	-0,059	0,035
22	-0,480	-0,969	-1,425	0,007	0,047	0,028
23	-0,485	-0,997	-1,425	0,003	-0,038	0,023
24	-0,487	-0,974	-1,425	0,005	0,030	0,018

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2=6,002	ModG*h
25	-0,490	-0,992	-1,425	0,003	-0,024	0,015
26	-0,492	-0,978	-1,425	0,004	0,019	0,012
27	-0,494	-0,989	-1,425	0,002	-0,016	0,010
28	-0,496	-0,980	-1,425	0,003	0,012	0,008
29	-0,497	-0,987	-1,425	0,002	-0,010	0,006
30	-0,498	-0,981	-1,425	0,002	0,008	0,005





Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.8

Робоча точка Р с номером 70 представляє рішення

X1=-102810011.350;

X2=8359647649.800;

Q(X1,X2)=104740674710000000000000;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0000;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00000, для координати X2 -0.00000

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 213

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Таблиця 6.11

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2	ModG*h
0	0.000	1.000	4.600	0.300	6.002	4.807
1	-0.240	-3.801	10.419	-0.228	-8.426	6.743
2	-0.058	2.940	21.854	0.483	11.815	9.460
3	-0.444	-6.512	44.396	-0.540	-16.579	13.270
4	-0.012	6.751	88.714	0.873	23.254	18.616
5	-0.710	-11.852	176.001	-1.127	-32.626	26.116
6	0.192	14.249	347.691	1.663	45.766	36.637
7	-1.139	-22.364	685.709	-2.264	-64.206	51.397
8	0.672	29.000	1350.744	3.235	90.069	72.102
9	-1.915	-43.055	2659.791	-4.488	-126.356	101.148
10	1.675	58.029	5235.629	6.338	177.257	141.896

Результати оптимізації (*h*=0,8)

процес пошуку розходиться

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:1

Робоча точка Р с номером 31 представляє рішення

X1=5447217.120;

X2=-7205724720.300;

Q(X1,X2)=77879780949000000000000;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0000;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00000, для координати X2 -0.00000

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 96

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Таблиця 6.12

Step	X1	X2	Q	dQx1	dQx2	ModG*h
0	0.000	1.000	4.600	0.300	6.002	6.009
1	-0.300	-5.002	22.717	-0.360	-12.033	12.038
2	0.060	7.032	95.412	0.915	24.102	24.119
3	-0.855	-17.071	387.354	-1.678	-48.296	48.325
4	0.823	31.225	1559.083	3.487	96.759	96.822
5	-2.664	-65.534	6263.173	-6.886	-193.867	193.989
6	4.222	128.333	25145.839	13.878	388.422	388.670
7	-9.656	-260.089	100947.878	-27.740	-778.232	778.726
8	18.084	518.142	405235.177	55.631	1559.237	1560.230

Результати оптимізації (*h*=1,0)

процес пошуку розходиться

Дослідження N 2

Оптимізація цільової функції системи градієнтним методом

Знайдіть функцію Q(X1,X2),задав коефіцієнти А0-А5 полінома

A0=0.1

A1=0.2

A2=3

A3=0.1

A4=0.1

A5=1.5

Вкажіть вид екстремуму (Max: +1/ Min: -1):-1

Задайте допустиме відхилення градієнта от 0 - Eps:0.001

Задайте величину зміщення точки по координатним осям при визначенні:

часткових похідних dQ(X1,X2)/dXi: DeltaX =0.001

Задайте початкові? координати робочої точки:

X10=0

X20=1

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.2

Робоча точка Р с номером 112 представляє рішення!

X1=-0.504; X2=-0.984; Q(X1,X2)=-1.4254;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0010;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00019, для координати X2 --0.00001

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 339

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Step: 0 X1= 0.000 X2= 1.000 Q= 4.600 dQx1= 0.300 dQx2= 6.002 ModG*h= 1.202

Step: 1 X1=-0.060 X2=-0.200 Q=-0.451 dQx1= 0.168 dQx2= 2.395 ModG*h= 0.480

. . .

Step:112 X1=-0.504 X2=-0.984 Q=-1.425 dQx1= 0.001 dQx2=-0.000 ModG*h= 0.000



Рис. 6.9. Результат оптимізації параметрів IBC (h=0,2): ◆ - X1; ■ - X2; ▲ - Q; x - dQx1; * - dQx2; • - ModG*h

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.4

Робоча точка Р с номером 55 представляє рішення

X1=-0.504; X2=-0.984; Q(X1,X2)=-1.4254;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0010; Максимальна можлива абсолютна похибка визначення Координат точки екстремуму цільової функції Q складає: Для координати X1 - 0.00038, для координати X2 --0.00001 Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 168

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Step: 0 X1= 0.000 X2= 1.000 Q= 4.600 dQx1= 0.300 dQx2= 6.002 ModG*h= 2.404 Step: 1 X1=-0.120 X2=-1.401 Q=-1.165 dQx1= 0.036 dQx2=-1.212 ModG*h= 0.485 ...

Step:55 X1=-0.504 X2=-0.984 Q=-1.425 dQx1= 0.001 dQx2=-0.000 ModG*h= 0.000



Рис. 6.10. Результат оптимізації параметрів IBC (h=0,4): ◆ - X1; ■ - X2; ▲ - Q; x - dQx1; * - dQx2; • - ModG*h

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.6

Робоча точка Р с номером 41 представляє рішення

X1=-0.506; X2=-0.983; Q(X1,X2)=-1.4254;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0009;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00029, для координати X2 --0.00044

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 126

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Step: 0 X1= 0.000 X2= 1.000 Q= 4.600 dQx1= 0.300 dQx2= 6.002 ModG*h= 3.605 Step: 1 X1=-0.180 X2=-2.601 Q= 2.458 dQx1=-0.096 dQx2=-4.819 ModG*h= 2.892

Step:41 X1=-0.506 X2=-0.984 Q=-1.425 dQx1= 0.000 dQx2=-0.001 ModG*h= 0.001



Рис. 6.11. Результат оптимізації параметрів IBC (h=0,6): ◆ - X1; ■ - X2; ▲ - Q; x - dQx1; * - dQx2; • - ModG*h

Дослідження N 3

Оптимізація цільової функції системи градієнтним методом

Знайдіть функцію Q(X1,X2),задав коефіцієнти А0-А5 полінома

A0=0.1

A1=0.2

A2=3

A3=0.1

A4=0.1

A5=1.5

Вкажіть вид екстремуму (Max: +1/ Min: -1):1

Задайте допустиме відхилення градієнта от 0 - Eps:0.01

Задайте величину зміщення точки по координатним осям при визначенні:

часткових похідних dQ(X1,X2)/dXi: DeltaX =0.001

Задайте початкові координати робочої точки:

X10=0

X20=1

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.2

Робоча точка Р с номером 44 представляє рішення

X1=30041833.320;

X2=3901907576.900;

Q(X1,X2)=22849136416000000000000;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0000;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00000, для координати X2 -0.00000

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 135

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.4

Робоча точка Р с номером 27 представляє рішення

X1=6044452.937;

X2=3691036564.700;

Q(X1,X2)=20437861077000000000.0000;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0000;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00000, для координати X2 -0.00000

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 84

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.6

Робоча точка Р с номером 21 представляє рішення

X1=365929388.920;

X2=11935958568.000;

Q(X1,X2)=214150822680000000000000;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0000;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00000, для координати X2 -0.00000

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 66

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Задайте коефіцієнт h, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:0.8

Робоча точка Р с номером 17 представляє рішення

X1=60792862.595;

X2=2283908599.500;

Q(X1,X2)=7838611854400000000.0000;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0000;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00000, для координати X2 -0.00000

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 54

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

Задайте коефіцієнт һ, що пов`язує переміщення з модулем градієнта:1

Робоча точка Р с номером 16 представляє рішення

X1=38059332.865;

X2=18877715233.000;

Q(X1,X2)=534624190890000000000000;

Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=0.0000;

Максимальна можлива абсолютна похибка визначення

Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:

Для координати X1 - 0.00000, для координати X2 -0.00000

Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q): 51

Точний розв`язок (аналітичний):X1opt:-0.5085 X2opt:-0.9831 Qopt:-1.4254;

6.4. Метод параметричної оптимізації

Задачі даного параграфа:

- ознайомитися з постановкою задачі параметричної оптимізації IBC;
- дослідити особливості основних методів параметричної оптимізації;
- розв'язати задачу параметричної оптимізації для конкретних чисельних прикладів;
- дослідити процес розв'язання оптимізаційної задачі для цільової функції двох змінних Q(X₁, X₂);

6.4.1. Основні теоретичні відомості

Постановка задачі параметричної оптимізації

Параметрична оптимізація – це процедура визначення значень характеристик складної технічної ситеми (СТС) заданої структури – інерціальної навігаційної системи, при яких досягається оптимальне значення критерію ефективності F(x). Характеристики СТС, які є незалежними одна від одної і змінюються в деяких межах, називаються керованими параметрами. Позначимо їх вектором $X=(x_1,x_2,...,x_n)$. Тоді критерій ефективності, що вказує відносну перевагу одного з варіантів вибору параметрів СТС відносно іншого, разом із списком керованих параметрів $x_1,x_2,...,x_n$ і описом припустимої області їх значень δ утворює математичну модель пошуку розв'язку для задачі параметричної оптимізації min K(x).

Залежно від кількості керованих параметрів, структури припустимої області δ і вигляду критерію ефективності F(x) задача параметричної оптимізації зводиться до різних класів математичних моделей прийняття розв'язків.

253
За відсутності обмежень на керовані параметри X задача параметричної оптимізації зводиться до пошуку безумовного мінімуму (максимуму) скалярної функції F(x), визначеної в N-вимірному просторі. Функцію F(x), визначену в N-вимірній області, називатимемо опуклою, якщо

$$F[\lambda X + (1 - \lambda)Y] \le \lambda F(x) + (1 - \lambda)F(Y)$$

для будь-яких X, $Y \in \delta$, $0 \le \lambda \le 1$.

Точку X * називатимемо локальним мінімумом F(x) на δ , якщо знайдено E > 0, таке, що $F(x) \ge F(x^*)$ для всіх X на Е-околі (тобто при $||X - X^*|| \le E$).

Необхідна умова першого порядку.

Вектор $\nabla F(x)$ з компонентами dF/dx_1 , dF/dx_2 ,..., dF/dx_n , називатимемо градієнтом функції F(x); Якщо Х* – точка мінімуму F(x) на δ і F(x) диференціюється в точці Х*, то градієнт $\nabla F(X^*) = 0$. Однак, якщо будь-яка точка є стаціонарною (тобто $\nabla F(X) = 0$), то вона не обов'язково є точкою мінімуму. Наприклад, вона може бути точкою максимуму чи седловою точкою. Для опуклих функцій така ситуація неможлива.

Достатня умова першого порядку.

Якщо F(x) – опукла функція, що диференціюється в точці X^* , і $\nabla F(X^*) = 0$, то X^* – точка мінімуму F(x), тобто для опуклих функцій необхідна умова екстремуму є також достатньою.

Необхідна умова другого порядку.

Якщо X^* – точка мінімуму F(x) в області δ і F(x) двічі диференціюєма в X^* , то матриця $\nabla^2 F(X) \ge 0$. Цю матрицю називають матрицею Гессе і позначають як $\nabla^2 F(X)$. Вона є симетричною матрицею розміром $N \times N$ і складається з елементів виду $\partial^2 F / \partial x_i \partial x_j$.

Достатня умова другого порядку.

Нехай у точці X * виконано необхідну умову першого порядку (тобто $\nabla F(X^*) = 0$) і функція F(x) двічі диференціюємо в цій точці, тобто $\nabla^2 F(X) \ge 0$. Тоді X^* – точка мінімуму.

Умови існування екстремуму є тією основою, на якій будуються методи розв'язання оптимізаційних задач. По-перше, у ряді випадків, умови екстремуму хоча і не дають можливості явно визначити розв'язати, але надають інформацію про його властивості. По-друге, доказ умов екстремуму часто вказує шлях побудови методів оптимізації. Наприклад, завдяки доведенню умови $\nabla F(X) = 0$ призводить до градієнтного методу оптимізації.

Метод Хука-Дживса (метод оптимізації нульового порядку)

У методах нульового порядку не використовуються значення перших чи других похідних. При пошуку точки екстремуму X^* використовують тільки значення функції F(x).

Суть модифікованого методу, розробленого Хуком і Дживсом, полягає в наступному. При визначенні нового напрямку пошуку враховується інформація, отримана на попередніх ітераціях, а саме: досліджується околиця базової точки і визначають напрямок, у якому відбувається зменшення функції F(x). У вибраному напрямку виконують спуск доти, поки значення функції зменшується. Якщо після повторного проведення дослідження маємо успіх, то отримана точка, в якій функція набуває мінімального значення, вважається новою базовою точкою і її шукають за зразком.

Алгоритм метода Хука-Дживса

1. Задати $X^{(0)}$ – початкове наближення до точки X^* ; E1 – точність пошуку екстремуму функції; n – кількість змінних; $\Delta X = (\Delta X_1, \Delta X_2, \dots \Delta X_n)$ – крок прирощення змінних.

2. Вважати k = 1, $X^{(k-1)}$ – початкова базова крапка.

3. Обчислити значення $F(X^{(k-1)})$.

4. Провести пошук, тобто циклічно змінити на величину ΔX ; кожну іту змінну. Якщо $F(X_i^{(k-1)} + \Delta X_i) < F(X^{(k-1)})$, то $X_i^k = X_i^{(k-1)} + \Delta X_i$. У протилежному випадку і-та змінна залишається з тим же значенням і розглядається наступна змінна. Після розгляду всіх змінних одержують наступну базову точку.

5. Якщо після закінчення пошуку $X^{(k-1)} + X^{(k)}$, то виконується пошук за зразком (перехід до пункту 6). У протилежному випадку переходять до п. 8.

6. Пошук за зразком. Пошук за зразком полягає в реалізації єдиного кроку з отриманої базової точки вздовж прямої, що з'єднує цю точку з попередньою базовою точкою. Нова точка зразка визначається за формулою $X_{p}^{(k+1)} = X^{(k)} + (X^{(k)} - X^{(k-1)}).$

7. Провести пошук, тобто повторити процедуру, описану в п.4. При цьому k = k + 1 і в якості тимчасової базової точки $X^{(k)}$ фіксується точка $x_p^{(k+1)}$. У випадку успіху пошуку з меншим значенням F(x) розглядається як нова базова точка $X^{(k+1)}$ і виконується перехід до п.6. У протилежному випадку необхідно виконати новий пошук, тобто перейти до п.4.

8. Якщо $\Delta X \leq E_1$, то $X^* = X^{(k)}$, $F(x^*) = F(x^{(k)})$ і закінчити пошук, а в протилежному випадку зменшити довжину кроку і перейти до п.4.

Метод Коші (метод оптимізації першого порядку)

У методах першого порядку під час пошуку екстремуму функції F(x) використовується як значення самої функції, так і значення її першої похідної.

Суть методу Коші

Ітераційний метод Коші (метод найшвидшого спуску) заснований на тому факті, що найшвидше зменшення значень функції F(x) досягається в напрямку, протилежному напрямку градієнта $\nabla F(x)$. Суть методу полягає в наступному. Після обчислення градієнта функції F(x) в точці $X^{(k)}$ виконується рух вздовж прямої, заданої вектором $(X^{(k)} - \alpha^{(k)} \nabla F(X^k))^T$ доти, поки не досягається мінімум функції F(x). Потім у точці $X^{(k+1)} = X^{(k)} - \alpha^{(k)} \nabla F(X^{(k)})$ знову обчислюється градієнт, і рух відбувається за напрямком антиградієнта і т.д., поки не буде досягнутий мінімум функції F(x) із заданою точністю або не буде перейдена межа припустимої області.

Особливість методу полягає в тому, що на кожній ітерації довжина кроку пошуку $\alpha^{(k)}$ обчислюється шляхом розв'язання задачі мінімізації $F(X^{(k+1)})$ вздовж напрямку - $\nabla F(x^{(k)})$. Слід особливо підкреслити, що ця задача розв'язується з використанням методів одновимірного пошуку екстремуму.

Алгоритм методу Коші

1. Задати $X^{(0)}$ – початкове наближення до екстремуму X^* ; M – максимальне (допустиме) число ітерацій; n – кількість змінних; E_1 - точність пошуку екстремуму функції F(x); E_2 – точність пошуку екстремуму функції F(x) при одномірному пошуку уздовж прямої. Вважати k=0.

2. Обчислити градієнт функції F(x) в точці $X^{(k)}$ по формулі

$$\nabla F(X^{(k)})^T = \left(\frac{\partial F}{\partial X_1} \middle| \frac{\partial F}{x = x^{(k)}}, \frac{\partial F}{\partial X_2} \middle| \frac{\partial F}{x = x^{(k)}}, \dots, \frac{\partial F}{\partial X_n} \middle| \frac{\partial F}{x = x^{(k)}}\right).$$

3. Якщо виконується нерівність $\|\nabla F(X^{(k)})\| \le E_1$, то вважати X*=X^(k), $F(X^*) = F(X^{(k)})$ і закінчити пошук мінімуму функції F(x).

4. Якщо $k \ge M$, то вважати X*=X^(k), F(X*)=F(X^(k)) і закінчити пошук мінімуму функції F(x).

5. Обчислити $\alpha^{(k)}$ на основі одновимірного пошуку вздовж прямої, використовуючи E_2 .

6. Вважати $X^{(k+1)} = X^{(k)} - \alpha^{(k)} \nabla F(X^{(k)}).$

7. Якщо $\left\|X^{k=1} - X^{(k)}\right\| / \|X^{(k)}\| \le E1$ і $\left\|X^{(k)}\right\| = \left[\sum X_x^2\right]^{1/2}$ – звичайна норма

в n-вимірному просторі, то вважати $X^{*=}X^{(k)}$, $F(X^{*})=F(X^{(k)})$ і закінчити пошук.

У протилежному випадку вважати *k*=*k*+1 і перейти до п.3.

Метод Ньютона (метод другого порядку)

Ітераційний метод пошуку екстремуму функції багатьох змінних F(x) названий методом Ньютона і заснований на використанні других похідних цієї функції.

Метод Ньютона реалізується за формулою

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \nabla^2 F(X^{(k)})^{-1} \nabla F(X^{(k)}),$$

де $\nabla^2 F(X^{(k)})$ - матриця Гессе.

Алгоритм методу Ньютона.

- 1. Задати X(0) початкове наближення до точки екстремуму X*.
- 2. Вважати *k*=0.
- 3. Обчислити $\nabla F(X^{(k)}), \nabla^2 F(X^{(k)})$ і $\nabla^2 F(X^{(k)})^{-1}$.

4. Обчислити $X^{(k+1)} = X^{(k)} - \nabla^2 F(X^{(k)})^{-1} \nabla F(X^{(k)})$. Якщо $\nabla F(X^{(k+1)}) = 0$, то вважати $X^* = X^{(k+1)}$ і закінчити пошук, у протилежному випадку вважати k = k+1 і перейти до кроку 3.

Використання методу квадратичної апроксимації для оптимізації функції однієї змінної

Розвазання ряду теоретичних і практичних задач синтезу і аналізу систем зводиться до пошуку екстремуму скалярної функції F(x) одного аргументу X. У цьому разі говоритимемо про пошук оптимального значення функції F(x) на деякому інтервалі [a, b] і математична модель прийняття

розв'язання в задачі параметричної оптимізації набуде вигляду $\min_{a \le x \le b} F(x)$. Для розв'язання цієї задачі часто використовуються методи поліноміальної апроксимації.

Основна ідея цих методів полягає в тому, що за інформацією про обчислення значення функції $F(X_i)$, $\overline{i=1,n}$ будується поліном $\varphi_m(x)$ ступеня $m \le n-1$ з такими властивостями:

- $\varphi_m(x)$ є рівномірним наближенням мінімізованої функції на інтервалі $[a_k, b_k];$

- точка мінімуму полінома визначається досить просто.

Необхідною умовою ефективної реалізації методів цього класу є унімодальність і безперервність функції F(x).

Вважатимемо, що в обмеженому інтервалі функцію F(x) можна апроксимувати квадратичним поліномом. Нехай задана послідовність точок X_1, X_2, X_3 і відомі значення функції в цих точках: $F(X_1)=F_1, F(X_2)=F_2,$ $F(X_3)=F_3$. Тоді можна визначити постійні коефіцієнти a_0, a_1, a_2 таким чином, що значення квадратичного полінома $\varphi(x)=a_0+a_1(x-x_1)+a_2(x-x_1)(x-x_2)$ збігаються із значеннями функції F(x) у цих трьох точках. Для цього обчислимо значення $\varphi(x)$ у цих трьох точках.

Так як $F_1 = F(X_1) = a_0$, то отримуємо $a_0 = F_1$.

Оскільки $F_2 = F(X_2) = \varphi(X_2) = F_1 + a_1(x_2 - x_1)$, то отримуємо $a_1 = (F_2 - F_1)/(X_2 - X_1)$.

При Х=Х3 маємо

$$F_3 = F(X_3) = \varphi(X_3) = F_1 + [(F_2 - F_1)/(X_2 - X_1)](X_3 - X_1) + a_2(X_3 - X_1)(X_3 - X_2),$$

або

$$a_{2} = \frac{1}{X_{3} - X_{2}} \left(\frac{F_{3} - F_{1}}{X_{3} - X_{1}} - \frac{F_{2} - F_{1}}{X_{2} - X_{1}} \right).$$

Якщо точність апроксимації функції F(x) в інтервалі $[x_1, x_2]$ квадратичним поліномом виявляється досить високою, то побудований поліном далі використовується для оцінювання координати точки екстремуму функції. Стаціонарні точки полінома визначають шляхом прирівнювання до нуля його першої похідної. Маємо

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = a_1 + a_2(x - x_2) + a(x - x_1) = 0.$$

Тоді для оцінювання координати точки екстремуму функції F(x) отримаємо формулу

$$\overline{X} = \frac{1}{2} (X_2 + X_1) - \frac{a_1}{2a_2}$$

Опис алгоритму методу послідовного оцінювання з використанням квадратичної апроксимації, розроблений Пауелом

1. Нехай F(x) – функція, оптимізується, X_1 – початкова точка, ΔX – значення кроку по осі абсцис. Обчислити $X_2=X_1+\Delta X$ і значення функцій $F(X_1)$ і $F(X_2)$.

2. Якщо $F(X_1) > F(X_2)$, то вважати $X_3 = X_1 + 2\Delta X$.

3. Якщо $F(X_1) < F(X_2)$, то вважати $X_3 = X_1 - \Delta X_0$

4. Обчислити $F(X_3)$. Визначити $F_{min}=min\{F(X_1),F(X_2),F(X_3)\}, X_{min}$ – точка, яка відповідає F_{min} .

5. По трьох точках X_1, X_2, X_3 обчислити \overline{X} .

6. Виконати перевірку на закінчення пошуку екстремуму. Якщо різниці F_{min} — $F(\overline{X})$ і X_{min} — \overline{X} є досить малими величинами, то закінчити пошук; інакше перейти до п.6.

7. Вибрати «найкращу» точку (X_{min} чи \overline{X}) та дві точки з обох сторін від неї. Позначити ці точки в відповідному порядку і перейти до п.3.

6.4.2. Приклад визначення екстремуму функції заданими методами

Задана функція $F(x) = 8x_1^2 + 4x_1x_2 + 5x_2^2$.

Оскільки функція задана аналітично, то можна визначити точне значення екстремуму функції. Для цього слід обчислити часткові похідні від цієї функції і прирівняти їх до нуля:

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 4x_2 + 16x_1 \text{ i } \frac{\partial f}{\partial x_2} = 4x_1 + 16x_2;$$

$$\begin{cases} 16x_1 + 4x_2 = 0, \\ 4x_1 + 10x_2 = 0. \end{cases}$$

Розв'язок цієї системи $X_1=0$ і $X_2=0$ буде координатами екстремуму функції F(x). Далі по ходу обчислень можна порівнювати результати, отримані за допомогою чисельних методів оптимізації, з цим точним аналітичним значенням.

Визначення екстремуму функції методом Хука-Джівса

Задано початкове наближення X(0)=(1,1) та крок зміни змінних $\Delta X=(2,2)$. Необхідно обчислити значення функції в точці X(0):

$$F(X^{(0)}) = F(1,1) = 8 + 4 + 5 = 17.$$

Далі виконується процедура пошуку (див. п.4 алгоритму).

Обчислюються значення функції F(x) в точках:

$$(x_1 + \Delta x_1, x_2) i (x_1 - \Delta x_1, x_2), (x_1, x_2 + \Delta x_1), (x_1, x_2 - \Delta x_2).$$

$$F(1+2, 1) = 89$$

$$F(1-2, 1) = 9$$

$$F(1, 1+2) = 65$$

$$F(1, 1-2) = 9$$

Вибираємо мінімальне значення F(x). В даному випадку можна вибрати і F(-1,1) і F(1, -1). Вибираємо перше обчислене значення і вважаємо, що X(1)=(-1,1); F(X(1)) = 9.

Далі проводиться пошук відповідно до п.6 алгоритму:

$$x_p^{(2)} = x^{(1)} + (x^{(1)} - x^{(0)}) = [-1,1] + ([-1,1] - [1,1]) = [-1,1] + [-2,0] = [-3,1]$$

Обчислюємо значення функції $F(x_p^{(2)}) = 65$.

В наслідок обчислень отримаємо значення $F(x_p^{(2)}) > F(x^{(1)})$, тобто гірший результат. Тому потрібно обчислене значення $F(x_p^{(2)})$ відкинути і з точки X(1) знову провести процедуру пошуку: F(-1+2,1); F(-1-2,1); F(-1,1+2); F(-1,1-2).

Всі знову обчислені значення функції більше F(X(1)), тому крок прирощення змінних досить великий. Зменшуємо крок до $\Delta x = (1,1)$.

Знову виконуємо процедуру пошуку в околі точки X(1)=(-1,1), але вже з новим кроком:

$$F(-1+1,1) = 5;$$

$$F(-1-1,1) = 29;$$

$$F(-1,2) = 20;$$

$$F(-1,0) = 8.$$

3 усіх обчислених значень вибираємо мінімальне: F(0,1)=5.

Проводимо пошук:

 $x_p = [1,1] + ([0,1] - [-1,1]) = [0,1] + [1,0] = [1,1].$

Отримуємо F(1,1)=17, що також є гіршим результатом у порівнянні з вже існуючими. Тому знову з точки X=(0,1) потрібно повторити процедуру пошуку, але вже з меншим кроком $\Delta x=(0,2;0,2)$: F(0+0,2, 1); F(0-0,2, 1); F(0, 1+0,2); F(0, 1-0,2).

Значення функції *F*(0, 0,8) є найкращим. Тому потрібно проводити пошук в даному напрямку:

 $x_p = [0,0.8] + ([0,0.8] - [-1,1]) = [0,0.8] + [0,-0.2] = [0,0.6].$

Значення функції зменшилось, тому нову точку можна прийняти за базову і провести процедуру пошуку: F (0+0,2, 0,6); F (0-0,2, 0,6); F (0, 0,6+0,2); F (0, 0,6-0,2).

Значення функції в точці F(0, 0, 4) є найкращим, тому проводимо в цьому напрямі пошук:

 $x_p = [0, 0.4] + ([0, 0.4] - [0, 0.6]) = [0, 0.4] + [0, -0.2] = [0, 0.2].$

В точці $F(x_p)$ значення функції менше, ніж $F(x^{(2)})$, тому $x_p = x^{(3)}$ і

 $F(x_p) = F(x^{(3)})$. Далі точку $x^{(3)}$ можна використати для пошуку. Розрахунок на цьому етапі можна закінчити.

Визначення екстремуму функції методом Коші

Задано початковий вектор X(0) = (1, 1).

Обчислюємо часткові похідні та значення градієнта в точці X(0):

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 4x_2 + 16x_1 \text{ i } \frac{\partial f}{\partial x_2} = 4x_1 + 10x_2;$$
$$\nabla F(x^{(0)}) = [20, 14],$$

Далі, за рекурентною формулою слід обчислити наступну точку:

$$X_1^{(1)} = X_1^{(0)} + \alpha^{(0)} \nabla F(X_1^{(0)});$$

$$X_2^{(1)} = X_2^{(0)} + \alpha^{(0)} \nabla F(X_2^{(0)}).$$

У даному виразі невідним є лише α – величина яка направлена вздовж антиградієнта. Вибираємо α так, щоб функція мала при цьому мінімальне значення. Для цього використаємо метод квадратичної апроксимації.

1)
$$a_1=0$$

 $X_1^{(1)} = X_1^{(0)} = 1;$
 $X_2^{(1)} = X_2^{(0)} = 1;$
 $F(1,1) = 17 = F(\alpha_1) = F_1;$
2) $\alpha_2 = \alpha_1 + \nabla \alpha = \alpha_1 + 0.1 = 0.1;$
 $X_1^{(1)} = X_1^{(0)} + \alpha_2 \nabla F(X_1^{(0)}) = 1 + 0.1 \cdot 20 = 3;$
 $X_2^{(1)} = X_2^{(0)} + \alpha_2 \nabla F(X_2^{(0)}) = 1 + 0.1 \cdot 14 = 2.4;$

 $F(\alpha_2) = 112.8 = F_2;$

3) Порівнюємо значення $F(\alpha_2)$ і $F(\alpha_1)$, оскільки $F(\alpha_2) > F(\alpha_1)$, тоді $\alpha_3 = \alpha_1 - \Delta \alpha$.

4)
$$\alpha_3 = -0.1;$$

 $X_1^{(1)} = 1 - 0.1 \cdot 20 = -1;$
 $X_2^{(1)} = 1 - 0.1 \cdot 14 = -0.4;$
 $F(\alpha_3) = 7.6 = F_3;$
 $a_1 = \frac{F_2 - F_1}{\alpha_2 - \alpha_1} = 958 - 1;$
 $a_1 = \frac{1}{\alpha_3 - \alpha_2} \left(\frac{F_3 - F_1}{\alpha_3 - \alpha_1} - \frac{F_2 - F_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right) = 4320;$
 $\alpha^{(0)} = \frac{1}{2} (\alpha_2 - \alpha_1) - \frac{a_1}{2a_2} = -0.16;$
 $X^{(1)} = X^{(0)} + \alpha^{(0)} \nabla F(X^{(0)}) = [1, 1] - 0.16[20, 14] = [-2.2, 1.24];$
 $\nabla F(x^{(1)}) = [-40.16 - 21.20];$
 $F(X^{(1)}) = 17.11.$

Отримаємо нову точку X(1) та обчислимо $\nabla F(x^{(1)})$ і $F(X^{(1)})$.

Далі з точки *X*(1) проводимо пошук по прямій. 1) α₁ = 0

$$X_1^{(2)} = X_1^{(1)} = -2.2$$
$$X_2^{(2)} = X_2^{(2)} = -1.24$$
$$F(\alpha_1) = 17.41 = F_1$$

2) $\alpha_2 = \alpha_1 + \nabla \alpha = \alpha_1 + 0.1 = 0.1$

$$X_{1}^{(2)} = X_{1}^{(1)} + \alpha_{1} \nabla F(X_{1}^{(1)}) = -6.2$$
$$X_{2}^{(2)} = X_{2}^{(1)} + \alpha_{1} \nabla F(X_{2}^{(1)}) = -3.36$$
$$F(\alpha_{2}) = 374.05 = F_{2}$$

Порівняємо значення $F(\alpha_2)$ і $F(\alpha_1)$, оскільки $F(\alpha_2) > F(\alpha_1)$, то

$$\alpha_3 = \alpha_1 - \Delta \alpha; \ \alpha_3 = -0.1;$$

 $X_1^{(2)} = 1.82; \ X_2^{(2)} = 1.71;$
 $F(\alpha_3) = 157.50;$
 $a_1 = 3569.4; \ a_2 = 18549; \ a^{(1)} = -0.05;$

X(2) = [0.19, -0.18]; F(X(2)) = -0.88.

На цьому розрахунок можна закінчити, оскільки процес прямуе до значення *x_{min}*, обчисленого аналітично.

6.4.3. Порядок виконання досліджень

Дослідження методів параметричної оптимізації проводиться на прикладі задачі оптимізації цільової функції двох змінних $Q(X_1, X_2)$, яка задана в явному вигляді. Форма представлення цільової функції – поліном другого порядку:

$$Q(X_1, X_2) = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_1X_2 + A_4X_1X_1 + A_5X_2X_2.$$

Конкретний вигляд цільової функції визначається значеннями коефіцієнтів полінома A₀ – A₅.

6.5. Приклад практичного використання методів параметричної оптимізації

Розглянемо використання методів параметричної оптимізації на прикладі вирішення задачі оптимізації параметрів інерціальної навігаційної системи I-21.

У першому розділі дисертації відмічено, що інерціальна навігаційна система I-21 використовувалась при авіаційних гравітаційних вимірюваннях в рамках НДР, які виконувались при участі автора.

Основним параметром, який вимірювався, була гравітаційна аномалія Дд. У роботі [11] отримано рівняння для визначення допустимих похибок вимірювання параметрів руху літака компонентами авіаційної гравіметричної системи (АГС). Перепишемо рівняння у вигляді

$$\Delta g = f_z + D ,$$

де D - сумарна похибка АГС.

На прикладі даної АГС, яка вирішувала навігаційну задачу вимірювання Δg , що надзвичайно актуально для незалежної України (поклади нафти, урану, газу та інші), покажемо ефективність використання запропонованих методів параметричної та структурної оптимізації параметрів IBC.

З урахуванням поправок [11], вираз, який визначає *D*, набуває вигляду

$$D = \frac{V^2}{r} \{1 - 2e[1 - 2\cos^2\varphi(1 - \frac{\sin^2 k}{2})]\} + 2V\omega_3 \sin k \cos \varphi - 2\dot{h}\frac{e}{r}V\cos k \sin 2\varphi + 2\frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2\cos^2\varphi h - \ddot{h} - \gamma_0,$$

Параметри, що входять у рівність, визначаються окремими підсистемами АГС (СС, IBC).

Зв'язок між абсолютними значеннями похибок $\Delta V, \Delta k, \Delta \varphi, \Delta h, \Delta \dot{h}, \Delta \ddot{h}$ підсистем можна представити у вигляді повного диференціала функції *D*:

$$\Delta D = \left(\frac{\partial D}{\partial V}\right) \Delta V + \left(\frac{\partial D}{\partial k}\right) \Delta k + \left(\frac{\partial D}{\partial \varphi}\right) \Delta \varphi + \left(\frac{\partial D}{\partial h}\right) \Delta h + \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{h}}\right) \Delta \dot{h} + \left(\frac{\partial D}{\partial \ddot{h}}\right) \Delta \ddot{h},$$

де $\frac{\partial D}{\partial V}, \frac{\partial D}{\partial k}, \frac{\partial D}{\partial \varphi}, \frac{\partial D}{\partial h},

вання відповідних параметрів,

$$\begin{split} \frac{\partial D}{\partial V} &= \frac{2V}{r} \left\{ 1 - 2e[1 - 2\cos^2\varphi(1 - \frac{\sin^2 k}{2})] \right\} + 2\omega_3 \sin k \cos \varphi - 2\dot{h}\frac{e}{r}\cos k \sin 2\varphi, \\ \frac{\partial D}{\partial k} &= 2\omega_3 V \cos k \cos \varphi - 2e\frac{V^2}{r}\cos^2\varphi \sin 2\varphi + 2\dot{h}\frac{e}{r}V \sin k \sin 2\varphi, \\ \frac{\partial D}{\partial \varphi} &= 2\omega_3 V \sin k \sin \varphi - \omega_3^2 \sin 2\varphi h - 4e\frac{V^2}{r}\sin 2\varphi(1 - \frac{\sin^2 k}{2}) - 4\dot{h}\frac{e}{r}V\cos k \cos 2\varphi - \\ &- \gamma_{0e} \cdot 5, 3 \cdot 10^{-3}\sin 2\varphi(1 - 2\frac{h}{r}), \\ \frac{\partial D}{\partial h} &= \omega_3^2\cos^2\varphi + 2\frac{\gamma_{oe}}{r}, \\ \frac{\partial D}{\partial h} &= -2\frac{e}{r}V\cos k \sin 2\varphi, \\ \frac{\partial D}{\partial h} &= -1. \end{split}$$

Числові значення коефіцієнтів чутливості (табл. 7.13) відповідають таким параметрам: $h=5\cdot10^3$ м, $e=3,4\cdot10^{-3}$, $r=6,4\cdot10^6$, $\omega_3=7,3.10^{-5}$ c⁻¹, $\gamma_{0_3}=9,78049$ м/c².

Таблиця 7.13.

Максимальні коефіцієнти чутливості похибки вихідного сигналу АГС до похибок вимірюванні параметрів

V, м/с	258	150	90	75
<i>́h</i> , м/с	40	30	21	15
$\left \frac{\partial D}{\partial V} \right $, мГл/м/с	22,80	19,80	18,00	17,00
$\left \frac{\partial D}{\partial k}\right $, мГл/кут.хвил.	1,1	0,70	0,45	0,32
$\left. \frac{\partial D}{\partial \varphi} \right $, мГл/кут.хвил.	2,31	2,06	1,90	1,81
$\left \frac{\partial D}{\partial h} \right $, мГл/м	0,30	0,30	0,30	0,30
$\left \frac{\partial D}{\partial h} \right $, мГл/м/с	3.10-2	$2 \cdot 10^{-2}$	1,08.10-2	0,8.10-2
$\left \frac{\partial D}{\partial h} \right $, мГл/м/с ²	1.10-5	1.10-5	1.10-5	1.10-5

За даними табл. 7.13 можна визначити максимально допустимі похибки вимірювання основних параметрів компонентами АГС. Використовуючи методи структурної та параметричної оптимізації на стадії проектування, отримаємо і наведемо обчислені максимальні значення похибок вимірювання досліджуваних параметрів IBC:

Похибка наведення	1'3'
Похибка стабілізації	20"60"
шляхова швидкість <i>V</i> , м/с	0,050,15
курс <i>k</i> , хв.	1,433,00
Географічна широта, кут.хв.	0,51,5
Висота, м	3,310
Вертикальна швидкість, м/с	$(0,51)^{-1}10^{2}$
Вертикальне прискорення, м/с ²	$(13)^{-10^{-5}}$
Шлях, м	1,54,5
Похибка стабілізації осі чутливості	
гравіметра АГС:	
(для прямолінійного польоту на автопілоті)	0,3"1'

Дані результати співпали з результатами аналітичних та експериментальних досліджень, що підтверджує адекватність отриманих у дисертації результатів, а також те, що точність вимірювання параметрів розробленої IBC підвищено у 3 рази шляхом використання запропонованих засобів та методів.

268

6.6. Висновки до розділу 6

6.6.1. Запропоновано на стадії проектування інерціальних навігаційних систем для досягнення необхідної точності визначення інформаційно-вимірювальних параметрів використовувати методи параметричної оптимізації.

6.6.2. Виявлено, що саме методи параметричної оптимізації забезпечують спрощені процедури пошуку, дозволяють скоротити обчислювальні витрати. Тобто є одними з найбільш ефективних методів оптимізації.

6.6.3. Результати параметричної та структурної оптимізації співпали з результатами аналітичних та експериментальних досліджень попередніх розділів, що підтверджує адекватність отриманих у дисертації результатів, а також те, що точність вимірювання параметрів розробленої ІВС підвищено у 3 рази шляхом використання запропонованих засобів та методів.

ВИСНОВКИ

Викладені у дисертаційній роботі дослідження дозволили вирішити актуальну і складну науково-технічну проблему, що має важливе народногосподарське значення – підвищення точності вимірювання механічних величин (широти, довготи, курсу, швидкості, прискорення та інших) сучасних інформаційно-вимірювальних систем рухомих об'єктів.

 З аналітичного огляду літератури встановлено, що відомі інерціальні ІВС забезпечують недостатні: точність наведення З'; точність стабілізації 60"; забезпечують роботу у малому діапазоні від 20 до 40 Гц.

Визначено, що актуальною проблемою э підвищення точності вимірювання механічних величин IBC шляхом використання розроблених та досліджених прецизійних нових засобів та методів;

2. Обрано функціональну схему СК лінією візування з використанням двоступеневих зустрічно спрямованих гіроскопів, з компенсацією похибок по третій осі, яка забезпечує підвищення точності наведення лінії візування (до 1' проти 3' у відомих) по трьох осях;

3. Забезпечено удосконалення системи керування IBC використанням розроблених та досліджених:

- *методів* (нові математичні моделі нових пристроїв, елементів – головного дзеркала, ричага натяжувателя стрічок, графічного методу визначення вимог до точності наведення та стабілізації СК для РО та інших). Завдяки цьому підвищено точність стабілізації 20″, забезпечено можливість роботи ІВС в широкому спектрі високочастотних коливань об'єкта носія – від 5 до 500 Гц;

засобів:

- введено в конструкцію опори головки наведення оригінальні сталеві цапфи із гумовими втулками, армованими мідними втулками. Це забезпечує

270

експлуатаційний захист СК IBC за рахунок зменшення швидкостей удару, амплітуди і часу загасання перехідного процесу при ударі;

- запропоновано нові стрічкові передачі, пружини натягу. Завдяки цьому зменшено похибку стабілізації до величини 1,5' (проти 4' у відомих ГС), шляхом вибору жорсткості стрічкових передач, жорсткості пружин натягу і сили натягу (до 0,003 кг/мм);

- запропоновано замінити матеріал важеля натяжувателя на матеріал зі зменшеною питомою вагою (ГД виконано на берилієвій підкладці стільникової конструкції зі застосуванням плівкового скла на поверхні Це забезпечує зменшення амплітуди коливань ГД в 1,4 рази;

4. Розроблено методи та спрощені алгоритми визначення координат об'єктів локації у СПК на підставі багаторазового вимірювання кута візування об'єкта за рухомого носія. Отримано курсом 3 формульні оцінки середньоквадратичних похибок, що викликані неточністю кутів візування за курсом. Встановлено, що при точності визначення координат 20" максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 5 м або 0,025 % віл дальності на відміну од відомих IBC, у яких при точності визначення координат 60" максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 15 м або 0,07 % від дальності. Показано, що точність розробленої ІВС у 3 рази вища, ніж у відомих;

5. Обґрунтовано можливість попередньої наземної прецизійної виставки навігаційних елементів IBC (0,3") шляхом використання розробленого та дослідженого нового методу дослідження похибок та нового засобу - вимірювача кута з кільцевим лазером.

З урахуванням запропонованих нового засобу та методу (методики) підвищення точності та швидкодії - нового автоматизованого вимірювача кута, аналітично та експериментально підтверджено, що систематична похибка вимірювання кутів за допомогою ВК не перевищує 0,3", випадкова - 0,1". Тобто, обґрунтовано, що розроблений та досліджений новий вимірювач кута

271

забезпечує значно більшу точність вимірювання кутів од відомих (шляхом введення у математичну модель ВК додаткових поправок для врахування впливу кутової швидкості обертання Землі, дрейфу масштабного коефіцієнта КЛ; використання методу калібрування) та значно більшу швидкодію шляхом реєстрації, обчислення та документування вимірювальної інформації у реальному часі за допомогою ЕОМ;

6. Обґрунтовано доцільність використання нейронних мереж для зменшення інструментальних похибок навігаційних елементів автоматизованої IBC;

7. Обгрунтовано на прикладі для реальної IBC, що запропоновані методи параметричної оптимізації забезпечують більшу у 3 рази, порівняно з відомими, точність визначення інформаційно-вимірювальних параметрів IBC;

8. Підтверджено достовірність отриманих результатів дисертації співпадінням теоретичних, експериментальних результатів та результатів моделювання на ЕОМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Системи вібро- та ударозахисту: Монографія. - Житомир, ЖДТУ, 2009. - 160с.

 Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Ткаченко С.С. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 174 с.

3. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинський Ю.О. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 200 с.

4. Безвесільна О.М. Пошуки шляхів підвищення точності автоматичних кутовимірювальних засобів: Монографія. - Житомир, ЖДТУ, 2010. - 225с.

5. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинський Ю.О. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 235 с.

6. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О. Інформаційно - комп'ютерні системи та технології. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин. Підручник з грифом МОНУ. – Житомир: Видавництво ЖДТУ, 2007, - 320 с.

Безвесільна О.М. Вимірювання гравітаційних прискорень. Підручник.
 – Житомир: ЖДТУ, 2002.- 264 с.

8. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень. - К.: Либідь, 2002. - 350с.

9. Безвесільна О.М. Елементи систем автоматики. Підручник з грифом МОНУ. – Житомир: ЖДТУ, 2008.-700с.

10. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О. Інформаційно - комп'ютерні системи та технології. Експериментальні методи вимірювання механічних величин. Навчальний посібник. - Видавництво ЖДТУ з грифом ЖДТУ, - Житомир, 2007, -124с.

11. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри.

Монографія – Житомир: ЖДТУ, 2007. - 504с.

12. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем. Навчальний посібник.– Видавництво ЖДТУ з грифом ЖДТУ, - Житомир, 2008, -172с.

Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Рижков Л.М., Янкелевич Г.Є.
 Віброізолятор. Авторське свідоцтво на винахід №96104037 від 24.10.97. – 3 с.
 Іл.: Опубл. 30.06.98. Бюл. №3.

14. Безвесільна О.М., Ткаченко С.С., Киричук Ю.В., Гнатейко Н.В. Спосіб вимірювання аномалій прискорень сили тяжіння. Патент на корисну модель №45567 від 10.11.09 р. за заявкою № и 2009 07765 від 23.07.2009.

15. Пат. 90627 С2 Україна, МПК (2009) G 01 V 7/00. Гравіметрична система з високоточним виставленням осі чутливості гравіметра / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, А.А. Остапчук, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко; заявник і власник патенту ЖДТУ. – № а2009 03869; заявл. 21.04.09; опубл. 11.05.10, Бюл. № 9.

16. Пат. 90621 С2 Україна, МПК (2009) G 01 V 7/00. Пристрій для виставлення осі чутливості гравіметричної системи / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, Ю.В. Киричук, Н.В. Гнатейко; заявник і власник патенту ЖДТУ. – № а2009 02978; заявл. 30.03.09; опубл. 11.05.10, Бюл. № 9.

17. Пат. 91315 С2 Україна, МПК (2009) G 01 В 11/26, G 01 Р 21/00. Спосіб виставлення осей чутливості акселерометрів / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, А.А. Остапчук, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко, Ж.М. Кондратюк; заявник і власник патенту ЖДТУ. – № а2009 11277; заявл. 06.11.09; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.

18. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Квасніков В.П. та інш. Пошуки шляхів підвищення точності автоматичних кутовимірювальних засобів// Звіт ІНДРК 2433-Ф, номер держрегістрації 01000U000894, код КВНТД І.2 12.11.01, УДК 681.2 UK.: 2002. -278с.

19. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. та інш. Узагальнення та

розвиток теорії та експериментальних основ створення гравіметричних засобів вимірювання з динамічним настроюванням// Звіт ІНДРК 2638-Ф, номер держрегістрації 0103U000237, код КВНТД І.2 12.11.01, УДК 681.2 UK.: 2004. -297с.

20. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. та інш. Розробка і дослідження нового динамічно – настроюваного гравіметра для прецизійних навігаційних та гравіметричних систем// Звіт про виконання НДР ДЗ/173-2005. (Постанова КМ №570 від 12.07.2005р."Про державне замовлення на закупівлю товарів"). Етап 1. – Київ: КПІ, 2005, – 148 с.

21. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О., Коробійчук І.В. та інш. Розробка і дослідження нового динамічно-настроюваного гравіметра для прецизійних навігаційних та гравіметричних систем// Звіт д/б № Д3/173-2005, номер держрегістрації 0103U000237, код КВНТД І.2 12.11.01, УДК 681.2 UK.: (Постанова КМ №570 від 12.07.2005р."Про державне замовлення на закупівлю товарів"). Етап 2. 2006. -125с.

22. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О., Коробійчук І.В. та інш. Теорія та принципи побудови нового екологічного комп'ютерноінтегрованого діагностичного комплексу з використанням нанотехнологій, нейронних мереж// Звіт ІНДРК 2803-Ф, номер держрегістрації 0105U001085, код КВНТД І.2 12.11.01, УДК 681.2 UK.: 2007. -295с.

23. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинський Ю.О. Дослідження нового динамічно настроюваного гравіметра для прецизійних навігаційних систем. Звіт по НДР (закл.)// УкрІНТІ: - номер держрегістрації 0209U 002127. – К., 2009.-185с.

24. Бабаев А.А. Стабилизация оптических приборов – Л.: Машиностроение, 1975. – 158 с.

25. Безвесільна О.М., Таланчук П.М., Перетворювальні пристрої приладів. - К.: Либідь. Міносвіти України, 1994. - 544 с.

26. Беллман Р. Динамическое программирование. - М.: Наука, 1960. - 382 с.

27. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1970. - 576 с.

28. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы. - М.: Наука, 1978. -575с.

29. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Москва, 1975. -479с.

30. Бесекерский В. А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. - Л.: Судостроение, 1968. - 350с.

31. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. - М.: Наука, 1966, -308 с.

32. Булгаков Б. А. Прикладная теория гироскопов. - М.: Гостехиздат, 1955, -387 с.

33. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем,
ч.1. Гироскопические стабилизаторы. /Под редакцией проф. Д.С. Пельпора. К.: Высшая школа, 1986. - 357 с.

34. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем,
ч.2. Гироскопические стабилизаторы. /Под редакцией проф. Д.С. Пельпора. К.: Высшая школа, 1971. - 428 с.

35. Иванов В.А., Чемоданов Б.К., Медведев В.С. Математические основы теории автоматического регулирования, - М.: Высшая школа 1971. - 806с.

36. Гостев В.И., Стеклов В.И., Столяров С.Н. Оптимальные системы управления цифровыми регуляторами. - К.: 1995. - 484 с.

37. Граммер Р. Гироскоп, его теория и применение. Т.1 - М.: Из-во иностранной литературы, 1952. -351 с.

38. Данилин В.П. Гироскопические приборы. - М.: Высшая школа, 1965. -497 с.

39. Еськов Д.И, Степин Ю.А., Торопин В.А. Методы и средства стабилизации оптического изображения. ОМП, - N1, 1982. -С. 17-24.

40. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Дослідження вібростійкості системи керування навігаційного комплексу по тангажу. Вісник Хмельницького

національного університету №2, 2009. С. 32-37.

41. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Синтез параметрів елементів і пристроїв системи керування навігаційного комплексу при кутових збуреннях носія. Східно-Європейський журнал передових технологій. №3, 2009. С. 61-69.

42. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Аналіз точності стабілізації головного дзеркала гіростабілізатора. Тези XXXIV науково – практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню університету, Житомир, 2009, с.15.

43. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Визначення координат об'єкта в прямокутній системі координат. МНТК "Автоматизація: проблеми, ідеї, решения 2009" Збірник тез, -Севастополь. –СНТУ, 2009 с.178-180.

44. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Визначення координат об'єкта в прямокутній системі координат. МНТК "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційнотехнологічними комплексами" Київ. 2009. С. 57-58.

45. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Вплив вібрацій на систему ударо- і віброзахисту. МНТК "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами" Київ. 2009 .С.57.

46. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Стабілізація головного дзеркала гіростабілізатора. ІІ міжнародна науково-практична конференція. "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2009)" збірник тез, -Київ. НАУ, 2009, с.132.

47. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Іванова О.С. Малогабаритна безплатформенна система орієнтації. Міжвідомча науково-практична конференція «Сучасні проблеми захисту інформації з обмеженим доступом» збірник тез, -Київ. НАУ-НАСБУ, 2008, 73-74с.

48. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Аналіз точності стабілізації головного дзеркала гіростабілізатора. Тези XXX1V науково – практичної

конференції, присвяченої Дню університету, - 2009, С. 15.

49. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Стабілізація головного дзеркала гіростабілізатора. ІІ міжнародна науково-практична конференція. "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2009)" збірник тез, -Київ. НАУ, 2009, с.132.

50. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Визначення координат об'єкта в прямокутній системі координат. Международная научно-техническая конференция "Автоматизация: проблемы, идеи, решения (АПИР) 2009" збірник тез, -Севастополь. СНТУ, 2009, с.178-180.

51. Збруцький А.В., Слюсарь А.М. Определение передаточной функции динамически настраиваемых гироскопов. //Прикладная механика, 1983, -№ 4. – С. 95-101.

52. Збруцький А.В. К вопросу о динамической устойчивости гироскопических устройств. //Доклады АН УССР, - серия А. 1981. - № 3. - С. 27-30.

53. Киричук Ю.В. Впливи кутових збурень на точность стабілізації головного дзеркала гіростабілізатора. VII наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2009, с.103-104.

54. Ковалев М.П., Сивоконенко И.М., Явленский Р.М. Опоры приборов. -М.: Машиностроение, 1967. - 456 с.

55. Липчин Л.Ц. Проектирование сложных навигационных систем, - М.: Машиностроение, 1976. - 175 с.

56. Малков М.А. Танковые прицелы и приборы наблюдения, - М.: Военное издательство МО СССР, 1961.

57. Малышев В.В. и др. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1989, - 311 с.

58. Методичні вказівки до виконання практичних занять (комп'ютерних практикумів) з магістрантами з дисципліни "Інформаційно комп'ютерні системи та технології (Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних

величин)" для магістрантів спеціальностей 8.092501 та 8.090901 // Укладачі О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук. – Житомир: ЖДТУ, 2009, - 93с.

59. Мясоедов Г.Б., Тимофеев В.М. Проектирование навигационных систем управляющих комплексов. - Л: 1990. - 53 с.

60. Николаи Е.Л. Гироскоп в кардановом подвесе. - М.: Наука, 1964. - 348 с.

61. Одинцов А.А. Компенсирующие гиротахометры. Из. КПИ. 1970. -352 с.

62. Одинцов А. А., Павловский М.А. и др. Гироскопические приборы. Часть 1. Киев. КПИ, 1970.-240 с.

63. Одинцов А.А., Павловский М.А., Бублик Г.Ф., Евгеньев В.С., Бондарь П.М. Теория гироскопов и гироскопических приборов. Практикум. //Под редакцией проф. Рябова Б.А. Вища школа, - К.; 1976. - 263 с.

64. Основы проектирования следящих систем. // Под ред. Н.А. Лакоты. - М.: Машиностроение, 1978. - 392 с.

65. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимального управления. - М.: Физматгиз, 1961, -485 с,

66. Павловский М.А., Рябыкин С.А. О погрешностях направления гироскопа с межрамочной коррекцией при качке и вираже объекта. Приборостроение, 1969. - № -С. 25-27.

67. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Теория гироскопов и гиростабилизаторов. Часть 2.- М.: Высшая школа, 1986.- 423 с.

68. Пельпор Д.С., Осокин Ю.А., Рохтеенко Е.Р. Гироскопические приборы систем ориентации и стабилизации. - М.: Машиностроение, 1977. - 208 с.

69. Ружицкий Е.И. Российские вертолеты. -М.:. АСТ: Астрель, Транзиткнига, 2005.-319 с.

70. Ривкин С.С. Теория гироскопических устройств. - Л.: Судпромгиз, Ч.1., 1962. - 369 с, Ч.2 , 1964. -459 с.

величин)" для магістрантів спеціальностей 8.092501 та 8.090901 // Укладачі О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук. – Житомир: ЖДТУ, 2009, - 93с.

59. Мясоедов Г.Б., Тимофеев В.М. Проектирование навигационных систем управляющих комплексов. - Л: 1990. - 53 с.

60. Николаи Е.Л. Гироскоп в кардановом подвесе. - М.: Наука, 1964. - 348 с.

61. Одинцов А.А. Компенсирующие гиротахометры. Из. КПИ. 1970. -352 с.

62. Одинцов А. А., Павловский М.А. и др. Гироскопические приборы. Часть 1. Киев. КПИ, 1970.-240 с.

63. Одинцов А.А., Павловский М.А., Бублик Г.Ф., Евгеньев В.С., Бондарь П.М. Теория гироскопов и гироскопических приборов. Практикум. //Под редакцией проф. Рябова Б.А. Вища школа, - К.; 1976. - 263 с.

64. Основы проектирования следящих систем. // Под ред. Н.А. Лакоты. - М.: Машиностроение, 1978. - 392 с.

65. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимального управления. - М.: Физматгиз, 1961, -485 с,

66. Павловский М.А., Рябыкин С.А. О погрешностях направления гироскопа с межрамочной коррекцией при качке и вираже объекта. Приборостроение, 1969. - № -С. 25-27.

67. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Теория гироскопов и гиростабилизаторов. Часть 2.- М.: Высшая школа, 1986.- 423 с.

68. Пельпор Д.С., Осокин Ю.А., Рохтеенко Е.Р. Гироскопические приборы систем ориентации и стабилизации. - М.: Машиностроение, 1977. - 208 с.

69. Ружицкий Е.И. Российские вертолеты. -М.:. АСТ: Астрель, Транзиткнига, 2005.-319 с.

70. Ривкин С.С. Теория гироскопических устройств. - Л.: Судпромгиз, Ч.1., 1962. - 369 с, Ч.2 , 1964. -459 с.

279

71. Ройтенберг Я.Н. Гироскопы. - М.: Наука, 1986. - 549 с.

72. Справочник. Опоры приборов. - М.: Машиностроение, 1978. - 532 с.

73. Сайдов П.И., Слив Э.И., Черков Р.И. Вопросы прикладной теории гироскопов. -М.: Судпромгиз, 1961. - 482 с.

74. Самотокин Б.Б., Мелешко В.В., Степанковский Ю.В. Навигационные приборы и системы. - К.: Головное издательство «Вища школа». 1986. - 313 с.

75. Самотокін Б.Б. Лекції з теорії автоматичного керування. Навчальний посібник. Житомир. ЖІТІ. 2001 - 508 с.

76. Соломенский ГЛ., Прядилов Ю.Н. Поплавковые гироскопы и их применение. - М.: Оборонгиз, 1958. - 352 с.

77. Травкина Н.П. Эффективность визуального поиска. - М.: Машиностроение, 1985.-128с.

78. Фабрикант Е.А., Журавлев Л.Д. Динамика следящих приводов гироскопических стабилизаторов. - М.: Машиностроение, 1984. - 351 с.

79. Хотько СТ. Проектирование систем управления с нестабильными параметрами. - Л.: Машиностроение, 1987. - 226 с.

80. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации. -М.: Наука, Физматгиз, 1995. - 336 с.

81. Шароватов В.Т. Обеспечение стабильных показателей качества навигационних систем. -Л.: Энергоавтоматиздат, 1987. - 176 с.

82. Патент № 1333591 Великобритания. G2 I (25, 87Х19). Improvement relafind to stabisation of optical Sighting System. Фирма British Aircraft Corporation Limited. Заявлено 19.01.70; Опубл. 10.10.73.

83. Патент № 129729. Великобритания. G2 I (B7A, 87X19) / Stabilised Sighing Mies/Eral Francais. Заявлено 19.04.71; опубл. 29.11.72.

84. Патент № 109313. Великобритания. G2 I (B7X16, 87X19). Stabilised Telescope / Daved Searth Rifchie. Заявлено 15.0664; опубл.,29.11.67.

85. Патент № 1269817. Великобритания. G1C IX3 (19/26). Gyroscopic Instrument for Facilitating Observations with Optical Aiming or Observation Devices / Mauris Bezu. Заявлено 11.12.69; опубл. 13.12.77.

86. Патент № 1150699. Великобритания. G2 I (87Х19). Optical Viewing Device / Marsel Deramond. Заявлено 5.04.66; опубл. 30.04.69.

87. Патент № 1317772. Великобритания. G2 1 (11B1 B7x19). Optical Viewing Apparatus / Фирма: Hugles Aircraft Compfny. Заявлено 106.70; опубл. 23.05.73.

88. Патент № 1236807. Великобритания. G2 I (11B3 B7x19). Improvements in or elating to an Optical Aiming Apparatus /Фирма: Nord-Aviation, Societe National De Constructions Aeronautigues. Заявлено 28. 10.68; опубл. 23.06.71.

89. Патент № 4062126. США. 33-226. Deadband Error Reduction in tardet Sight Stabilization /Peter I.O Hara. Заявлено 8.011.76; опубл. 6.04.72.

90. Патент № 4012989. США. 33-236, 89-41ЕА. Inertial Free-Sight System /Robert Punt; Theodore B. Edvards. Заявлено 21.04.75; опубл. 22.03.75.

91. Патент № 3471931. США. 33-264. Stabilised Aiming Sight / Mauris Веги. Заявлено 12.01.66; опубл. 14.10.69.

92. Патент № 2859526. США. 33-236. Sighting Mexanism / Charles S.Grumshaw. General Electric Company. Заявлено 12.01.58; опубл. 11.11.58.

93. Патент № 1925326. ФРГ. 72f 15/08. Auf cinema Fahreng amgcurdnetes optisches Sichtgerat / Rix Rudolf. Заявлено 19.05.69; опубл. 22.02.78

94. Патент № 1435872. Франция. F41y. Liaison Mecanigue Sans jeu et Sans Inertie Mauris Bezu. Заявлено 15.01.65; опубл. 14.03.66.

95. Патент № 1563217. Франция. G 01c. Appareil gyroscopigue pour facililer reservation au moyen de dispositifs optigues de visce on d' observation / Mauris Bezu. Т'шіено 1.03.68; опубл. 3.03.69.

96. Патент № 1340212. Франция. G2I, G 02B, 7/18, Improvements to Observation Instruments / Фирма: Sosiete D Etudes et de Realesations Electronigues, Заявлено 21.06.71; опубл. 12.12.73.

97. Патент № 1549505. Франция. F.41g. Perfectionnements apportes aux appareils de pointage a systee de reference gyroscopigue / SAGEM. Заявлено 31.10.67; опубл. 4.11.68.

98. Патент № 1401395. Франция. G 01c. Surveillance de gyroscope par un

gyroscope de reference / Mauris Bezu. Заявлено 23.04.64; опубл. 26.04.65.

99. Патент № 1150700. Франция. G₂I, G_{02в}. 7/18. Optical Viewing Device/Marsel Deramond. Заявлено 5.04.66; опубл. 30.04.69.

100. Бурак А.В., Гордиенко В.И., Денисенко А.Ю., Мазурин И.В., Охрименко А.Г., Модернизация ночных танковых прицелов/ Механіка та машинобудування, науково-технічний журнал. – 2002. - № 2.- с.210 -213.

101. Бурак А.В., Гордиенко В.И., Денисенко А.Ю., Мазурин И.В., Охрименко А.Г. Семенов В.А., Соловьев Г.Я., Фролов Л.А., Дневно-ночной прицельно-наблюдательный комплекс ПНК-5/ Механіка та машинобудування, науково-технічний журнал. -2002.- № 2. – с. 214 - 216.

102. Бурак А.В., Гордиенко В.И., Мазурин И.В., Охрименко А.Г., Соловьев Г.Я., Мошнин В.Н., Тепловизионные прицелы для систем управления огнем объектов БТТ/Механіка та машинобудування, науковотехнічний журнал. – 2002. - № 2. –с. 217- 219.

103. Гироскопические системы. Проектирование гтроскопических систем. (В двух томах), ч.1. Гироскопические слабилизаторы. /Под редакцией проф. Д.С, Пельпора. К. Высшая школа, 1986. - 222 с.

104. Глущенко А.Р., Гордиенко В.И., Бурак А.В., Денисенко А.Ю., Гиростабилизаторы танковых прицелов. – Черкассы: Чабаненко Ю.А., 2005.-294 с.

105. Колобродов В.Г., Шустер Н., Тепловізійні системи (Фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підручник. К.: 1999. – 340 с.

106. Малков М.А., Танковые прицелы и приборы наблюдения. – М.: Воениздат, 1961. – 240 с.

107. Орлов В.А., Петров В.И. Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. – М.: Военное издательство, 1989. – 256 с.

108. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г., Инфракрасные системы «смотрящего» типа.- М.: Логос, 2004.- 444 с.

109. Хомченко А.Я., Мазурин И.В., Гордиенко В.И., Замосенчук В.Н., Система индикации положения линии визирования панорамного прибора

наблюдения / Артиллерийское и стрелковое вооружение, Международный научно-технический журнал. – Киев: НТЦ АСВ, - 2005. - № 1(14). – с. 42-45.

110. Алексеев А.М. О демпфировании колебаний импульснодинамическим гасителем // Пробл. прочности. 1972. -№2. -с.52-54.

111. Алексеев А.М., Сборовский А.К. Судовые виброгасители. – Л.: Судпромгиз, 1962.-196 с.

112. Ананьев И.В., Колбин Н.М. Ударное демпфирование колебаний. Материалы семинара МДНТП "Вибрационная техника", 1966. -269 с.

113. Андреева Л.Е., Пономарев С.Д. Расчет упругих элементов машин и приборов - М.: Машиностроение.1980.-326 с.

114. Андрейченко К.П. К теории жидкостного демпфирования в поплавковых приборах // Изв. АН СССР. МТТ. – 1977.-№5.-С.13-23.

115. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. -М. :Наука, 1979.-296 с.

116. Бабаков И.М. Теория колебаний. изд.2 "Наука". 1965. -456 с.

117. Балабанов И.В., Збруцкий А.В. Методы и программное обеспечение расчета и оптимизации упругих подвесов навигационных датчиков. // 3-я С.-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Часть 2. ЦНИИ "Электроприбор", 1996, с. 215-222.

118. Бакшис А.К., Рагульскис К.М. и др. Исследование вибрации электрических машин статистическими методами. – Вибротехника, 1972, в.3, с.27-33.

119. Батуев Г.С. и др. Инженерные методы исследования ударных процессов. 1977. -164 с.

120. Бауэр Г.Ф. Установившиеся гармонические и комбинационные колебания нелинейного динамического поглотителя колебаний// Тр. Амер. ова инж. -механиков. Прикл. механика. -1966.-Т.33, № І. -с.205-208.

121. Безвесільна О.М., Рижков Л.М., Киричук Ю.В. Про вибір параметрів систем вібро- і ударозахисту з сухим тертям. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 1998.- № 3. – С. 95-98.

283

122. Безвесильная Е.Н., Балабанов И.В., Киричук Ю.В. Расчет упругой плоской пластины методом узловой конденсации.// Наукові вісті НТУУ "КПІ". - 1999. -№ 1. – С. 119-124.

123. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Бобруйко Є.І., Тулупов Д.Г., Меншикова К.В., Нечай С.О. Розрахунок пружного модуля методом вузлової конденсації. МНТК "Прогресивна техніка і технологія – 2002", Севастополь, 2002, С.44-37.

124. Бидерман В.А. Теория механических колебаний. - М.: Высш. школа, 1980.-408с.

125. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Наука, 1974.-504с.

126. Боевкин В.И., Павлов Ю.Н. Динамический гаситель с сухим трением // Тр. МВТУ. – 1971.- № 153.-с.110-117.

127. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. -336с.

128. Бузицкий В.Н., Шанов В.Н., Пичугин А.Д. Некоторые вопросы исследования амортизаторов. КУАИ им. С.П. Королева. Труды, вып. XXX. 1967. - 158с.

129. Бурденко А.Ф., Флора В.Ф. Определение оптимальных параметров упруго-вязкого демпфера при наличии затухания колебаний главной массы // Акустика и ультразв. техника. -1972. -Вып.7.-с.58-62.

130. Бутковский А. Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. – М. :Наука, 1979.-224с.

131. Введение в динамику механизмов с учетом упругости звеньев: Учеб.пособ/ И.И. Вульфсон; Ленинград. политехн. ин-т. им. М.И. Калинина. – Л.; ЛПИ, 1977. –45 с.

132. Вибрации в технике. Справочник, т.6 / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981.-456с.

133. Вильке В. Г. Разделение движений и Метод усреднения в механике систем с бесконечным числом степеней свободы//, Вестн. Моск. ун-та. Сер.

матем., механ., 1983. -№5.-с.54-59.

134. У. Кер-Вільсон, Вибрационная техника. Машгиз. 1963.

135. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.

136. Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегродифференциальных уравнений. – М. -. Наука, 1982.- 304с.

137. Вульфсон И.И., Коловский М.З. Нелинейные задачи динамики машин. – Л. "Машиностроение", 1968. –282 с.

138. Ганиев Р. В., Кононенко В.О. Колебания твердых тел. – М.: Наука, 1976. -432с.

139. Гетманов А.Г., Дигтяренко П.И., Мадровский Б.Ю. и др. Автоматическое управление вибрационными вибрационными испытаниями. – М., "Энергия", 1978, -110 с.

140. Грибов М.М., Жвакин Ю.И. Конструирование амортизационных систем РЭА с помощью моделирования. 1977. -437с.

141. Джонс, Нэшиф, Эдкинс. Влияние настраиваемых демпферов на колебания простых конструкцій //Ракетная техника и космонавтика: Пер. с англ. – М.: Мир. -1967. -5. -№2. -с.144-150.

142. Динамические свойства линейных виброзащитных систем. Коллектив авторов. – М.: Наука, 1982. - 208с.

143. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 539 с.

144. Ильинский В. С. Защита аппаратов от динамических воздействий. – М.: Энергия, 1970. -320с.

145. Иориш Ю.И. Защита самолетного оборудования от вибрации и ударов. Оборониздат, 1960. –240 с.

146. Карпушин В.Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре. – М. "Сов. Радио". 1971. –344 с.

147. Киричук Ю.В. Про вибір параметрів систем вібро- і ударозахисту з сухим тертям. Вісник Інженерної академії наук №5 -2008. С.39-45.

148. Конычев В.И. Амортизаторы самолетного оборудования. Оборонгиз 1956.-273с.

149. Круглов Ю. А., Туманов Ю. А. Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. -222 с.

150. Ларин В.Б. Статические задачи виброзащиты. – Киев., "Наук.Думка", 1974. -127 с.

151. Павловский М.А. Теория гироскопов. – К.: Вища шк. Головное издво, 1986. - 303 с.

152. Павловский М.А., Петренко В.Е. Виброустойчивость гироскопов. – Киев, "Виша школа", 1982,-171 с.

153. Павловский М.А., Рыжков Л.М. Об эквивалентной линеаризации при решении задач колебаний механических систем гистерезисного типа // Пробл. прочности. -1987. -М. -С. 106-109.

154. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-хт./ Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.-. Машиностроение, 1968, т.3. -567 с.

155. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. – М. - . Машиностроение, 1976. - 463с.

156. Сергеев С.И. Демпфирование механических колебаний. – М.: Физматгиз, 1959. -408с.

157. Суровцев Ю.А. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры. 1977. - 249с.

158. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1966.-444с.

159. Фурунжиев Р.И. Проектирование оптимальных виброзащитных систем. – Минск.: Вища школа, 1971.-318с.

160. Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем. – М. Машиностроение, 1980.-276с.

161. Lowe R., Crede C. Resent developments and futuze trends in vibration isolation. -Noise Control, 1957, XI, vol.3, №6, p. 145.

162. Hisayoshi S., Kazuoshi I. The isolation of random vibration. Case of wide band white noise// Bull. JSME. -1970. -V.I3, №56. -P. 248-257.

163. Shock and vibration handbook. -New-York: MC Crow-Hill, 1976. -P. I2II.

164. Snowdon J.C. Vibration and Shock in damped mechanical system. -New-York: J. Wiley and Sons, 1986. -486 p.

165. Snowdon J.C. Reduction of the Longitudinal vibration of internally Damped Rods Having Finite Termination Impendance// J. Acoust. Soc. Amer. -V. 46, №5. -1969. -P. 1203-1212.

166. Snowdon J.C. Nobile M.A. Beamlike dynamic vibration absorbers// Acustica. -I960. -V. 44, №2. -P. 98-108.

167. Thomson A.G. Optimum tuning and damping of a dynamic vibration absorber// J. Sound and Vibr. -1981. -V. 77, №3. -P. 403-415.

168. Warburton G.V. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters// Earthquake eng-g and Struct, dynamics. - 1982. -V.10, №3. -P. 581-401.

169. Warburton G.V. Optimum absorber parameters for minimizing vibration response// Ibid.- 1981.- V. 9.- P. 251 - 262.

170. Warburton G.V., Ayorinde E.O. Optimum absorber parameters for simple systems // Ibid. -1980. -V.8. -P.197-217.

171. Frahm H. Device for Damping Vibrations of Bodies, U.S. Patent №989, 958, 1911.

172. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Взаимное вибрационное влияние динамически настраиваемых гироскопов с учетом системы виброзащиты. Міжвідомча науково-практична конференція «Сучасні проблеми захисту інформації з обмеженим доступом» збірник тез, -Київ. НАУ-НАСБУ, 2008, 84-85с.

173. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Метод вузлової конденсації при розрахунку пружного модуля. Вісник ЖДТУ / Технічні науки. - 2009. - № 2 (48). - С. 45-53.

287

174. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Про вибір параметрів систем віброі ударозахисту з сухим тертям. Вісник Інженерної академії наук №1 -2009. С. 91-94.

175. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Кришталь В.Ф. Взаємний вібраційний вплив динамічно-настроювальних гіроскопів один на одного через систему віброзахисту. Вісник Інженерної академії України, №2, 2009, С.8-16.

176. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Рівняння руху системи вібро- і ударозахисту з сухим тертям. Вісник Інженерної академії України, №2, 2009, С.52-54.

177. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Система ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу. МНТК "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами". Київ. 2009. С.59.

178. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Моделювання поведінки плоскої пружини при значних її прогинах на ЕОМ. МНТК "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами" Київ. 2009. С.58.

179. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Кришталь В.Ф. Взаємний вібраційний вплив динамічно настроюваних гіроскопів з урахуванням системи віброзахисту. Тези XXX1V науково – практичної конференції, присвяченої Дню університету,- 2009, С. 16.

180. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Дослідження поведінки динамічно - настроюваного гравіметра за допомогою ЦОМ. Вісник КПІ, Київ, серія "Приладобудування", 2004. № 27.-с.5-10.

181. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Експериментальні дослідження динамічно - настроюваного гравіметра. Вісник КПІ, Київ, серія "Приладобудування", 2004. № 28. –С.11 -17.

182. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Аналіз статичних похибок динамічно – настроюваного гравіметра. Вісник Інженерної академії
України, Київ, 2004. №2, -С.44-53.

183. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Аналіз динамічних похибок динамічно – настроюваного гравіметра при дії лінійних та кутових прискорень основи. Вісник Інженерної академії України, Київ, 2004. №3, - С.37-45.

184. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Аналіз динамічних похибок динамічно – настроюваного гравіметра при спільній дії кутових швидкостей та лінійних прискорень основи. Вісник Інженерної академії України, Київ, 2004. №4, - С.51-56.

185. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Похибки динамічно – настроюваного гравіметра при дії лінійних та кутових прискорень основи. Вісник КДПУ. – Кременчуг: Редакція журналу КДПУ, 2004, - с. 14-19.

186. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Аналіз динамічних похибок динамічно – настроюваного гравіметра. Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. – Херсон: Редакція журналу Херсонського Національного технічного університету, №2(14) 2004, с. 95-100.

187. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Похибки динамічно – настроюваного гравіметра при спільній дії кутових швидкостей та лінійних прискорень основи. Міжнар. Науково-техн. журнал. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький: №1 (21) 2004, с.33-34.

188. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Фільтрація вихідного сигналу динамічно - настроюваного гравіметра. Вісник КПІ, Київ, серія "Приладобудування", 2004. -с.38-42.

189. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Математична модель динамічної похибки нового динамічно настроюваного гравіметра. Вісник Інженерної академії наук України, вип. 2-3, Київ, 2006, с. 13-17

190. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Аналіз похибок нового динамічно настроюваного гравіметра при окремій дії лінійних та кутових прискорень

основи. Вісник Інженерної академії наук №1-2007. С.21-25.

191. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Метод калібрування для автоматизованого гоніометра. Вісник Інженерної академії наук №2-2007. С.23-28.

192. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Метод калібрування для автоматизованого гоніометра. Вісник Інженерної академії наук №3-4-2007. С.78-81.

193. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили ваги з двогіроскопним гравіметром. Східно-Європейський журнал передових технологій. №6/4, 2007.С.7-10.

194. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Лінійний нейромережевий динамічний діагностичний комплекс з послідовним відновленням і фільтрацією вхідного сигналу гірогравіметра. Східно-Європейський журнал передових технологій. №6/4, 2007. С.10-13.

195. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Аналіз динамічних похибок динамічно настоюваного гравіметра при спільній дії кутових швидкостей та лінійних прискорень основи. Вісник Інженерної академії наук №3-4/2007. С.78-80.

196. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Дослідження впливу кутової швидкості обертання Землі на похибку вимірювання кутів. Вісник Інженерної академії наук №3-4/ 2007. С.68-71.

197. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Аналіз досягнень в галузі високоточних вимірювань кута. Вісник Інженерної академії наук №3-4/2007. С.72-77.

198. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинського Ю.О., Єльнікової Т.О. Комп'ютеризована методика дослідження процесів евтрофікації. Вісник Інженерної академії наук №1.-2008.С.37-38.

199. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Ткаченко С.С. Аналітичний огляд робіт у галузі високоточних вимірювачів кутів. Східно-Європейський журнал

передових технологій. №5/3(35), 2008.С.60-65.

200. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Добржанський О.О. Дослідження впливу кутової швидкості обертання Землі на роботу гіроскопічного гравіметра. Вісник Інженерної академії наук №2/2008. С.230-232.

201. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Добржанський О.О. Моделювання впливу параметрів збурень на роботу гравіметра на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень. Вісник Інженерної академії наук №3-4 - 2008. С.39-45.

202. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Ткаченко С.С. Аналіз похибки вимірювання кутів з використанням методу калібрування. Східно-Європейський журнал передових технологій. №6/5(36), 2008. С.17-21.

203. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Ткаченко С.С. Калібрування кутовимірювального пристрою. Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації №2(19), 2009, с.12.

204. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Новий високоточний кутовимірювальний пристрій для попередньої виставки ДНГ. Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації №2(19), 2009, с.12-14.

205. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Остапчук А.О. Математична модель визначення аномалій прискорення сили тяжіння для ІНС. Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації №2(19), 2009, с.14-15.

206. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Яцків Р.М. Визначення навігаційних параметрів на літаках при гравіметричних вимірюваннях. Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації №2(19), 2009, с.18–19.

207. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Ткаченко С.С. Експериментальні дослідження характеристик кільцевого лазера. Вісник Хмельницького національного університету №1 -2009. С.129-133.

208. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Ткаченко С.С. Експериментальні

дослідження систематичних і випадкових похибок гоніометра. Вестник Херсонского национального технического университета, №3(32), 2008, с.45-48.

209. Скляров И.Ф. Основы системного анализа и синтеза. - М.: Сов. радио, 1983. – 169 с.

210. Теория систем и методы системного анализа в управлений и связи / В.Н. Волкова, В.А. Воронков и др. - М.: Радио и связь, 1983. - 248 с.

211. Денисов А.А., Колесников Д.Н. Теория больших систем управления: Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоиздат, 1982. - 288 с.

212. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. - М.: Сов. радио, 1982.

213. Основы системного анализа и проектирования АСУ. Уч. пособие / А.А. Павлов и др. - К.: Вища шк.; 1991. - 367 с.

214. Саркисян С.А., Ахундов В.М., Минаев З.С. Анализ и прогноз развития больших технических систем. - М.: Наука, 1982. - 280 с.

215. Петров А.В., Яковлев А.А. Анализ и синтез радиотехнических комплексов. -М.: Радио и связь, 1984. -248 с.

216. Основы моделирования сложных систем. Уч. пос/ Под. ред. И.В. Кузьмина. -К.: Вища школа, 1981. - 360 с.

217. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. -М: Наука, 1976. – 248с.

218. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. Пер. с англ. -М.: Мир, 1985. – 92с.

219. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по векторному критерию. - М.: Сов. радио, 1975. –137 с.

220. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. - М.: Сов. радио, 1973. - 440 с.

221. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.В., Коробійчук І.В. Гравіметр. Патент на винахід №86005 від 25.03.2009 р. Бюл. №6 за заявкою № а 2005 04762, заявл. 15.12.2006 (бюл. №12).

222. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. - М. "Наука". Гл.ред. физ.-мат. лит., 1986. - 296 с.

223. Справочник по сопротивлению материалов. Под Ред. П.С. Писаренко, -К., Наукова думка, 1988. - 362 с.

224. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.

225. Елисеев С.В. Структурная теория виброзащитных систем. Новосибирск: Наука, 1987. -222с.

226. Безвесільна О.М. Киричук Ю.В. Високоточний вимірювач кутів. МНТК "Прогресивна техніка і технологія", Севастополь, 2001, С.38-41.

227. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Бобруйко Є.І., Тулупов Д.Г., Меншикова К.В., Нечай С.О., Старцев С.М. Прогрессивная технология точного измерения малых углов с помощью лазерного гироскопа. МНТК "Прогресивна техніка і технологія – 2002", Севастополь, 2002, С.47-50.

228. Безвесільна О.М., Добржанський О.О. Балістичний гравіметр. Тези XXX наукової конф. ЖДТУ, - 2005, С. 5.

229. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Маркін М.О., Кур'ята СВ., Коробійчук І.В. Новий високоточний кутовимірювальни пристрій для попередньої виставки ДНГ. МНТК "Приладобудування" 2006, Київ, с. 23.

230. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Маркін М.О., Кур'ята СВ. Метод калібрування кутовимірювального пристрою. МНТК "Приладобудування" 2006, Київ, с 24.

231. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Кремінський Д.Г. Розробка мікропроцесорного витратоміра палива в автомобілях. МНТК "Приладобудування" 2006, Київ, с. 25.

232. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Анісімов М.В., Іванов СВ. Математична модель визначення аномалій прискорення сили тяжіння для ІНС. МНТК "Приладобудування" 2006, Київ, с. 23-27.

233. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай СО., Добржанський О.О. Фільтрація вихідного сигналу гіроінтегратора лінійних прискорень. МНТК "Приладобудування" 2006, Київ, с. 23-27.

234. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Фільтрація вихідного сигналу авіаційної гравіметричної системи. VI наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2007, с.154-155.

235. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Коробійчук І.В. Експериментальні дослідження гіроскопічного гравіметра авіаційної гравіметричної системи. VI наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2007, с.155-156.

236. Безвесільна О.М. Киричук Ю.В. Засоби визначення навігаційних параметрів на літаках при гравіметричних вимірюваннях. VI науковатехнічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2007, с.153-154.

237. Безвесільна О.М. Киричук Ю.В. Дослідження авіаційного гравіметра гравіметричної системи. Тези 111 науково - технічної конференції ЖДТУ "Інформаційно - комп'ютерні технології", 2007, С. 27.

238. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Коробійчук І.В. Аналіз сучасних навігаційних засобів при авіаційних гравіметричних вимірюваннях. Тези 111 науково - технічної конференції ЖДТУ "Інформаційно - комп'ютерні технології", 2007, С. 56.

239. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинський Ю.О. Дослідження чутливості авіаційної гравіметричної системи до похибок вимірювання навігаційних параметрів. Тези 111 науково - технічної конференції ЖДТУ "Інформаційно - комп'ютерні технології", - 2007, С. 50.

240. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Дослідження авіаційного гравіметра гравіметричної системи. Тези XXXII науково - практичної конференції, присвяченої Дню університету, 2007, С. 48.

241. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Коробійчук 1.В. Аналіз сучасних навігаційних засобів при гравіметричних вимірюваннях. Тези XXXII науково - практичної конференції, присвяченої Дню університету,-2007, С. 49.

242. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинський Ю.О. Дослідження чутливості авіаційної гравіметричної системи до похибок вимірювання навігаційних параметрів. Тези XXXII науково - практичної конференції, присвяченої Дню університету, -2007, С. 50.

243. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинський Ю.О. Автоматизований контроль геофізичних умов на промислових об'єктах за допомогою балістичного гравіметра. Тези XXXII науково -практичної конференції, присвяченої Дню університету, -2007, С. 50.

244. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Лінійний нейромережевий динамічний діагностичний комплекс з послідовним відновленням і фільтрацією вхідного сигналу гірогравіметра. VII МНТК "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2008, с. 130-131.

245. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О., Аналіз динамічних похибок динамічно-настроюваного гравіметра. VII наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2008, с. 131-132.

246. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинський Ю.О. Похибки динамічно-настроюваного гравіметра при спільній дії кутових швидкостей та лінійних прискорень основи. VII наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2008, с.132.

247. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Лінійний нейромережевий динамічний діагностичний комплекс. Тези XXX111 науково – практичної конференції, присвяченої Дню університету, 2008, С. 60.

248. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О. Динамічні похибки динамічно – настоюваного гравіметра. Тези XXX111 науково – практичної конференції, присвяченої Дню університету, 2008, С. 58.

249. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Подчашинський Ю.О. Дослідження спільної дії кутових швидкостей та лінійних прискорень основи на динамічно – настоюваний гравіметр. Тези XXX111 науково – практичної

295

конференції, присвяченої Дню університету, - 2008, С. 59.

250. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Класифікація гравіметрів АГС. Одногіроскопні гравіметри нового типу. МНТК молодых учених, аспирантов и студентов "Прогресивные направления развития машиноприборостроителдьных отраслей и транспорта-2008" збірник тез доповідей, -Севастополь. 2008, с.193-194.

251. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Добржанський О.О. Основні метрологічні характеристики гірогравіметра. І міжнародна науковопрактична конференція. "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2008)" збірник тез, -Київ. НАУ, 2008, 44-45с.

252. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Ткаченко С.С., Кондратюк Ж.І. Методика дослідження на ЦОМ системи віброзахисту гіроскопічного гравіметра. Міжвідомча науково-практична конференція «Сучасні проблеми захисту інформації з обмеженим доступом» збірник тез, -Київ. НАУ-НАСБУ, 2008, 90с.

253. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Нечай С.О., Яцків Р.М. Аналіз динамічних похибок динамічно-настроюваного гравіметра на ЦОМ. Міжвідомча науково-практична конференція «Сучасні проблеми захисту інформації з обмеженим доступом» збірник тез, -Київ. НАУ-НАСБУ, 2008, 81-с.

254. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Гура Е.В. Алгоритм корекції інерційності гравіметра на основі динамічної моделі нейромережевого діагностичного комплексу з послідовним відновленням і фільтрацією вхідного сигналу гірогравіметра. Міжвідомча науково-практична конференція «Сучасні проблеми захисту інформації з обмеженим доступом» збірник тез, -Київ. НАУ-НАСБУ, 2008, 75-76с.

255. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Єльнікова Т.О., Кліменко М.С. Методика дослідження процесів евтрофікації на основі використання інформаційно-комп'ютерних технологій. Міжвідомча науково-практична конференція «Сучасні проблеми захисту інформації з обмеженим доступом»

296

збірник тез, -Київ. НАУ-НАСБУ, 2008, 87-88с.

256. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Оцінювання стану гірогравіметра з цифровою обробкою інформації. VII наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2009, с.98-99.

257. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Кришталь В.Ф. Взаємний вібраційний вплив динамічно настроюваних гіроскопів. VII наукова-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" збірник тез доповідей, -Київ. 2009, с.99-100.

258. Система ударо- і віброзахисту чутливих елементів стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки: монографія / Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Цірук В.Г – Житомир: ЖДТУ, 2015. – 158 с.

259. Kyrychuk Y.V. Crosscoupling of dynamically tunable gyroscopes on each other through vibration protection system. European Applied Sciences is international, Germany. №11, 2013 p. 104-110. – ISSN2195-2183.

260. Kyrychuk Y.V. Simulation of flat elastic plate behavior at its substantial flexure. THE ADVANCED SCIENCE JOURNAL. United States. November 2013. P.20-24 (USA)(ISSN 2219-746X, e-ISSN 2219-7478).

261. Kyrychuk Y.V. Use of triangulation laser sensors to improve metrological characteristics of gyroscopic gyrometers / Y.V. Kyrychuk, D.P. Ornatskyi, O.I. Osmolovskyi // European applied sciences. – 2014. – №1. – C. 112–114. – ISSN2195-2183.

262. Yu. Kyrychuk. System Designed for Shock and Vibration Protection Using Dry Friction./ Yu. Kyrychuk // Universal Journal of Engineering Science 2(4): 69-72, 2014 http://www.hrpub.org DOI: 10.13189/ ujes.2014.020401

263. E.N. Bezvesilna. Analytical overview of works on high precision angle measurement instruments./ E.N. Bezvesilna, Yu.V. Kyrychuk, S. Nechai, R. Bychuk / THE ADVANCED SCIENCE JOURNAL. (USA)(ISSN 2219-746X, e-ISSN 2219-7478). November №2, 2014. P.29-32.

264. Bezvesilnaya, E. N. Research of Earth rotation speed influence on angle

measurement error [Text] / E.N. Bezvesilnaya, A.A. Ostapchuk, J.V. Kirichuk, L.O. Chepyuk // European Applied Sciences (Germany). – 2014. – №3. – P. 100–102.

265. Bezvesilnaya, E. N. Automated angle measurement instrument calibration method for preliminary ground setup of navigation elements [Text] / E.N. Bezvesilnaya, A.A. Ostapchuk, J.V. Kirichuk, L.O. Chepyuk // The advanced science journal (China). – 2014. – №8. – Р. 225–230. (Іноземне видання).

266. Bezvesilna E.N. Neural Networks in Measuring of Gravity Disturbances Simulation of Flat Elastic Plate Behavior at its Substantial Flexure THE ADVANCED SCIENCE JOURNAL. United States. (USA)(ISSN 2219-746X, e-ISSN 2219-7478). November №2, 2014. P.29-32.

267. Киричук Ю.В. Метод узловой конденсации в расчете упругого модуля системы виброзащиты [Текст]/ Киричук Ю.В. // Сборник статей по материалам XV Международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук» - М. Международный центр науки и образования, №10(12), 2013. С.79-89.

268. Киричук Ю.В. Характеристика плоской упругой пластины при значительных ее прогибах [Текст]/ Киричук Ю.В. // Сборник статей по материалам XXI Международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: Инновации в современном мире» - М. Международный центр науки и образования, №1(21), 2014. С.25-32.

269. Киричук Ю.В. Система вибро - и ударозащиты с сухим трением. [Текст]/ Киричук Ю.В.// Східно-Європейський журнал передових технологій. №6/7, 2013. С. 31-33.

270. Киричук Ю.В. Система вібро- і ударозахисту з сухим тертям [Текст]/ Киричук Ю.В.// Вестник НТУ ХПИ, №10, 2011, С. 41-45.

271. Киричук Ю.В. Дослідження поведінки плоскої пружини системи ударо- і віброзахисту при значних її прогинах [Текст]/ Киричук Ю.В.// Вісник Інженерної академії України, №1, 2011, С. 196-199.

272. Киричук Ю.В. Синтез системи стабілізації навігаційного комплексу

при лінійних збуреннях носія. [Текст]/ Киричук Ю.В.// Вісник Інженерної академії України, №2, 2011, С. 196-199.

273. Киричук Ю.В. Методика проведення експериментальних досліджень системи керування навігаційної системи [Текст]/ Киричук Ю.В. //Вісник інженерної академії україни, №3-4, 2011, С.75-76.

274. Киричук Ю.В. Проектування системи стабілізації навігаційного комплексу [Текст]/ Киричук Ю.В. //Збірник статей «ТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ» №1,2(5,6), 2012, Луцьк. С. 113-117.

275. Киричук Ю.В. Методи вимірювання відстані [Текст]/ Киричук Ю.В. Бичук Р.В.// Вісник інженерної академії України, №2, 2012, С.73-78.

276. Киричук Ю.В. Дослідження передачі руху через важільний механізм в електромагнітному приводі клапана [Текст]/ Киричук Ю.В. //Вісник Інженерної академії України, №3-4, 2012, С. 112-115.

277. Киричук Ю.В. Системи керування навігаційного комплексу при кутових збуреннях носія [Текст]/ Киричук Ю.В. //Вісник Інженерної академії України, №3-4, 2012, С. 28-32.

278. Киричук Ю.В. Синтез елементів опори системи керування навігаційних систем за курсом в умовах багаторазових ударних впливів [Текст]/ Киричук Ю.В. //Вісник Інженерної академії України, №1, 2013, С. 13-19.

279. Киричук Ю.В. Фільтрація вихідного сигналу гіроскопічного гравіметра авіаційної гравіметричної системи [Текст]/ Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// Вісник Інженерної академії України, №2, 2013, С. 7-12.

280. Киричук Ю.В. Експериментальні дослідження динамічнонастроюваного гравіметра [Текст]/ Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// Вісник Інженерної академії України, №2, 2013, С. 12-15.

281. Киричук Ю.В. Исполнительные механизмы систем управления. /Киричук Ю.В., Кононенко В.В. // Вісник Інженерної академії України, №2, 2014, С. 7-12.

282. Безвесільна О.М. Стенди та устаткування для проведення

автоматизованих експериментальних перевірок систем керування навігаційних систем /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення", в 2-х т.т.2, Севастополь. 6-10 вересня 2010. с.10-11.

283. Безвесільна О.М. Результати автоматизованих експериментальних досліджень систем керування, елементів і пристроїв навігаційних систем /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Ткаченко С.С., Кондратюк Ж.М. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення", в 2-х т.т.2, Севастополь. 6-10 вересня 2010. с.11.

284. Киричук Ю.В. Методика проведення експериментальних досліджень системи керування навігаційної системи /Киричук Ю.В.// 4 МНТК "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2011)" Київ, НАУ. 2011. С.161-162

285. Киричук Ю.В. Лабораторні експериментальні дослідження балістичного гравіметра /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Остапчук А.В. 4 МНТК "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2011)" Київ, НАУ. 2011. С.108-110

286. Безвесільна О.М. Оцінка впливу окремих елементів конструкції гіростабілізатора на точність системи стабілізації /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// 4 МНТК "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІІРТК-2011)" Київ, НАУ. 2011. С.106-107

287. Безвесільна О.М. Лабораторні дослідження балістичного гравіметра /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Остапчук А.А.// XXXVI НПМК, присвяченої Дню науки, Житомир, ЖДТУ, 2011, с. 110-111

288. Безвесільна О.М. Оценка похибок динамічно настроювальних гіроскопів /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// ХХХVІ НПМК, присвяченої Дню науки, Житомир, ЖДТУ, 2011, с. 106-107

289. Безвесільна О.М. Мікросистемний акселерометр Безвесільна О.М., Бичук Р.В. XXXVI НПМК, присвяченої Дню науки, Житомир, ЖДТУ, 2011, с.100-101

300

290. Безвесільна О.М. Результати експериментальних досліджень систем керування, елементів і пристроїв навігаційних систем /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// ХХХVІ НПМК, присвяченої Дню науки, Житомир, ЖДТУ, 2011, с.108-109

291. Безвесільна О.М. Комп'ютерно-інтегрована технологія вимірювань гравітаційних аномалій за допомогою автоматизованого діагностичного комплексу /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// Перша НК "Теоретичні та прикладні аспекти розвитку нових автоматизованих технологій і дослідження матеріалів" ТНТУ імені Івана Пулюя (факультету комп'ютерних технологій), Тернопіль, 2011, с.21

292. Безвесільна О.М. Комп'ютерно-інтегрована технологія створення навігаційної високоточної інерціальної системи автоматизованого діагностичного комплексу для вимірювань гравітаційних аномалій /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// Перша НК "Теоретичні та прикладні нових автоматизованих технологій і дослідження аспекти розвитку матеріалів" ТНТУ імені Івана Пулюя (факультету комп'ютерних технологій), Тернопіль, 2011, с.18

293. Киричук Ю.В. Точність системи стабілізації навігаційних комплексів /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// МНТК «Автоматизация: Проблемы, идеи, решения» г. Севастополь 6-10 вересня 2011. с. 32 – 34

294. Киричук Ю.В. Дослідження впливу вібрацій на систему ударо- і віброзахисту /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// 5 МНТК "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2012)" Київ, НАУ. 2012. С.124-125

295. Киричук Ю.В. Методика проведення експериментальних досліджень системи керування навігаційної системи //Киричук Ю.В.// Первая Всеукраинская НТК студентов, аспирантов и молодых учених «Современные тенденции развития Приборостроения», сборник тезисов г. Луганск, кафедра «Приборы», ВНУ им. В.Даля (19-20 ноября 2012), с.125-126

296. Киричук Ю.В. Розрахунок кута відхилення інерційної маси

оптичного акселерометра /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// Первая Всеукраинская НТК студентов, аспирантов и молодых учених «Современные тенденции развития Приборостроения», сборник тезисов г. Луганск, кафедра «Приборы», ВНУ им. В.Даля (19-20 ноября 2012), с.40-41

297. Киричук Ю.В. Моделирование поведения плоской упругой пластины при значительных ее прогибах /Киричук Ю.В.// НТК «Современные технологии в системах управления и вооружении» посвященная 60-летию высшего образования в городе Коврове (13 ноября 2012 г.), Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. ДЕГТЯРЕВА с.100-101

298. Киричук Ю.В. Взаимное вибрационное влияние динамически настраиваемых гироскопов /Киричук Ю.В.// НТК «Современные технологии в системах управления и вооружении» посвященная 60-летию высшего образования в городе Коврове (13 ноября 2012 г.), Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. ДЕГТЯРЕВА с.98-99

299. Безвесільна О.М. Нейронні мережі у вимірюванні гравітаційних аномалій /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.// Всеукраїнська наукова Інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 1)» (м.Тернопіль, 30-31 січня 2014р. – Тернопіль: Тайп, 2014. с.64-67

300. Киричук Ю.В. Системи визначення положення об'єкту у замкнутому просторі /Киричук Ю.В., Бичук Р.В.// Всеукраїнської науково-практичної опline конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої дню науки. 15–17 травня 2014 року Житомир, ЖДТУ. 2014. С.100

301. Безвесільна О.М. Прецизійний пристрій для попередньої виставки осей навігаційних елементів /Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Бичук Р.В.// Х НПК "Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні" Київ. НТУУ «КПІ» 2014. С. 16

302. Киричук Ю.В. Середньоквадратичні похибки визначення координат об'єкта в системі прямокутних координат. [Текст]/ Безвесільна О.М., Киричук

302

Ю.В., Коробійчук І.В. // Технологічний аудит та резерви виробництва. Матеріали VII Міжн. Наук.-практ. Конф. "Якість технологій - якість життя" (22-27 лютого 2014 р., Польща, м. Перемишль) №1/4, 2014. С. 21-23. додатки

Додаток А

Акти впровадження

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО НАУКОВО- ВИРОБНИЧИЙ КОМПЛЕКС "ФОТОПРИЛАД"

вул. Б. Вишневецького, 85, м. Черкаси, 18001 тел./факс (0472) 45-12-75, (0472) 37-45-31 тел. (0472) 36-03-08 E – mail: oaspu@photopribor.ck.ua

6.08.16	Nº 4465 329
на №	від

STATE CONCERN «UKROBORONPROM»

STATE ENTERPRISE RESEARCH AND PRODUCTION COMPLEX "PHOTOPRYLAD"

85, B. Vyshnevetsky St., Cherkasy, 18001
tel./fax (0472) 45-12-75, (0472) 37-45-31
tel. (0472) 36-03-08
E - mail: oaspu@photopribor.ck.ua

AKT

що результати наукових досліджень, Цим підтверджується, які опубліковано в наукових статях, монографіях та узагальнено у дисертації на Киричука Юрія доктора технічних наук здобуття вченого ступеня «Автоматизована приладова інформаційно-Володимировича на тему вимірювальна система» використано при дослідженні шляхів покращення інформаційно-вимірювальних тактико-технічних характеристик існуючих систем (IBC), а також впроваджено у дослідні зразки виробів по тематиці НВК «Фотоприлад».

Впроваджено:

запропоновані нові методи та засоби забезпечення більш високої точності IBC;

- розроблений метод визначення вимог до параметрів IBC;

 запропоновано базову функціональну кінематичну і структурну схеми IBC;

 новий прецизійний вимірювач кутів для попередньої високоточної наземної виставки навігаційних елементів IBC;

- методи структурної та параметричної оптимізації прецизійної IBC.

Акт не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.



В.І.Гордієнко

Відкрите акціонерне товариство «Науково-виробничий комплекс



Open Joint Stock Company «Scientific Industrial Complex

«KYIV AUTOMATIC PLANT n.a. G. PETROVSKY»

«КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ ім. Г.І. ПЕТРОВСЬКОГО»

вул. Старокиївська, 10, м. Київ, 04116 Україна Тел./факс: +38044-236-62-75 10 Starokyivska str., Kyiv , 04116, Ukraine Tel/fax: +38044-236-62-75

http://www.kza.com.ua E-mail: kza@list.ru

20 р. вих. № 501/

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Киричука Юрія Володимировича "Автоматизована приладова інформаційновимірювальна система"

Даним актом підтверджується прийняття до впровадження результатів наукових досліджень Киричука Юрія Володимировича, викладених в дисертаційній роботі на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук "Автоматизована приладова інформаційно-вимірювальна система". Прийнято до впровадження результати, що пов'язані з дослідженням шляхів покращення тактико-технічних характеристик стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки, а також впроваджено в дослідні зразки виробів по тематиці ВАТ «НВК «Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського» при участі автора.

Даний акт не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Перший заступник Голови Правління – Генерального директора, Головний інженер



В.Г. Цірук



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ ODESA STATE ACADEMY OF TECHNICAL REGULATION AND GUALITY

65020, м. Одеса, вул. Ковальська, 15 тел.: (048) 726-65-92 фикс. (048) 726-76-95

14.12.2015 p. N237

ЗАТВЕРДЖУЮ Проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків ОДАТРЯ д.тн, ffpod ПД. Братченко

e-mail:odatry@gmail.com www.kachestvo.od.ua

АКТ

впровадження у навчальний процес результатів дисертації на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук Киричука Юрія Володимировича на тему "Автоматизована приладова інформаційновимірювальна система"

Цей акт складений про те, що результати наукових досліджень, які опубліковані у наукових статтях та узагальнені в дисертації на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук Киричука Юрія Володимировича на тему "Автоматизована приладова інформаційно-вимірювальна система" апробовані у навчальному процесі кафедри метрології та метрологічного забезпечення у навчальних дисциплінах "Механічні вимірювання", "Метрологічне забезпечення виробництва" та "Основи взаємозамінності деталей та вузлів".

Зокрема було використано наступні впровадження:

 методи параметричної оптимізації для збільшення точності механічних вимірювань визначальних параметрів досліджуваної інформаційно-вимірювальні системи на стадії проектування IBC;

– конструкцію та принцип дії високоточного автоматизованого вимірювача кута з кільцевим лазером більшої точності (0,3"), що досягнута при калібруванні за рахунок повної автоматизації вимірювань кутів і збільшення швидкодії вимірювань з використанням ЕОМ та додаткового коригування самих вимірювань, завдяки введення у математичну модель ВК спеціальних поправок від впливу кутової швидкості обертання Землі, дрейфу масштабного коефіцієнту КЛ;

використання нейронних мереж для зменшення інструментальних похибок навігаційних елементів нової IBC.

Зав. кафедри метрології та метрологічного забезпечення, д.т.н., доцент

К.Ф. Боряк

Додаток Б

Програма пошуку екстремуму цільової функції методом модифікованого прямого перебору

{Пошук екстремуму цільової функції методом модифікованого прямого перебору}

uses crt;

const Eps=0.00001;

label 1,2,3;

```
var X1, X2, X1min, X1max, X2min, X2max, DeltaX1, DeltaX2, SX1, SX2,
```

Q, Qopt, X1opt, X2opt, Eps1, Eps2, Eps10, Eps20:real;

A:array[0..5] of real;

Step:array[1..500,1..3] of real;

i, j, s, ns, Control:integer;

N:real;

```
P:longint; function Y(X1,X2:real):real;
```

begin

Y:=A[0]+A[1]*X1+A[2]*X2+A[3]*X1*X2+A[4]*X1*X1+

A[5]*X2*X2

end;

begin

ClrScr;

WriteLn(' Програма N1');

WriteLn(' Оптимізація цільової функції системи методом модифікованого прямого перебору ');

WriteLn; WriteLn;

WriteLn('Визначити функцію Q(X1 ,X2), задав коефіцієнти A0-A5 поліному ');

WriteLn('Y=A0+A1*X1+A2*X2+A3*X1*X2+A4*X1 ^2+A5*X2^2');

for i:=0 to 5 do

begin Write('A',i:1,'='); ReadLn(A[i]); end;

Write(' Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму'); Write(' по координаті X1: EpsX1= '); ReadLn(Eps10);

Write(' Вкажіть відносну помилку визначення положення екстремуму');

Write(' по координат? X2: EpsX2= '); ReadLn(Eps20);

WriteLn(' Визначте простір пошуку оптимуму функції Q(X1,X2), задано');

WriteLn(' Границі інтервалів зміни аргументів функції:');

Write(' X1min= '); ReadLn(X1min);

Write(' X1max= '); ReadLn(X1max);

Write(' X2min= '); ReadLn(X2min);

Write(' X2max= '); ReadLn(X2max);

WriteIn(' Вкажіть кількість відрізків N, на яке розбиваються інтервали');

Write(' Зміна аргументів X1 и X2: N= '); ReadLn(N);

SX1:=X1max-X1min; SX2:=X2max-X2min;

DeltaX1:=SX1/N; DeltaX2:=SX2/N;

WriteLn(' Крок решітки по координаті X1: DeltaX1=', DeltaX1:5:4);

WriteLn(' Крок решітки по координаті X2: DeltaX2=', DeltaX2:5:4);

Write(' Вкажіть вид екстремуму (Max - 0/ Min -1)');

Write(':');

ReadLn(Control);

```
if Control=0 then Qopt:=-1e20 else Qopt:=1e20;
```

P:=0; 1:X1:=X1min;

While X1 <= (X1max+Eps) do begin X2:=X2min;

While X2 <= (X2max+Eps) do begin Q:=Y(X1,X2); P:=P+1;

if P <= 500 then begin

Step[p,1]:=X1; Step[p,2]:=X2; Step[p,3]:=Q;

end;

if Control = 1 then

```
if Q < Qopt then begin
```

```
Qopt:=Q; X1opt:=X1; X2opt:=X2
```

end;

if Control = 0 then if Q >Qopt then begin

Qopt:=Q; X1opt:=X1; X2opt:=X2 end;

X2:=X2+DeltaX2; end; X1:=X1+DeltaX1;

end;

WriteLn;

WriteLn(' В поточній області пошуку отриманого роз`язка:');

WriteLn('X1opt:',X1opt:6:4,' X2opt:',X2opt:6:4,' Qopt;',Qopt:6:4,';');

WriteLn(' Витрати на пошук (кількість обчислень функції Q):',P:5);

WriteLn; WriteLn;

WriteLn('Аналіз отриманого розв`язку;');

```
if (X1opt < (X1min+Eps)) or (X1opt >(X1max-Eps)) or (X2opt < (X2min+Eps))
```

```
or (X2opt >(X2max-Eps))
```

```
then begin if (X1opt >(X1max-Eps)) then
```

begin

WriteLn(' Отриманий розв`язок лежить на правій границі області пошуку X1xmax.');

```
X1min:=X1max-DeltaX1; X1max:=X1min+SX1;
```

end;

```
if X1opt < (X1min+Eps) then begin
```

WriteLn(' Отриманий розв`язок лежить на лівій границі області пошуку X1min.');

```
X1max:=X1min+DeltaX1; X1min:=X1max-SX1;
```

end;

```
if X2opt > (X2max-Eps) then begin
```

WriteLn(' Отриманий розв`язок лежить на верхній границі області пошуку X2max.');

X2min:=X2max-DeltaX2; X2max:=X2min+SX2

end;

if X2opt < (X2min+Eps) then begin

Writeln(' Отриманий розв`язок лежить на нижній границі області пошуку X2min.');

X2max:=X2min+DeltaX2; X2min:=X2max-SX2; end;

WriteIn('Область пошуку ЗСУНУТА. Пошук продовжується в нових

границях:');

WriteLn('X1min:',X1min:6:4,' X1max:',X1max:6:4);

Writeln('X2min:',X2min:6:4,' X2max:',X2max:6:4);

WriteLn; ReadLn;

goto 1 end else begin

WriteLn(' Екстемум функції Q(x1,x2) лежить в середині області пошуку ');

{WriteLn('X1opt:',X1opt:6:3,' X2opt:',X2opt:6:3,' Qopt:',Qopt:7:3,';');}

WriteLn(' Абсолютна помилка визначення координат точки екстремуму ');

Write('Для X1opt не перевищує величину ',DeltaX1:6:4);

WriteLn(' и для X2opt не перевищує величину ',DeltaX2:6:4);

Eps1:=abs(DeltaX1/X1opt); Eps2:=abs(DeltaX2/X2opt);

WriteLn(' Відносна помилка визначення координат точки екстремуму ');

Write('Для Х1орt складає величину ', Eps1:6:4);

WriteLn(' и для X2opt складає величину ',Eps2:6:4);

if (Eps1>Eps10) or (Eps2>Eps20) then begin

X1min:=X1opt- DeltaX1; X1max:=X1opt+ DeltaX1;

X2min:=X2opt-DeltaX2; X2max:=X2opt+DeltaX2;

SX1 :=X1max-X1min; SX2:=X2max-X2min;

DeltaX1 :=SX1/N; DeltaX2:=SX2/N;

Writeln(' Область пошуку ЗМЕНШЕНА. Пошук продовжується в нових границях:');

WriteLn('X1min:',X1min:6:4,' X2max:',X2max:6:4);

WriteLn('X2min:', X2min:6:4,' X2max:',X2max:6:4);

WriteLn(' Новий крок решітки по координаті X1: DeltaX1 =', DeltaX1:5:4); WriteLn(' Новий крок решітки по координаті X2: DeltaX2 =', DeltaX2:5:4); WriteLn; ReadLn; goto 1 end;

WriteLn(' Рішення задачі отримано!');

X1opt:=(A[2]*A[3]-2*A[1]*A[5])/(4*A[4]*A[5]-A[3]*A[3]);

X2opt:=(A[1]*A[3]-2*A[2]*A[4])/(4*A[4]*A[5]-A[3]*A[3]);

Qopt:=Y(X1opt,X2opt);

WriteLn(' Точний розв`язок, отриманий аналітично:');

```
WriteLn('X1opt:',X1opt:6:4,' X2opt:',X2opt:6:4,' Qopt:',Qopt:7:4,';');
WriteLn;
```

3:WriteLn(' Вкажіть номер точки, починаючи з якої ви хочете ');

Write(' Вивести результати пошуку: Number='); ReadLn(ns);

```
WriteLn(' Вкажіть кількість точок(<=46), для яких ви хочете ');
```

```
Write(' Вивести результати пошуку: Steps='); ReadLn(s);
```

j:=s div 2;

```
WriteLn('N шага X1 X2 Q N шага X1 X2 Q');
```

```
for i:=ns to ns+j-1 do
```

```
WriteLn('',i:3,'',Step[i,1]:6:3,'',Step[i,2]:6:3,'',Step[i,3]:6:3,'',i+j:3,'');
WriteLn(Step[i+j,1]:6:3,'',Step[i+j,2]:6:3,'',Step[i+j,3]:6:3);
```

```
Write(' Виведення результатів продовжувати?(1 - так/0 - ні)');
```

ReadLn(Control);

```
if Control = 1 then goto 3;
```

```
{ReadLn; ReadLn;}
```

end;

end.

END.

Програма оптимізації цільової функції системи методом градієнта

{пошук екстремуму цільової функції методом градієнта}

uses crt;

label 1,2,3,4;

var X1, X2, X10, X20, DeltaX, Q, dQx1, dQx2, Qopt, X1opt, X2opt,

DX1opt, DX2opt, ModG, h, Eps:real;

A:array[0..5] of real;

Step:array[0..500,1.6] of real;

i, j, s, ns, N, Control, Control1:integer;

P:longint;

```
function Y(X1,X2:real):real;
```

begin

```
Y:=A[0]+A[1]*X1+A[2]*X2+A[3]*X1*X2+A[4]*X1*X1+A[5]*X2*X2
```

end;

begin

ClrScr;

Writeln(' Дослідження N 2');

Writeln(' Оптимізація цільової функції системи градієнтним методом ');

WriteLn; WriteLn;

WriteLn(' Знайдіть функцію Q(X1,X2),задав коефіцієнти А0-А5 полінома

');

```
WriteLn('Y=A0+A1*X1+A2*X2+A3*X1*X2+A4*X1^2+A5*X2^2');
```

for i:=0 to 5 do begin

```
Write('A',i:1,'='); ReadLn(A[i]);
```

end;

Write(' Вкажіть вид екстремуму (Max: +1/ Min: -1):'); ReadLn(Control);

Write(' Задайте допустиме відхилення градієнта от 0 - Eps:'); ReadLn(Eps);

WriteLn(' Задайте величину зміщення точки по координатним осям при визначенні:');

Write(' часткових похідних dQ(X1,X2)/dXi: DeltaX ='); ReadLn(DeltaX);

WriteLn(' Задайте початкові координати робочої точки:');

Write('X10='); ReadLn(X10);

Write('X20='); ReadLn(X20);

3:Write(' Задайте коефіцієнт h, що пов'язує переміщення з модулем градієнта:');

ReadLn(h);

4:X1:=X10; X2:=X20; P:=0; ModG:= 1e9; Q:=1e9;

while (ModG > Eps)and(Q<>Y(X1,X2)) do begin

Q:=Y(X1,X2);

dQx1:=(Y(X1+DeltaX,X2)-Q)/DeltaX;

dQx2:=(Y(X1,X2+DeltaX)-Q)/DeltaX;

ModG:=Sqrt(sqr(dQx1)+sqr(dQx2));

if P <= 500 then begin

```
Step[p,1]:=X1; Step[p,2]:=X2; Step[p,3]:=Q; Step[p,4]:=dQx1;
Step[p,5]:=dQx2; Step[p,6]:=ModG*h;
```

end;

WriteIn;

WriteLn('Для робочої точки Р с номером ', P:1,' отримано :');

WriteLn('X1=',X1:7:4,'; "X2=',X2:7:4,';','Q(X1,X2)=',Q:7:4,';');

WriteLn(' dQx1/dx1=',dQx1:7:5,'; dQx1/dx2=',dQx1:7:5,';');

WriteLn(' Величина модуля градієнта функції Q:Mod(G)=',ModG:6:4,';');

WriteLn(' Величина кроку H*Mod(G):',h*ModG:6:5,'.');

P:=P+1;

X1:=X1+Control*h*dQx1;

```
X2:=X2+Control*h*dQx2;
```

ReadIn;

end;

if ModG <= Eps then begin

Writeln;

Writein(' Робоча точка Р с номером ', P-1:2,' представляє рішення!');

WriteLn('X1=',X1:6:3,'; X2=',X2:6:3,'; Q(X1,X2)=',Q:6:4,';');

WriteLn(' Величина модуля градієнта функції Q: Mod(G)=',ModG:6:4,';');

WriteLn(' Максимальна можлива абсолютна похибка визначення ');

WriteLn(' Координат точки екстремуму цільової функції Q складає:');

WriteLn(' Для координати X1 - ',dQx1*h:7:5,', для координати X2 - ',dQx2*h:7:5);

WriteLn(' Витрати на пошук (кількість вичислений функції Q):',p*3:5);

```
X1opt:=(A[2]*A[3]-2*A[1]*A[5])/(4*A[4]*A[5]-A[3]*A[3]);
```

X2opt:=(A[1]*A[3]-2*A[2]*A[4])/(4*A[4]*A[5]-A[3]*A[3]);

Qopt:=Y(X1opt,X2opt);

Write(' Точний розв'язок (аналітичний):');

```
WriteLn('X1opt:',X1opt:6:4,' X2opt:',X2opt:6:4,' Qopt:',Qopt:7:4,';');
```

WriteLn;

```
Write(' Траєкторію пошуку виводити?(1-так/0=ні)');
```

```
ReadLn(Control1);
```

if Control1=0 then goto 1;

2:WriteLn(' Вкажіть номер точки, починаючи з якої ви хочете');

```
Write(' вивести траєкторію пошуку: Number='); ReadLn(ns);
```

Write(' Вкажіть кількість точок, що виводиться (<=18) в траєкторії: Steps=');

ReadLn(s);

for i:=ns to ns+s-1 do

WriteLn('Step:',i:2,' X1=',Step[i,1]:6:3,'X2=',Step[i,2]:6:3,

'Q=',Step[i,3]:6:3,' dQx1=',Step[i,4]:6;3, ' dQx2=',Step[i,5]:6:3,

'ModG*h=',Step[i,6).6:3);

Write ('Виведення результатів продовжити?(1 - так/0 - ні)'); ReadLn(Control1);

if Control1=1 then goto 2;

```
1: Write(' Повторити розв'язок задачі при новому значенні h ?(1-так/0=ні)');
ReadLn(Control1);
```

```
if Control1=1 then goto 3; end else begin
```

WriteIn;

```
Writeln(' Особливий випадок! Значення цільової функції в поточній точці
```

');

WriteLn(' співпадає зі значенням її в попередній точці. Якщо при цьому ');

WriteLn(' співпадає модулі градієнтів, то можливе зациклення процесу-

');

```
WriteLn(' Доцільне повторення пошуку з використанням іншої');
```

WriteLn(' початкової точки.');

```
WriteLn ('Задайте початкові координати робочої точки:');
```

```
Write('X10=');ReadLn(X10);
```

```
Write('X20='); ReadLn(X20);
```

goto 4;

end

end.

Додаток Г

Програма для ідентифікації динамічних характеристик IBC рухомих об'єктів

program Prog3;

uses Crt, Graph;

label 1;

type array_data=array [0..1023] of real;

inf_line=string[80];

di=array [1..7] of byte;

array_string=array [1..5] of string [16];

var x,y,korxx,korxy:array_data;

x101:di;

```
kx,ky:array [0..2] of real;
```

a,b:real;

i,j,n,m,toy,tx:integer;

lx,ly,l1,l2:inf_line;

valstr:array_string;

const menu:array [1..25] of string [80]=

('

'ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОУ ПО МЕТОДУ ВКФ ',

۰,

ПАРАМЕТР	ДОПУСТИМІ ЗНАЧЕННЯ	ПОТОЧНЕ ЗНАЧЕННЯ
1. ТИП ДИНАМІЧНОГО	1 – АПЕРІОДИЧНИЙ 1 ПОРЯДКУ	
ОБ"ЕКТА УПРАВЛІННЯ	2 - 2 ПОР. С ІНТЕГРАТОРАМИ	
J.		
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОУ,	1 - NEPEXIAHA	
Щ ЩО ВИЗНАЧАЄТЬСЯ Ш	2 – IMIIYJIBCHA	
3. кількість відліків	10 500	
ВХІДНОГО СИГНАЛУ		
))		
4. KOEØIUIEHT A	0 2	
П (ОХТИЗ)		
5. KOEØTUTEHT B	0 4	
(OY 2)		
1		



procedure HRW(var y:array_data;n,type_gr:integer;max,min:real;

var lx,ly,l1,l2:inf_line);

var

```
Gd, Gm ,i,x1,x2,y1,y2: Integer;
```

ch:char;

```
my0,my1,mx:real;
```

I3,I4:string[20];

begin

```
Gd := CGA; GM:=CGAHi; InitGraph(Gd, Gm, ");
```

```
if GraphResult <> grOk then Halt(1);
```

```
outtextxy(0,183,I1);
```

```
outtextxy(0,192,I2);
```

```
case type_gr of
```

0: begin

```
my0:=max/5; mx:=(n+5) div 5;
line(80,0,80,169); line(80,169,639,169);
line(80,0,78,4); line(80,0,82,4);
line(639,169,634,167); line(639,169,634,171);
outtextxy(64,172,'0');
for i:=1 to 5 do begin
```

```
line(78,169-i*trunc(150/5),82,169-i*trunc(150/5));
     str((my0*i):9:3,l3);
     outtextxy(0,169-4-i*30,l3);
   end;
   for i:=1 to 5 do begin
     line(80+i*trunc(500/5),167,80+i*trunc(500/5),171);
     str((mx*i):9:3,l4);
     outtextxy(80-20+i*100,172,l4);
   end;
   outtextxy(0,0,ly);
   outtextxy(579,158,lx);
   x1:=80:
   y1:=169-trunc(y[0]*150/(my0*5));
   for i:=1 to n do begin
     x2:=80+trunc(500.0*i/(mx*5));
     y2:=169-trunc(y[i]*150/(my0*5));
     line(x1,y1,x2,y2);
     x1:=x2; y1:=y2;
   end;
end;
1: begin
   my0:=max/5; my1:=min/5; mx:=(n+4) div 5;
   if min>max then my0:=my1;
   line(80,0,80,169); line(80,95,639,95);
   line(80,0,78,4); line(80,0,82,4);
   line(639,95,634,93); line(639,95,634,97);
   outtextxy(64,92,'0');
   for i:=1 to 5 do begin
```

```
line(78,95-i*trunc(75/5),82,95-i*trunc(75/5));
```

```
str((my0*i):9:3,l3);
         outtextxy(0,95-4-i*15,l3);
       end;
       for i:=1 to 5 do begin
         line(78,95+i*trunc(75/5),82,95+i*trunc(75/5));
         str((-my0*i):9:3,l3);
         outtextxy(0,95-4+i*15,l3);
       end;
       for i:=1 to 5 do begin
         line(80+i*trunc(500/5),93,80+i*trunc(500/5),97);
         str((mx*i):9:3,l4);
         outtextxy(80-20+i*100,97,I4);
       end;
       outtextxy(0,0,ly);
       outtextxy(579,84,lx);
       x1:=80;
       y1:=95-trunc(y[0]*75/(my0*5));
       for i:=1 to n do begin
         x2:=80+trunc(500.0*i/(mx*5));
         y2:=95-trunc(y[i]*75/(my0*5));
         line(x1,y1,x2,y2);
         x1:=x2; y1:=y2;
       end;
    end;
  end;
  ch:=readkey;
CloseGraph;
```

end;

```
procedure ViewArray2(var array1,array2:array_data;
```

```
n:integer;var line1,line2:inf_line);
```

label scroll;

```
var sizepage,m1,m2,i,j,k,l1,l2:integer;
```

ch:char;

funkey,keytrue:boolean;

begin

```
m1:=0; m2:=n;
```

```
sizepage:=20;
```

if n<19 then sizepage:=n+1;

clrscr;

```
writeln (line1); writeln (line2);
```

window (1,5,80,25);

```
11:=0; 12:=sizepage-1;
```

```
keytrue:=true;
```

repeat;

```
if keytrue then begin
```

```
if I1<m1 then begin I1:=m1; I2:=m1+sizepage-1; end;
```

```
if I2>m2 then begin I1:=m2-sizepage+1; I2:=m2; end;
```

clrscr;

```
for i:=l1 to l2 do writeln (i:5,array1[i]:20:3,array2[i]:20:3);
```

end

else begin

```
sound(400); delay(500); nosound;
```

end;

scroll:

```
keytrue:=false;
```

```
ch:=readkey;
```

```
if ch<>#0 then funkey:=false
```

else begin funkey:=true; ch:=readkey; end; if funkey then begin case ch of #80: begin keytrue:=true; if I2+1<=m2 then begin 11:=11+1; 12:=12+1; writeln (l2:5,array1[l2]:20:3,array2[l2]:20:3); end; goto scroll; end; #72: begin keytrue:=true; if I1-1>=m1 then begin l1:=l1-1; l2:=l2-1; gotoxy(1,1); insline; writeln (l1:5,array1[l1]:20:3,array2[l1]:20:3); gotoxy(1,21); insline; end; goto scroll; end; #81: begin keytrue:=true; l1:=l1+sizepage; l2:=l2+sizepage; end;

#73: begin

```
keytrue:=true;
```

```
l1:=l1-sizepage; l2:=l2-sizepage;
```

end;

```
#79: begin
```

keytrue:=true;

```
l1:=m2-sizepage+1; l2:=m2;
```

end;

#71: begin

keytrue:=true;

```
I1:=m1; I2:=m1+sizepage-1;
```

end

end;

end;

```
until (ch=#13) or (ch=#27);
```

```
window(1,1,80,25);
```

clrscr;

end;

```
procedure readintmenu5(var toy,tx,n:integer; var a,b:real);
```

var

i,code:integer;

ch:char;

modify:array [1..5] of boolean;

run:boolean;

begin

textbackground(BLUE);

```
TEXTCOLOR(WHITE);
```

clrscr;

```
for i:=1 to 25 do write(menu[i]);
```
```
textbackground(black);
for i:=1 to 5 do begin
  gotoxy(62,7+(i-1)*3);
  write(' ':16);
  gotoxy(62,7+(i-1)*3);
  write(valstr[i]);
  modify[i]:=false;
end;
code:=0;
i:=1;
gotoxy(62+length(valstr[1]),7);
run:=false;
repeat;
    ch:=readkey;
    case ch of
    #27: BEGIN
         textbackground(BLACK);
         TEXTCOLOR(LIGHTGRAY);
         halt(0);
```

END;

#43,#45,#46,#48..#57: begin

```
if modify[i]=false then begin
  modify[i]:=true;
  valstr[i]:=";
  gotoxy(62,7+(i-1)*3);
  write(' ':16);
  gotoxy(62,7+(i-1)*3);
end;
if length(valstr[i])<16 then begin</pre>
```

```
valstr[i]:=valstr[i]+ch;
                    write(ch);
                  end;
               end;
#8: begin
      if length(valstr[i])<>0 then begin
        write(#8#32#8);
        delete(valstr[i],length(valstr[i]),1);
                  if modify[i]=false then begin
                    modify[i]:=true;
                    valstr[i]:=";
                    gotoxy(62,7+(i-1)*3);
                    write(' ':16);
                    gotoxy(62,7+(i-1)*3);
                  end;
      end;
#13: begin
```

modify[i]:=false; i:=i+1;

```
if i>5 then i:=5;
```

```
gotoxy(62+length(valstr[i]),7+(i-1)*3);
```

end;

end;

#0: begin

```
ch:=readkey;
case ch of
#72: begin
      modify[i]:=false;
      i:=i-1;
```

```
if i < 1 then i := 1;
                 gotoxy(62+length(valstr[i]),7+(i-1)*3);
              end;
           #80: begin
                 modify[i]:=false;
                 i:=i+1;
                 if i>5 then i:=5;
                 gotoxy(62+length(valstr[i]),7+(i-1)*3);
              end;
           #60: run:=true;
           end;
       end;
    end:
until run;
val(VALStr[1], toy, code);
if code <> 0 then
  WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[2], tx, code);
if code <> 0 then
 WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[3], n, code);
if code <> 0 then
  WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[4], a, code);
if code <> 0 then
  WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[5], b, code);
if code <> 0 then
 WriteLn('Error at position: ', code);
```

```
procedure KOR_SUM_XY(var x,y,korxy:array_data;m:integer);
var i,j:integer;
sum:real;
begin
for j:=0 to m-1 do begin
gotoxy(2,wherey); write(j:5);
sum:=0;
for i:=0 to m do sum:=sum+y[i+j]*x[i]/(m+1);
korxy[j]:=sum;
end;
```

end;

```
function RAND127(var x101:di):integer;
```

var i:integer;

r:byte;

begin

```
r:=x101[7] xor x101[4];
for i:=7 downto 2 do x101[i]:=x101[i-1];
x101[1]:=r;
case r of
1: rand127:=1;
0: rand127:=-1;
end;
```

end;

```
function RAND15(var x101:di):integer;
```

var i:integer;

r:byte;

begin

```
r:=x101[4] xor x101[3];
for i:=4 downto 2 do x101[i]:=x101[i-1];
x101[1]:=r;
case r of
1: rand15:=1;
0: rand15:=-1;
end;
end;
```

procedure cgadriver;external;

{\$L c:\program\bp7\bgi\CGADRV.OBJ}

begin

clrscr;

```
if registerbgidriver(@cgadriver)<0 then halt(0);
```

```
m:=0; n:=0;
```

```
valstr[1]:='1';
```

```
valstr[2]:='1';
```

```
valstr[3]:='16';
```

valstr[4]:='0.7';

valstr[5]:='0.8';

1: readintmenu5(toy,tx,n,a,b);

window(25,9,56,16);

clrscr;

for i:=1 to 8 do write(viewwind[i]);

gotoxy(3,5);

```
m:=n-1; n:=n*2-1;
   for i:=0 to 1023 do begin
     x[i]:=0; y[i]:=0; korxx[i]:=0; korxy[i]:=0;
   end;
   for i:=1 to 7 do begin
     x101[i]:=1;
   end;
   for i:=0 to 2 do begin
     kx[i]:=0; ky[i]:=0;
   end;
   case toy of
   1: begin
        ky[1]:=1-a;kx[0]:=a;
         case tx of
         1: begin
               for i:=1 to n do x[i]:=1.0;
               for i:=1 to n do begin
                 y[i]:=ky[1]*y[i-1]+kx[0]*x[i];
               end;
               I1:='ПЕРЕХІДНА ХАРАКТЕРИСТИКА АПЕРІОДИЧНОГО ОУ
1-ГО ПОРЯДКУ Y=h(t)';
                               ۰.
               12:='
               lx:='x'; ly:='Y=h(x)';
               hrw(y,m,0,2,0,lx,ly,l1,l2);
               window(1,1,80,25);
```

12:=' i x(i) h(x)';

ViewArray2(x,y,m,l1,l2);

end;

2: begin

```
for i:=1 to n do x[i]:=rand127(x101);
               for i:=1 to n do begin
                 y[i]:=ky[1]*y[i-1]+kx[0]*x[i];
               end;
               kor_sum_xy(x,y,korxy,m);
               I1:='ІМПУЛЬСНА ХАРАКТЕРИСТИКА АПЕРІОДИЧНОГО
ОУ 1-ГО ПОРЯДКУ Y=k(t)';
                               ';
               12:='
               lx:='x'; ly:='Y=h(x)';
               hrw(korxy,m,1,1,0,lx,ly,l1,l2);
               window(1,1,80,25);
               l2:=' i
                                x(i)
                                             k(x)';
               ViewArray2(x,korxy,m,l1,l2);
            end;
         end;
     end;
   2: begin
        ky[1]:=2-a-b; ky[2]:=a-1; kx[0]:=a; kx[1]:=b-a;
         case tx of
         1: begin
               for i:=1 to n do x[i]:=1.0;
               for i:=1 to n do begin
                 y[i]:=ky[1]*y[i-1]+ky[2]*y[i-2]+
                     kx[0]*x[i]+kx[1]*x[i-1];
               end;
               I1:='ПЕРЕХІДНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОУ 2-ГО ПОРЯДКУ';
               12:='
                               1
```

```
lx:='x'; ly:='Y=h(x)';
```

```
hrw(y,m,0,2,0,lx,ly,l1,l2);
```

```
window(1,1,80,25);
            l2:=' i
                                          h(x)';
                             x(i)
           ViewArray2(x,y,m,l1,l2);
         end;
     2: begin
           for i:=1 to n do x[i]:=rand127(x101);
           for i:=1 to n do begin
              y[i]:=ky[1]*y[i-1]+ky[2]*y[i-2]+
                  kx[0]*x[i]+kx[1]*x[i-1];
            end;
           kor_sum_xy(x,y,korxy,m);
           I1:='ІМПУЛЬСНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОУ 2-ГО ПОРЯДКУ';
                            ';
            12:='
           lx:='x'; ly:='Y=h(x)';
           hrw(korxy,m,1,1,0,lx,ly,l1,l2);
           window(1,1,80,25);
            l2:=' i
                                          k(x)';
                             x(i)
           ViewArray2(x,korxy,m,l1,l2);
         end;
     end;
  end;
end;
```

end.

goto 1;

Програма для дослідження методів адаптивної ідентифікації IBC program Prog4;

uses

Crt, Graph;

label 1;

type array_data=array [0..1023] of real;

inf_line=string[80];

di=array [1..7] of byte;

array_string=array [1..8] of string [16];

var x,y,ym,funcd,am,bm:array_data;

a,b,am0,bm0,amp,f,nf,s,ksi,funcdmax,ga,gb,maxk:real;

i,j,n,toy,ts,nstep:integer;

ch:char;

۱

lx,ly,l1,l2:inf_line;

valstr:array_string;

const menu:array [1..25] of string [80]=

('		
ПАРАМЕТР	ДОПУСТИМІ ЗНАЧЕННЯ	ПОТОЧНЕ ЗНАЧЕННЯ
 ТИП ОБ"ЄКТУ УПРАВЛІННЯ КОЕФІЦІЄНТ А (РАР-ОБ"ЄКТ) КОЕФІЦІЄНТ В (Р И РАР-ОБ"ЄКТИ) КІЛЬКІСТЬ ВІДЛІКІВ ВХІДНОГО СИГНАЛУ ПОЧАТКОВЕ ЗНАЧЕННЯ КОЕ МОДЕЛІ АМ(0) ПОЧАТКОВЕ ЗНАЧЕННЯ КОЕ МОДЕЛІ ВМ(0) КРОК ЗМІНИ КОЕФ. АМ И ВМ – S ТИП ВХІДНОГО СИГНАЛУ 	<pre>1-P Y(n)=B*X(n) 2-PAP Y(n)=-A*Y(n-1)+B*X(n) 0 10 0 10 10 500 0 8 0 8 0.01 1 1 - "1(t)" 2 - "БІЛЫЙ ШУМ" 3 - SIN</pre>	

F2-ВИКОНАННЯ ПРОГРАМИ "ESC"-ВИХІД');

viewwind:array [1..8] of string [32]=



procedure HRWD(var x,y:array_data;n,type_gr:integer;maxy,miny:real;

var lx,ly,l1,l2:inf_line);

var

```
Gd, Gm ,i,x1,x2,y1,y2,mxnum: Integer;
```

ch:char;

my0,my1,mx:real;

I3,I4:string[20];

begin

```
Gd := CGA; GM:=CGAHi; InitGraph(Gd, Gm, ");
```

```
if GraphResult <> grOk then Halt(1);
```

outtextxy(0,183,I1);

```
outtextxy(0,192,I2);
```

```
case type_gr of
```

0: begin

```
my0:=maxy/5; mxnum:=(n+4) div 5;
line(80,0,80,169); line(80,169,639,169);
line(80,0,78,4); line(80,0,82,4);
line(639,169,634,167); line(639,169,634,171);
outtextxy(64,172,'0');
for i:=1 to 5 do begin
line(78,169-i*trunc(150/5),82,169-i*trunc(150/5));
str((my0*i):9:3,I3);
outtextxy(0,169-4-i*30,I3);
```

```
for i:=1 to 5 do begin
```

```
line(80+i*trunc(500/5),167,80+i*trunc(500/5),171);
```

```
str((mxnum*i):5,l4);
```

```
outtextxy(80-20+i*100,172,I4);
```

end;

```
outtextxy(0,0,ly);
```

```
outtextxy(579,158,lx);
```

x1:=80;

```
y1:=169-trunc(y[0]*150/(my0*5));
```

```
for i:=1 to n do begin
```

```
x2:=80+trunc(500.0*i/(mxnum*5));
```

```
y2:=169-trunc(y[i]*150/(my0*5));
```

```
line(x1,y1,x2,y2);
```

```
x1:=x2; y1:=y2;
```

end;

end;

1: begin

```
my0:=maxy/5; my1:=miny/5; mxnum:=(n+4) div 5;
```

```
if miny>maxy then my0:=my1;
```

```
line(80,0,80,169); line(80,95,639,95);
```

```
line(80,0,78,4); line(80,0,82,4);
```

line(639,95,634,93); line(639,95,634,97);

```
outtextxy(64,92,'0');
```

```
for i:=1 to 5 do begin
```

```
line(78,95-i*trunc(75/5),82,95-i*trunc(75/5));
```

```
str((my0*i):9:3,l3);
```

```
outtextxy(0,95-4-i*15,l3);
```

```
end;
```

```
for i:=1 to 5 do begin
    line(78,95+i*trunc(75/5),82,95+i*trunc(75/5));
    str((-my0*i):9:3,l3);
    outtextxy(0,95-4+i*15,l3);
end;
for i:=1 to 5 do begin
    line(80+i*trunc(500/5),93,80+i*trunc(500/5),97);
    str((mxnum*i):5,l4);
    outtextxy(80-20+i*100,97,l4);
end;
outtextxy(80-20+i*100,97,l4);
end;
outtextxy(0,0,ly);
outtextxy(579,84,lx);
x1:=80;
y1:=95-trunc(y[0]*75/(my0*5));
for i:=1 to n do begin
```

```
x2:=80+trunc(500.0*i/(mxnum*5));
```

```
y2:=95-trunc(y[i]*75/(my0*5));
```

```
line(x1,y1,x2,y2);
```

```
x1:=x2; y1:=y2;
```

end;

2: begin

```
my0:=maxy/5; mx:=(x[n]-x[0])/5; mxnum:=(n+4) div 5;
line(80,0,80,169); line(80,169,639,169);
```

```
line(80,0,78,4); line(80,0,82,4);
```

line(639,169,634,167); line(639,169,634,171);

outtextxy(64,172,'0');

```
for i:=1 to 5 do begin
```

```
line(78,169-i*trunc(150/5),82,169-i*trunc(150/5));
```

```
str((my0*i):9:3,l3);
outtextxy(0,169-4-i*30,l3);
```

```
for i:=1 to 5 do begin
```

```
line(80+i*trunc(500/5),167,80+i*trunc(500/5),171);
```

```
str((x[0]+mx*i):9:3,l4);
```

```
outtextxy(80-20+i*100,172,I4);
```

end;

```
outtextxy(0,0,ly);
```

```
outtextxy(579,158,lx);
```

x1:=80;

```
y1:=169-trunc(y[0]*150/(my0*5));
```

```
for i:=1 to n do begin
```

```
x2:=80+trunc(500.0*i/(mxnum*5));
```

```
y2:=169-trunc(y[i]*150/(my0*5));
```

```
line(x1,y1,x2,y2);
```

```
x1:=x2; y1:=y2;
```

end;

end;

```
3: begin
```

```
my0:=maxy/5; my1:=miny/5; mx:=(x[n]-x[0])/5; mxnum:=(n+4) div 5;
```

if miny>maxy then my0:=my1;

line(80,0,80,169); line(80,95,639,95);

```
line(80,0,78,4); line(80,0,82,4);
```

line(639,95,634,93); line(639,95,634,97);

outtextxy(64,92,'0');

for i:=1 to 5 do begin

```
line(78,95-i*trunc(75/5),82,95-i*trunc(75/5));
```

```
str((my0*i):9:3,I3);
```

```
outtextxy(0,95-4-i*15,I3);
end;
for i:=1 to 5 do begin
line(78,95+i*trunc(75/5),82,95+i*trunc(75/5));
str((-my0*i):9:3,I3);
outtextxy(0,95-4+i*15,I3);
end;
for i:=1 to 5 do begin
```

```
line(80+i*trunc(500/5),93,80+i*trunc(500/5),97);
```

```
str((x[0]+mx*i):9:3,l4);
```

```
outtextxy(80-20+i*100,97,I4);
```

```
outtextxy(0,0,ly);
```

```
outtextxy(579,84,lx);
```

x1:=80;

```
y1:=95-trunc(y[0]*75/(my0*5));
```

```
for i:=1 to n do begin
```

```
x2:=80+trunc(500.0*i/(mxnum*5));
```

```
y2:=95-trunc(y[i]*75/(my0*5));
```

```
line(x1,y1,x2,y2);
```

```
x1:=x2; y1:=y2;
```

end;

end;

5: begin

```
my0:=maxy/5; mxnum:=(n+4) div 5;
line(80,0,80,169); line(80,169,639,169);
line(80,0,78,4); line(80,0,82,4);
line(639,169,634,167); line(639,169,634,171);
outtextxy(64,172,'0');
```

```
for i:=1 to 5 do begin
  line(78,169-i*trunc(150/5),82,169-i*trunc(150/5));
  str((my0*i):9:3,l3);
  outtextxy(0,169-4-i*30,l3);
end;
for i:=1 to 5 do begin
  line(80+i*trunc(500/5),167,80+i*trunc(500/5),171);
  str((mxnum*i):5,14);
  outtextxy(80-20+i*100,172,I4);
end;
outtextxy(0,0,ly);
outtextxy(579,158,lx);
setlinestyle(solidIn,0,thickwidth);
x1:=80;
y1:=169-trunc(x[0]*150/(my0*5));
for i:=1 to n do begin
  x2:=80+trunc(500.0*i/(mxnum*5));
  y2:=169-trunc(x[i]*150/(my0*5));
  line(x1,y1,x2,y2);
  x1:=x2; y1:=y2;
end;
setlinestyle(solidIn,0,normwidth);
x1:=80;
y1:=169-trunc(y[0]*150/(my0*5));
for i:=1 to n do begin
```

```
x2:=80+trunc(500.0*i/(mxnum*5));
```

y2:=169-trunc(y[i]*150/(my0*5));

line(x1,y1,x2,y2);

x1:=x2; y1:=y2;

```
end;
end;
end;
ch:=readkey;
CloseGraph;
```

```
end;
```

```
procedure ViewArray2(var array1,array2:array_data;
```

```
n:integer;var line1,line2:inf_line);
```

label scroll;

```
var sizepage,m1,m2,i,j,k,l1,l2:integer;
```

ch:char;

funkey,keytrue:boolean;

begin

```
m1:=0; m2:=n;
```

```
sizepage:=20;
```

```
if n<19 then sizepage:=n+1;
```

clrscr;

```
writeln (line1); writeln (line2);
```

```
window (1,5,80,25);
```

```
11:=0; 12:=sizepage-1;
```

keytrue:=true;

repeat;

```
if keytrue then begin
```

```
if I1<m1 then begin I1:=m1; I2:=m1+sizepage-1; end;
```

```
if I2>m2 then begin I1:=m2-sizepage+1; I2:=m2; end;
```

clrscr;

```
for i:=l1 to l2 do writeln (i:5,array1[i]:20:3,array2[i]:20:3);
```

end

else begin

```
sound(400); delay(500); nosound;
```

end;

scroll:

keytrue:=false;

ch:=readkey;

if ch<>#0 then funkey:=false

else begin

funkey:=true;

ch:=readkey;

end;

if funkey then begin

case ch of

#80: begin

keytrue:=true;

if I2+1<=m2 then begin

l1:=l1+1; l2:=l2+1;

writeln (l2:5,array1[l2]:20:3,array2[l2]:20:3);

end;

goto scroll;

end;

#72: begin

goto scroll;

end;

#81: begin

keytrue:=true;

l1:=l1+sizepage; l2:=l2+sizepage;

end;

#73: begin

keytrue:=true;

l1:=l1-sizepage; l2:=l2-sizepage;

end;

#79: begin

keytrue:=true;

```
l1:=m2-sizepage+1; l2:=m2;
```

end;

#71: begin

keytrue:=true;

```
l1:=m1; l2:=m1+sizepage-1;
```

end

end;

end;

```
until (ch=#13) or (ch=#27);
```

```
window(1,1,80,25);
```

clrscr;

end;

procedure readintmenu8(var toy:integer; var a,b:real; var n:integer;

var am0,bm0,s:real; var ts:integer);

var

i,code:integer;

ch:char;

```
modify:array [1..8] of boolean;
run:boolean;
```

begin

textbackground(BLUE);

TEXTCOLOR(WHITE);

clrscr;

for i:=1 to 25 do write(menu[i]);

textbackground(black);

for i:=1 to 8 do begin

```
gotoxy(62,7+(i-1)*2);
```

write(' ':16);

```
gotoxy(62,7+(i-1)*2);
```

```
write(valstr[i]);
```

```
modify[i]:=false;
```

end;

```
code:=0;
```

```
i:=1;
```

```
gotoxy(62+length(valstr[1]),7);
```

run:=false;

repeat;

```
ch:=readkey;
```

case ch of

```
#27: BEGIN
```

textbackground(BLACK);

```
TEXTCOLOR(LIGHTGRAY);
```

halt(0);

END;

```
#43,#45,#46,#48..#57: begin
```

```
if modify[i]=false then begin
                         modify[i]:=true;
                         valstr[i]:=";
                         gotoxy(62,7+(i-1)*2);
             write(' ':16);
             gotoxy(62,7+(i-1)*2);
             end;
             if length(valstr[i])<16 then begin
             valstr[i]:=valstr[i]+ch;
            write(ch);
            end;
          end;
    #8: begin
    if length(valstr[i])<>0 then begin
            write(#8#32#8);
             delete(valstr[i],length(valstr[i]),1);
                       if modify[i]=false then begin
                         modify[i]:=true;
               valstr[i]:=";
               gotoxy(62,7+(i-1)*2);
               write(' ':16);
               gotoxy(62,7+(i-1)*2);
                       end;
           end;
       end;
#13: begin
   modify[i]:=false;
   i:=i+1;
```

```
if i>8 then i:=8;
```

```
gotoxy(62+length(valstr[i]),7+(i-1)*2);
   end;
   #0: begin
      ch:=readkey;
      case ch of
      #72: begin
         modify[i]:=false;
         i:=i-1;
         if i < 1 then i := 1;
         gotoxy(62+length(valstr[i]),7+(i-1)*2);
         end;
      #80: begin
         modify[i]:=false;
         i:=i+1;
         if i>8 then i:=8;
                 gotoxy(62+length(valstr[i]),7+(i-1)*2);
         end;
      #60: run:=true;
         end;
    end;
   end;
until run;
val(VALStr[1], toy, code);
if code <> 0 then
  WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[2], a, code);
if code <> 0 then
 WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[3], b, code);
```

```
if code <> 0 then
  WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[4], n, code);
if code <> 0 then
  WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[5], am0, code);
if code <> 0 then
 WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[6], bm0, code);
if code <> 0 then
  WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[7], s, code);
if code <> 0 then
  WriteLn('Error at position: ', code);
val(VALStr[8], ts, code);
if code <> 0 then
```

WriteLn('Error at position: ', code);

end;

```
procedure DS(var x:array_data;n,ts:integer;amp,f,nf:real);
```

var i:integer;

begin

case ts of

1: begin

```
for i:=0 to n do x[i]:=amp;
```

end;

2: begin

```
for i:=0 to n do x[i]:=amp*random;
```

end;

3: begin

```
nf:=nf*(pi/180);
for i:=0 to n do x[i]:=amp*sin(2*pi*f*i/(n+1)+nf);
```

end;

end;

end;

```
procedure cgadriver;external;
```

{\$L c:\program\bp7\bgi\CGADRV.OBJ}

begin

clrscr;

```
if registerbgidriver(@cgadriver)<0 then halt(0);
```

n:=0;

```
amp:=1; f:=1; nf:=0;
```

```
valstr[1]:='1';
```

```
valstr[2]:='1';
```

valstr[3]:='2';

```
valstr[4]:='32';
```

```
valstr[5]:='0.8';
```

```
valstr[6]:='1';
```

```
valstr[7]:='0.2';
```

valstr[8]:='1';

1: readintmenu8(toy,a,b,n,am0,bm0,s,ts); window(25,9,56,16);

clrscr;

for i:=1 to 8 do write(viewwind[i]);

gotoxy(3,5);

```
for i:=0 to 1023 do begin
```

```
x[i]:=0; y[i]:=0; ym[i]:=0; funcd[i]:=0; am[i]:=0; bm[i]:=0;
end;
n:=n-1;
nstep:=trunc((b-bm0)*2/s);
funcdmax:=0;
ksi:=0;
ds(x,n,ts,amp,f,nf);
case toy of
1: begin
     bm[0]:=bm0;
     funcdmax:=0;
     for i:=0 to nstep do begin
       bm[i]:=bm0+s*i;
       funcd[i]:=0;
       for j:=0 to n do begin
          y[j]:=b*x[j]+ksi;
          ym[j]:=bm[i]*x[j];
          funcd[i]:=funcd[i]+(sqr(y[j]-ym[j]))/(n+1);
       end;
       if funcd[i]>funcdmax then funcdmax:=funcd[i];
     end;
     I1:='НЕВ"ЯЗКА ДЛЯ Р - ОБ"ЕКТА УПРАВЛІННЯ';
                      ١.
     12:='
     Ix:='BM(I)'; Iy:='HEB"93KA F';
     hrwd(bm,funcd,nstep,2,funcdmax,0,lx,ly,l1,l2);
     window(1,1,80,25);
     I2:=' I КОЭФ.МОДЕЛИ ВМ(I)
                                       ФУНКЦІЯ ВТРАТ F[E(I)]';
     ViewArray2(bm,funcd,nstep,l1,l2);
     for i:=0 to 1023 do begin
```

```
y[i]:=0; ym[i]:=0; bm[i]:=0;
end;
bm[0]:=bm0;
gb:=0.1;
ksi:=0;
y[0]:=b*x[0]+ksi;
ym[0]:=bm[0]*x[0];
for i:=1 to n do begin
ksi:=0;
y[i]:=b*x[i]+ksi;
bm[i]:=bm[i-1]-2*gb*x[i]*(bm[i-1]*x[i]-y[i]);
ym[i]:=bm[i]*x[i];
end;
```

I1:='НАСТРОЮВАННЯ КОЕФ. ВМ МОДЕЛІ Р - ОБ"ЕКТА УПРАВЛІННЯ';

```
I2:=' ';
Ix:='I'; Iy:='KOЭФ.МОДЕЛИ ВМ(I)';
hrwd(bm,bm,n,0,b,0,Ix,Iy,I1,I2);
window(1,1,80,25);
I2:=' I ВИХ.МОДЕЛІ ҮМ(I) КОЕФ.МОДЕЛІ ВМ(I)';
ViewArray2(ym,bm,n,I1,I2);
```

end;

2: begin

```
am[0]:=am0; bm[0]:=bm0;
funcdmax:=0;
for i:=0 to nstep do begin
    bm[i]:=bm0+s*i;
    funcd[i]:=0;
    y[0]:=0; ym[0]:=0;
```

```
for j:=1 to n do begin
```

```
y[j]:=-a*y[j-1]+b*x[j]+ksi;
```

```
ym[j]:=-am0*y[j-1]+bm[i]*x[j];
```

```
funcd[i]:=funcd[i]+(sqr(y[j]-ym[j]))/(n+1);
```

if funcd[i]>funcdmax then funcdmax:=funcd[i];

end;

```
I1:='НЕВ"ЯЗКА ДЛЯ РАР - ОБ"ЄКТА УПРАВЛІННЯ';
```

```
12:='
```

```
lx:='BM(I)'; ly:='HEB"ЯЗКА F';
```

١.

```
hrwd(bm,funcd,nstep,2,funcdmax,0,lx,ly,l1,l2);
```

```
window(1,1,80,25);
```

```
I2:=' I КОЕФ.МОДЕЛІ ВМ(I) ФУНКЦІЯ ВТРАТ F[E(I)]';
```

```
ViewArray2(bm,funcd,nstep,I1,I2);
```

```
for i:=0 to 1023 do begin
```

```
y[i]:=0; ym[i]:=0; am[i]:=0; bm[i]:=0;
```

end;

```
am[0]:=am0; bm[0]:=bm0;
```

```
gb:=0.1; ga:=0.1;
```

ksi:=0;

```
y[0]:=-a*0.0+b*x[0]+ksi;
```

```
ym[0]:=-am[0]*0.0+bm[0]*x[0];
```

```
for i:=1 to n do begin
```

ksi:=0;

```
y[i]:=-a*y[i-1]+b*x[i]+ksi;
am[i]:=am[i-1]-2*ga*y[i-1]*(y[i]-(-am[i-1]*y[i-1]+bm[i-1]*x[i]));
```

```
bm[i]:=bm[i-1]-2*gb*x[i]*(-am[i-1]*y[i-1]+bm[i-1]*x[i]-y[i]);
```

```
ym[i]:=-am[i]*y[i-1]+bm[i]*x[i];
```

end;

I1:='НАСТРОЮВАННЯ КОЕФ. АМ И ВМ МОДЕЛІ РАР - ОБ''ЄКТА УПРАВЛІННЯ';

```
I2:='AM - ПОДВІЙНА ЛІНІЯ, BM - ТОНКА ЛІНІЯ';
```

```
lx:='l'; ly:='BM(l), AM(l)';
```

maxk:=a; if b>a then maxk:=b;

```
hrwd(am,bm,n,5,maxk,0,lx,ly,l1,l2);
```

window(1,1,80,25);

```
I2:=' I КОЕФ.МОДЕЛІ АМ(I) КОЕФ.МОДЕЛІ ВМ(I)';
```

```
ViewArray2(am,bm,n,l1,l2);
```

end;

end;

goto 1;

end.