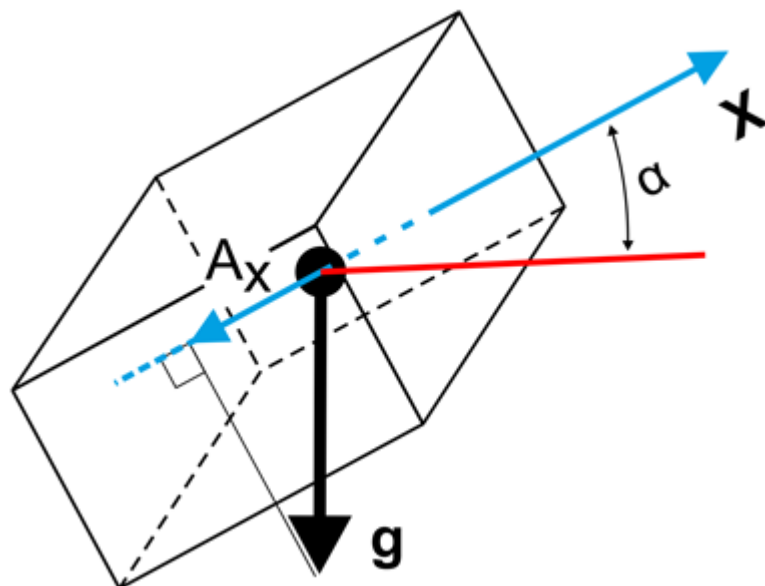


С. М. Пономарьов
О. А. Пономарьова
Г. О. Лукашук
І. В. Рижков

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
МОНІТОРИНГУ ПРОСТОРОВОГО
ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ**

С. М. ПОНОМАРЬОВ
О. А. ПОНОМАРЬОВА
Г. О. ЛУКАШУК
І. В. РИЖКОВ

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
МОНІТОРИНГУ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ
ОБ'ЄКТІВ**



С. М. Пономарьов, О. А. Пономарьова, Г. О. Лукашук

І. В. Рижков

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
МОНІТОРИНГУ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ
ОБ'ЄКТІВ**

Колективна монографія

Дніпро

ЦДАБА

2023

УДК 681.586.7:621.317:53.088

Рекомендовано до печаті Вченою радою Придніпровської державної академії будівництва та архітектури (протокол №7 від 24 січня 2023 року)

Рецензенти: професор, доктор техн. наук, зав. каф. комп'ютерних систем Національного університету «Одеська політехніка» В.С.Ситніков; доцент, доктор техн. наук, провідний науковий співробітник відділу системного аналізу і проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України Ю.О.Прокопчук

А в т о р с ь к и й к о л е к т и в :

І. В. Рижков, докт. техн. наук, доцент – частина 2;
О. А. Пономарьова, канд. техн. наук, доцент - частина 1;
С. М. Пономарьов, ст.викладач – вступ, частина 3;
Г. О. Лукашук, асистент - частина 4.

Пономарьов С. М.

Розробка методів підвищення ефективності комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів: колективна монографія / С.М. Пономарьов, О.А. Пономарьова, Г.О. Лукашук, І.В.Рижков – Дніпро: ПДАБА, 2023 – 182 с.

ISBN_978-966-323-210-2

В монографії досліджуються сучасні методи підвищення ефективності комп'ютерних систем. Розглянуто принципи дії первинних перетворювачів нахилу різноманитної фізичної природи та створено їх математичні моделі. Описані процеси розробки алгоритмічних та програмних методів корекції інструментальних похибок датчиків. Описано декілька нових конструкцій первинних перетворювачів нахилу та орієнтації.

Призначено студентам, магістрам, аспірантам і науковим робітникам.

ISBN_978-966-323-210-2

УДК 681.586.7:621.317:53.088

© С.М. Пономарьов, 2023

© О.А. Пономарьова, 2023

© Г.О. Лукашук, 2023

© І.В. Рижков, 2023

© ПДАБА, 2023

ЗМІСТ

Стор:

ВСТУП	7
ЧАСТИНА 1. Обзор методів підвищення ефективності комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів	12
1.1 Огляд робіт з компонентів комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів	
1.2 Концепція забезпечення підвищення точності компонентів комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів	21
1.3 Результати та висновки	30
ЧАСТИНА 2. Аналіз впливу інструментальних похибок на первинні перетворювачі комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів	32
2.1 Похибки інклінометрів з нерухомими первинними перетворювачами через відхилення їх осей чутливості від взаємної ортогональності	35
2.1.1 Оцінка похибок визначення зенітного та візирного кутів через відхилення осей чутливості акселерометрів від взаємної ортогональності	35
2.1.2 Оцінка похибки обчислення азимуту при перекосі осей чутливості магніточутливих і гіроскопічних датчиків	38
2.2 Похибки інклінометрів через неідентичність електричних параметрів первинних перетворювачів	43
2.2.1 Оцінка похибок інклінометрів через зміну передавальних коефіцієнтів первинних перетворювачів	44
2.2.2 Оцінка похибок інклінометрів через відмінність значень нульових сигналів первинних перетворювачів	55
2.3. Результати та висновки	67
Частина 3. Практичне застосування методу підвищення ефективності комп'ютерних систем, розробленого у другій частині	69

3.1 Конструкції перетворювачів нахилу	
3.1.1 Перетворювач нахилу на основі акселерометрів	69
3.1.2 Датчик зенітного кута з чутливим рідинним елементом	74
3.1.3 Магнітометричний датчик кута нахилу	78
3.1.4 Перетворювач нахилу на основі одноступеневих маятників	80
3.2 Аналіз експериментальних даних	82
3.3 Метрологічні випробування перетворювачів нахилу на основі акселерометрів	84
3.4 Температурні випробування перетворювачів нахилу на основі акселерометрів	87
3.5 Дослідження характеристик ПН на основі акселерометрів при різних значеннях напруги живлення	94
3.6 Принцип роботи одновісного акселерометру	96
3.7 Експеримент для отримання технічних характеристик первинних перетворювачів	99
3.7.1 Алгоритм проведення експериментальних вимірювань	102
3.7.2 Отримання розрахункових значень вихідних напруг та проведення порівняльного аналізу з експериментальними значеннями	105
3.8 Стенд для метрологічних випробувань первинних перетворювачів, які можуть використовуватися у комп'ютерних системах моніторингу будівельних конструкцій	107
3.8.1 Опис стенду для метрологічних випробувань первинних перетворювачів	107
3.8.2 Розробка програмного модуля для обробки вихідних даних експерименту	112
3.9 Результати та висновки	119
Частина 4. Комп'ютерні системи на основі магніточутливих первинних перетворювачів для контролю та керування процесом буріння	121
4.1 Аналіз комп'ютерних систем для контролю та керування процесом буріння	122

4. 2 Конструкція без каркасного ферозонда на основі тонких плівок	130
4. 3 Конструкція каркасного ферозонда	133
4.4 Конструкція магнітометра на основі диференціального плівкового ферозонда	139
4.5 Компенсаційний датчик з магніточутливим перетворювачем	143
Висновки	152
Список використаних джерел	153
ДОДАТОК А Класифікація методів контролю й діагностики	161
ДОДАТОК Б Компютерна інформаційна система моніторингу	162
ДОДАТОК В Результати розкладу даних у ряд Фур'є	163
ДОДАТОК Г Технічні характеристики блока акселерометрів	168
ДОДАТОК Д Код програми обчислення технічних характеристик блока акселерометрів	169

ВСТУП

Моніторинг – процес, який включає контроль, випробування, аналіз та оцінку конструкцій будівель і споруд. Основною метою моніторингу конструкцій будівель та споруд є визначення поточного технічного стану, виявлення ступеня фізичного зношування, дефектів, з'ясування експлуатаційних якостей конструкцій; прогнозування їхньої поведінки у майбутньому. Моніторинг конструкцій будівель та споруд проводиться, зокрема, у таких випадках:

- оцінка фізичного зносу конструкцій та інженерних систем (наприклад, якщо планується поновлення незавершеного будівництва);

- визначення стану конструкцій внаслідок їх затоки чи пожежі тощо; – обстеження конструкцій на предмет наступного перепланування будівлі, надбудови поверхів, поглиблення підвальної частини;

- при планованому капітальному ремонті будівлі та споруди;

- при реконструкції та модернізації будівлі та споруди;

- для виявлення причин деформацій стін, перекриттів колон;

- при встановленні причин появи вогкості на стінах та промерзання.

Моніторинг конструкцій будівель та споруд проводиться у кілька етапів. Перший етап – попереднє обстеження конструкцій будівель та споруд. Основним завданням

попереднього обстеження є визначення загального стану будівельних конструкцій та виробничого середовища; визначення складу намічуваних робіт та збору вихідних даних, необхідних для складання технічного завдання на детальне інструментальне дослідження для встановлення вартості намічених робіт та укладання договору із замовником.

До складу робіт із попереднього обстеження входять:

- загальний огляд будівлі чи споруди;
- збір загальних відомостей про будівлю або споруду (час будівництва, термін експлуатації);
- загальна характеристика об'ємно-планувального та конструктивного рішень систем інженерного обладнання;
- виявлення особливостей технології виробництва для виробничих будівель з точки зору їх впливу на будівельні конструкції;
- визначення фактичних параметрів мікроклімату або виробничого середовища, температурно-вологого режиму приміщення, наявність агресивних до будівельних конструкцій технологічних виділень, збирання відомостей про антикорозійні заходи;
- гідрогеологічні умови ділянки та загальні характеристики ґрунтів основ; – ознайомлення з архівними матеріалами досліджень;
- вивчення матеріалів раніше проведених на даному об'єкті обстежень виробничого середовища та стану будівельних конструкцій.

На стадії попереднього візуального обстеження встановлюються за зовнішніми ознаками категорії технічного стану конструкцій залежно від дефектів і пошкоджень. Другий етап – детальне інструментальне обстеження будівель та споруд.

Детальне обстеження включає:

- візуальне обстеження конструкцій (з фотофіксацією видимих дефектів);
- обмірні роботи – визначаються конфігурація, розміри, положення в плані та по вертикалі конструкцій та їх елементів;
- інструментальне обстеження;
- вимірювання прогинів та деформацій;
- визначення характеристик матеріалу несучих конструкцій;
- опади фундаментів та деформації ґрунтів основ.

Третій етап – визначення фізико-технічних характеристик матеріалів обстежуваних конструкцій у лабораторних умовах.

Четвертий етап – узагальнення результатів досліджень. За результатами обстеження складаються:

- технологічний звіт, що містить результат обстеження (плани та розрізи будівлі з геологічними профілями, конструктивні особливості будівлі, фундаментів та їх геометрія);
- схеми розташування реперів та марок; опис прийнятої системи вимірів; фотографії, графіки та епюри горизонтальних та вертикальних переміщень, кренів; розвиток

тріщин; перелік факторів, що сприяють виникненню деформацій;

- оцінка міцнісних та деформаційних характеристик ґрунтів основ та матеріалу конструкцій;

- технологічний висновок про категорію технічного стану будівлі чи споруди з оцінками можливості сприйняття ним додаткових деформацій чи інших впливів, зумовлених новим будівництвом чи реконструкцією, а у разі потреби – перелік заходів для посилення конструкцій та зміцнення ґрунтів основи.

Моніторинг під час будівництва – систематичне та (або) періодичне стеження (спостереження) за процесом будівництва, деформаціями конструкцій або частин будівлі та об'єкта в цілому, а також за станом ґрунтів, основ та навколишньої забудови в зоні будівництва, своєчасна фіксація та оцінка відступів від проекту, нормативних документів, прогнозування взаємного впливу об'єкта та довкілля у майбутньому, забезпечення адекватного зворотного зв'язку для своєчасного виявлення фактичних змін, попередження негативних процесів та усунення їх наслідків. Одним із основних факторів підвищення ефективності виробництва є забезпечення працездатності та оптимальних технологічних режимів промислового обладнання з використанням комп'ютерних систем, оснащених сучасними засобами технічної діагностики. Якість функціонування та використання засобів технічної діагностики в умовах великих виробництв, техногенних систем зі складною топологією

розташування великої кількості об'єктів у свою чергу визначається ефективністю організації комп'ютерних систем та управління режимами діагностування на основі моніторингу загального стану об'єктів.

В даний час у зв'язку з великою кількістю зруйнованих та пошкоджених внаслідок обстрілів будівель та споруд попит на проведення діагностики та моніторингу зріс у кілька разів. Тому що часто дешевше і швидше відремонтувати пошкоджену будівлю чи споруду, ніж побудувати нову. Особливо гостро постає питання з відновленням промислових споруд.

Інтеграція підсистем моніторингу та діагностування в даний час зумовила гостру необхідність створення методів та засобів побудови комп'ютерних систем моніторингу та діагностування, як єдиних систем, на основі загальних критеріїв, принципів побудови з урахуванням сучасного рівня розвитку техніки та досягнень у суміжних галузях науки. Створення і розвиток комп'ютерних систем, які використовуються для моніторингу просторового положення об'єктів, відіграє важливу роль у розвитку економіки країни, а також в її науково-технічному прогресі.

ЧАСТИНА 1. ОБЗОР МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

В даний час відомий досить широкий спектр робіт і розробок в області комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів, що виконувались у досить тривалий період, починаючи зі створення в 50-х роках найпростіших інклінометричних приладів та освоєння серійних магнітомеханічних пристроїв.

Аналізу стану та систематизації відомих робіт, їх класифікації за низкою суттєвих ознак, виявлення на основі огляду та критичного аналізу найбільш перспективних концептуальних наукових тенденцій та практичних напрямів у галузі побудови комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів присвячено даний розділ.

Беручи до уваги велику кількість вітчизняних і зарубіжних публікацій з інклінометричних систем, автор не претендує на абсолютну повноту огляду та аналізу.

1.1 Огляд робіт з компонентів комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів.

У ранніх розробках інклінометричних перетворювачів (ІІІ) використовувалися магнітомеханічні первинні перетворювачі. Шевченка І.Г. був запропонований ІІІ типу ІІІ-2 з магнітною стрілкою та потенціометричним перетворювачем. Серійно випускалися донедавна на

Київському ОЕЗГП ІІІ типу КІТ, КІТ-А також засновані на потенціометричних перетворювачах та електромеханічному пристрої ар-ретування.

Згодом слідувала серія модернізованих магнітомеханічних ІІІ, які характеризувалися поліпшенням конструкції первинних перетворювачів [1]. Особливе місце у створенні магнітомеханічних ІІІ займають роботи В.Т.Маркова [66], що призвели до випуску малогабаритних кабельних приладів ІЕМ 36-80/2. У цьому приладі реалізовано метод гідроімпульсного арретування та цифрова передача даних. Магніто-механічні ІІІ як компоненти ІІС контролю просторової орієнтації характеризуються низькою надійністю конструкцій та невисокою точністю вимірювань: зенітного кута $\pm 0,5^\circ$; азимуту $\pm 4^\circ$.

За використанням магнітомеханічних ІІІ можна зробити наступний висновок: доцільно їх застосовувати в термобаростійкому варіанті (без електронних блоків у свердловинному приладі), малогабаритному виконанні та найпростішому автономному варіанті.

Цікавим підходом у розробці ІІІ виявився напрямок зі створення прецизійних інклінометрів з аеростатичним підвісом [2], що володіють унікальними метрологічними характеристиками, а також високою вібро-і удароміцністю. Однак основною проблемою став складний знімання інформації з чутливого перетворювача, що не дозволило розвинути цей напрямок.

Важливим напрямом в інклінометрії, яке набуло розвитку, є створення гіроскопічних інклінометрів [3]. У гіроскопічних ІІІ типу ІІ-36 перетворювач азимуту виконаний у вигляді двоступеневого гіроскопа з потенціометричним датчиком, а вузол зенітного кута і наземний пульт аналогічні конструкції інклінометра КІТ [4]. На сьогоднішній день розробки гіроскопічних інклінометрів продовжуються. Так ТОВ «Рудпромгеофізика» Кривий Ріг в 2009 році був розроблений гіроінклінометр ІІ - 50М, призначений для визначення просторового проходження свердловин малого діаметра при глибинному бурінні. ТОВ «Солдата Україна» Київ розроблено інклінометричний зонд для ручних вимірювань відхилень від вертикальної осі всередині вертикально встановленої інклінометричної труби [5]. Однак, більшість конструкцій гіроскопічних інклінометрів для вимірювань у процесі буріння практично непридатні через складність конструкції первинних перетворювачів і низької надійності роботи в умовах підвищених вібраційних і ударних перевантажень, що супроводжують процес буріння. Хоча з усіх напрямків саме гіроінклінометри є кращим технічним засобом, працездатним у рудних свердловинах і обсаджених колоні труб.

Найперспективнішим напрямом у сфері розробки ІІІ стало використання як датчиків азимуту магнитомодуляционных перетворювачів – феррозондов. Застосування феррозондів в інклінометрії дозволяє підвищити

точність вимірювань, надійність конструкції, зменшити габарити і виконати первинні перетворювачі без рухомих елементів. Завдяки перерахованим перевагам в порівнянні з магнітомеханічними феррозондові ІП набули широкого поширення у вітчизняних і зарубіжних розробках.

До напрямку останніх років відносяться розробки перетворювачів zenітного та візирного кутів на основі акселерометричних датчиків. Основні співвідношення для розрахунку перетворювачів zenітного і візирного кутів на основі акселерометрів були отримані Г.М. Ковшовим [6]. Подальший розвиток цей напрямок отримав у роботах Г.В. Міловзорова [7], А.В. Садовникової [8] та у роботах автора [9].

Г.М. Ковшовим був розроблений комплекс теоретичних та експериментальних досліджень з розробки перетворювачів з підвищеною точністю, вібро- та удароміцністю [10], отримала розвиток теорія застосування в ІП феррозондів [11], розроблені теоретичні основи контролю параметрів викривлення сква- жінки по кривизні та кручення [12]. Важливе місце в даному напрямку займають розробки з удосконалення конструктивних виконань і схемних рішень феррозондових ІП [13].

Важливим напрямом в інклінометрії є роботи в галузі феррозондових ІП, які використовуються при вирішенні задач визначення азимуту в аномально магнітних середовищах [14].

Основною перевагою автономних ІП є простота використання. Немає потреби викликати на забій інклінометричний загін. Процес інклінометрії свердловини з використанням автономного ІП цілком під силу буровій бригаді.

Конструктивно ІП являє собою пристрій, що складається зі свердловинного вимірювального приладу і наземного пульта обробки та відображення інформації, які з'єднані каналом зв'язку. Залежно від конкретної задачі, що вирішується, канал зв'язку може бути провідним у вигляді геофізичного каротажного кабелю або у вигляді кабелю, вбудованого в колону бурових труб, бездротові - гальванічним, акустичним, гідравлічним, або канал зв'язку може бути відсутнім (автономний інклі-нометр). Велика увага приділяється проектуванню профілю свердловини, розробці методик розрахунку координат вибою [15].

За кордоном також приділяється велика увага розробці, випуску та експлуатації інклінометричної апаратури. Основні напрямки зарубіжних фахівців у галузі інклінометрії сконцентровані на створенні вибійних систем з використанням гіроскопічних, феррозондових та акселерометричних датчиків, що працюють з кабельними, гідравлічними та електромагнітними каналами зв'язку. Найбільш відомими іноземними фірмами з виробництва компонентів ІС контролю просторової орієнтації є такі фірми: Gyrodate Inc. (США), Gearhart Owen (США), Schlumberger

Anadrill (США), Sperry Sun (Великобританія), Robertson Geologing LTD (Великобританія), Lentern (Німеччина), Azinbee (Франція), Geoservices (Франція). Відомі також інші розробники інклінометричної апаратури: французький інститут нафти Institute Francais du Petrol (IFP), Seeker (Німеччина), фірми ОУО (Японія), CNPC (Китай) та ін.

Останнім часом за кордоном велика увага приділяється розробкам гіроскопічних інклінометричних перетворювачів [96]. Фірмами Gyrodata Inc. та Scaliop Gorp розроблена гіроскопічна система з використанням інерційного гіроскопа. При цьому точність вимірів наступна: зенітного кута $\square 0,05$ град., азимуту $\square 0,1$ град. Фірмою Eastan Whipstock на основі гіроскопів створено прилад третього покоління Seeker-1, який останнім часом використовується в районі Скелястих гір США. У Великій Британії розроблено гіроінклінометр фірми Robertson Ge-ologging LTD з високими точними характеристиками [16]. Основним недоліком таких систем є неможливість використання у процесі буріння. Гіроскопічні інклінометри є прецизійними механічними пристроями і втрачають працездатність в умовах вібрацій свердловин, ударів і температур.

У деяких зарубіжних інклінометрах зустрічається компонування преобразователя на основі трьох жорстко закріплених ферозондів і акселерометрів [17]. Це система Azintac, розроблена французьким інститутом нафти [18],

модель 6713 фірми Electro-Mechanics США [19] телесистема Sperry Sun, Azinbee, Smith International [20].

У 1977 р. на зарубіжному ринку з'явилися MWD - системи з провідним каналом, призначені для контролю траєкторії стовбура похило спрямованої свердловини і частотою обертання долота, розроблені фірмами Scientific Drilling Controls і Sperry Sun. В даний час більше 30 зарубіжних фірм займаються розробкою телесистем контролю процесу буріння похило спрямованих і горизонтальних свердловин. Переваги MWD – системи були продемонстровані при бурінні похило спрямованих свердловин у Північному морі з бурової платформи Клеймор. Провідною фірмою із застосування MWD – систем є Teleco Oilfield Services Inc. [21]. Буріння з використанням MWD - системи дозволяє: скоротити число спускопідйомних операцій для зміни долота, компоновок низу бурильної колони, збільшити термін служби доліт, механічну швидкість буріння і зменшити можливість прихоплення бурового інструменту в порівнянні зі звичайними методами буріння.

Важливою складовою будь-якої телеметричної системи є канал зв'язку між свердловинною та наземною частиною. Останнім часом приділяється велика увага телесистемам з кабельним каналом зв'язку.

Телеметричні системи з дротовим каналом зв'язку розроблялися компаніями Scientific Drilling Controls, Sperry Sun, Exxon Production Research, французьким нафтовим

інститутом Institute Francais du Petrol (IFP), General Electric та гідравлічним каналом – компаніями Teleco Oilfield Services Inc., Gearhart Owen Indust Engineering Ztd, Mobile Oil [22].

Найбільшої популярності набули кабельні телесистеми MWD Totco, Sperry Sun, Azinbee Smith International [23]. Недоліком MWD – системи із кабельним каналом зв'язку є складність в експлуатації.

Типовою гідравлічною системою є розроблена в США телесистема WOT, в якій інформація передається за допомогою пульсацій потоку бурового розчину [24]. У телесистемах такого роду способи передачі у вигляді позитивних, негативних пульсацій і фазових змін низькочастотних коливань витрати бурового розчину. До недоліків гідравлічних систем відноситься необхідність синхронного відображення електричних сигналів первинних перетворювачів у вигляді пульсуючих переміщень громіздких механізмів - потрібно потужне джерело електричної енергії на вибої. Система клапанів та інші об'ємні частини компоновки створюють значний гідравлічний опір потоку бурового розчину, що зменшує крутний момент на долоті, погіршує енергетичні параметри буріння. Глибина буріння обмежена.

Фірмою Vec-Tel Petroleum в 1979 р. була розроблена і поставлена споживачам система імпульсної дії, що дозволяє отримувати інформацію про положення вибою свердловини через застосування в якості генератора імпульсних коливань стовпа бурового розчину, концентричного клапана, що

обертається, і серводвигуна. Основним вимірювальним датчиком служив тривісний акселерометр.

В останні роки знаходять широке застосування телеметричних систем з електромагнітним каналом зв'язку фірм Tool Drill і Geoservices, Schlumberger Anadrill. Набув розвитку метод передачі магнітних імпульсних сигналів [25].

Приділяється увага і магнітомеханічним ІІ. Так фірмою Leutert (Германія) розроблений термостійкий до 180°C прилад для слабопохилих свердловин до 30 м, а фірмою NL Sperry Sun запропонований одноточковий та багатоточковий магнітно-механічні інклінометри, фірмою Kuster (США) створений фотоінкліно-метр з поточною.

Узагальнюючи представлені дані, можна дійти невтішного висновку, що особливу увагу зарубіжні дослідники і розробники, як і вітчизняні, приділяють вдосконаленню первинних инклинометрических перетворювачів і каналів передачі.

Огляд існуючих ІІ, а також критичний аналіз відомих розробок показує, що найбільш перспективним напрямом в області підвищення ефективності ІІС контролю просторової орієнтації об'єктів є використання феррозондових перетворювачів, перетворювачів з акселеро-метричними датчиками і маятникових структур перетворювачів зенітного і візирного . Даний напрямок дозволяє досягти високих точнісних показників ІІС, зменшити габаритні розміри перетворювачів. Вибір тієї чи іншої схеми визначається

конкретним завданням, діапазонами вимірювання, умовами експлуатації і вимогами до метрологічних характеристик.

1.2 Концепція забезпечення підвищення точності компонентів комп'ютерних систем моніторингу просторового положення об'єктів.

Аналіз публікацій по інклінометричним перетворювачам як компонентам ПС контролю просторової орієнтації об'єктів показує, що в основному представлено опис конструкцій, експериментальне дослідження їх похибок, результати натурних випробувань і практично відсутні теоретичні основи інклінометрів. У той же час, розробка та створення ПП на основі чутливих елементів різної фізичної природи, їх конструкторсько-технологічне опрацювання, побудова структурних схем знаходяться у безпосередньому взаємозв'язку з дослідженням та розробкою методів підвищення точності інклінометричних вимірювань. Тільки спільні розробки зі створення ПП і методів підвищення точності вимірювань просторової орієнтації об'єктів різного призначення, а також методів корекції похибок можуть призвести до необхідних результатів - розробки ПП ПС контролю просторової орієнтації об'єктів з підвищеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Сукупність параметрів, що впливають на точність вимірювань, класифікуємо наступним чином:

1. Чинники, які зумовлені конструкцією ПП.

2. Фактори, які обумовлені зовнішніми обурюючими впливами.

До першої групи належать такі параметри: тертя в опорах підвісу рухомих елементів, неточність орієнтації рамок і маятників у площину нахилу, відсутність ортогональності в орієнтації первинних чутливих елементів та ін.

До другої групи відноситься вплив на показання первинних перетворювачів ІІ збурювальних впливів - температури навколишнього середовища, варіації напруги харчування, вплив вібраційних і ударних збурень, магнітних аномалій.

Методи підвищення точності вимірювань ІІ ґрунтуються на відомих методах, що широко застосовуються при розробці засобів інформаційно-вимірювальної техніки. Однак, є й особливості, що обумовлені специфікою побудови ІІ та умовами їх експлуатації.

Аналіз робіт у галузі інклінометрії дозволяє підрозділити всю сукупність прийомів і методів підвищення точності на три групи: структурно-схемотехнічний, конструкторсько-технологічний та алгоритмічний [26]. Структурно-схемотехнічні методи включають вибір кінематики перетворювача, компенсацію впливу факторів, що дестабілізують (за допомогою, наприклад, підтримки постійної температури спеціальним регулятором), використання схем врівноважує перетворення [27]. Конструкторсько-технологічні методи полягають у таких

змінах конструкції та технології виготовлення перетворювачів, які дозволили б звести до мінімуму основні помилки вимірювання від впливу таких факторів, як моменти та сили сухого тертя в опорах підвісу, балансування по плавучості, юстирування осей чутливості ферозондів, поєднання центрів тяжіння з точкою докладання архімедової сили, що виштовхує, створення маятників-рамок з низькою частотою власних коливань для фільтрації вібраційних перешкод і т. д. [28]. До алгоритмічних методів віднесемо обробку результатів виміру на ПЕОМ у вигляді використання спеціальних програм. Сучасні ПС контролю мають у своєму складі персональну ЕОМ, що дозволяє скористатися алгоритмічними методами, що є потужним засобом поліпшення технічних характеристик компонентів будь-якої ПС.

Таким чином, відомі розробки в області ІІ у плані забезпечення високих метрологічних характеристик повинні включати як структурно-схемотехнічні і конструкторсько-технологічні методи підвищення точності вимірювань, так і алгоритмічні, оскільки перші і другі не забезпечують повною мірою вирішення поставлених завдань, а треті дозволяють звести до мінімуму похибки вимірів конкретних технічних рішень ІІ. А найефективнішим варіантом у цьому напрямі є корекція результатів вимірювань.

Найбільш поширеною схемою ІІ, яка широко використовується і по сьогоднішній день, є кінематична схема

двох рамок карданних. Так в інклінометрі ІН 1-721, в автономному інклінометрі , в блоці датчиків ЗІС-4, в магнітомеханічних інклінометрах класу КІТ [29] первинні перетворювачі азимуту встановлюються на платформі, що горизонтується, внутрішньої карданної рамки. У магнітомеханічних ІІ магнітна стрілка механічно пов'язана з потенціометром. Після зупинки БІ магнітна стрілка арретувалася. Показання потенціометричного перетворювача були пропорційні магнітному азимуту горизонтальній площині. У феррозондових ІІ два ферозонди встановлювалися на платформі, що горизонтується, таким чином, що осі їх чутливості орієнтувалися в горизонтальній площині незалежно від кута нахилу корпусу приладу, ортогонально один одному. Для того, щоб перелічені перетворювачі витримували необхідний рівень точності, необхідний був цілий комплекс регулювальних операцій як при складанні ІІ, так і при регламентних перевірках. У магнітомеханічних перетворювачах таких операцій не багато. Потрібно було виставити платформу в горизонтальну площину та налаштувати потенціометричний перетворювач. У феррозондових ІІ таких операцій було вже набагато більше, і вони були більш трудомісткими і відповідальними. Проведення настроювальних операцій вимагало багаторазових експериментів з виконанням регулювань в особливих точках азимутального лімба перевірочних установок, відповідних значенням азимуту 0, 90, 180 і 270

градусів, а також висувало підвищені вимоги до кваліфікації персоналу.

Регулювальні операції для перетворювачів зенітного кута не були такими трудомісткими, але були потрібні.

Крім високих вимог до кваліфікації персоналу, технологічні операції регулювання ускладнювалися ще й вимогою врівноважування по-плавкових конструкцій ІІ з плавучості та диференту. Це значно ускладнювало процес налаштування ІІ і не завжди давало очікувані результати у всьому діапазоні зенітного кута.

Всі ці проблеми виявилися стримуючим фактором для промислового виробництва феррозондових інклінометрів цього класу.

Подальший розвиток ІІ було пов'язане з кінематикою трьох жорстко закріплених перетворювачів у корпусі приладу. Таке компонування дозволило забезпечити ряд конструкторсько-технологічних переваг і підвищити точність та експлуатаційні характеристики ІІ. Такі ІІ забезпечують безконтактне конструктивне виконання, зниження габаритних розмірів, забезпечують підвищену надійність та високі точнісні характеристики. Найбільшим недоліком даної конструкції ІІ була складність алгоритму обчислення азимуту. Сьогодні, у зв'язку з бурхливим розвитком обчислювальної техніки, складність алгоритму та його програмна реалізація ніяких практичних проблем не

представляє. Чим, на сьогоднішній день, і обумовлено це найбільш перспективний напрямок у розвитку ІІІ.

ІІІ з маятниковими конструкціями і акселерометричними датчиками в якості перетворювачів зенітного і візирного кутів мають складні аналітичні залежності вихідних сигналів з вимірюваними кутовими параметрами, які мають вигляд системи скалярних трансцендентних рівнянь, що визначають статичні математичні моделі, які тивних алгоритмів обчислень кутів орієнтації.

В загальному випадку в ІІІ визначення шуканих кутів може бути реалізовано за допомогою методу, заснованого на двох вимірюваних величин - сигналів з феррозондів, сигналів з СКВТ або акселерометрів. Таким ІІІ властива надмірність інформаційних сигналів, що реєструються у процесі вимірювань. Однак така надмірність з одного боку дозволяє забезпечити однозначність рішень у повному діапазоні вимірюваних кутів α , θ і φ , а з іншого боку дозволяє реалізувати метод вимірювань, що визначає основу підвищених точнісних показників ІІІ в умовах впливу факторів, що обурюють, на канали вторинного перетворення інформації.

Основними обурюючими факторами, що впливають на канал перетворення вимірюваного сигналу, є: похибка первинного перетворення, інструментальна похибка, похибка вторинного перетворення.

Похибка первинного перетворення переважно характеризується не-линейністю статичної характеристики чутливого елемента. Для того щоб забезпечити підвищену точність вимірювання, необхідно здійснити лінеаризацію статичної характеристики чутливого елемента.

Інструментальні похибки ІІ як компонентів ІІС просторової орієнтації обумовлені кінематичними схемами перетворювачів азимуту, зенітного та візирного кутів. І визначаються вони величиною відхилення осей чутливості феррозондів, акселерометрів і осей обертання маятників і рамок від осей прямокутних систем координат, пов'язаних з корпусом перетворювача, рамками та ексцентричними вантажами кожного маятника.

Наявність інструментальних похибок в інформаційному сигналі обумовлено полями допусків виготовлення деталей і вузлів ІІ, які характеризуються точністю технологічного та виробничого процесів.

Похибки вторинного перетворення зумовлені впливом збурювальних факторів на електронні компоненти. При цьому вихідний сигнал включає адитивну і мультиплікативну складові похибки.

Реалізуючи метод послідовного опитування сигналів, адитивну похибку результату вимірювань можна виключити шляхом додаткового опитування «нуля» каналів вторинного перетворення (схемотехнічно).

Далі під час обробки результатів вимірів мультиплікативну похибку можна виключити під час взяття відносин, тобто. реалізуючи логометричний метод виміру [30].

Інструментальні похибки, які характеризують конкретне конструктивне виконання компонентів ПС, є систематичними похибками у всіх діапазонах вимірювання α , θ і φ . Одним з методів зменшення цих похибок, який був розглянутий вище, є виконання регулювальних операцій. Даний метод є трудомістким і кропітким, вимагає високої кваліфікації персоналу і не завжди дає необхідний результат.

Найбільш ефективним методом є алгоритмічна корекція інструментальних похибок при обробці результатів вимірювань та виконанні обчислень шуканих кутів орієнтації. Корекція може бути здійснена двома способами: шляхом відрахування похибки з обчисленого за базовою математичною моделлю значення шуканого кута або шляхом корекції значень сигналів, що вимірюються, з чутливих елементів первинних перетворювачів ПП з подальшим їх урахуванням в узагальнених статичних математичних моделях.

І в першому і другому випадку потрібна адекватна математична модель алгоритмічної обробки даних. Тому математичне моделювання інклінометричних перетворювачів як компонентів ПС просторової орієнтації об'єктів різної фізичної природи є важливим завданням щодо вивчення

ступеня впливу того чи іншого параметра інструментальних похибок на точнісні показники.

На першому етапі визначаються вихідні системи координат, пов'язані з вектором прискорення сили тяжіння і з повним вектором напруженості магнітного поля Землі, а також всі системи координат, пов'язані з корпусом і рухомими елементами ІІІ.

На другому етапі визначаються всі можливі джерела інструментальних похибок, до яких відносяться відхилення осей чутливості первинних перетворювачів від осей ортогональних реперів, пов'язаних з корпусом ІІІ і рухомими елементами.

На третьому етапі з використанням відомих математичних методів встановлюється аналітична залежність сигналів з чутливих елементів ІІІ з визначеними кутами просторової орієнтації α , θ і φ з урахуванням кутових параметрів, які обумовлені джерелами інструментальних похибок.

Таким чином, пропонований шлях підвищення ефективності ІІС просторової орієнтації об'єктів, що ґрунтується на концепції алгоритмічної корекції інструментальних похибок конкретних кінематичних схем перетворювачів азимуту і перетворювачів зенітного і візирного кутів, є найбільш переважним з точки зору його практичної кінцевого результату.

Для реалізації цієї концепції необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Розробити узагальнені статичні математичні моделі інклінометричних перетворювачів як компонентів ПС контролю просторової орієнтації об'єктів, що враховують кутові параметри відхилення осей чутливості первинних перетворювачів від осі взаємної орто-гональності.

2. Провести комплексний аналіз інструментальних похибок ПП ПС контролю за просторовою орієнтацією об'єктів.

3. Розробити систему алгоритмічної корекції похибок.

4. Провести експериментальні дослідження, які б підтверджували адекватність отриманих узагальнених математичних моделей.

Поставлені завдання, безсумнівно, є актуальними науковими завданнями і вимагають проведення теоретичних досліджень у галузі моделювання та аналізу похибок, а також виконання комплексу експериментальних досліджень. Вирішенню даних завдань та практичній реалізації запропонованої концепції та присвячена дана робота.

1.3. Результати та висновки

1. Аналіз технічної літератури показує, що підвищення ефективності інформаційно-вимірювальних систем контролю просторової орієнтації об'єктів є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якої забезпечує підвищення

якості та зниження собівартості проведення технологічних операцій різного призначення.

2. Встановлено, що випускалися раніше серійно магнітомеханічні ІІ мають низькі точнісні показники, низьку надійність і не можуть бути використані в якості компонентів ІІС контролю просторової орієнтації об'єктів.

3. Виявлено найбільш перспективний напрямок на сьогоднішній день, який полягає в дослідженні, розробці та створенні ІІ на основі феррозондових датчиків азимуту, перетворювачів зенітного і візирного кутів акселерометричного типу і на основі одноступеневих маятників. Запропоновано концепцію забезпечення підвищеної точності, засновану на алгоритмічній корекції похибок.

4. Виявлено необхідність проведення комплексу теоретичних та експериментальних досліджень з математичного моделювання, аналізу інструментальних похибок та розробки алгоритмічного забезпечення в плані реалізації концепції забезпечення підвищеної точності компонентів ІІС контролю просторової орієнтації об'єктів.

ЧАСТИНА 2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПОХИБОК НА ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ.

Завдання визначення похибок інклінометричних даних, вивчення характеру їх розподілу по діапазонах вимірюваних параметрів і оцінка граничних значень по модулю з виявленням домінуючих складових вирішується методом математичного моделювання та аналізу інструментальних похибок різних варіантів кінематичних схем і конструктивного виконання компонентів КС контролю.

У цьому розділі розглядаються аспекти отримання узагальнених математичних моделей ІІ різної фізичної природи як компонентів КС контролю просторової орієнтації об'єктів, виведення аналітичних виразів інструментальних похибок, їх оцінки та аналізу.

Інструментальні похибки інклінометрів обумовлюються недосконалістю їх конструкцій та зміною зовнішніх умов експлуатації. Вони значною мірою залежать від зміни температури навколишнього середовища, що лежить в діапазоні $-20^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$, від вібраційних і ударних перевантажень, що супроводжують процес буріння, величина яких досягає до 40 крат. Ці похибки називають додатковими, що з'являються через відхилення від нормальних умов, за яких проводиться перевірка інклінометрів.

За технічними вимогами наведена похибка визначення азимуту та візирного кутів у діапазоні $0\div 360^\circ$ лежить у межах 0,5%, зенітного кута в діапазоні $0\div 180^\circ$ – у межах 0,2%. Така точність вимірювань у заданому діапазоні температур вимагає ретельного аналізу причин появи похибок та прийомів їх компенсації.

Практично інклінометр реалізує вимірювання проекції векторів на осі чутливості первинних перетворювачів і величини їх модулів. Тому однією з похибок інклінометра є похибка спрямованості, що виникає через відхилення положення осей чутливості первинних перетворювачів від взаємної ортогональності відносно один одного інклінометр. Неврахування цих похибок при обчисленні шуканих кутів Ейлера призводить до значних похибок. Однак, оцінка обчислення кутів орієнтації від перекосів осей чутливості первинних перетворювачів у технічній літературі відсутня.

Похибки спрямованості, як правило, усувають механічним або електричним юстируванням осей чутливості первинних перетворювачів. Механічне юстування здійснюють за допомогою регулювальних мікрометричних гвинтів, що повертають у двох площинах осі чутливості перетворювачів. Такий підхід значно ускладнює конструкцію інкліно-метра і не забезпечує стабільності положення осей чутливості перетворювачів при дії вібраційних та ударних перевантажень. При електричній юстуванні в сигнал кожного перетворювача вводиться корекція, що формується від

сигналів двох інших перетворювачів. У підході, що розвивається автором, попередньо вимірюються просторові повороти, які враховуються при подальших обчисленнях шуканих кутів просторової орієнтації.

Для первинних перетворювачів інклінометра характерні похибки чутливості (зміна передавального коефіцієнта) та похибка нуля перетворювача (нульовий сигнал), що характеризує зміщений нуль (зсув) та шум каналу. При зміні температури довкілля змінюються як передавальний коефіцієнт перетворювача, і його нульовий сигнал.

У загальному випадку інклінометр є сукупністю трьох одновісних первинних перетворювачів різної фізичної природи, розташованих віссю чутливості колінеарно осям декартового тригранника, пов'язаного з корпусом пристрою. Індивідуальні електричні параметри – передавальний коефіцієнт і нульовий сигнал кожного первинного перетворювача навіть у межах однієї серії відрізняються один від одного. Це призводить до помилки при обчисленні шуканих кутів.

У цьому розділі оцінюються похибки вимірювання кутів просторової орієнтації об'єктів зенітного, візирного або кута установки отклонителя, азимуту від впливу відхиляча від номінального значення електричних параметрів первинних перетворювачів, складових інклінометр і осей їх чутливості від взаємної ортогональності.

2.1 Похибки інклінометрів з нерухомими первинними перетворювачами через відхилення їх осей чутливості від взаємної ортогональності

Осі чутливості первинних перетворювачів інклінометрів після їх складання в корпусі пристрою виявляються не ортогональними один одному. Це відбувається тому, що посадкові поверхні корпусу інклінометра під первинні перетворювачі виконуються з певним технологічним допуском по перпендикулярності. До того ж осі чутливості датчиків не збігаються з геометричними осями, утвореними посадковими поверхнями самих датчиків. Ці просторові кутові відхилення осей чутливості викликають похибки спрямованості - відхилення від взаємної ортогональності осей датчиків і тригранника осей, пов'язаних з корпусом інклінометра. Неврахування цих величин при обчисленні кутів, що визначають кути просторової орієнтації бурового інструменту (азимут, зеніт, візирний кут) призводить до значних помилок обчислення. Наведемо оцінку цих помилок.

2.1.1. Оцінка похибок визначення зенітного та візирного кутів через відхилення осей чутливості акселерометрів від взаємної ортогональності.

Нехай осі чутливості акселерометрів не ортогональні, а повернені щодо репера, пов'язаного з корпусом інклінометра, на деякі малі кути. Задамо помилки повороту осей чутливості першого, другого та третього акселерометрів відповідно векторами

$$\bar{\varepsilon}_1(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}), \quad \bar{\varepsilon}_2(\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{23}), \quad \bar{\varepsilon}_3(\varepsilon_{31}, \varepsilon_{32}, \varepsilon_{33}),$$

тут ε_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ – малі кути повороту осей чутливості і – акселерометра навколо першої, другої та третьої осей.

Нехай $V^*(b_1^*, b_2^*, b_3^*)$ – вектор показань акселерометрів з урахуванням їх перекосів, а $\bar{V}(b_1, b_2, b_3)$ – за їх відсутності. Тоді з точністю до нескінченно малих другого порядку щодо величин ε_{ij} маємо співвідношення:

$$\begin{aligned} b_1 &= b_1^* - b_2^* \varepsilon_{13} + b_3^* \varepsilon_{12} \\ b_2 &= b_2^* + b_1^* \varepsilon_{23} - b_3^* \varepsilon_{21} \\ b_3 &= b_3^* - b_1^* \varepsilon_{32} + b_2^* \varepsilon_{31} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\text{Тут } b_1 = \frac{g_x}{g}, \quad b_2 = \frac{g_y}{g}, \quad b_3 = \frac{g_z}{g}, \text{ а}$$

$$b_1 = -\cos \varphi \sin \theta, \quad b_2 = \sin \varphi \sin \theta, \quad b_3 = -\cos \theta,$$

$$b_1^* = -\cos \varphi^* \sin \theta^*, \quad b_2^* = \sin \varphi^* \sin \theta^*, \quad b_3^* = \cos \theta^*.$$

З точністю до нескінченно малих другого порядку щодо похибок зенітного та візирного кутів $\Delta\theta = \theta - \theta^*$ и $\Delta\varphi = \varphi - \varphi^*$

справедливі рівності $b_i = b_i^* + \frac{\partial b_i^*}{\partial \varphi^*} \cdot \Delta\varphi + \frac{\partial b_i^*}{\partial \theta^*} \cdot \Delta\theta$, $i = 1, 2, 3$, які у

розгорнутій формі записуються так:

$$\begin{aligned}
b_1 &= b_1^* + \sin \varphi^* \sin \theta^* \Delta \varphi - \cos \varphi^* \cos \theta^* \Delta \theta, \\
b_2 &= b_2^* + \cos \varphi^* \sin \theta^* \Delta \varphi + \sin \varphi^* \cos \theta^* \Delta \theta, \\
b_3 &= b_3^* - \sin \theta^* \Delta \theta.
\end{aligned}$$

Звідки, з урахуванням виразів (2.1), отримаємо співвідношення для похибок $\Delta \theta$ та $\Delta \varphi$:

$$\begin{aligned}
\Delta \varphi \sin \varphi^* \sin \theta^* - \Delta \theta \cos \varphi^* \cos \theta^* &= -b_2^* \varepsilon_{13} + b_3^* \varepsilon_{12}, \\
\Delta \varphi \cos \varphi^* \sin \theta^* + \Delta \theta \sin \varphi^* \cos \theta^* &= b_1^* \varepsilon_{23} - b_3^* \varepsilon_{21}, \\
\Delta \theta \sin \theta^* &= b_1^* \varepsilon_{32} - b_2^* \varepsilon_{31}, \text{ які перепишемо так:} \\
\Delta \varphi \sin \theta^* &= \left[-b_2^* \varepsilon_{13} + b_3^* \varepsilon_{12} \right] \sin \varphi^* + \left[b_1^* \varepsilon_{23} - b_3^* \varepsilon_{21} \right] \cos \varphi^*, \\
\Delta \theta \cos \theta^* &= \left[b_1^* \varepsilon_{23} - b_3^* \varepsilon_{21} \right] \sin \varphi^* - \left[-b_2^* \varepsilon_{13} + b_3^* \varepsilon_{12} \right] \cos \varphi^*, \quad (2.2) \\
\Delta \theta &= -\varepsilon_{32} \cos \varphi^* - \varepsilon_{31} \sin \varphi^*.
\end{aligned}$$

І, нарешті, з третього та першого рівнянь отриманої системи маємо такі оцінки для величин $\Delta \theta$ та $\Delta \varphi$:

$$|\Delta \theta| \leq |\varepsilon_{32}| + |\varepsilon_{31}|, \quad (2.3)$$

$$|\Delta \varphi| \leq |\varepsilon_{13}| + |\varepsilon_{23}| + (|\varepsilon_{21}| + |\varepsilon_{12}|) + |\operatorname{ctg} \theta^*| \quad (2.4)$$

Вираз (2.4) можна переписати інакше, враховуючи, що

$$\begin{aligned}
\operatorname{ctg}^2 \theta^* &= \frac{b_3^{*2}}{b_1^{*2} + b_2^{*2}}: \\
|\Delta \varphi| &\leq |\varepsilon_{13}| + |\varepsilon_{23}| + (|\varepsilon_{12}| + |\varepsilon_{21}|) \cdot \frac{b_3^*}{\sqrt{b_1^{*2} + b_2^{*2}}}. \quad (2.5)
\end{aligned}$$

Ця оцінка справедлива лише коли $|\sin \theta^*| \geq C_0$, де C_0 позитивна величина, що визначається порогом чутливості використовуваних акселерометрів.

2.1.2 Оцінка похибки обчислення азимуту при перекосі осей чутливості магніточутливих і гіроскопічних датчиків.

Нехай осі чутливості датчиків не збігаються з осями тригранника, пов'язаного з корпусом інклінометра, а повернені щодо нього через помилки виготовлення посадкових поверхонь на деякі малі кути μ_i .

Задамо ці кути повороту векторами $\bar{\mu}_1(\mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{13})$, $\bar{\mu}_2(\mu_{21}, \mu_{22}, \mu_{23})$, $\bar{\mu}_3(\mu_{31}, \mu_{32}, \mu_{33})$ для першого, другого та третього датчика відповідно. Для остаточних виразів запишемо вектори $\bar{\mu}_i^M$, $\bar{\mu}_i^G$ ввівши відповідно індекси м - магніточутливий і г - гіроскопічний. Тоді з точністю до малих другого порядку щодо величин μ_{ij} маємо співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_1^* - \mu_{13} a_2^* + \mu_{23} a_3^*, \\ a_2 &= a_2^* + \mu_{23} a_1^* - \mu_{21} a_3^*, \\ a_3 &= a_3^* - \mu_{32} a_1^* + \mu_{31} a_2^*, \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$\left. \begin{aligned}
a_1 &= \cos \varphi \cos \theta \cos \alpha - \sin \varphi \sin \alpha - b \cos \varphi \sin \theta, \\
a_2 &= -\sin \varphi \cos \theta \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha + b \sin \varphi \sin \theta, \\
a_3 &= \cos \alpha \sin \theta + b \cos \theta, \\
\text{де } a_1^* &= \cos \varphi^* \cos \theta^* \cos \alpha^* - \sin \varphi^* \sin \alpha^* - b \cos \varphi^* \sin \theta^*, \\
a_2^* &= -\sin \varphi^* \cos \theta^* \cos \alpha^* - \cos \varphi^* \sin \alpha^* + b \sin \varphi^* \sin \theta^*, \\
a_3^* &= \cos \alpha^* \sin \theta^* + b \cos \theta^*.
\end{aligned} \right\} (2.7)$$

Для магніточутливих датчиків позначено

$$a_1^M = \frac{T_x}{H}, \quad a_2^M = \frac{T_y}{H}, \quad a_3^M = \frac{T_z}{H}, \quad b = \frac{Z}{H}, \quad (2.8)$$

для гіроскопичних

$$a_1^\Gamma = \frac{\Omega_x}{\Omega_\Gamma}, \quad a_2^\Gamma = \frac{\Omega_y}{\Omega_\Gamma}, \quad a_3^\Gamma = \frac{\Omega_z}{\Omega_\Gamma}, \quad b^\Gamma \operatorname{tg} \varphi_\Gamma = \frac{\Omega_B}{\Omega_\Gamma}. \quad (2.9)$$

Для спрощення написання проміжних математичних виразів зазначені індекси опустимо.

Далі з точністю до нескінченно малих другого порядку щодо похибок кутів азимуту, візирного та зенітного.

$$\Delta \alpha, \Delta \varphi, \Delta \theta \quad (\Delta \alpha = \alpha - \alpha^*, \quad \Delta \varphi = \varphi - \varphi^*, \quad \Delta \theta = \theta - \theta^*) \quad \text{з виразів (2.6)}$$

отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_1^* + \frac{\partial a_1^*}{\partial \alpha^*} \Delta \alpha + \frac{\partial a_1^*}{\partial \theta^*} \Delta \theta + \frac{\partial a_1^*}{\partial \varphi^*} \Delta \varphi, \\ a_2 &= a_2^* + \frac{\partial a_2^*}{\partial \alpha^*} \Delta \alpha + \frac{\partial a_2^*}{\partial \theta^*} \Delta \theta + \frac{\partial a_2^*}{\partial \varphi^*} \Delta \varphi, \\ a_3 &= a_3^* + \frac{\partial a_3^*}{\partial \alpha^*} \Delta \alpha + \frac{\partial a_3^*}{\partial \theta^*} \Delta \theta + \frac{\partial a_3^*}{\partial \varphi^*} \Delta \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Враховуючи формули (2.10), співвідношення (2.6) перепишемо наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial a_1^*}{\partial \alpha^*} \Delta \alpha + \frac{\partial a_1^*}{\partial \theta^*} \Delta \theta + \frac{\partial a_1^*}{\partial \varphi^*} \Delta \varphi &= -\mu_{13} a_2^* + \mu_{12} a_3^*, \\ \frac{\partial a_2^*}{\partial \alpha^*} \Delta \alpha + \frac{\partial a_2^*}{\partial \theta^*} \Delta \theta + \frac{\partial a_2^*}{\partial \varphi^*} \Delta \varphi &= \mu_{23} a_1^* - \mu_{21} a_3^*, \\ \frac{\partial a_3^*}{\partial \alpha^*} \Delta \alpha + \frac{\partial a_3^*}{\partial \theta^*} \Delta \theta + \frac{\partial a_3^*}{\partial \varphi^*} \Delta \varphi &= -\mu_{32} a_1^* + \mu_{31} a_2^*. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Неважко перевірити, що $a_1^{*2} + a_2^{*2} + a_3^{*2} = 1 + b^2$ і тому справедливі рівності

$$\vec{a}^* \cdot \frac{\partial \vec{a}^*}{\partial \alpha^*} = 0, \quad \vec{a}^* \cdot \frac{\partial \vec{a}^*}{\partial \theta^*} = 0, \quad \vec{a}^* \cdot \frac{\partial \vec{a}^*}{\partial \varphi^*} = 0, \quad \text{тут} \quad \vec{a} = (a_1, a_2, a_3),$$

$$\vec{a}^* = (a_1^*, a_2^*, a_3^*).$$

Таким чином, вектори $\frac{\partial \vec{a}^*}{\partial \alpha^*}$, $\frac{\partial \vec{a}^*}{\partial \theta^*}$ и $\frac{\partial \vec{a}^*}{\partial \varphi^*}$ компланарні, т.к.

вони ортогональні до вектору \vec{a} , тобто визначник системи рівнянь (2.11) дорівнює нулю і, отже, неможливо визначити із цих рівнянь похибки $\Delta \alpha$, $\Delta \theta$ и $\Delta \varphi$.

Для оцінки похибок обчислення азимуту необхідно залучення оцінок (2.3), (2.5).

Використовуючи формули (2.7), можна показати, що

$$\left| \frac{\partial a_1^*}{\partial \theta^*} \right| \leq 1 + b, \quad \left| \frac{\partial a_1^*}{\partial \varphi^*} \right| \leq 2 + b, \quad \left| \frac{\partial a_2^*}{\partial \theta^*} \right| \leq 1 + b, \quad \left| \frac{\partial a_2^*}{\partial \varphi^*} \right| \leq 2 + b,$$

$$\left| \frac{\partial a_3^*}{\partial \theta^*} \right| \leq 1 + b, \quad |a_1^*| \leq 2 + b, \quad |a_2^*| \leq 2 + b, \quad |a_3^*| \leq 1 + b, \quad \left| \frac{\partial a_3^*}{\partial \varphi^*} \right| = 0,$$

підставивши деякі у рівняння (2.11), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{\partial a_1^*}{\partial \alpha^*} \right| \cdot \Delta \alpha &\leq (1 + b)|\Delta \theta| + (2 + b)|\Delta \varphi| + (2 + b)|\mu_{13}| + (1 + b)|\mu_{12}|, \\ \left| \frac{\partial a_2^*}{\partial \alpha^*} \right| \cdot \Delta \alpha &\leq (1 + b)|\Delta \theta| + (2 + b)|\Delta \varphi| + (2 + b)|\mu_{23}| + (1 + b)|\mu_{12}|, \\ \left| \frac{\partial a_3^*}{\partial \alpha^*} \right| \cdot \Delta \alpha &\leq (1 + b)|\Delta \theta| + (2 + b)|\mu_{32}| + (2 + b)|\mu_{13}|. \end{aligned} \right\} (2.12)$$

Так як $\left(\frac{\partial a_1^*}{\partial \alpha^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial a_2^*}{\partial \alpha^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial a_3^*}{\partial \alpha^*} \right)^2 = 1$, то з (2.12) отримаємо

нерівність

$$|\Delta \alpha|^2 \leq [(1 + b)(|\Delta \theta| + |\mu_{12}|) + (2 + b)(|\Delta \varphi| + |\mu_{13}|)]^2 + [(1 + b)(|\Delta \theta| + |\mu_{21}|) + (2 + b)|\Delta \varphi| + |\mu_{23}|]^2 + [(1 + b)|\Delta \theta| + (2 + b)(|\mu_{32}| + |\mu_{31}|)]^2,$$

звідки слідує оцінка:

$$|\Delta\alpha| \leq \left\{ [(1+b)(|\Delta\theta| + |\mu_{12}|) + (2+b)(|\Delta\varphi| + |\mu_{13}|)]^2 + [(1+b)(|\Delta\theta| + |\mu_{12}|) + (2+b)(|\Delta\varphi| + |\mu_{23}|)]^2 + [(1+b)(|\Delta\theta| + (2+b)(|\mu_{32}| + |\mu_{31}|))]^2 \right\}^{1/2}. \quad (2.13)$$

Позначимо $\varepsilon = \max\{|\varepsilon_{12}|, |\varepsilon_{13}|, |\varepsilon_{21}|, |\varepsilon_{23}|, |\varepsilon_{31}|, |\varepsilon_{32}|\}$,
 $\mu = \max\{|\mu_{12}|, |\mu_{13}|, |\mu_{21}|, |\mu_{23}|, |\mu_{31}|, |\mu_{32}|\}$,

тоді оцінки (2.3), (2.5) можна представити так:

$$|\Delta\theta| \leq 2\varepsilon, \quad (2.14)$$

$$|\Delta\varphi| \leq 2\varepsilon \left(1 + \frac{b_3^*}{\sqrt{b_1^{*2} + b_2^{*2}}} \right). \quad (2.15)$$

$$|\Delta\alpha| \leq \sqrt{3} [2(1+b)\varepsilon + (2+b)|\Delta\varphi| + (4+2b)\mu], \text{ або}$$

$$|\Delta\alpha| \leq 2\sqrt{3} \left\{ \left[(3+2b) + \frac{(2+b)b_3^*}{\sqrt{b_1^{*2} + b_2^{*2}}} \right] \varepsilon + (2+b)\mu \right\}. \quad (2.16)$$

Похибка визначення азимуту від впливу лише перекосів осей чутливості магніточутливих первинних перетворювачів дорівнює:

$$|\Delta\alpha| \leq 2\sqrt{3}(2+b)\mu^M \quad (2.17)$$

гіроскопичних датчиків:

$$|\Delta\alpha^G| \leq 2\sqrt{3}(2+b^*)\mu^G \quad (2.18)$$

З формули (2.17) виходить, що при потрібній помилці вимірювання азимуту $|\Delta\alpha| \leq 1^\circ$ не перевищує одного градуса, максимальна величина перекосу осей чутливості для магнітного способу, що відповідає м. Дніпропетровську, не повинна перевищувати трьох кутових хвилин. $|\mu| \leq 3'$. Неортогональності осей з такою точністю можна усунути спеціальним регулюванням, мікроповоротами осей чутливості первинних перетворювачів на кути μ у бік протилежний вихідному положенню до забезпечення необхідної взаємної ортогональності осей. Однак це вимагає ускладнення конструкції інклінометра через введення регулювальних гвинтів та ретельне контрування їх. Іншим підходом є усунення такої похибки експериментальними вимірами перекосів та облік їх при обробці результатів показань.

2.2 Похибки інклінометрів через неідентичність електричних параметрів первинних перетворювачів

Нехай інклінометр включає три взаємно ортогональні акселерометри, три магніточутливі. Складемо оцінки помилок обчислення зенітного, візирного кутів та азимуту через відхилення передавальних коефіцієнтів Δk_i від номінального значення k_n , та відмінності по модулю нульових сигналів первинних перетворювачів, що становлять інклінометр.

Визначимо допустимі значення величин Δk_i , U_{0i} у яких похибки обчислення шуканих кутів не перевищують заданих значень $\delta\theta$, $\delta\varphi$, $\delta\alpha$.

2.2.1 Оцінка похибок інклінометрів через зміну передавальних коефіцієнтів первинних перетворювачів.

Числові значення передавальних коефіцієнтів Δk_i кожного первинного перетворювача, як правило, відрізняються один від одного, крім того, при зміні температури навколишнього середовища ці величини теж виявляються змінними.

Позначимо зміну передавальних коефіцієнтів виразом $k = k_H + \Delta k$, де Δk – відхилення передавального коефіцієнта від деякого постійного, номінального значення k_H .

Вихідні рівняння запишемо в скалярному вигляді,

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1^a - U_{01}^a}{U_{1m}^a} &= -\cos \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_2^a - U_{02}^a}{U_{2m}^a} &= \sin \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_3^a - U_{03}^a}{U_{3m}^a} &= \cos \theta, \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1 - U_{01}}{U_{1m}} &= \cos \varphi \cos \theta \cos \alpha - \sin \varphi \sin \alpha - b \cos \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_2 - U_{02}}{U_{2m}} &= -\sin \varphi \cos \theta \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha + b \sin \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_3 - U_{03}}{U_{3m}} &= \cos \alpha \sin \theta + b \cos \theta, \end{aligned} \right\} (2.20)$$

$$\text{де } b = \frac{H}{Z}, \quad U_{mi}^M = k_i^M H, \quad U_{mi}^a = k_i^a g.$$

Для гіроскопічних перетворювачів вирази виявляються формою збігаються з вихідними рівняннями (2.20) для феррозондових магніточутливих перетворювачів. Тому оцінки похибок для гіроскопічних датчиків можуть бути отримані з оцінок для магніточутливих перетворювачів.

Без урахування похибок $k_1 = k_2 = k_3 = k_H$, вважаючи, що передавальні коефіцієнти кожного типу перетворювачів однакові, з акселерометрів та магніточутливих датчиків знімаються сигнали:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1^a}{U_m^a} &= -\cos \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_2^a}{U_m^a} &= \sin \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_3^a}{U_m^a} &= \cos \theta, \end{aligned} \right\} (2.21)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1^M}{U_m^M} &= \cos \varphi \cos \theta \cos \alpha - \sin \varphi \sin \alpha - b \cos \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_2^M}{U_m^M} &= -\sin \varphi \cos \theta \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha + b \sin \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_3^M}{U_m^M} &= \cos \alpha \sin \theta + b \cos \theta, \end{aligned} \right\} (2.22)$$

де $U_m^a = k_H^a g$, $U_m^M = k_H^M H$, а $U_{0i}^a = 0$, $U_{0i}^M = 0$, $i = 1, 2, 3$,
насправді через відмінність передавальних коефіцієнтів від
номінальних маємо співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1^a}{U_m^a + \Delta U_1^a} &= -\cos(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\theta + \Delta\theta), \\ \frac{U_2^a}{U_m^a + \Delta U_2^a} &= \sin(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\theta + \Delta\theta), \\ \frac{U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} &= \cos(\theta + \Delta\theta). \end{aligned} \right\} (2.23)$$

Визначимо допустимі значення величин Δ_i^a , $i = 1, 2, 3$, за
яких похибки обчислення візирного, зенітного кутів не
перевищують заданих з технічних умов похибок $\delta\varphi$, $\delta\theta$.

З формул (2.21) та (2.23) випливає, що

$$\begin{aligned} -\Delta\varphi &= \arctg \frac{U_2^a (U_m^a + \Delta U_1^a)}{(U_m^a + \Delta U_2^a) U_1^a} - \arctg \frac{U_2^a}{U_1^a}, \text{ або} \\ -\Delta\varphi &= \operatorname{arcctg} \frac{U_1^a (U_m^a + \Delta U_2^a)}{(U_m^a + \Delta U_1^a) U_2^a} - \operatorname{arcctg} \frac{U_1^a}{U_2^a}. \end{aligned}$$

Використовуючи формулу кінцевих прирощень, вихідні співвідношення перепишемо наступним чином

$$-\Delta\varphi = \frac{\frac{U_2^a \left[\frac{U_m^a + \Delta U_1^a}{U_m^a + \Delta U_2^a} - 1 \right]}{U_1^a}}{1 + \left[\frac{U_2^a}{U_1^a} + \gamma \left(\frac{U_m^a + \Delta U_1^a}{U_m^a + \Delta U_2^a} \right) \frac{U_2^a}{U_1^a} \right]^2}, \quad \gamma \in (0,1), \quad (2.24)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{U_1^a \left[\frac{U_m^a + \Delta U_2^a}{U_m^a + \Delta U_1^a} - 1 \right]}{U_2^a}}{1 + \left[\frac{U_1^a}{U_2^a} + \gamma_1 \left(\frac{U_m^a + \Delta U_2^a}{U_m^a + \Delta U_1^a} \right) \frac{U_1^a}{U_2^a} \right]^2}, \quad \gamma_1 \in (0,1). \quad (2.25)$$

Нехай $\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{4}\right] \cup \left[\frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}\right] \cup \left[\frac{7\pi}{4}, 2\pi\right]$, тоді $|\cos\varphi| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$,

$|\sin\varphi| \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$ та з (2.24) слідує оцінка

$$|\Delta\varphi| \leq \frac{|\Delta U_1^a - \Delta U_2^a|}{|U_m^a + \Delta U_2^a|}. \quad (2.26)$$

Нехай $|\Delta U_1^a| + |\Delta U_2^a| < |U_m^a|$, тоді з виразів (2.26), (2.27)

отримаємо:

$$|\Delta\varphi| \leq \frac{|\Delta U_1^a| + |\Delta U_2^a|}{|U_m^a| - |\Delta U_2^a|} \leq \frac{|\Delta U_1^a| + |\Delta U_2^a|}{|U_m^a| - |\Delta U_2^a| - |\Delta U_1^a|}. \quad (2.28)$$

Нехай $\frac{|\Delta U_1^a| + |\Delta U_2^a|}{|U_m^a| - |\Delta U_1^a| - |\Delta U_2^a|} \leq \delta\varphi$, або теж саме

$$|\Delta U_1^a| + |\Delta U_2^a| \leq \frac{|U_m^a|}{1 + \delta\varphi} \delta\varphi. \quad (2.29)$$

$$\text{В цьому випадку } |\Delta\varphi| \leq \delta\varphi. \quad (2.30)$$

Якщо $\varphi \in \left[\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}\right] \cup \left[\frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}\right]$, то $|\sin\varphi| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$ та $|\cos\varphi| \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$ та з формули (2.25) слідує оцінка

$$|\Delta\varphi| \leq \frac{|\Delta U_1^a - \Delta U_2^a|}{|U_m^a + \Delta U_1^a|}. \quad (2.31)$$

Як і вище, із (2.31) отримуємо, що за умови (2.29) справедлива оцінка (2.30).

Знайдемо похибку обчислення зенітного кута з виразів (2.21), (2.23).

$$\Delta\theta = \arccos\left(\frac{U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a}\right) - \arccos\frac{U_3^a}{U_m^a}, \text{ або}$$

$$\Delta\theta = -\frac{\left[\frac{U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} - \frac{U_3^a}{U_m^a}\right]}{\left\{1 - \left[\frac{U_3^a}{U_m^a} + \gamma\left(\frac{U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} - \frac{U_3^a}{U_m^a}\right)\right]^2\right\}}, \quad \text{яку можна}$$

записати так:

$$\Delta\theta = \frac{\left[\frac{\Delta U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} \right] \frac{U_3^a}{U_m^a}}{\left[1 - \left(\frac{U_3^a}{U_m^a} \right)^2 \left(1 - \gamma \frac{\Delta U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.32)$$

Положим $\sin \theta = r_0$, вважаємо, що $\sin \theta_0 \geq r_0 > 0$, ($0 < r_0 < 1$).
Формулу (2.32) перепишемо так:

$$\Delta\theta = \frac{\left[\frac{\Delta U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} \right] \frac{U_3^a}{U_m^a}}{\left[r_0^2 + 2\gamma \left(\frac{U_3^a}{U_m^a} \right)^2 \frac{\Delta U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} - \gamma^2 \left(\frac{U_3^a}{U_m^a} \right)^2 \frac{(\Delta U_3^a)^2}{(U_m^a + \Delta U_3^a)^2} \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.33)$$

Далі нехай виконані співвідношення

$$|\Delta U_3^a| < |U_m^a|, \quad (2.34)$$

$$r_0^2 - 2 \frac{|\Delta U_3^a|}{|U_m^a| - |\Delta U_3^a|} - \frac{|\Delta U_3^a|^2}{(|U_m^a| - |\Delta U_3^a|)^2} > 0, \quad (2.35)$$

тоді з (2.33) з урахуванням (2.34), (2.35) отримуємо оцінку

$$\begin{aligned} |\Delta\theta| &\leq \frac{\left| \frac{U_3^a}{U_m^a} \right| \cdot \left| \frac{\Delta U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} \right|}{\left\{ r_0^2 + 2 \frac{|U_3^a|^2}{|U_m^a|} \left| \frac{\Delta U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} \right| - \frac{|U_3^a|^2}{|U_m^a|} \left| \frac{\Delta U_3^a}{U_m^a + \Delta U_3^a} \right|^{1/2} \right\}} \\ &\leq \frac{\left| \frac{\Delta U_3^a}{|U_m^a| - |\Delta U_3^a|} \right|}{\left\{ r_0^2 - 2 \frac{|\Delta U_3^a|}{|U_m^a| - |\Delta U_3^a|} - \frac{|\Delta U_3^a|^2}{(|U_m^a| - |\Delta U_3^a|)^2} \right\}^{1/2}} \leq \delta\theta \end{aligned} \quad (2.36)$$

Остання нерівність еквівалентна наступному

$$\frac{|\Delta U_3^a|}{|U_m^a| - |\Delta U_3^a|} \leq \frac{\sqrt{\delta^4 \theta + (1 + \delta^2 \theta) r_0^2 \delta^2 \theta - \delta^2 \theta}}{1 + \delta^2 \theta} \quad (2.37)$$

Неважко перевірити, що з (2.37) випливає співвідношення (2.35). Тепер оцінку (2.37) зручно переписати у вигляді:

$$|\Delta U_3^a| \leq |U_m^a| \frac{\sqrt{\delta^4 \theta + (1 + \delta^2 \theta) r_0^2 \delta^2 \theta - \delta^2 \theta}}{\sqrt{\delta^4 \theta + (1 + \delta^2 \theta) r_0^2 \delta^2 \theta + 1}} \quad (2.38)$$

Зрозуміло, що за умови (2.38) виконується нерівність (2.34). Отже, за умови (2.38) з (2.36) отримуємо $|\Delta \theta| \leq \delta \theta$.

Таким чином, якщо величини ΔU_i^a , $i = 1, 2, 3$ задовольняють умовам

$$|\Delta U_1^a| + |\Delta U_2^a| \leq \frac{|U_m^a|}{(1 + \delta \varphi)} \delta \varphi,$$

$$|\Delta U_3^a| \leq U_m^a \frac{\sqrt{\delta^4 \theta + (1 + \delta^2 \theta) r_0^2 \delta^2 \theta - \delta^2 \theta}}{1 + \sqrt{\delta^4 \theta + (1 + \delta^2 \theta) r_0^2 \delta^2 \theta}},$$

$$\text{тоді } |\Delta \varphi| \leq \delta \varphi, \quad |\Delta \theta| \leq \delta \theta.$$

Нехай інклінометричний датчик утворений на основі трьох взаємно ортогональних магніточутливих перетворювачів або гіроскопів. Для нього складемо уточнену

оцінку помилки обчислення азимуту через відхилення передавальних коефіцієнтів $\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3$ від номінального значення k_n . Вважаємо, що нульовий сигнал перетворювачів відсутній $U_{0i} = 0, i = 1, 2, 3$.

Визначимо допустимі значення величин Δk_i , у яких похибка обчислення азимуту вбирається у заданого значення $\delta\alpha$.

Без урахування похибок (при $k_1 = k_2 = k_3 = k_n$) з первинних перетворювачів азимуту знімаються сигнали, що описуються рівняннями (2.22). Через відмінність передавальних коефіцієнтів перетворювачів від номінального значення маємо співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1}{U_m + \Delta U_1} &= \cos \varphi \cos \theta \cos(\alpha + \Delta\alpha) - \sin \varphi \sin(\alpha + \Delta\alpha) - b \cos \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_2}{U_m + \Delta U_2} &= -\sin \varphi \cos \theta \cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \varphi \sin(\alpha + \Delta\alpha) + b \sin \varphi \sin \theta, \\ \frac{U_3}{U_m + \Delta U_3} &= \cos(\alpha + \Delta\alpha) \sin \theta + b \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

Розв'яжемо рівняння (2.22), (2.39) відносно $\sin \alpha, \cos \alpha, \sin(\alpha + \Delta\alpha), \cos(\alpha + \Delta\alpha)$:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{U_1}{U_m} \cos \theta \cos \varphi - \frac{U_2}{U_m} \cos \theta \sin \varphi + \frac{U_3}{U_m} \sin \theta, \\ -\sin \alpha &= \frac{U_1}{U_m} \sin \varphi + \frac{U_2}{U_m} \cos \varphi, \\ b &= \left(\frac{U_2}{U_m} \sin \varphi - \frac{U_1}{U_m} \cos \varphi \right) \sin \theta + \frac{U_2}{U_m} \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

та

$$\begin{aligned}
\cos(\alpha + \Delta\alpha) &= \frac{U_1}{U_m + \Delta U_1} \cos \theta \cos \varphi - \frac{U_2}{U_m + \Delta U_2} \cos \theta \sin \varphi + \frac{U_3}{U_m + \Delta U_3} \sin \theta, \\
-\sin(\alpha + \Delta\alpha) &= \frac{U_1}{U_m + \Delta U_1} \sin \varphi + \frac{U_2}{U_m + \Delta U_2} \cos \varphi, \\
b &= \left(\frac{U_2}{U_m + \Delta U_2} \sin \varphi - \frac{U_1}{U_m + \Delta U_1} \cos \varphi \right) \sin \theta + \frac{U_2}{U_m + \Delta U_3} \cos \theta
\end{aligned} \tag{2.41}$$

З відповідних рівнянь системи (2.41) віднімемо рівняння системи (2.40), отримаємо співвідношення:

$$\begin{aligned}
\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \alpha &= \frac{U_1}{U_m} \left(\frac{-\Delta U_1}{U_m + \Delta U_1} \right) \cos \theta \cos \varphi - \frac{U_2}{U_m} \left(\frac{\Delta U_2}{U_m + \Delta U_2} \right) \\
&\quad - \frac{U_3}{U_m} \left(\frac{\Delta U_3}{U_m + \Delta U_3} \right) \sin \theta, \\
\sin(\alpha + \Delta\alpha) + \sin \alpha &= -\frac{U_1}{U_m} \left(\frac{\Delta U_1}{U_m + \Delta U_1} \right) \sin \varphi - \frac{U_2}{U_m} \left(\frac{\Delta U_2}{U_m + \Delta U_2} \right) \cos \varphi.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Так як $\left(\frac{U_1}{U_m}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{U_m}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{U_m}\right)^2 = 1 + b^2$, то $\left|\frac{U_i}{U_m}\right| \leq \sqrt{1 + b^2}$

для $i = 1, 2, 3$.

Тепер із виразів (2.42) слідують оцінки:

$$\begin{aligned}
|\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \alpha| &\leq \sqrt{1 + b^2} \left\{ \frac{|\Delta U_1|}{|U_m + \Delta U_1|} + \frac{|\Delta U_2|}{|U_m + \Delta U_2|} + \frac{|\Delta U_3|}{|U_m + \Delta U_3|} \right\}, \\
|\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin \alpha| &\leq \sqrt{1 + b^2} \left\{ \frac{|\Delta U_1|}{|U_m + \Delta U_1|} + \frac{|\Delta U_2|}{|U_m + \Delta U_2|} \right\},
\end{aligned}$$

які при $|\Delta U_1| + |\Delta U_2| + |\Delta U_3| < |\Delta U_m|$ записуються в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} |\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \alpha| &\leq \sqrt{1+b^2} \frac{|\Delta U_1| + |\Delta U_2| + |\Delta U_3|}{|\Delta U_m| - |\Delta U_1| - |\Delta U_2| - |\Delta U_3|}, \\ |\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin \alpha| &\leq \sqrt{1+b^2} \frac{|\Delta U_1| + |\Delta U_2|}{|\Delta U_m| - |\Delta U_1| - |\Delta U_2|} \leq \\ &\leq \sqrt{1+b^2} \frac{|\Delta U_1| + |\Delta U_2| + |\Delta U_3|}{|\Delta U_m| - |\Delta U_1| - |\Delta U_2| - |\Delta U_3|}. \end{aligned} \right\} (2.43)$$

Зведемо ліві частини рівняння (2.43) у квадрат і складемо

$$[\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \alpha]^2 + [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin \alpha]^2 = 2(1 - \cos \Delta\alpha) \quad (2.44)$$

Розкладемо функцію $\cos \Delta\alpha$ за формулою Тейлора:

$$\cos \Delta\alpha = 1 - \frac{1}{2!} \Delta^2 \alpha + \frac{\cos(\gamma \Delta\alpha)}{4!} \Delta^4 \alpha, \quad \gamma \in (0,1). \quad \text{Тоді формулу (3.44)}$$

запишемо у вигляді:

$$[\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \alpha]^2 + [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin \alpha]^2 = \Delta^2 \alpha \left[1 - \frac{\cos(\gamma \Delta\alpha)}{12} \Delta^2 \alpha \right] \quad (2.45)$$

і, підставивши її в систему (2.43), отримаємо оцінку:

$$\Delta^2 \alpha \left[1 - \frac{\cos(\gamma \Delta\alpha)}{12} \Delta^2 \alpha \right] \leq 2(1+b^2) \frac{(|\Delta U_1| + |\Delta U_2| + |\Delta U_3|)^2}{(|\Delta U_m| - |\Delta U_1| - |\Delta U_2| - |\Delta U_3|)^2}$$

звідки випливає нерівність:

$$\Delta^2 \alpha \leq 2(1+b^2) \frac{(|\Delta U_1| + |\Delta U_2| + |\Delta U_3|)^2}{(|\Delta U_m| - |\Delta U_1| - |\Delta U_2| - |\Delta U_3|)^2 \left(1 - \frac{\Delta^2 \alpha}{12} \right)}, \quad (2.46)$$

так як $1 - \frac{\cos(\gamma \Delta\alpha)}{12} \Delta^2 \alpha \geq 1 - \frac{\Delta^2 \alpha}{12}$, або уточнена оцінка:

$$|\Delta U_1| + |\Delta U_2| + |\Delta U_3| \leq |\Delta U_m| \frac{\Delta\alpha \left(1 - \frac{\Delta^2\alpha}{12}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left[\sqrt{2}\sqrt{1+b^2} + \Delta\alpha \left(1 - \frac{\Delta^2\alpha}{12}\right)^{\frac{1}{2}}\right]}. \quad (2.47)$$

З оцінки (2.47) випливає грубіша проста оцінка:

$$\frac{|\Delta U_1|}{|U_m|} + \frac{|\Delta U_2|}{|U_m|} + \frac{|\Delta U_3|}{|U_m|} \leq |\Delta\alpha|, \quad (2.48)$$

яка переписується наступним чином:

$$\frac{|\Delta k_1|}{|k_1|} + \frac{|\Delta k_2|}{|k_1|} + \frac{|\Delta k_3|}{|k_1|} \leq |\Delta\alpha|, \quad \text{якщо врахувати, що}$$

$$U_m = kH, \quad \Delta U_i = \Delta k_i H.$$

Якщо ввести граничну помилку виміру $\delta\alpha$, то похибка обчислення азимуту $|\Delta\alpha|$ менше заданої, якщо граничні допустимі значення величин Δk_i задовольняють нерівності:

$$\frac{|\Delta k_1|}{|k_H|} + \frac{|\Delta k_2|}{|k_H|} + \frac{|\Delta k_3|}{|k_H|} \leq \frac{\delta\alpha \left(1 - \frac{\delta^2\alpha}{12}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left[\sqrt{2}\sqrt{1+b^2} + \delta\alpha \left(1 - \frac{\delta^2\alpha}{12}\right)^{\frac{1}{2}}\right]}. \quad (2.49)$$

Позначимо $\frac{\Delta k}{k_H} = \max \left\{ \frac{|\Delta k_1|}{|k_H|}, \frac{|\Delta k_2|}{|k_H|}, \frac{|\Delta k_3|}{|k_H|} \right\}$, тоді спрощену

оцінку (2.48) можна представити так: $\Delta \alpha \leq 3 \frac{\Delta k}{k_H}$.

Звернемося до числового прикладу. Нехай гранична помилка виміру в азимуті не повинна перевищувати одного градуса $\delta \alpha \leq 1^\circ$. Тоді передавальні коефіцієнти $\frac{\Delta k}{k_H} \leq \frac{1}{57,3 \cdot 3}$ не повинні відрізнятися на 0,6%.

Ця умова вимагає ретельного припасування параметрів всіх трьох первинних перетворювачів при їх виробництві. Крім того, передавальні коефіцієнти не повинні змінюватися на більшу, ніж 0,6% від вихідної величини за зміни температурних умов експлуатації.

2.2.2 Оцінка похибок інклінометрів через відмінність значень нульових сигналів первинних перетворювачів.

Складемо оцінки помилок обчислення візирного, зенітного кутів та азимуту через наявність нульового сигналу у показаннях первинних перетворювачів. Нульовий сигнал кожного перетворювача за величиною відрізняється друг від друга. Визначимо допустимі значення величин нульового сигналу U_{0i} .

З акселерометрів, магніточутливих та гіроскопічних датчиків без урахування похибок від нульового сигналу знімаються напруги:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_1}{u_{1m}} &= -\cos \varphi \sin \theta, \\ \frac{u_2}{u_{2m}} &= \sin \varphi \sin \theta, \\ \frac{u_3}{u_{3m}} &= \cos \theta, \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{u'_1}{u'_{1m}} &= \cos \varphi \cos \theta \cos \alpha - \sin \varphi \sin \alpha - b \cos \varphi \sin \theta, \\ \frac{u'_2}{u'_{2m}} &= -\sin \varphi \cos \theta \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha + b \sin \varphi \sin \theta, \\ \frac{u'_3}{u'_{3m}} &= \cos \alpha \sin \theta + b \cos \theta, \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

Насправді вимірювання проводяться з похибками і при визначенні азимуту, візирного та зенітного кутів використовують співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_1 - u_{10}}{u_{1m}} &= -\cos(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\theta + \Delta\theta), \\ \frac{u_2 - u_{20}}{u_{2m}} &= \sin(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\theta + \Delta\theta), \\ \frac{u_3 - u_{30}}{u_{3m}} &= \cos(\theta + \Delta\theta), \end{aligned} \right\} \quad (2.52)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{u'_1 - u'_{10}}{u'_{1m}} &= \cos(\varphi + \Delta\varphi) \cos(\theta + \Delta\theta) \cos(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\alpha + \Delta\alpha) - \\ &- b \cos(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\theta + \Delta\theta), \\ \frac{u'_2 - u'_{20}}{u'_{2m}} &= -\sin(\varphi + \Delta\varphi) \cos(\theta + \Delta\theta) \cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\alpha + \Delta\alpha) + \\ &+ b \sin(\varphi + \Delta\varphi) \sin(\theta + \Delta\theta), \\ \frac{u'_3 - u'_{30}}{u'_{3m}} &= \cos(\alpha + \Delta\alpha) \sin(\theta + \Delta\theta) + b \cos(\theta + \Delta\theta). \end{aligned} \right\} \quad (2.53)$$

Розглядається таке завдання: задані абсолютні похибки азимуту, візирного та зенітного кутів. $\delta\alpha, \delta\varphi, \delta\theta$. Потрібно визначити допустимі значення параметрів $U_{i0}, U_{im}, U'_{i0}, U'_{im}$. Точніше за яких значень величин $U_{i0}, U_{im}, U'_{i0}, U'_{im}$ справедливі оцінки:

$$|\Delta\varphi| \leq \delta\varphi, \quad |\Delta\theta| \leq \delta\theta, \quad |\Delta\alpha| \leq \delta\alpha. \quad (2.54)$$

Для вирішення поставленого завдання необхідно обмежити область зміни зенітного кута θ , так як при $\theta=0, \pi$ азимут α та візирний кут φ визначаються неоднозначно. Тому припустимо, що:

$$R = \sin \theta \geq r_0, \quad (2.55)$$

де r_0 – задане число ($0 < r_0 < 1$). Далі при отриманні оцінок корисно інтервал вимірювання візирного кута $[0, 2\pi]$ розбити на дві частини А і В такі, що

$$|\cos \varphi| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad \text{при } \varphi \in A \quad (2.56)$$

та

$$|\sin \varphi| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad \text{при } \varphi \in B \quad (2.57)$$

Безліч А є об'єднанням відрізків $\left[0, \frac{\pi}{4}\right]$, $\left[\frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi\right]$ та $\left[\frac{7}{4}\pi, 2\pi\right]$, а В відрізків $\left[\frac{\pi}{4}, \frac{3}{4}\pi\right]$ та $\left[\frac{5}{4}\pi, \frac{7}{4}\pi\right]$.

Тепер із формул (2.50) отримуємо, що похибка вимірювання візирного кута обчислюється за формулою:

$$\Delta\varphi = -\operatorname{arctg}\left(\frac{u_2 - u_{20}}{u_1 - u_{10}} \frac{u_{1m}}{u_{2m}}\right) + \operatorname{arctg}\frac{u_2}{u_1} \frac{u_{1m}}{u_{2m}}. \quad (2.58)$$

Використовуючи формулу кінцевих прирощень

$$\Delta f(x) = f'(x + \gamma\Delta x)\Delta x, \quad 0 < \gamma < 1, \quad (2.59)$$

співвідношення (2.58) перепишемо у вигляді:

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{u_{1m}}{u_{2m}} \left(\frac{u_2}{u_1} - \frac{u_2 - u_{20}}{u_1 - u_{10}} \right)}{1 + \left[\frac{u_2}{u_1} \frac{u_{1m}}{u_{2m}} + \gamma \left(\frac{u_2 - u_{20}}{u_1 - u_{10}} - \frac{u_2}{u_1} \right) \frac{u_{1m}}{u_{2m}} \right]^2}.$$

Звідки випливає нерівність:

$$|\Delta\varphi| \leq \left| \frac{u_{1m}(u_{20}u_1 - u_{10}u_2)}{u_{2m}u_1(u_1 - u_{10})} \right|.$$

Останнє, в силу (3.50) та (3.55), записується наступним чином:

$$|\Delta\varphi| \leq \left| \frac{\frac{u_{20}}{u_{2m}} \cos\varphi + \frac{u_{10}}{u_{1m}} \sin\varphi}{\cos\varphi \left(r \cos\varphi + \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right)} \right|. \quad (2.60)$$

Нехай $\varphi \in A$. Тоді, з огляду на (3.59), (3.60) отримуємо оцінку:

$$\begin{aligned} \left| r \cos \varphi + \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right| &\geq \left| r \cos \varphi \right| - \left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right| \geq \left| r \cos \varphi \right| - \left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right| - \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| \geq \\ &\geq r_0 \frac{\sqrt{2}}{2} - \left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right| - \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right|. \end{aligned} \quad (2.61)$$

Припустатимемо, що

$$\left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right| + \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| < \frac{\sqrt{2}}{2} r_0 \quad (2.62)$$

Далі формулу (2.60) перепишемо у вигляді:

$$|\Delta\varphi| \leq \frac{\left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} + \frac{u_{10}}{u_{1m}} \operatorname{tg} \varphi \right|}{\left| r \left(\cos \varphi + \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right) \right|}. \quad (2.63)$$

Так як $|\operatorname{tg} \varphi| \leq 1$ при $\varphi \in A$, то з нерівності (2.61) ÷ (2.63) маємо:

$$|\Delta\varphi| \leq \frac{\frac{u_{20}}{u_{2m}} + \frac{u_{10}}{u_{1m}}}{r_0 \frac{\sqrt{2}}{2} - \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| - \left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right|}. \quad (2.64)$$

Нехай

$$\frac{\frac{u_{20}}{u_{2m}} + \frac{u_{10}}{u_{1m}}}{r_0 \frac{\sqrt{2}}{2} - \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| - \left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right|} \leq \delta\varphi, \text{ тобто}$$

$$\left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right| + \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| \leq r_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\delta\varphi}{1 + \delta\varphi}, \quad (2.65)$$

тоді з (2.64) маємо оцінку $|\Delta\varphi| \leq \delta\varphi$.

Зазначимо, що співвідношення (2.62), в силу (2.65), завжди виконується.

Якщо $\varphi \in B$, то для оцінки похибки слід використати формулу:

$$\Delta\varphi = -\operatorname{arccctg} \left(\frac{u_1 - u_{10}}{u_2 - u_{20}} \frac{u_{2m}}{u_{1m}} \right) + \operatorname{arccctg} \frac{u_1}{u_2} \frac{u_{2m}}{u_{1m}},$$

яку можна записати у вигляді:

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{u_{2m}}{u_{1m}} \left(\frac{u_1 - u_2}{u_2 - u_1} - \frac{u_1}{u_2} \right)}{1 + \left[\frac{u_1}{u_2} \frac{u_{2m}}{u_{1m}} + \gamma \left(\frac{u_1 - u_{10}}{u_2 - u_{20}} - \frac{u_1}{u_2} \right) \frac{u_{2m}}{u_{1m}} \right]^2}.$$

Отже

$$|\Delta\varphi| \leq \left| \frac{u_{2m}(u_{20}u_1 - u_{10}u_2)}{u_{1m}u_2(u_2 - u_{20})} \right|,$$

або через співвідношення (2.50), (2.55) маємо:

$$|\Delta\varphi| \leq \left| \frac{\frac{u_{20}}{u_{2m}} \cos \varphi + \frac{u_{10}}{u_{1m}} \sin \varphi}{\sin \varphi \left(r \sin \varphi - \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right)} \right|.$$

Так як $|\operatorname{ctg} \varphi| \leq 1$ $\varphi \in B$, то з останньої нерівності випливає оцінка:

$$|\Delta \varphi| \leq \frac{\left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| + \left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right|}{\left| r \sin \varphi - \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right|} \quad (2.66)$$

Далі, так як

$$\left| r \sin \varphi - \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| \geq \left| r \sin \varphi \right| - \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| - \left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right| \geq r_0 \frac{\sqrt{2}}{2} - \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| - \left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right|, \text{ то за}$$

умови (2.62) із формули (2.66) слід оцінка (2.64). Тому під час виконання умови (2.65) маємо оцінку $|\Delta \varphi| \leq \delta \varphi$.

Розглянемо тепер похибку обчислення кута θ . Зі співвідношень (2.50), (2.52) маємо:

$$\Delta \theta = \arccos \left(\frac{u_3 - u_{30}}{u_{3m}} \right) - \arccos \frac{u_3}{u_{3m}}.$$

Останню формулу в силу (2.59) можна записати у вигляді:

$$\Delta \theta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{u_3}{u_{3m}} - \gamma \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right)^2}} \frac{u_{30}}{u_{3m}}, \quad \gamma \in (0,1),$$

або тому що $1 - \frac{u_3^2}{u_{3m}^2} = 1 - \cos^2 \theta = r^2$, то

$$\Delta\theta = \frac{1}{\sqrt{r^2 + 2\gamma \frac{u_3}{u_{3m}} \frac{u_{30}}{u_{3m}} - \gamma^2 \frac{u_{30}^2}{u_{3m}^2}}} \frac{u_{30}}{u_{3m}}. \quad (2.67)$$

Далі маємо

$$\begin{aligned} r^2 + 2\gamma \frac{u_3}{u_{3m}} \frac{u_{30}}{u_{3m}} - \gamma^2 \frac{u_{30}^2}{u_{3m}^2} &\geq r^2 - 2\gamma \left| \frac{u_3}{u_{3m}} \right| \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| - \gamma^2 \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right|^2 \geq \\ &\geq r^2 - 2 \left| \frac{u_3}{u_{3m}} \right| \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| - \gamma^2 \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right|^2, \end{aligned}$$

а так як $r \geq r_0$, $\left| \frac{u_3}{u_{3m}} \right| = |\cos\theta| \leq 1$, то

$$r^2 + 2\gamma \frac{u_3}{u_{3m}} \frac{u_{30}}{u_{3m}} - \gamma^2 \frac{u_{30}^2}{u_{3m}^2} \geq r_0^2 - 2 \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| - \gamma^2 \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right|^2. \quad (2.68)$$

Нехай тепер виконано нерівність:

$$\left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right|^2 + 2 \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| < r_0^2, \quad (2.69)$$

тоді, враховуючи (2.68) з (2.67), отримуємо оцінку:

$$|\Delta\varphi| = \frac{\left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right|}{\sqrt{r_0^2 - 2 \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| - \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right|^2}}. \quad (2.70)$$

Якщо

$$\frac{\left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right|}{\sqrt{r_0^2 - 2 \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| - \left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right|^2}} \leq \delta\theta, \quad (2.71)$$

то з (2.70) маємо оцінку $|\Delta\theta| \leq \delta\theta$.

Умову (2.71) неважко записати в еквівалентній формі:

$$\left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| \leq \frac{\sqrt{\delta^4\theta + (1 + \delta^2\theta)r_0^2\delta^2\theta - \delta^2\theta}}{1 + \delta^2\theta}. \quad (2.72)$$

Більше того, із (21) випливає справедливність оцінки (2.69). Справді, це співвідношення еквівалентне умові

$$\left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| < \sqrt{1 + r_0^2} - 1, \quad \text{а} \quad \text{справедливність} \quad \text{нерівності}$$

$$\frac{\sqrt{\delta^4\theta + (1 + \delta^2\theta)r_0^2\delta^2\theta - \delta^2\theta}}{1 + \delta^2\theta} < \sqrt{1 + r_0^2} - 1 \quad \text{перевіряється}$$

стандартним чином.

Для оцінки параметрів U_{0i}, U_{im}, U'_{0i} и $U'_{im}, i=1,2,3$, при яких помилка виміру азимуту $|\Delta\alpha| \leq \delta\alpha$, використовуємо рівняння:

$$\cos \alpha = \frac{u'_1}{u'_{1m}} \cos \theta \cos \varphi - \frac{u'_2}{u'_{2m}} \cos \theta \cos \varphi + \frac{u'_3}{u'_{3m}} \sin \theta,$$

$$-\sin \alpha = \frac{u'_1}{u'_{1m}} \sin \varphi + \frac{u'_2}{u'_{2m}} \cos \varphi,$$

$$\cos(\alpha + \Delta\alpha) = \frac{u'_1 - u'_{10}}{u'_{1m}} \cos(\theta + \Delta\theta) \cos(\varphi + \Delta\varphi) - \frac{u'_2 - u'_{20}}{u'_{2m}} \cos(\theta + \Delta\theta) \sin(\varphi + \Delta\varphi) +$$

$$+ \frac{u'_3 - u'_{30}}{u'_{3m}} \sin(\theta + \Delta\theta),$$

$$-\sin(\alpha + \Delta\alpha) = \frac{u'_1 - u'_{10}}{u'_{1m}} \sin(\varphi + \Delta\varphi) + \frac{u'_2 - u'_{20}}{u'_{2m}} \cos(\varphi + \Delta\varphi), \quad (2.73)$$

які впливають із співвідношень (2.51), (2.53).

Зі співвідношень (2.73) отримуємо рівності:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos\alpha &= \\ &= \left[\frac{u'_1 - u'_{10}}{u'_{1m}} \cos(\theta + \Delta\theta) \cos(\varphi + \Delta\varphi) - \frac{u'_2 - u'_{20}}{u'_{2m}} \cos(\theta + \Delta\theta) \sin(\varphi + \Delta\varphi) + \right. \\ &\left. + \frac{u'_3 - u'_{30}}{u'_{3m}} \sin(\theta + \Delta\theta) \right] - \left[\frac{u'_1}{u'_{1m}} \cos\theta \sin\varphi - \frac{u'_2}{u'_{2m}} \cos\theta \sin\varphi + \frac{u'_3}{u'_{3m}} \sin\theta \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin\alpha &= \\ &= \left[\frac{u'_1 - u'_{10}}{u'_{1m}} \sin(\varphi + \Delta\varphi) + \frac{u'_2 - u'_{20}}{u'_{2m}} \cos(\varphi + \Delta\varphi) \right] - \left[\frac{u'_1}{u'_{1m}} \sin\varphi + \frac{u'_2}{u'_{2m}} \cos\varphi \right], \end{aligned}$$

які зручно записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos\alpha &= \frac{u'_1}{u'_{1m}} [\cos(\theta + \Delta\theta) \cos(\varphi + \Delta\varphi) - \cos\theta \cos\varphi] - \\ &- \frac{u'_2}{u'_{2m}} [\cos(\theta + \Delta\theta) \sin(\varphi + \Delta\varphi) - \cos\theta \sin\varphi] = \\ &+ \frac{u'_3}{u'_{3m}} [\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta] - \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \cos(\theta + \Delta\theta) \cos(\varphi + \Delta\varphi) + \\ &+ \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \cos(\theta + \Delta\theta) \sin(\varphi + \Delta\varphi) - \frac{u'_{30}}{u'_{3m}} \sin(\theta + \Delta\theta), \end{aligned} \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} -\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin\alpha &= \frac{u'_1}{u'_{1m}} [\sin(\varphi + \Delta\varphi) - \sin\varphi] + \frac{u'_2}{u'_{2m}} [\cos(\varphi + \Delta\varphi) - \cos\varphi] - \\ &- \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \sin(\varphi + \Delta\varphi) - \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \cos(\varphi + \Delta\varphi). \end{aligned}$$

Далі, використовуючи формулу кінцевих прирощень та аналогічну їй для функцій кількох змінних, неважко отримати оцінки:

$$\begin{aligned} |\cos(\theta + \Delta\theta)\cos(\varphi + \Delta\varphi) - \cos\theta\cos\varphi| &\leq |\Delta\theta| + |\Delta\varphi|, \\ |\cos(\theta + \Delta\theta)\sin(\varphi + \Delta\varphi) - \cos\theta\sin\varphi| &\leq |\Delta\theta| + |\Delta\varphi|, \\ |\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta| &\leq |\Delta\theta|, \quad |\cos(\varphi + \Delta\varphi) - \cos\varphi| \leq |\Delta\varphi|. \end{aligned} \quad (2.75)$$

Тепер із (2.74), (2.75) отримуємо оцінки:

$$\begin{aligned} |\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos\alpha| &\leq \left(\left| \frac{u'_1}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_2}{u'_{2m}} \right| \right) (|\Delta\theta| + |\Delta\varphi|) + \\ &+ \left| \frac{u'_3}{u'_{3m}} \right| |\Delta\theta| + \left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + \left| \frac{u'_{30}}{u'_{3m}} \right|, \\ |\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin\alpha| &\leq \left(\left| \frac{u'_1}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_2}{u'_{2m}} \right| \right) |\Delta\varphi| + \left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right|. \end{aligned} \quad (2.76)$$

А так як

$$\left(\frac{u'_1}{u'_{1m}} \right)^2 + \left(\frac{u'_2}{u'_{2m}} \right)^2 + \left(\frac{u'_3}{u'_{3m}} \right)^2 = 1 + b^2, \text{ то } \left| \frac{u'_i}{u'_{im}} \right| \leq \sqrt{1 + b^2}, i = 1, 2, 3$$

і тому з нерівності (2.76) випливають оцінки виду:

$$\begin{aligned} |\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos\alpha| &\leq \left| \frac{u'_1}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_2}{u'_{2m}} \right| + \left| \frac{u'_3}{u'_{3m}} \right| + \sqrt{1 + b^2} (3|\Delta\theta| + 2|\Delta\varphi|); \\ |\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin\alpha| &\leq \left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + 2\sqrt{1 + b^2} |\Delta\varphi|. \end{aligned} \quad (2.77)$$

Далі неважко показати, що

$$[\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \alpha]^2 + [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin \alpha]^2 = 2 - 2\cos \Delta\alpha.$$

Останню формулу перепишемо, використовуючи формулу Тейлора для функції $\cos \Delta\alpha$

$$\cos \Delta\alpha = 1 - \frac{\Delta^2 \alpha}{2} + \frac{\cos(\gamma \Delta\alpha)}{24} \Delta^4 \alpha, \quad \gamma \in (0,1),$$

наступним чином

$$[\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \alpha]^2 + [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin \alpha]^2 = \Delta^2 \alpha \left(1 - \frac{\cos \gamma \Delta\alpha}{12} \Delta^2 \alpha \right). \quad (2.78)$$

Тепер, використовуючи оцінки (2.77) з (2.78) отримуємо, що

$$\begin{aligned} \Delta^2 \alpha \left(1 - \frac{\cos \gamma \Delta\alpha}{12} \Delta^2 \alpha \right) &\leq \left[\left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + \left| \frac{u'_{30}}{u'_{3m}} \right| + \sqrt{1+b^2} (3|\Delta\theta| + 2|\Delta\varphi|) \right]^2 + \\ &+ \left[\left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + 2\sqrt{1+b^2} |\Delta\varphi| \right]^2. \end{aligned}$$

Так як $1 - \frac{\cos \gamma \Delta\alpha}{12} \Delta^2 \alpha \geq 1 - \frac{\Delta^2 \alpha}{12} \geq \frac{\delta^2 \alpha}{12}$, то з останньої нерівності отримуємо оцінку:

$$\Delta^2 \alpha \leq \frac{\left[\left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + \left| \frac{u'_{30}}{u'_{3m}} \right| + \sqrt{1+b^2} (3|\Delta\theta| + 2|\Delta\varphi|) \right]^2 + \left[\left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + 2\sqrt{1+b^2} |\Delta\varphi| \right]^2}{1 - \frac{\delta^2 \alpha}{12}} \quad (2.79)$$

Нехай справедлива нерівність:

$$\left[\left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + \left| \frac{u'_{30}}{u'_{3m}} \right| + \sqrt{1+b^2} (3\delta\theta + 2\delta\varphi) \right]^2 + \quad (2.80)$$

$$+ \left[\left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + 2\sqrt{1+b^2} \delta\varphi \right]^2 \leq \delta^2 \alpha \left(1 - \frac{\delta^2 \alpha}{12} \right),$$

Тоді з (2.79) випливає оцінка $|\Delta\alpha| \leq \delta\alpha$.

Таким чином, з формул (2.65), (2.72), (2.80) отримуємо, що для того, щоб помилки вимірювання азимуту, візирного та зенітного кутів не перевищували значень $\delta\alpha$, $\delta\varphi$ и $\delta\theta$ достатньо виконання наступних умов щодо параметрів

U_{0i}, U_{im}, U'_{0i} и $U'_{im}, i = 1, 2, 3$:

$$\left| \frac{u_{10}}{u_{1m}} \right| + \left| \frac{u_{20}}{u_{2m}} \right| \leq \frac{r_0 \sqrt{2}}{2} \frac{\delta\varphi}{(1+\delta\varphi)},$$

$$\left| \frac{u_{30}}{u_{3m}} \right| \leq \frac{1}{(1+\delta^2\theta)} \left[\sqrt{\delta^4\theta + (1+\delta^2\theta)r_0^2\delta^2\theta} - \delta^2\theta \right],$$

$$\left[\left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + \left| \frac{u'_{30}}{u'_{3m}} \right| + \sqrt{1+b^2} (3\delta\theta + 2\delta\varphi) \right]^2 +$$

$$+ \left[\left| \frac{u'_{10}}{u'_{1m}} \right| + \left| \frac{u'_{20}}{u'_{2m}} \right| + 2\sqrt{1+b^2} \delta\varphi \right]^2 \leq \delta^2 \alpha \left(1 - \frac{\delta^2 \alpha}{12} \right).$$

2.3. Результати та висновки

Розвинена теорія похибок інклінометрів з нерухомими первинними перетворювачами різної фізичної природи (феррозондами, гіроскопічними датчиками кутової швидкості, акселерометрами) і з карданними маятниковими підвісами. Вона дозволяє проаналізувати фактори, що впливають на

точність виміру кутів просторової орієнтації бурового інструменту, виражені через кути Ейлера через:

- відхилення положення осей чутливості первинних перетворювачів від взаємної ортогональності та опорного тригранника осей, пов'язаного з корпусом інклінометра;

- зміни передавального коефіцієнта та нульового сигналу перетворювача;

- неідентичності електричних параметрів первинних перетворювачів;

- неточної установки маятникових карданних рамок інкліно-метра у площину нахилу та по вертикалі місця.

ЧАСТИНА 3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ, РОЗРОБЛЕНИХ У ДРУГІЙ ЧАСТИНІ.

Моніторинг - система постійного спостереження за явищами та процесами, що проходять у навколишньому середовищі та суспільстві, результати якого служать для обґрунтування управлінських рішень щодо забезпечення безпеки людей та об'єктів економіки.

Для моніторингу будівельних конструкцій використовуються комп'ютерні системи, у состав яких входять первічні перетворювачі різної фізичної природи. Для моніторингу орієнтації важливих конструкцій використовуються різноманітні оптичні прилади, основним недоліком яких є неможливість автоматизувати процес.

3.1 Конструкції перетворювачів нахилу

3.1.1 Перетворювач нахилу на основі акселерометрів

Перетворювач нахилу на основі акселерометрів призначений для вимірювання кутів відхилення від вертикалі у двох площинах і складається з трьох акселерометрів, осі чутливості яких взаємно ортогональні. Автором пропонується як первинні перетворювачі використовувати акселерометри. Макетний зразок було зібрано з двох одноосних акселерометрів, розташованих ортогонально один до одного (рис 3.1). Вони перетворюють кут нахилу у двох площинах у електричний

сигнал, який обробляється комп'ютерною системою в автоматичному режимі.

Весь кристал акселерометра розміром 3.05×3.05 мм зайнятий головним чином схемами формування сигналу, які оточують мініатюрний датчик прискорення розміром 1×1 мм, що у його центрі. Датчик є диференціальною конденсаторною структурою з повітряним діелектриком, обкладки якого вирізані з плоского шматка полікремнієвої плівки товщиною 2 мкм. Нерухомі обкладки цього конденсатора є простими консольними стрижнями, розташованими на висоті 1 мкм від поверхні кристала в повітрі на полікремнієвих стовпчиках-анкерах, приварених до кристала на молекулярному рівні [37–39, 170]. Спрощена схема акселерометра наведена на рис.3.1.

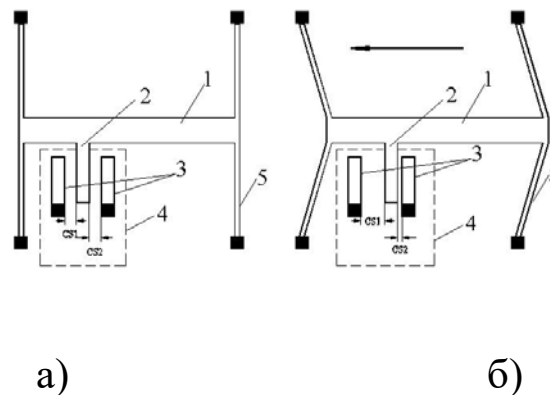


Рисунок 3.1 - Спрощена схема акселерометра ADXL

а) у стані спокою; б) під впливом прикладеного прискорення.

1 – інерційна маса; 2 – рухома обкладка; 3 – нерухомі обкладки;
4 - елементарна комірка; 5 – анкер.

Противази́ні сигнали прямокутної форми частотою 1 МГц однакової амплітуди подаються від генератора відповідно на верхню та нижню обкладки (рис 3.2). Ємності CS1 і CS2 між нерухомими та рухомими обкладками за відсутності прискорення однакові, тому на рухому обкладку передаються сигнали однакової амплітуди. Різнісний сигнал, що надходить на вхід повторювача, дорівнює нулю. При відхиленні датчика від горизонтального положення різницевий сигнал стає відмінним від нуля, причому його амплітуда залежить від величини зсуву рухомої обкладки, а фаза визначається знаком прискорення.

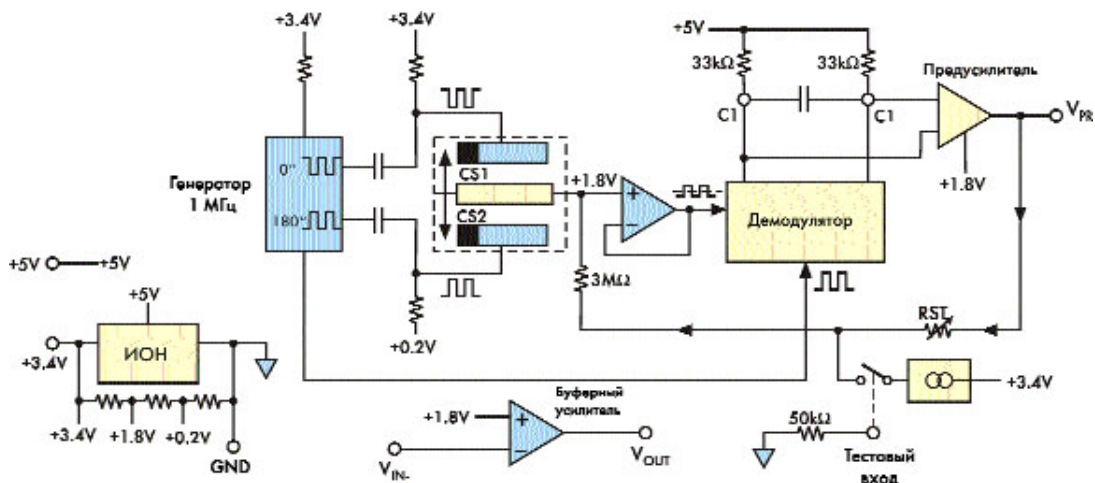


Рисунок 3.2- Функціональна схема акселерометра ADXL

На рис. 3.3 представлений ПН на основі акселерометрів конденсаторного типу серії АТ- 1101, на рис. 3.4 – моделі УППН на основі акселерометрів ІЛІН1 та ADXL50. На рис. 3.5 представлений блок датчиків інклінометричної телесистеми з трьома акселерометрами та трьома феррозондами.

Перетворювач нахилу на основі акселерометрів містить корпус 1 з немагнітного матеріалу, в якому виконані три пази 2 з взаємно перпендикулярними осями симетрії, в яких жорстко закріплені акселерометри 3. Виходи акселерометрів електрично з'єднані зі штепсельним роз'ємом 4.

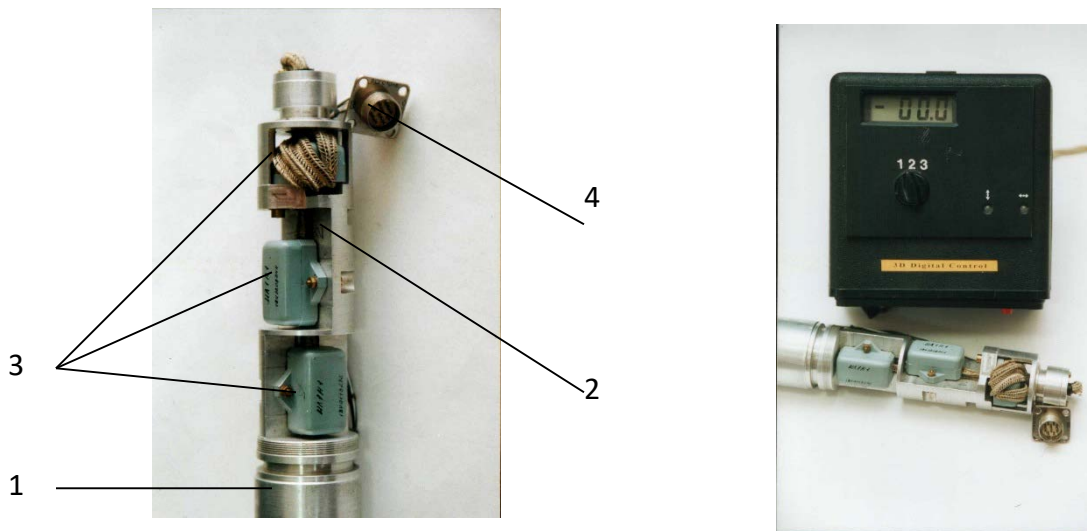


Рисунок 3.3 - Перетворювач нахилу на основі акселерометрів

ПН на основі акселерометрів працює наступним чином. При горизонтальному положенні корпусу 1 інерційні тіла акселерометрів знаходяться в нейтральному положенні і на виході датчика сигнал відсутній. При нахилах щодо горизонту інерційні тіла акселерометрів зміщуються вздовж осей чутливості, і на виході датчика з'являється сигнал, пропорційний куту відхилення від вертикалі.

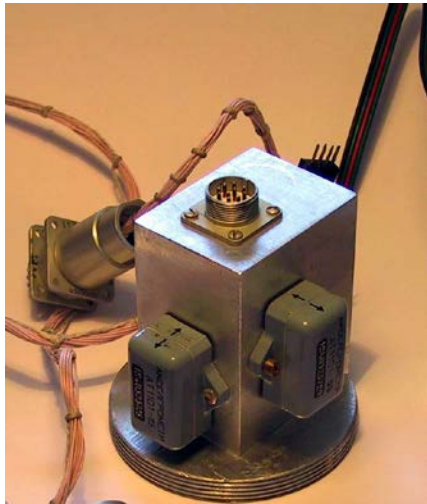


Рисунок 3.4 - Моделі перетворювачів нахилу на основі акселерометрів

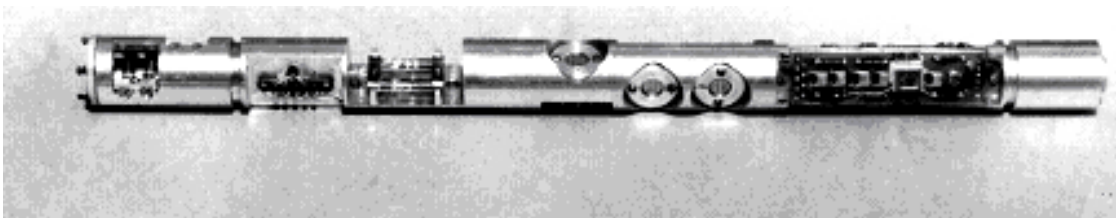


Рисунок 3.5 - Блок датчиків інклінометричної телесистеми контролю просторових параметрів траєкторії свердловини

Шукані кути відхилення від вертикалі визначаються за сигналами акселерометрів, відповідно до співвідношення (2.20) за формулами (2.21).

Перетворювач нахилу на основі акселерометрів характеризується:

- підвищеною точністю вимірювань, яка зумовлена високою точністю первинних перетворювачів та обліком в рівняннях

перетворення кутових параметрів індивідуальних електричних параметрів акселерометрів та перекосів їх осей чутливості щодо осей репера, пов'язаного з корпусом пристрою;

- простотою конструкції та малими габаритними розмірами;
- стійкістю до впливу температури, яка обумовлена застосуванням у процесі вимірювання методу цифрової корекції температурних похибок, розробленого у частині 2.

3.1.2 Датчик зенітного кута з чутливим рідинним елементом

На рис. 4.6 представлений датчик зенітного кута з чутливим рідинним елементом. Пристрій містить корпус 1, в пазу якого укладена циліндрична спіральна трубка 2, заповнена рідиною, виходи якої з'єднані з порожнинами 3, 4, герметично закритими м'якими мембранами 5, 6, на яких закріплені безконтактні перетворювачі сили 7, 8 і безконтактні датчики переміщення, підсилювач зворотного зв'язку 13 та опір зворотного зв'язку 14.

Перетворювач нахилу працює наступним чином. Нехай датчик розташований у горизонтальній свердловині. При відхиленні свердловини від горизонтальної площини рідина в чутливому елементі 2 переміщається вздовж осі чутливості датчика x , при цьому мембрани 5, 6 деформуються і на виході датчиків переміщення з'являються сигнали неузгодженості, які після посилення та перетворення подаються на безконтактні

датчики сили, що повертають мембрани вихідне положення. При цьому напруга на резистори зворотного зв'язку є вихідним сигналом датчика, пропорційним косінус зенітного кута.

$$U = U_0 + U_m \cdot \cos(\vec{g}, \vec{x})$$

де U_0 – початковий сигнал датчика зенітного кута,

U_m – максимальне значення вихідного сигналу.

Пропонований датчик зенітного кута може бути використаний безпосередньо в процесі турбінного, так і роторного буріння.

Для перетворювача з рідинним чутливим елементом частота власних коливань визначається за такою формулою:

$$\omega_0^2 = \frac{2g}{l},$$

тут g – прискорення вільного падіння, l - довжина чутливого елемента.

Зі співвідношення видно, що при збільшенні довжини чутливого елемента зменшується частота власних коливань, а тому вібраційні навантаження, що супроводжують процес турбінного буріння і що лежать у діапазоні 20 - 30 Гц не впливають на показання датчика.

Відцентрові сили, що виникають у процесі роторного буріння, не відхиляють чутливий елемент від заданого положення внаслідок симетричного розташування виходів спіральної трубки.

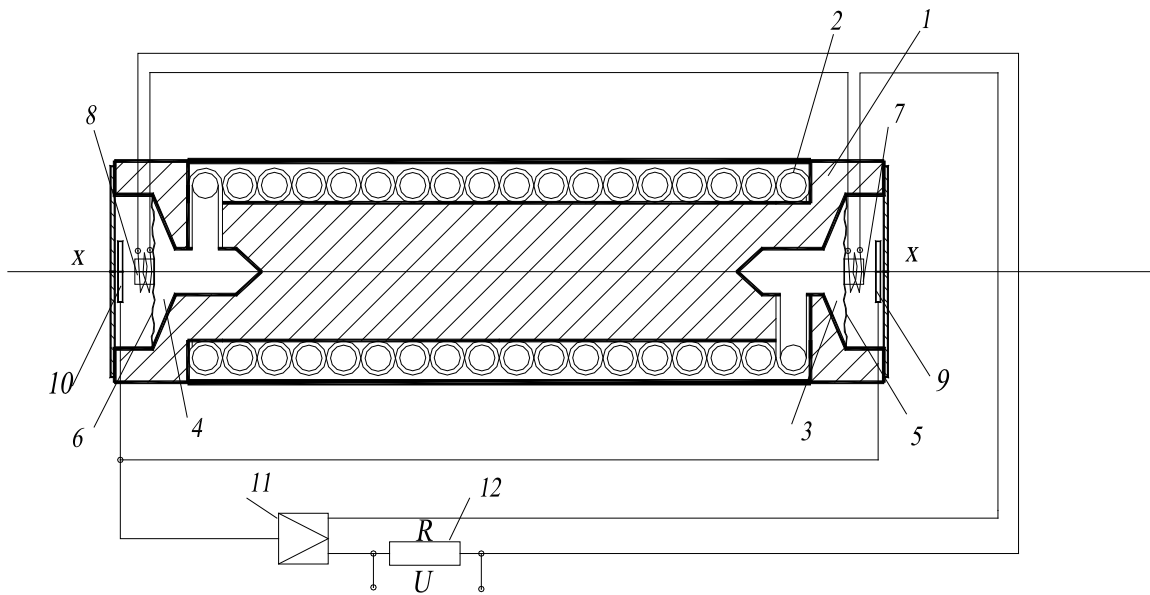


Рисунок 3.6 - Функціональна схема датчика зенітного кута з рідинним чутливим елементом

Точність вимірювання зенітного кута залежить від відстані між виходами спіральної трубки, яка не обмежена діаметром снаряда свердловинного і може бути обрано виходячи з необхідної точності.

Таким чином, зі збільшенням довжини чутливого елемента одночасно зменшується частота власних коливань і збільшується чутливість пристрою.

Стендові випробування пристрою показали, що поріг чутливості датчика лежить у межах кутових секунд.

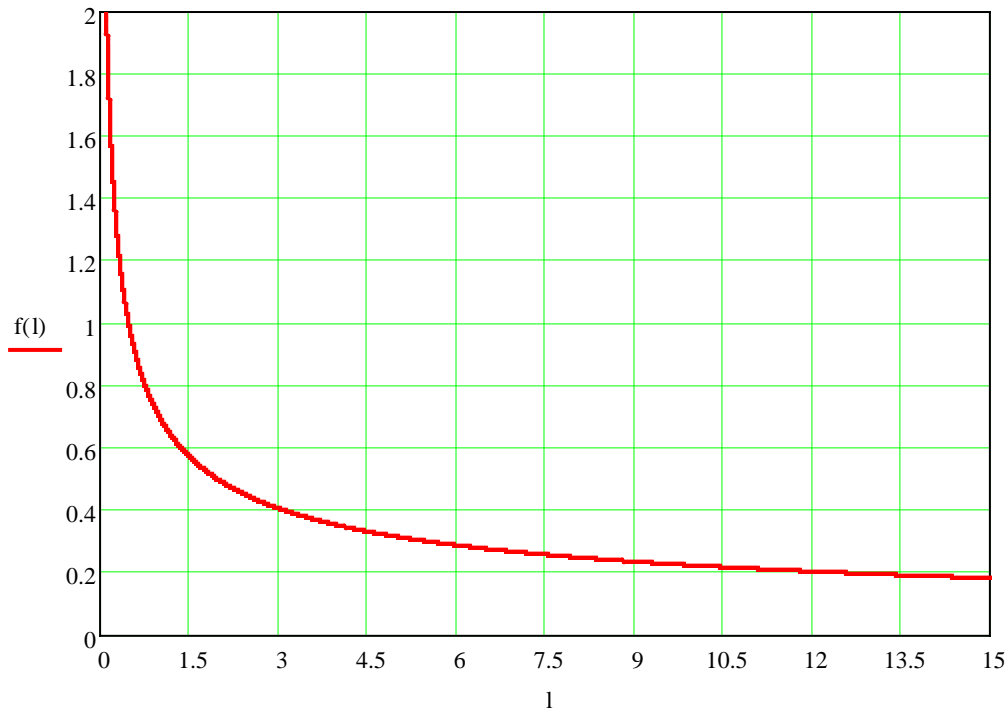


Рисунок 3.7 - Залежність частоти власних коливань ПН від довжини чутливого рідинного елемента

Датчик зенітного кута з чутливим рідинним елементом характеризується:

- високою вібростійкістю, яка обумовлена формою та довжиною чутливого елемента;
- високою точністю вимірювань, що зумовлена відсутністю механічних вузлів;
- низькою вартістю та високою технологічністю, оскільки складання не потребує спеціальних умов та технологічних циклів.

3.1.3 Магнітометричний датчик кута нахилу

Для підвищення точності при вимірі малих кутів відхилення від вертикалі розроблено магнітометричний датчик кута нахилу, рис. 3.8.

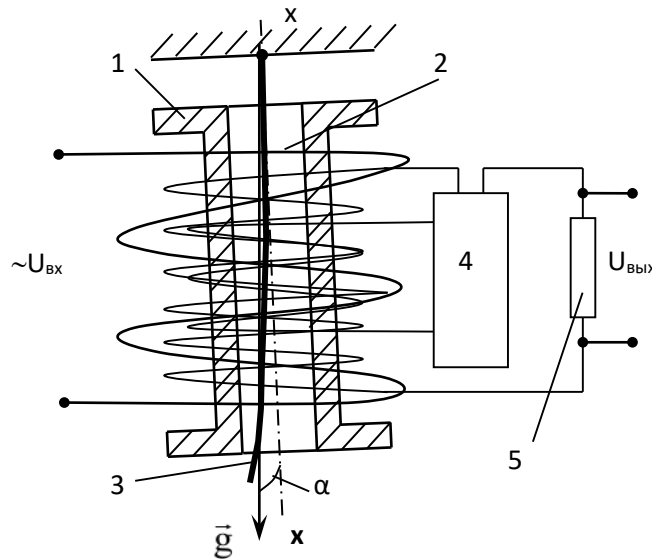


Рисунок 3.8 - Магнітометричний датчик кута нахилу

- 1 – корпус; 2 – обмотки; 3 – чутливий елемент (сердечник);
4 – фазочутливий підсилювач; 5 - резистор зворотного зв'язку

Датчик містить корпус 1 у вигляді циліндра, котушку 2 індуктивності, сердечник 3, який є чутливим елементом датчика, фазочутливий підсилювач 4, резистор зворотного зв'язку 5.

Магнітометричний датчик кута нахилу працює наступним чином. Нехай датчик закріплений у вертикальній свердловині, при цьому вісь чутливості датчика збігається з вертикаллю місця (напрямком вектора прискорення вільного падіння). Під дією магнітного поля Землі в сигнальній обмотці з'являється напруга,

пропорційна проекції вектора напруженості магнітного поля Землі на вісь чутливості датчика кута нахилу. При цьому напруга на резисторі зворотного зв'язку 5 є вихідним сигналом, який пропорційний модулю виміряного вектора напруженості магнітного поля Землі та косинусу кута повороту чутливості осі датчика щодо :

$$U = U_0 + U_m \cdot \cos(\vec{T}, \vec{xx}),$$

де U_0 – початковий сигнал датчика зенітного кута,

U_m – максимальне значення вихідного сигналу.

При відхиленні свердловини від вертикалі сердечник 2 під дією сили ваги деформується, що призводить до зміни властивостей берилієвого магнітопроводу, внаслідок чого змінюється індуктивність котушки. При цьому сигнал на резисторі зворотного зв'язку 5 змінюється на величину, пропорційну куту відхилення об'єкта контролю від вертикального положення.

Точність визначення кута відхилення від вертикалі залежить від довжини берилієвого магнітопроводу і може бути обрана, виходячи з необхідної точності вимірювання.

Пропонований пристрій є принципово новий підхід до конструкції датчиків і може бути використаний для контролю відхилення від вертикалі будівельних конструкцій на зсувних ґрунтах.

Розроблений датчик кута нахилу характеризується:

- малими габаритними розмірами, простотою виготовлення, низькою вартістю;
- високою вібро- та ударостійкістю, що обумовлено відсутністю механічних вузлів;
- високою точністю при вимірах малих (до 3°) кутів відхилення від вертикалі.

3.1.4 Перетворювач нахилу на основі одноступеневих маятників

Для визначення відхилення від вертикалі в умовах підвищеної температури навколишнього середовища, дії ударних та вібраційних перевантажень, жорсткого радіаційного випромінювання, а також визначення зенітного та візирного кутів просторової орієнтації бурового інструменту за участю автора був розроблений перетворювач нахилу на основі двох одноступеневих маятників, осі обертання яких взаємні ортогональні.

На рис. 3.9 представлений загальний вигляд, але на рис. 3.10 – конструкція ПН на основі одноступеневих маятників.

Перетворювач нахилу містить корпус 1, заповнений інертною кремнеорганічною рідиною, два ортогональних поплавця-маятника 2, 3 з ексцентричними вантажами 4, 5 і датчики кута повороту 6, 7, в якості яких були використані синусно-косинусні обертові трансформатори. Маятники

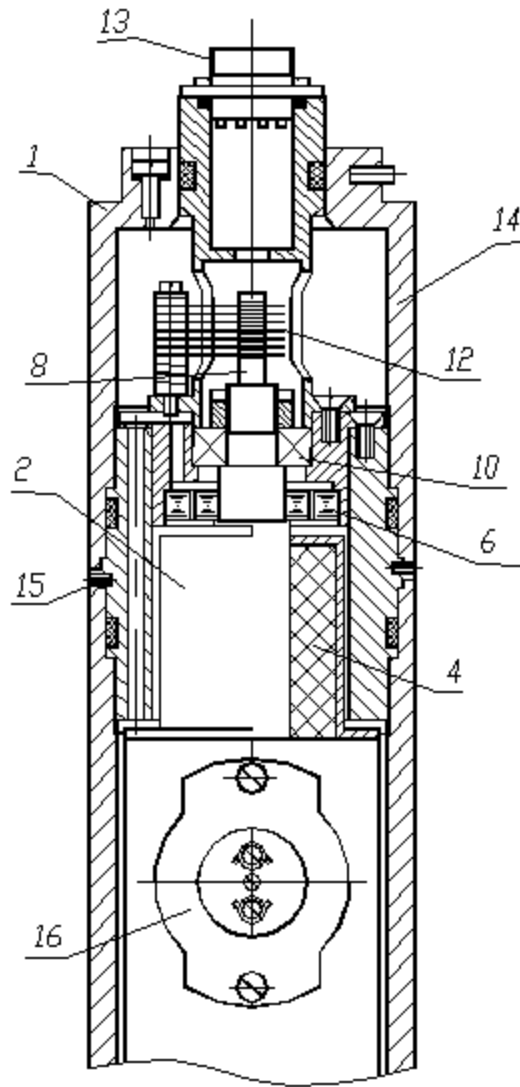


Рисунок 3.10 - Конструкція ПН на основі одноступеневих маятників

3.2 Аналіз експериментальних даних

Оскільки точність визначення індивідуальних електричних параметрів, перекосів та коефіцієнтів температурного дрейфу акселерометрів методом найменших квадратів залежить від якості експериментальних вибірок, то з метою уточнення даних

було проведено аналіз достовірності вихідних даних за допомогою надбудови «Пакет аналізу» Microsoft Excel.

На першому етапі проводився аналіз на наявність грубих помилок та викидів. Визначалося вибіркове середнє та стандартне відхилення, потім, за формулою

$$S_p = (x_1 - \bar{X}) / \sigma,$$

де x_1 – екстремальне значення,

\bar{X} - вибіркове середнє,

σ – стандартне відхилення,

розраховувалося значення S-критерію. Порівнюючи розрахункове значення з критичним, можна дійти невтішного висновку у тому, чи є обране екстремальне значення викидом. Після видалення викидів відкоригована вибірка перевірялася на відповідність нормальному закону розподілу. Для цього за допомогою інструмента «Описова статистика» визначалися числові характеристики експериментальної вибірки. У тому випадку, коли оцінки вибіркового середнього, моди та медіани близькі за значенням, а оцінки асиметрії та ексцесу трохи відрізняються від нуля, можна зробити висновок про те, що випадкова величина підпорядковується нормальному закону розподілу. Результати аналізу експериментальних даних наведено у Додатку Е.

3.3 Метрологічні випробування перетворювачів нахилу на основі акселерометрів

У корпусі перетворювача нахилу закріплені три одновісні акселерометри марки ІЛ1Н1, осі чутливості яких взаємно ортогональні. Діапазон вимірювання акселерометрів 10-3 – 1g. Первинні перетворювачі розташовані щодо системи координат, пов'язаної з корпусом пристрою наступним чином: перший b_1 - вісь чутливості паралельно осі Ox_2 , другий - b_2 , вісь чутливості паралельно осі Oy_2 , третій b_3 - вісь чутливості паралельно осі Oz_2 (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 - Установка для проведення метрологічних випробувань ПН

Для проведення метрологічних випробувань перетворювача нахилу використовувався інклінометричний поворотний стіл, перевірка якого перед проведенням вимірювань здійснювалася за допомогою атестованих приладів високої точності: теодоліту 2Т30 та оптичного квадранту КО-30.

Технологія перевірки інклінометричного столу полягає в наступному. У першому етапі горизонтується нижня платформа поворотного столу. Для цього в її центрі розміщується оптичний квадрант і шляхом обертання різьбової пари ніжок платформи досягається нульовий рівень рідинного оптичного рівня. Потім квадрант розгортається в центрі платформи в положення, перпендикулярне первісному, і обертанням другої різьбової пари досягається нульове показання рівня рідини квадранта. Аналогічно горизонтується верхня платформа. При цьому допустимий догляд нуля оптичного квадранту при поворотах в діапазоні $0 \div 360^\circ$ становить $\pm 30''$.

Визначення основної похибки візирного кута проводиться за допомогою теодоліту, обертанням верхньої платформи поворотного столу за точками 0, 90, 180, 270, 360 °. При цьому основна похибка відтворення візирного кута при дванадцятикратному повторенні обчислень не перевищує ± 1 кутову хвилину згідно з формулою $\Delta\varphi = \sum_{i=1}^{12} \varphi_i - \varphi$.

Контроль точності завдання зенітного кута здійснюється за допомогою квадранту в точках 0, 45, 90, 120, 150, 180 °. Основна похибка обчислюється за такою формулою $\Delta\theta = \sum_{i=1}^{12} \theta_i - \theta_i$ вбирається у зенітного кута ± 20 кутових секунд.

За розробленими в результаті досліджень алгоритмами у середовищі MathCad проводилися обчислення зенітного та візирного кутів, з урахуванням не ортогональності осей чутливості та відмінності індивідуальних електричних параметрів акселерометрів. При цьому проводилося порівняння похибки обчислення без урахування перерахованих параметрів та за запропонованими методиками.

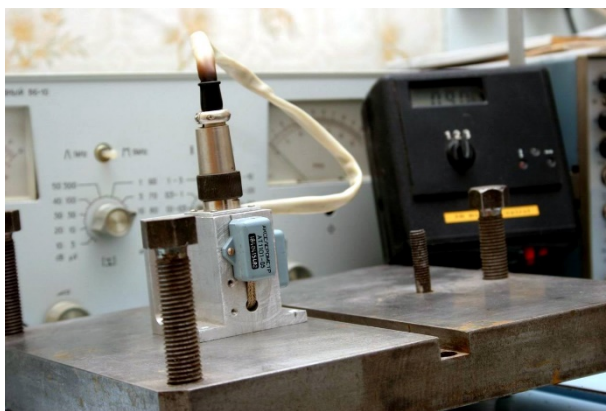


Рисунок 3.12 - Установка для моделювання малих кутів відхилення від вертикалі:

- 1 – блок датчиків; 2 – акселерометр; 3 – блок індикації;
- 4 – поворотна платформа.

При проведенні експерименту задавався зенітний кут θ в діапазоні $0 \div 90^\circ$ з кроком 30° та змінювався візирний кут φ у

діапазоні $0\div 360^\circ$ з кроком 30° . Потім ставився візирний кут з кроком 30° і змінювався зенітний в діапазоні $0\div 360^\circ$ з кроком 30° . Результати вимірювань при $\theta=30^\circ$ та $\varphi=60^\circ$ наведено у Додатку Ж.

3.4 Температурні випробування перетворювачів нахилу на основі акселерометрів

Акселерометри, що входять до складу розроблених перетворювачів нахилу, мають поріг чутливості $2\cdot 5\cdot 10^{-3}g$. Незважаючи на це, очікувана точність вимірів на практиці не досягається.

Однією з причин, які суттєво впливають на показання первинних перетворювачів, є температура навколишнього середовища в місці проведення вимірювань.

При проведенні будівельних робіт температура навколишнього середовища коливається в межах $-40 - +50^\circ C$, а в процесі буріння збільшується до $120^\circ C$, тому похибка від впливу температури може зростати до десятків градусів.

Існує низка методів компенсації температурних похибок первинних перетворювачів, описаних у Частині 2.

Оскільки процеси у будівництві та бурінні протікають повільно, а інклінометрична апаратура має у своєму складі ЕОМ, з'являється можливість використовувати алгоритмічні методи зниження температурних похибок перетворювачів нахилу. Ці методи полягають у тому, що проводяться попередні

вимірювання температурного дрейфу датчиків, який потім враховується під час обробки вимірювальної інформації. Знаючи температуру в точці вимірювання та величину температурного дрейфу при даній температурі, можна відкоригувати показання датчиків і тим самим значно підвищити точність вимірювань.

Мета експериментального дослідження полягала у виявленні залежності вихідного сигналу акселерометрів від температури навколишнього середовища, виборі апроксимуючих функцій та визначенні коефіцієнтів температурного дрейфу.

Температурні випробування проводилися для акселерометрів ADXL202 виробництва Analog Devices при заданому положенні перетворювача нахилу з використанням термостата.

У корпусі перетворювача нахилу паралельно осям репера $Ox_2y_2z_2$, пов'язаного з ним, закріплені три одновісні акселерометри: перший - b_1 , вісь чутливості якого паралельна осі Ox_2 , другий - b_2 , вісь чутливості якого паралельна осі Oy_2 , третій - b_3 , вісь чутливості якого паралельна осі Oz_2 .

На першому етапі перетворювач нахилу за допомогою термостата нагрівався від початкової температури, що відповідає температурі в лабораторії ($\approx 21^\circ\text{C}$) до температури $80 - 90^\circ\text{C}$. Через рівні проміжки часу знімалися показання датчика температури та акселерометрів, після чого нагрівання

припинялося, і знімалися показання при охолодженні УППН. Результати одного з випробувань для наочності наведено в Таб.3.1. та Таб. 3.2. Основні результати зібрані у Додатку 3.

Результати випробувань засобами Microsoft Excel наносилися на діаграму та піддавалися аналізу. У [64] було запропоновано описувати температурний дрейф датчиків (акселерометрів та феррозондів) лінійними функціями. Проведені випробування показують, що дійсно температурний дрейф акселерометрів у багатьох випадках з достатнім ступенем точності апроксимується лінійними функціями, рис. 3.13. Однак, не рідкісні випадки, коли апроксимація температурного дрейфу лінійними функціями дає значну середньоквадратичну похибку, рис. 3.14.

Для вибору апроксимуючої функції у таких випадках було проведено порівняльний аналіз апроксимації результатів вимірювань лінійними функціями та поліномами другого та третього ступеня.

Таблиця 3.1

**Результати експерименту
(нагрів)**

T	b1	b2	b3
21,24	-0,233	-0,265	0,927
22,07	-0,233	-0,265	0,924

Таблиця 3.2

**Результати експерименту
(охолодження)**

T	b1	b2	b3
61,06	-0,225	-0,197	0,824
60,3	-0,225	-0,197	0,824

23,27	-0,232	-0,266	0,92
24	-0,234	-0,262	0,917
25,1	-0,235	-0,266	0,913
26,06	-0,235	-0,264	0,908
27,51	-0,236	-0,263	0,904
29,06	-0,236	-0,261	0,9
30,62	-0,239	-0,259	0,894
31,45	-0,238	-0,258	0,891
32,31	-0,239	-0,256	0,888
33,21	-0,24	-0,254	0,885
34,22	-0,241	-0,253	0,882
35,15	-0,242	-0,251	0,878
36,15	-0,243	-0,248	0,875
37,08	-0,242	-0,247	0,872
38,27	-0,243	-0,246	0,867
39,29	-0,241	-0,242	0,865
40,38	-0,243	-0,24	0,861
41,45	-0,243	-0,238	0,859
42,54	-0,244	-0,237	0,854
43,55	-0,242	-0,235	0,852
44,61	-0,244	-0,233	0,848
45,62	-0,243	-0,231	0,846
46,65	-0,243	-0,23	0,842
47,62	-0,24	-0,226	0,841

58,96	-0,225	-0,198	0,83
58,11	-0,225	-0,2	0,832
57,02	-0,219	-0,198	0,838
56,05	-0,219	-0,199	0,842
55,04	-0,22	-0,203	0,843
54,07	-0,221	-0,205	0,848
53,21	-0,22	-0,206	0,849
52,1	-0,22	-0,21	0,852
51,06	-0,22	-0,211	0,854
49,16	-0,228	-0,211	0,86
48,01	-0,228	-0,213	0,865
46,96	-0,23	-0,216	0,867
46,1	-0,231	-0,218	0,869
45,07	-0,231	-0,221	0,871
44,2	-0,231	-0,223	0,875
43,11	-0,232	-0,227	0,877
42,13	-0,232	-0,229	0,88
41,09	-0,232	-0,232	0,883
40,17	-0,232	-0,232	0,886
39,07	-0,232	-0,236	0,89
38,22	-0,232	-0,239	0,893
37,08	-0,232	-0,241	0,896
36,01	-0,231	-0,243	0,899
35,06	-0,231	-0,246	0,902

Продолжение таб. 3.1

48,62	-0,239	-0,224	0,84
49,57	-0,239	-0,221	0,836
50,54	-0,236	-0,217	0,837
51,34	-0,236	-0,214	0,836
52,26	-0,237	-0,216	0,831
53,25	-0,235	-0,212	0,831
54,75	-0,23	-0,206	0,831
55,69	-0,229	-0,202	0,829
56,18	-0,229	-0,201	0,827
57,13	-0,228	-0,198	0,826
58,55	-0,229	-0,193	0,821
59,89	-0,226	-0,191	0,82

Продолжение таб. 3.2

34	-0,23	-0,25	0,906
33,2	-0,229	-0,252	0,908

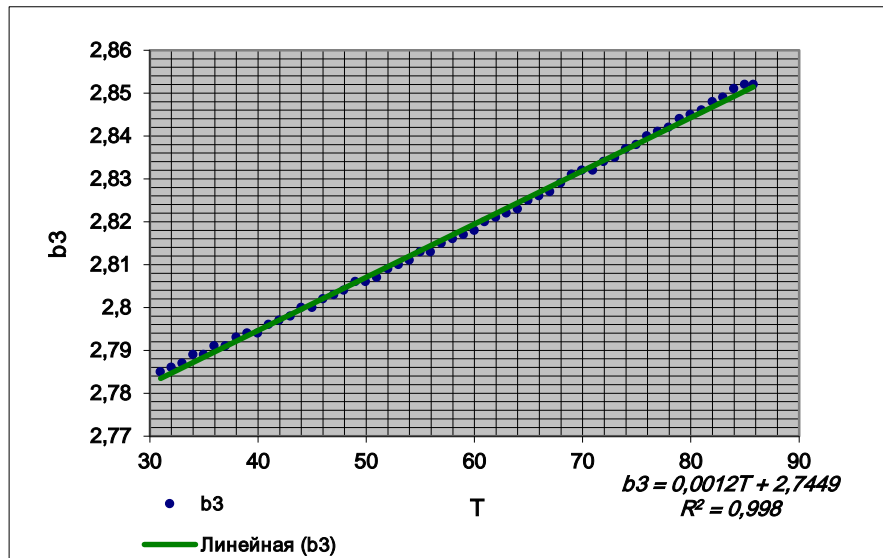


Рисунок 3.13 - Температурний дрейф акселерометра, апроксимований лінійною функцією

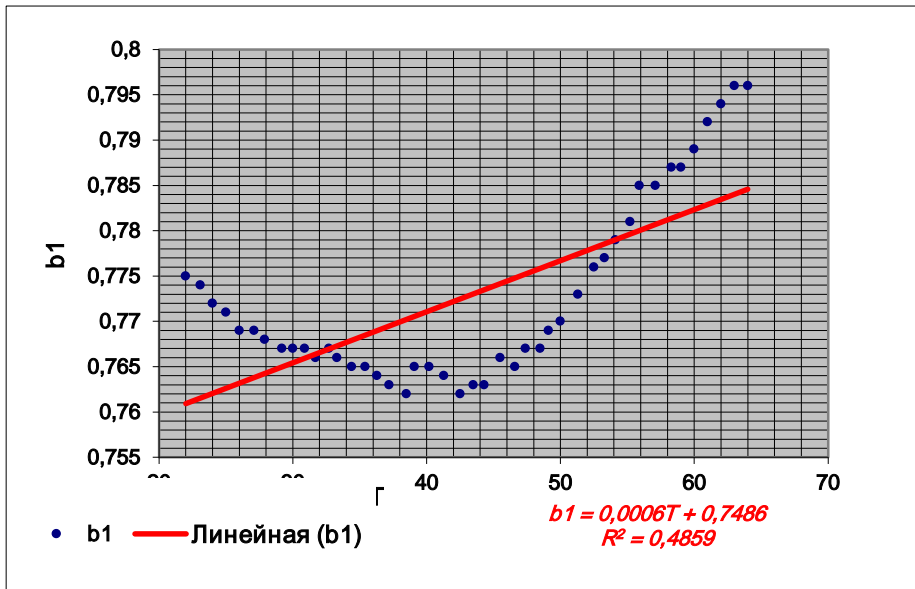
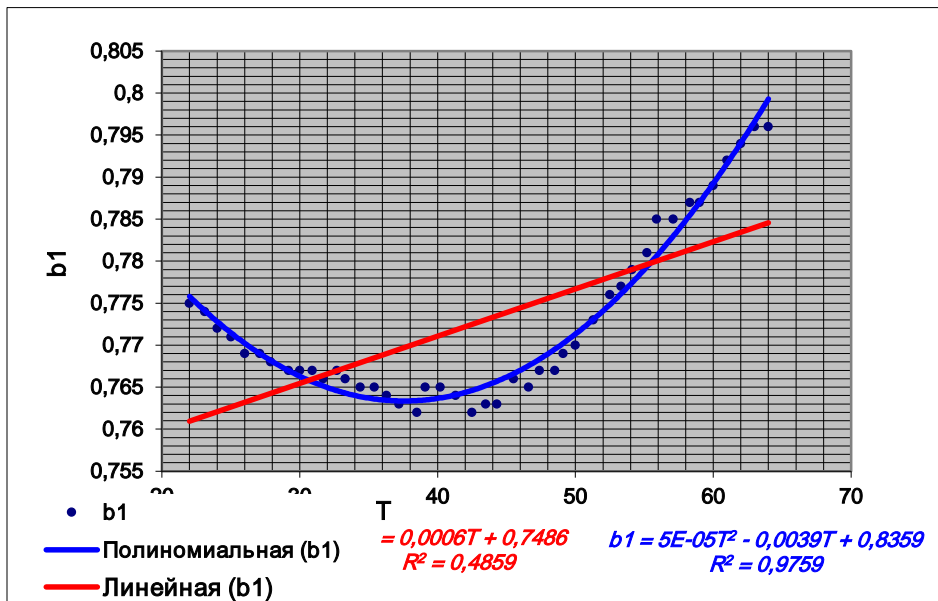


Рисунок 3.14 - Температурний дрейф акселерометра, для якого лінійна апроксимація дає суттєву середньоквадратичну похибку



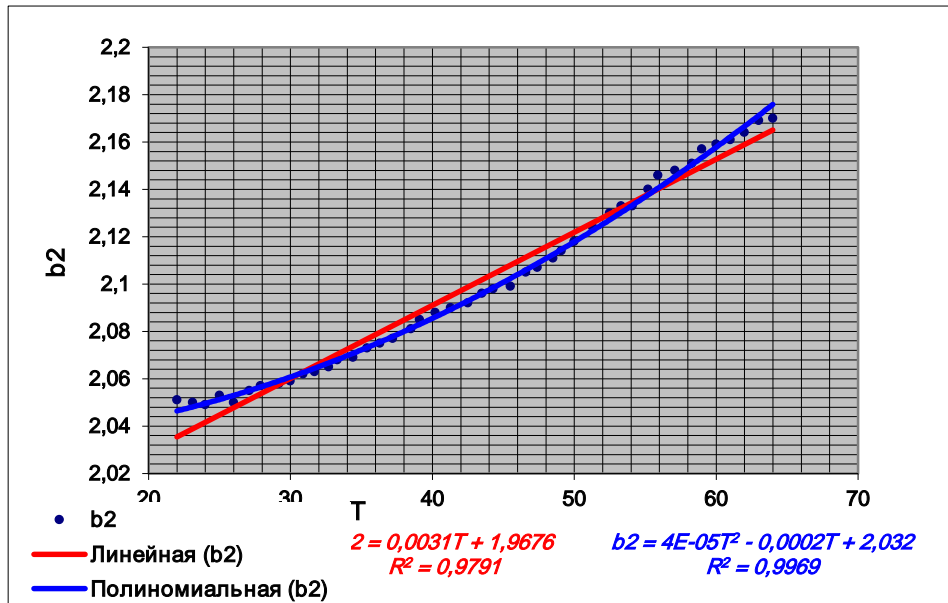


Рисунок 3.15 - Порівняльний аналіз апроксимації температурного дрейфу акселерометрів лінійними та квадратичними функціями

Експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про те, що часто зустрічаються акселерометричні перетворювачі, температурний дрейф яких не вдається описати лінійними функціями.

Порівняльний аналіз апроксимації температурного дрейфу квадратичними та кубічними поліномами показує, що стосовно точність – складність обчислення, перевагу слід віддати квадратичної апроксимації.

За розробленими в результаті досліджень алгоритмами середовища MathCad проводилися обчислення зенітного і візирного кутів, з урахуванням температурного дрейфу акселерометрів. При цьому проводилося порівняння похибки

обчислення без урахування впливу температури та запропонованих методик. Результати наведено у Додатку І.

3.5 Дослідження характеристик ПН на основі акселерометрів при різних значеннях напруги живлення

З метою визначення ступеня впливу девіацій напруги живлення на показання акселерометрів були проведені випробування пристрою при номінальному значенні напруги живлення $U_{п} = 12В$ та відхиленні від номінального $\pm 1В$, а також зміні температури від $+20^{\circ}С$ до $+70^{\circ}С$.

Під час випробувань ПН розташовувався на поворотному столі, який повертався щодо вертикалі та фіксувався при різних кутах у діапазоні $0\div 360^{\circ}$ з кроком 10° .

Весь діапазон вимірів розбитий на 36 точок. У кожній точці проведено 22 виміри. Вимірювання повторювалися для напруги живлення, відмінного від номінального.

До кожного кроку вимірювань визначалися:

- середнє арифметичне $U_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}$
- середньоквадратичне відхилення $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - U_{cp})^2}{n}}$
- ентропійне значення похибки $\Delta = \frac{d}{2} \frac{n}{10 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m U_i \lg U_i}$

де m – кількість стовпців гістограми розподілу;

n – кількість вимірів;

U_i – результат виміру;

d – ширина шпальти.

Результати вимірювань наведено у Додатку К.

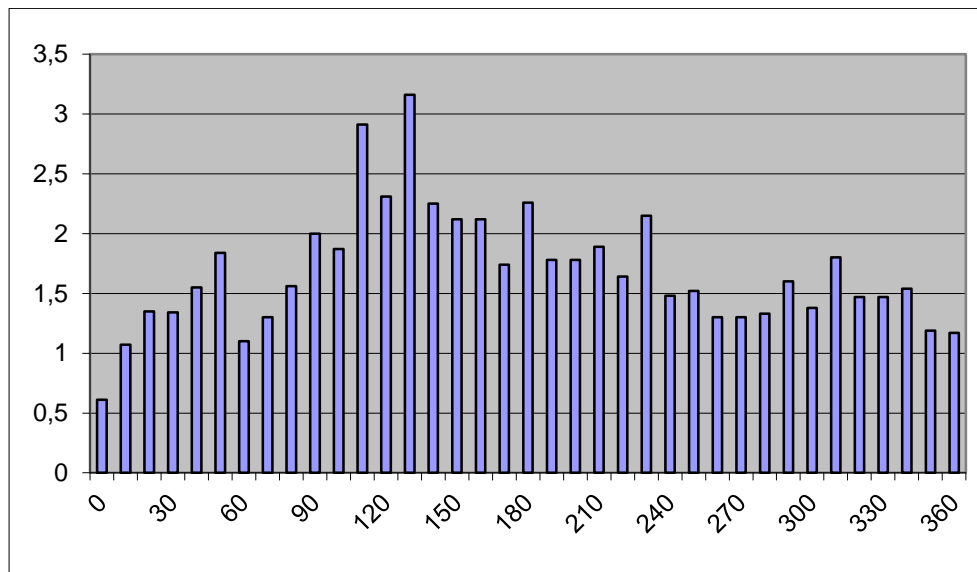
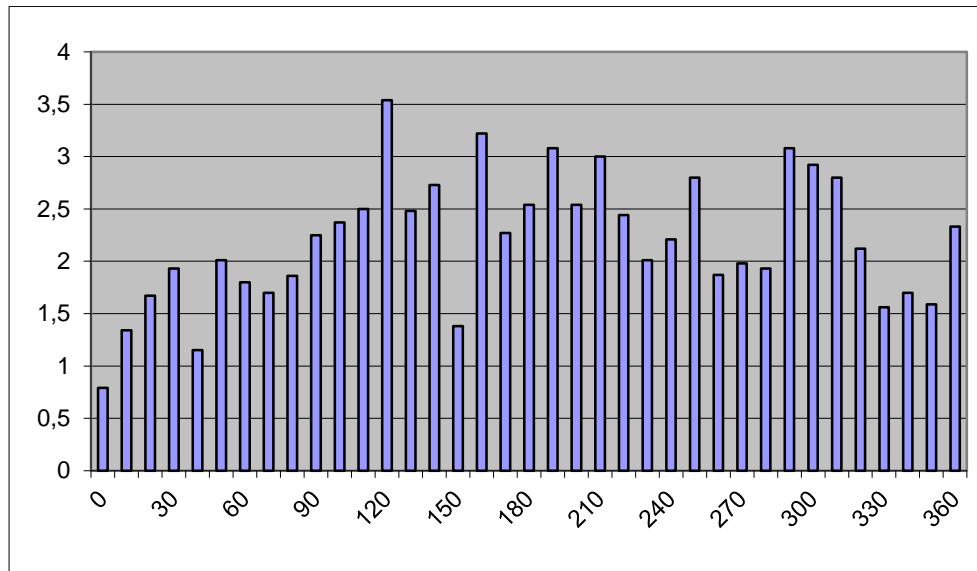


Рисунок 3.16 - Гістограми розподілу похибки УППН на основі акселерометрів для напруги живлення, відмінного від номінального

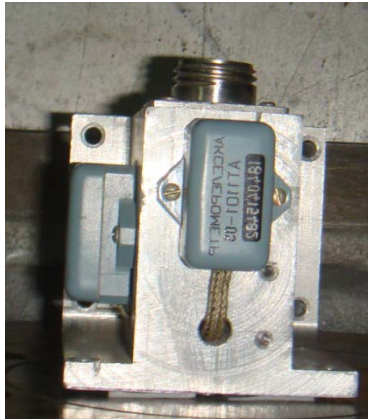


Рисунок 3.16-Блок акселерометрів

Вимірювання кута нахилу акселерометром ґрунтується на вимірі проекції вектора сили тяжіння на вісь виміру. Варто мати на увазі, що акселерометр вимірює не тільки прискорення вільного падіння, але й інші параметри: постійне прискорення пристрою, прискорення доцентрового за рахунок обертання пристрою, вібрації. Ці додаткові прискорення також проектуються на осі датчиків акселерометра і не можуть легко відокремитися від прискорення вільного падіння, що призводить до помилки вимірювання. У цьому розділі розглядаються методи зменшення впливу цих помилок на кінцевий результат роботи комп'ютерної системи моніторингу об'єктів.

3.6 Принцип роботи одновісного акселерометру

Розглянемо принци роботи одновісного акселерометра. Датчик обертається навколо однієї фіксованої осі, ортогональній вектору сили тяжіння (рис 3.17).

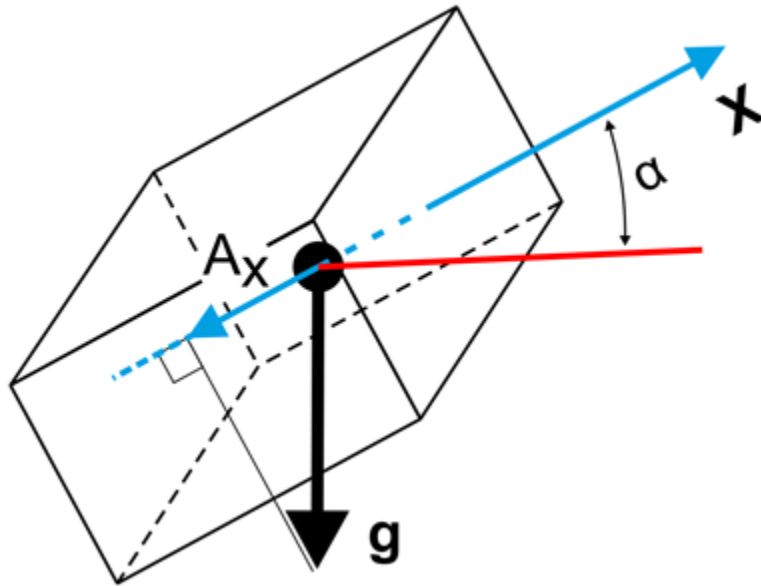


Рисунок 3.17 – Схематичне зображення роботи одновісного акселерометра

Значення на виході акселерометра дорівнюватиме синусу кута нахилу α – кута між горизонтальною площиною та віссю виміру. Таким чином, кут нахилу можна розрахувати за такою формулою:

$$\alpha = \arcsin(A_x/g) [\text{рад}],$$

де A_x – вихідне значення акселерометра (проекція прискорення на вісь виміру), g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²).

Далі сопоставимо напругу на виході акселерометру з кутом його нахилу. Для макетного моделювання використовується одновісний акселерометр, який вимірює прискорення в частинах g , напруга у 5 вольт відповідає прискоренню у $0.5g$.

Потрібно експериментальним шляхом знайти технічні характеристики датчика кута нахилу, у якому первічним перетворювачем виступає одновісний акселерометр.

Прискорення довільного тіла у загальному вигляді обчислюється за такою формулою:

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_{mp} + \mathbf{g},$$

де \mathbf{W}_{mp} - вектор прискорення тіла, що переміщається, \mathbf{g} - вектор прискорення вільного падіння.

Відповідно на виході акселерометра знімається така напруга:

$$U = U_0 + U_m \cdot \cos(\mathbf{i}\mathbf{g}),$$

де U_0 - нульове значення показань акселерометра, U_m - модуль максимального (амплітудного) значення вихідної напруги, \mathbf{i} вектор переміщення тіла, \mathbf{g} вектор спрямований до центру землі.

Якщо тіло перебуває у відносному спокої, складова \mathbf{W}_{mp} дорівнює нулю, а прискорення дорівнюватиме проекції вектора \mathbf{g} на вісь чутливості приладу:

$$\mathbf{W} = \mathbf{g} \cdot \sin(\alpha),$$

де α - кут між вектором \mathbf{g} і віссю чутливості акселерометра. У одновісних акселерометрів вихідні характеристики не є лінійними, максимальна чутливість знаходиться у діапазоні від -6 до +6 кутових градусів дивиться графік на рисунку 3.18, тому платформу ми будемо повертати у цьому діапазоні.

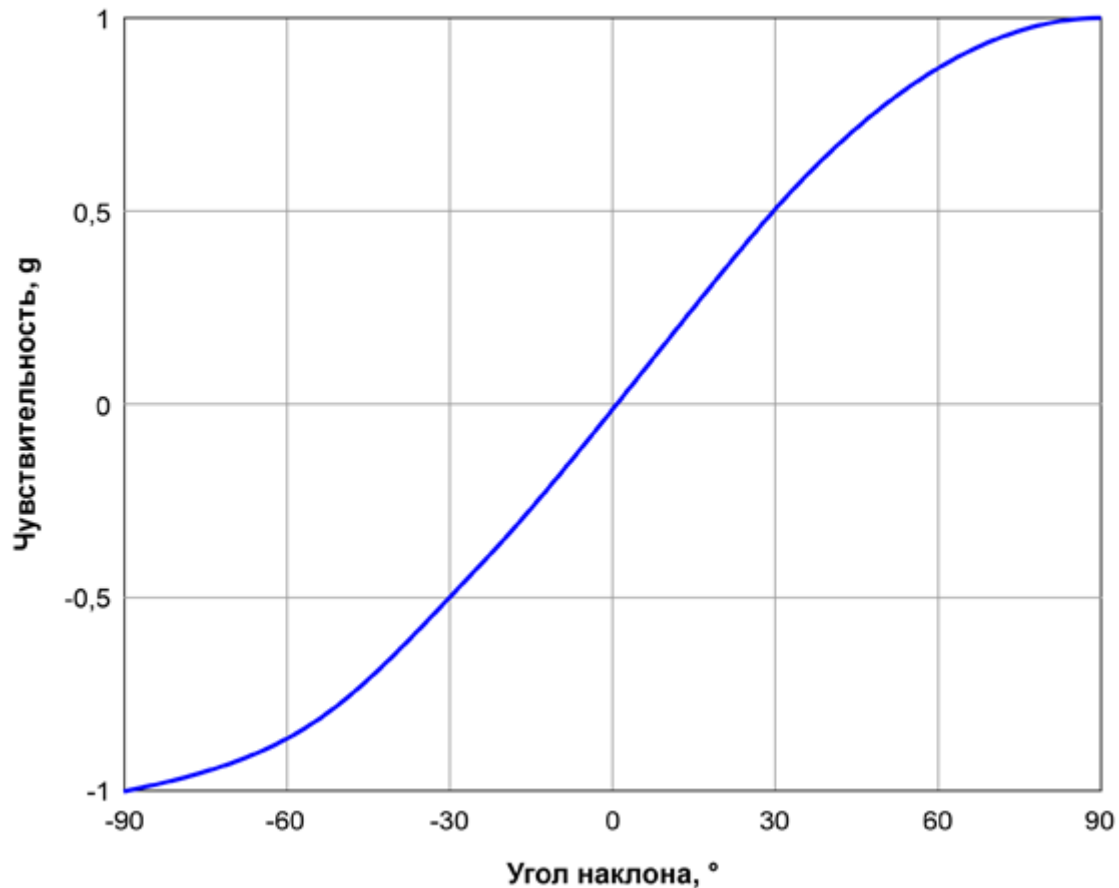


Рисунок 3.18 - Графік залежності чутливості акселерометра від кута нахилу

3.7 Експеримент для отримання технічних характеристик первинних перетворювачів

В експерименті використовується наступне обладнання:

- а) одновісний акселерометр, який закріплено на спеціально розробленому корпусі (див. Рисунок 3.16);
- б) оптичний квадрант КО-10 (см. Рисунок 3.19);

в) наклонна платформа, яку за допомогою гвинтів можна виставляти під різними кутами відносно горизонталі (див. Рисунок 3.20);

г) лазерний далекомір BOSCH-GLM50 Professionall (див. Рисунок 3.21);

д) прецезійний мультиметр NEO TOOLS 94-001 (див. Рисунок 3.22);

е) додаткове та допоміжне обладнання.

Квадрант КО-10, призначений для вимірювання кутів нахилу плоских і циліндричних поверхонь і для їх установки під заданим кутом до горизонтальної площини.



Рисунок 3.19 - Квадрант оптичний КО-10

Квадранти КО застосовуються для перевірки:

- кутових поверхонь шаблонів;
- кутів заточування на великих ріжучих інструментах;

- відображення напрямних і затискних пристосувань рівнів;
- направляють верстатів і опорних плит; кутомірних вимірювальних приладів.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики квадранта оптичного КО-10

Модель	КО-10
Межа допустимої похибки квадранта, "	± 10
Ціна поділу шкали відлікового пристрою, "	10
Діапазон вимірювань кутів по лімбу, °	0-360
Ціна розподілу шкали основного рівня,	15
Ціна розподілу шкали лімба,	20
Ціна поділу зовнішньої шкали, °	5
Габаритні розміри, мм	165x120x165
Маса, кг	4



Рисунок 3.20 - Наклонна платформа



Рисунок 3.21 - далекомір BOSCH-GLM50 Professionall



Рисунок 3.22 – Мультиметр NEO TOOLS 94-001

3.7.1 Алгоритм проведення експериментальних вимірювань

За допомогою квадранта оптичного встановлюємо наклонну платформу согласно горизонталі місця у двох площинах (див. Рисунок 3.23). Встановлюємо корпус з акселерометром у геометричний центр платформи (див. Рисунок 3.22). Також закріплюємо на платформі лазерний далекомір, за допомогою якого на стіні відмічаємо початок масштабної шкали

у вигляді риски та напису 0 градусів (див. Рисунок 3.24) За допомогою мультиметру знімаємо вихідну напругу з первинного перетворювача. Ця напруга дорівнює 0.101 вольт, та є U_0 - нульовим значенням показань акселерометра.



Рисунок 3.23 – Встановлення платформи у горизонталь

За допомогою гвинтів та квадранта оптичного встановлюємо наклонну платформу на кут $+3$ градуса у напрямку співпадающому з напрямом вісі чутливості акселерометра відмічаємо риску на масштабній шкалі та знімаємо вихідну напругу. Далі повертаємо платформу на кут -3 градуса у напрямку протилежному напрямку вісі чутливості акселерометра відмічаємо риску на масштабній шкалі та знімаємо вихідну напругу. Таким чином ми получили масштабну шкалу, використовуючи яку можна виставити платформу у три положення -3 , 0 та $+3$ кутових градуса без застосування квадранта оптичного. З використанням цього алгоритму були отримані результати у вигляді шкали від -3 до $+3$ градусів з

кроком 15 кутових хвилин (див. Рисунок 3.24) і відповідним цим нахилам вихідним напругам з акселерометра (див. Таблицю 3.2).

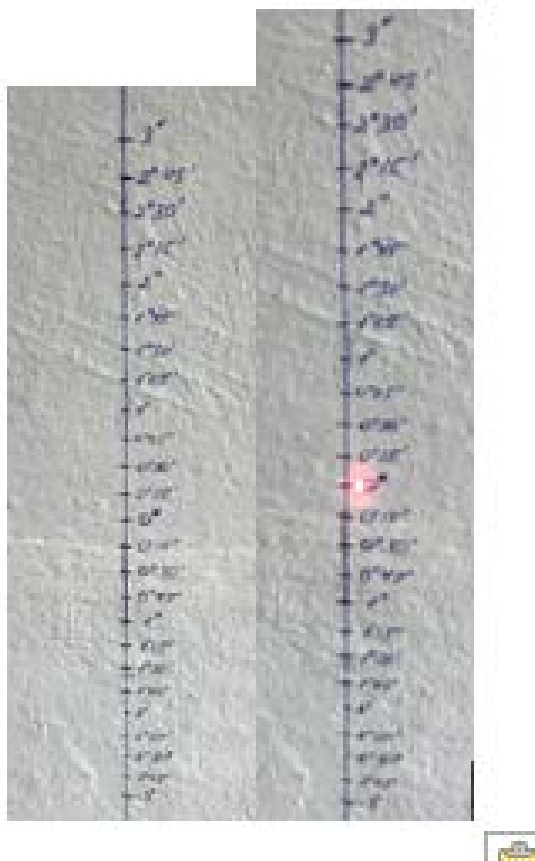


Рисунок 3.24 – Получені шкали

Таблиця 3.4 – Зведені значення вимірювань

КО-10	U _д
3°	0,63/-0,42
2°45'	0,578/-0,372
2°30'	0,529/-0,327
2°15'	0,494/-0,290
2°	0,448/-0,247
1°45'	0,393/-0,189
1°30'	0,365/-0,159
1°15'	0,322/-0,104

1°	0,277/-0,072
0°45'	0,237/-0,027
0°30'	0,192/0,020
0°15'	0,148/0,056
0°	0,103/0,108
-0°15'	0,065/0,138
-0°30'	0,021/0,184
-0°45'	-0,022/0,232
-1°	-0,066/0,270
-1°15'	-0,112/0,311
-1°30'	-0,153/0,351
-1°45'	-0,198/0,398
-2°	-0,249/0,442
-2°15'	-0,285/0,488
-2°30'	-0,329/0,537
-2°45'	-0,368/0,575
-3°	-0,411/0,618

Отже використання масштабної шкали спрощує вимірювання та підвищує їх точність і, отже, підвищує ефективність комп'ютерних систем моніторингу будівельних об'єктів.

3.7.2 Отримання розрахункових значень вихідних напруг та проведення порівняльного аналізу з експериментальними значеннями

Як сказано раніш, на виході акселерометра знімається така напруга:

$$U=U_0+U_m*\cos(\text{ig}),$$

де U_0 - нульове значення показань акселерометра, U_m - модуль максимального (амплітудного) значення вихідної напруги, \mathbf{i} вектор переміщення тіла, \mathbf{g} вектор спрямований до центру землі.

При $U_0 = 0.103$ В, $U_m = 5$ В та кутів нахилу у діапазоні від -3 до +3 кутових градусів с кроком у 15 кутових хвилин обчислюємо потрібні показники.

Таблиця 3.5 Розрахункови значення вихідної напруги

$U_0=$	0,103	В	
$U_m=$	5	В	
кут у гр	кут у рад	sin	р.напр
-3	-0,05236	-0,05234	-0,15868
-2,75	-0,048	-0,04798	-0,13689
-2,5	-0,04363	-0,04362	-0,1151
-2,25	-0,03927	-0,03926	-0,0933
-2	-0,03491	-0,0349	-0,0715
-1,75	-0,03054	-0,03054	-0,04969
-1,5	-0,02618	-0,02618	-0,02788
-1,25	-0,02182	-0,02181	-0,00607
-1	-0,01745	-0,01745	0,015738
-0,75	-0,01309	-0,01309	0,037552
-0,5	-0,00873	-0,00873	0,059367
-0,25	-0,00436	-0,00436	0,081183
0	0	0	0,103
0,25	0,004363	0,004363	0,124817
0,5	0,008727	0,008727	0,146633
0,75	0,01309	0,01309	0,168448
1	0,017453	0,017452	0,190262
1,25	0,021817	0,021815	0,212074
1,5	0,02618	0,026177	0,233885

1,75	0,030543	0,030539	0,255693
2	0,034907	0,034899	0,277497
2,25	0,03927	0,03926	0,299299
2,5	0,043633	0,043619	0,321097
2,75	0,047997	0,047978	0,342891
3	0,05236	0,052336	0,36468

Якщо провести порівняльний аналіз стає зрозуміло, що розбіг значень між експериментом та розрахунком доволі великий, тому потрібно використовувати запропонований метод, що й потрібно було довести.

3.8 Стенд для метрологічних випробувань первинних перетворювачів, які можуть використовуватися у комп'ютерних системах моніторингу будівельних конструкцій.

Під час випробувань первинних перетворювачів на їх показники впливають різноманітні чинники, які збільшують похибку вимірювань. Для зменшення впливу цих чинників було розроблено стенд для метрологічних випробувань первинних перетворювачів (див. Рисунок 3.25).

3.8.1 Опис стенду для метрологічних випробувань первинних перетворювачів

Стенд складається з основи, поворотного столу, екранів зі шкалами, нівеліра, який реєструє і допоміжної апаратури. Основа - фундамент, зроблений у вигляді колони, заглибленою на 2/3 висоти в ґрунт. У верхню частину основи вмонтований металевий опорний майданчик з немагнітного матеріалу.



Рисунок 3.25 – Зовнішній вигляд стану

Фундамент основи виконано в підлозі приміщення лабораторії, розташованій в підвалі будівлі корпусу академії на позначці "-6м". Сам фундамент і основа стану виконані незалежно від стін, підлоги і фундаменту приміщення лабораторії та взагалі будівлі. Крім цього ґрунт під фундаментом глинистий, а жирна глина (пластилін), як відомо, сама по собі знижує амплітуду вібрацій. Таким чином, на покази приладів, розташованих на станді, не впливають зовнішні чинники, які діють на фундамент будівлі, підлогу і стіни лабораторії. Також

проводилися випробування щодо ступіня ізоляції стенду від того, що відбувається в самій лабораторії, які показали високу ступінь віброізоляції основи. Опорна площадка виготовлена з немагнітного матеріалу (дюралюмінію Д16) з метою виключення впливу на магнітне поле землі.

На опорну площадку встановлений поворотний стіл OSN-250 "ПРОМА CZ" (див. Рисунок 3.9) (сертифікат відповідності № CZ.АЯ80.В03503), і має наступні технічні дані:

1. Тип	OSN-250
2. Діаметр столу	250 мм
3. Конус столу	МкIII
4. Діаметр і глибина центральної рамки	30 x 6
5. «Т»- подібний паз	12 мм
6. Передача зубчастих коліс	1:90
7. Кут нахилу столу	0 - 90°
8. Модуль черв'ячної передачі	2 мм
9. Розподіл на окружності столу	360° (по 1°)
10. Поворот столу при одному повороті ручки	4°
11. Ділення ноніуса повороту столу	10'' кут. секунд
12. Ділення ноніуса нахилу столу	2' кут. хвилини

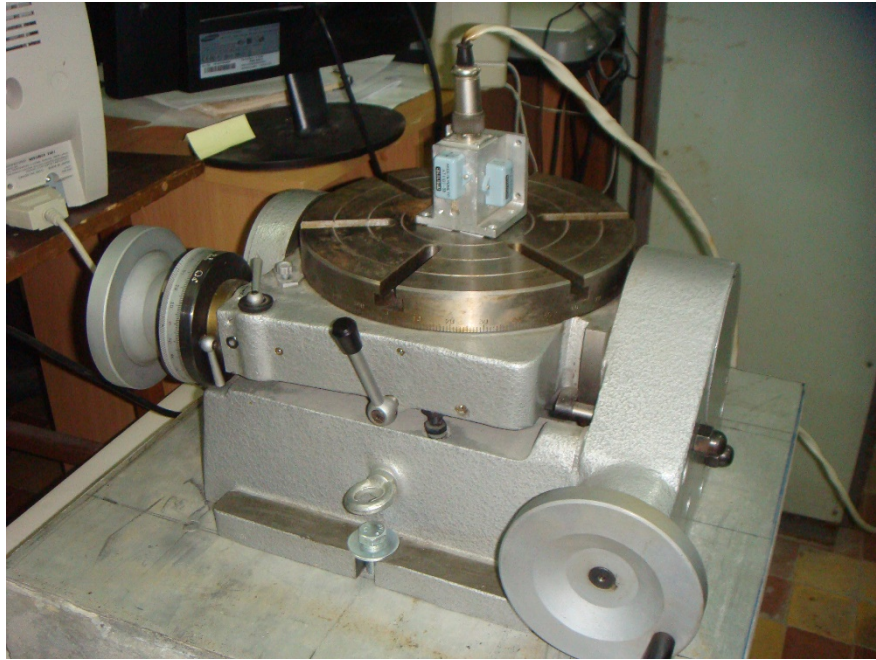


Рисунок 3.26 – Поворотний стіл OSN-250 "PROMA CZ"

Цей стіл за певних умов дозволяє повернути тестований пристрій на кут від 10" кутових секунд, чого цілком достатньо для вирішення поставлених завдань. Далі, для підвищення точності вимірювань на стінах лабораторії на відстані 4м від установки розташовані екрани зі шкалами, зробленими в масштабі від шкал поворотного столу і нівеліра. Перш ніж перевіряти систему контролю необхідно протестувати саму установку на можливі похибки вимірювання кутів нахилу. Для цього запропоновано оригінальну методику «метод масивів», суть якого полягає в наступному. Виставляємо поворотний стіл по обом лімбах в 0°. Використовуючи оптичний квадрант КО-10 визначаємо відхилення поверхні столу від горизонтальності з точністю до 10" (похибка установки в такому положенні столу

склала $+12'$). Заносимо цей результат в таблицю. Повертаємо ручкою стіл навколо вертикальної осі на 5° , використовуючи оптичний квадрант КО-10 визначаємо відхилення поверхні столу від горизонтальності і заносимо результат в таблицю. Повторюємо цей експеримент 72 раз, поки стіл не повернеться на 360° і не повернеться в початкове положення. В результаті отримуємо дані у вигляді масиву з 72 елементів. Кожен елемент масиву визначає різницю між показаннями на шкалі лімбів від показань еталонного приладу КО-10. Зазвичай для отримання дійсного значення кута відхилення поверхні столу від горизонтальності одного виміру на визначених кутах недостатньо, у нашому випадку було проведено 6 вимірів кута відхилення. Для тестування системи контролю малих кутів нахилу необхідно вимірювальний перетворювач системи (датчик) закріпити на поверхні столу і провести аналогічні дії. З кроком в 5° зняти показання вимірювального перетворювача системи і занести їх в масив показань тестованої системи. Для визначення технічних характеристик системи пропонується написана в середовищі Visual Studio C ++ програма, яка враховуючи похибки вимірювання малих кутів нахилу, що виникли через вплив шкідливих факторів (зазори в зачепленнях передач столу, дрейф показань вимірювальних перетворювачів, що виникли в результаті впливу температури, тиску, зовнішніх вібрацій і людського фактора), з точністю в $10''$ обчислює

технічні характеристики системи. Крім цього, програма дозволяє математичним способом визначити технічні характеристики системи з довільним кроком вимірювань, мінімальна величина якого визначається тільки можливостями еталонного приладу. Для тестування систем, де вимірювальними перетворювачами є ферозонди або акселерометри на основі магнітної рідини, на місце поворотного столу встановлюється нівелір, корпус якого виконаний з немагнітного матеріалу і проводяться експерименти за схожим алгоритмом. Крім цього, зараз в лабораторії проводиться випробування розділювача середовищ, розділовою мембраною якого виступає магнітна рідина разом з постійними магнітами.

3.8.2 Розробка програмного модуля для обробки вихідних даних експерименту

Для обробки експериментальних даних було розроблено програму у середовищі VISUAL Studio C++, яка представлена у ДОДАТКУ Д.

При запуску програми нас зустрічає консольне вікно (див. Рисунок 3.27) з текстом програми, де нам пропонується ввести дані відхилення поверхні столу від горизонтальності в зазначений файл формату .txt, для обчислення похибки вимірювань.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
#####
#
# Программа для обработки данных полученных при испытаниях прецизионных инклинометрических систем.
#
#####
1. Введите значения погрешностей стола в файл -> Error_Table.txt, сохраните и закройте его.
Нажмите Enter для продолжения.
Проверьте ваши данные:

```

	1	2	3	4	5	6
0 ->	12.5	13.5	12	13.5	12.5	13
5 ->	12.5	13.5	12.5	13.5	12	13.5
10 ->	12.5	13.5	12	13	12.5	13.5
15 ->	12	13	12.5	13.5	12	13
20 ->	11.5	12.5	11.5	12	11	12.5
25 ->	11	12.5	11	12	11.5	12
30 ->	10	11	10.5	11	11	11
35 ->	9.5	10.5	10	10	9.5	11
40 ->	9	10	8.5	9	9	10.5
45 ->	8.5	9	8.5	9	8	9.5
50 ->	8	7	7	8.5	7.5	8
55 ->	6	7	6.5	8	6	7
60 ->	5	6	5.5	6	5.5	6
65 ->	4.5	5	4	4	4.5	5
70 ->	3	4	3.5	4	3	4.5
75 ->	2	3	2	2.5	2	2.5
80 ->	1	2	1.5	2	1.5	2
85 ->	-1	0	-1	0.5	-0.5	0
90 ->	-2	-1.5	-2.5	-0.5	-2	-1
95 ->	-3	-2	-3	-2	-2.5	-2
100 ->	-4	-3	-4	-3	-3	-3
105 ->	-4	-4	-4	-4	-4	-4
110 ->	-6	-5	-6	-5	-6	-5
115 ->	-7	-6	-7	-6	-7	-6
120 ->	-8	-7	-8	-7	-8	-7

Рисунок 3.27 – Завантаження експериментальних даних

Далі згідно з програмою вводимо дані датчика зняті на поворотному столі з кроком в 5° (кутових градусів), від 0° до 355° (див. Рисунок 3.28).

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Введите значения датчика в файл -> Znach_Datc.txt, сохраните и закройте его.
Нажмите Enter для продолжения.
Проверьте ваши данные:

```

	1	2	3	4	5	6
0 ->	-0.287	-0.29	-0.292	-0.287	-0.29	-0.292
5 ->	0.174	0.176	0.172	0.17	0.178	0.175
10 ->	0.698	0.695	0.689	0.696	0.692	0.697
15 ->	1.2	1.23	1.27	1.21	1.22	1.24
20 ->	1.68	1.7	1.72	1.67	1.65	1.66
25 ->	2.16	2.15	2.12	2.19	2.1	2.13
30 ->	2.61	2.57	2.58	2.63	2.61	2.58
35 ->	3.07	3.08	3.05	3.1	3.08	3.07
40 ->	3.48	3.51	3.53	3.44	3.52	3.55
45 ->	3.89	3.85	3.87	3.88	3.86	3.87
50 ->	4.26	4.25	4.27	4.26	4.25	4.27
55 ->	4.6	4.61	4.59	4.6	4.61	4.59
60 ->	4.9	4.92	4.89	4.89	4.9	4.92
65 ->	5.17	5.18	5.21	5.17	5.18	5.21
70 ->	5.4	5.38	5.4	5.4	5.38	5.42
75 ->	5.58	5.59	5.61	5.58	5.59	5.61
80 ->	5.72	5.73	5.74	5.69	5.71	5.7
85 ->	5.8	5.81	5.85	5.8	5.81	5.85
90 ->	5.85	5.83	5.85	5.8	5.81	5.87
95 ->	5.85	5.85	5.83	5.87	5.85	5.85
100 ->	5.81	5.81	5.8	5.81	5.79	5.79
105 ->	5.73	5.73	5.74	5.69	5.71	5.7
110 ->	5.6	5.62	5.56	5.62	5.56	5.62
115 ->	5.42	5.4	5.4	5.4	5.38	5.42
120 ->	5.2	5.2	5.21	5.17	5.18	5.21
125 ->	4.93	4.93	4.92	4.89	4.94	4.9
130 ->	4.63	4.63	4.61	4.58	4.59	4.61
135 ->	4.28	4.3	4.32	4.26	4.31	4.27
140 ->	3.92	3.91	3.89	3.85	3.87	3.94
145 ->	3.52	3.52	3.53	3.44	3.52	3.55
150 ->	3.09	3.09	3.05	3.1	3.08	3.07

Рисунок 3.28 – Завантаження даних знятих з датчика

Щоб отримати дані, які буде показувати датчик при відмінних від експериментальних значень кутах повороту столу

навколо вертикальної осі, необхідно розкласти наші дані в ряд Фур'є до п'ятої гармоніки включно. У загальному вигляді формула розкладання в ряд Фур'є має вигляд:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

У програмі формула математичної моделі розкладання в ряд Фур'є представлена у вигляді циклічно повторюваного коду (див. Рисунок 3.29).

```
for (float i = 0; i < 360.0f; i+= shag)
{
    Znach_Sahg_Dat << ((A_dat[0] / 2) + (A_dat[1] * cosf(1 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[0] * sinf(1 * ((i*3.14f) / 180)))
    + (A_dat[2] * cosf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[1] * sinf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[3] * cosf(3 * ((i*3.14f) / 180)))
    + (B_dat[2] * sinf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[4] * cosf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[3] * sinf(4 * ((i*3.14f) / 180)))
    + (A_dat[5] * cosf(5 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[4] * sinf(5 * ((i*3.14f) / 180))))<<endl;
}
```

Рисунок 3.29 – Математична модель розкладання в ряд Фур'є у програмі

Знаючи введені дані, програма починає обчислення коефіцієнтів ряду Фур'є (див. Рисунок 3.30), і запитує крок (кут) теоретичного розбиття для отримання різних значень напруги датчика при різних кутах, в нашому випадку це 1° (див. Рисунок 3.31).

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Чтобы начать разложение в ряд Фурье нажмите Enter.
Разложение в ряд Фурье до пятой гармоники:
Получены коэффициенты ряда Фурье для датчика:
a_0 = -0.0441481
a_1 = -0.26358
a_2 = -0.00563494
a_3 = 0.00192368
a_4 = 0.00388143
a_5 = 0.00487266
b_1 = 5.84141
b_2 = -0.00139364
b_3 = -0.0405448
b_4 = 0.00237124
b_5 = -0.0137041

Получены коэффициенты ряда Фурье для стола:
a_0 = 0.231482
a_1 = 13.8216
a_2 = -0.355471
a_3 = -0.140965
a_4 = -0.0654404
a_5 = 0.00328305
b_1 = -1.66004
b_2 = -0.225628
b_3 = -0.072542
b_4 = 0.0366727
b_5 = -0.00941154

Чтобы получить теоритические значения при меньших углах введите шаг разбиения:

```

Рисунок 3.30 – Обчислення коефіцієнтів ряду Фур'є

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Чтобы получить теоритические значения при меньших углах введите шаг разбиения:1
Получены следующие теоритические значения датчика:
Угол поворота  Погрешность стола  Показание датчика
0              13.3787              -0.280612
1              13.338              -0.181902
2              13.2943              -0.0831825
3              13.2475              0.0155294
4              13.1977              0.114218
5              13.1448              0.212867
6              13.089              0.31146
7              13.0301              0.409982
8              12.9683              0.508416
9              12.9036              0.606746
10             12.8359              0.704956
11             12.7652              0.803028
12             12.6916              0.900945
13             12.6151              0.998689
14             12.5356              1.09624
15             12.4532              1.19359
16             12.3678              1.2907
17             12.2796              1.38757
18             12.1884              1.48416
19             12.0943              1.58047
20             11.9972              1.67645
21             11.8972              1.7721
22             11.7942              1.86739
23             11.6883              1.96229
24             11.5795              2.05678
25             11.4677              2.15082
26             11.3529              2.2444
27             11.2351              2.33748
28             11.1144              2.43004
29             10.9907              2.52204
30             10.8641              2.61345
31             10.7344              2.70424
32             10.6018              2.79438

```

Рисунок 3.31 – Результат розкладання у ряд Фур'є

В кінці алгоритму виконання розрахунку програма виводить список файлів, в яких зберігаються дані обчислень (див. Рисунок 3.32).

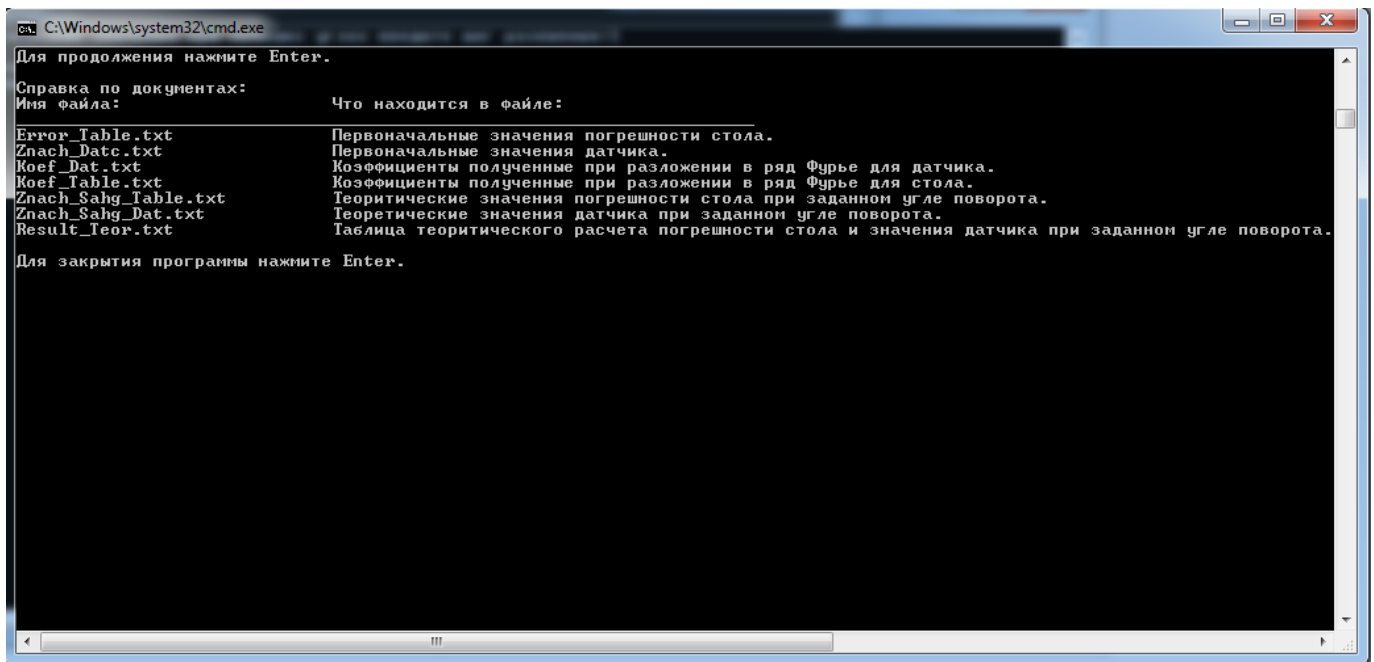


Рисунок 3.32 – Довідка про використані файли

Отримані дані переносимо в Microsoft Excel (див. Рисунок 3.33) і будемо графік залежності кута повороту від експериментальних значень датчика і графік залежності кута повороту від розрахункових значень датчика (див. Рисунок 3.34).

Эксперимент		Теоритический расчет	
Угол поворота	Напряжение	Угол поворота	Напряжение
0	-0,290	0	-0,282
5	0,174	1	-0,184
10	0,695	2	-0,086
15	1,228	3	0,012
20	1,680	4	0,109
25	2,142	5	0,207
30	2,597	6	0,305
35	3,075	7	0,403
40	3,505	8	0,500
45	3,870	9	0,598
50	4,260	10	0,696
55	4,600
...	...	347	-1,563
300	-5,240	348	-1,467
305	-4,963	349	-1,370
310	-4,656	350	-1,274
315	-4,327	351	-1,177
320	-3,961	352	-1,079
325	-3,569	353	-0,982
330	-3,148	354	-0,885
335	-2,701	355	-0,787
340	-2,245	356	-0,690
345	-1,780	357	-0,592
350	-1,279	358	-0,495
355	-0,770	359	-0,397

Рисунок 3.33 – Завантаження даних в Microsoft Excel

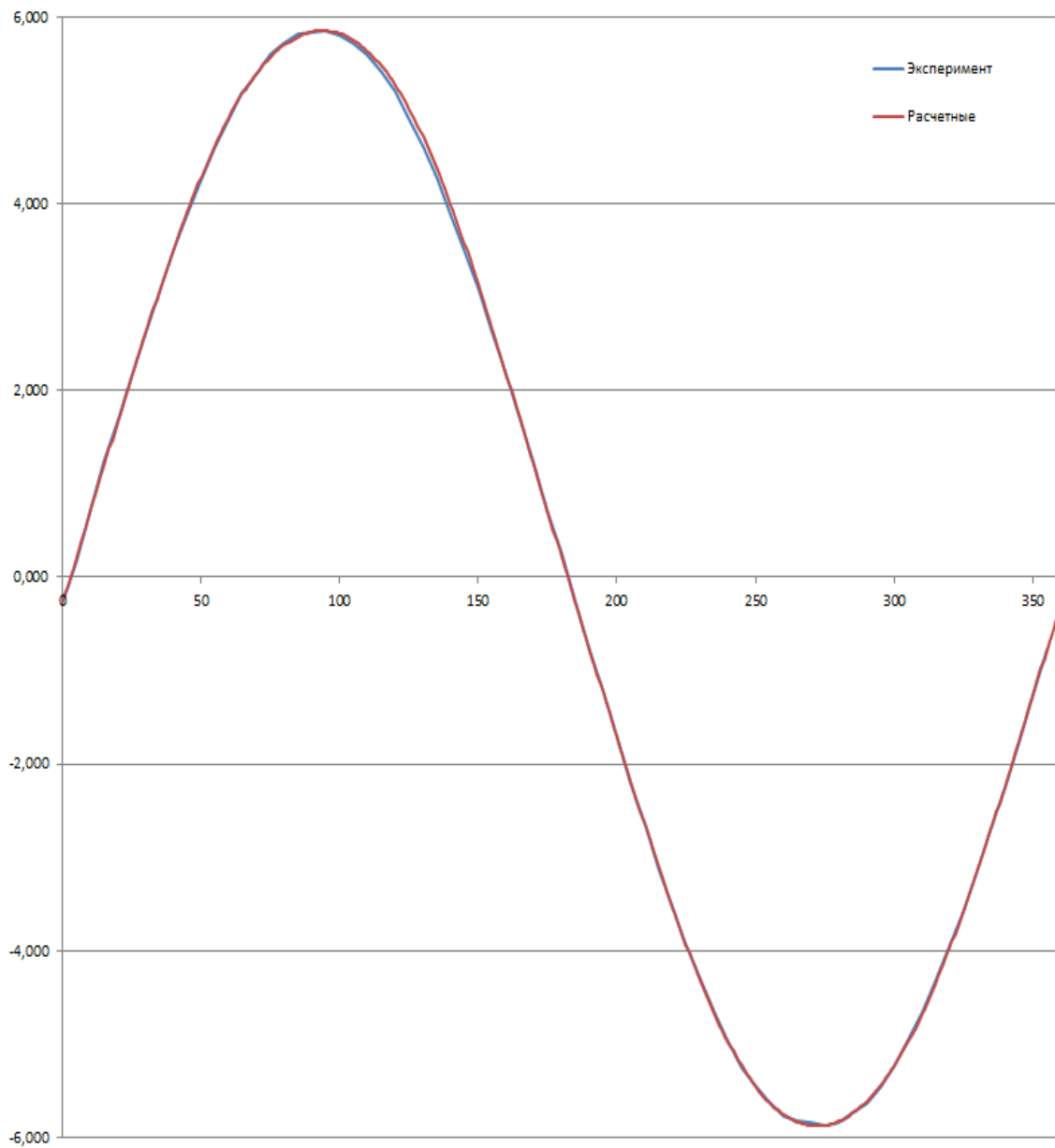


Рисунок 3.34 – Графік залежності кута повороту від експериментальних і розрахункових значень датчика

3.9 Результати та висновки

1. Розроблено конструкції перетворювачів нахилу, що мають високі експлуатаційні характеристики.

2. Проведено метрологічні та температурні дослідження запропонованих перетворювачів нахилу на основі акселерометрів. Досліджено похибки УППН від відмінності індивідуальних електричних параметрів та перекосів осей чутливості акселерометрів, а також від впливу зміни температури навколишнього середовища. В результаті досліджень підтверджено адекватність розроблених математичних моделей перетворювачів нахилу та методів компенсації температурного дрейфу акселерометрів.

3. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що гранична похибка виміру зенітного кута при використанні розроблених методів не перевищує 0.2° , гранична похибка вимірювання візирного кута – 2° .

4. Проводити вимірювання малих кутів нахилу з точністю до $10''$ кутових секунд, завдяки мінімізації дії зовнішніх шкідливих факторів і використання екранів зі шкалами для підвищення точності;

5. Конструювати, збирати, тестувати, комбінувати елементи прецизійних іклінометричних систем контролю в умовах науково-дослідної лабораторії;

6. За допомогою методу масивів враховувати неточності у вимірах, що виникають в результаті відхилення поверхні столу від горизонтальності, обумовлену зазорами в механізмі повороту і нахилу;

7. За допомогою математичної моделі знаходити і враховувати похибку горизонтальності столу для довільного кута повороту навколо вертикальної осі.

ЧАСТИНА 4. КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВИХ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ

На даний час в умовах економічної кризи та зростанням розвитку в Україні нафтогазовидобувної галузі, підвищуються вимоги до комп'ютерних систем, які здійснюють контроль та керування процесом буріння. Застосовується високоточна апаратура, яка дозволяє в процесі буріння керувати напрямком траєкторії свердловини, без відхилення забою від заданого курсу та збільшує продуктивність похило-спрямованих та морських свердловин. Нафтогазова промисловість України сьогодні має високий попит на збільшення видобутку вуглеводнів [31-40].

В останні роки значно зросли вимоги до точності в комп'ютерних систем та контролі комплексу кутових параметрів просторової орієнтації похило спрямованих, горизонтальних, вертикальних та кущових свердловин. У процесі буріння необхідно досягти проектної точки забою і повторити проектний профіль свердловини, з мінімальними відхиленнями та високою надійністю. Наявність на ринку зарубіжних комп'ютерних систем не дозволяє вирішити проблему оснащення бурових бригад сучасною технікою через її високу вартість, сучасні вітчизняні розробки і володіють низькою точністю і надійністю. Крім того, їх не завжди можливо застосовувати в процесі буріння при високих вібраційних та ударних перевантажень (50 g) [32-34, 36, 39, 42-55].

Актуальним завданням стає створення датчиків у складі комп'ютерних систем, які забезпечать підвищення ефективності та якості видобутку нафти та газу, зниження їх собівартості.

4.1 Аналіз комп'ютерних систем для контролю та керування процесом буріння

На сучасному етапі розвитку комп'ютерних систем орієнтації бурового інструменту для контролю та керування основними параметрами (кут азимуту, візирний та зенітний) заданої траєкторії свердловини застосовують магнітні стрілки, акселерометри, гіроскопи, ферозонди [37, 51-72, 55-61]. Буріння свердловин є одним із складних технологічних процесів, тому до апаратури бурової колони, що входить до складу, пред'являють високі вимоги за точністю (до 0,1 %), за температурою (до 200 °С), габаритними розмірами (від 25 мм), вібраційним і ударним навантаженням (до 50 g), за вартістю та екологічною безпекою.

При бурінні похило-спрямованих, морських, горизонтальних свердловин і відновлення свердловин старого фонду, всі процеси протікають в умовах високих вібраційних і ударних перевантажень, що значно знижує точність вимірювань основних параметрів. Більшість комп'ютерних систем побудовані з використанням акселерометрів та гіроскопів, які не призначені для вимірювань у процесі буріння, що тягне за собою зупинки та скорочення продуктивності нафтовидобутку. Застосування магніточутливих

перетворювачів забезпечує високий контроль та отримання оперативної інформації про параметри траєкторії свердловини.

Протягом останніх кількох років ведуться розвідувальні роботи та буріння свердловин у складних гірничо-геологічних умовах, які характерні для більшості родовищ України та обумовлені глибиною понад 6000 метрів, пластовими тисками до 1000 атмосфер та температурою до 200 °С. Збільшилися темпи розвідки та освоєння продуктивних нафтогазоносних басейнів на шельфах Чорного та Азовського морів, із застосуванням плаваючих бурових установок, що значно ускладнює проведення робіт.

Один із ефективних методів збільшення видобутку вуглеводнів є буріння пологих, горизонтальних та похило-спрямованих свердловин з крутим кутом викривлення [31, 33, 44, 48-50, 52, 55, 60]. Широке поширення має куцове похило-спрямоване та розгалужено-горизонтальне буріння, обумовлене економічною ефективністю буріння в умовах заболоченості.

Один із основних напрямів збільшення видобутку нафти та газу в інших країнах – це відновлення свердловин старого фонду. Існує два способи буріння другого ствола в закріпленій свердловині [31-33, 38, 40, 45, 47, 58]:

- вирізування вікна в експлуатаційній колоні з подальшим зарізом другого ствола зі стаціонарного або знімного клину-відхиляча;
- вирізання ділянки експлуатаційної колони та буріння другого ствола роторним способом [59].

Виникає необхідність пошуку нових родовищ, покращення методів буріння, удосконалення промислово-геофізичних засобів,

відновлення та підвищення точності прокладання стовбурів свердловини. Технологічні особливості процесу буріння пов'язані зі зростанням глибин, ускладненням технології проведення стволів за точно заданою траєкторією для розкриття горизонтальних ділянок [31, 33, 49, 51, 54]. Зменшити похибки, спричинені цими факторами, дозволяє застосування засобів визначення геометричних характеристик стволів із постійним контролем траєкторії свердловини. Основним засобом управління похило-спрямованого та горизонтального буріння та контроль комплексу параметрів викривлення свердловин є комп'ютерні системи [31, 33, 36, 43, 51, 54, 57, 58].

За методами вимірювань комп'ютерні системи діляться на дві групи:

- системи з магніточутливими первинними перетворювачами, які вимірюють магнітне поле землі, тому вони повинні знаходитися на достатньому видаленні від бурильної колони [50, 52, 55-58, 61-63];

- системи з гіроскопічними первинними перетворювачами вимірюють напрямок в нерухомому положенні щодо початкової орієнтації гіроскопа, що зберігається за рахунок використання карданної підвіски. У свердловинах, обсаджених металевими трубами, вимір азимута і кута проводять гіроскопічними інклінометр [50, 52, 55-58, 60].

У більшості випадків при проведенні вимірювань необхідно використовувати як магнітні, так і гіроскопічні комп'ютерні системи. У обох типів пристроїв є свої переваги і свої обмеження. Тому при плануванні інклінометричних досліджень необхідно враховувати

особливості кожного типу, що дозволить отримати найбільш точні результати при найменших затратах.

Сучасні комп'ютерні системи з магніточутливими первинними перетворювачами можна розділити по виду магніточутливого елемента [50, 52, 55-58, 61-67]:

а) з магнітними стрілками;

б) ферозондами:

— з осердям;

— кільцеві,

— диференційні;

в) датчики Холла.

В даний час широко застосовуються комп'ютерні системи з магнітними перетворювачами, серед яких найчастіше використовуються магнітні стрілки, магніторезистивні смужки та ферозонди [50, 52, 55-58, 61-63]. Недоліком магнітних стрілок є невисока точність, викликана її вимушеними коливаннями під час руху свердловинного приладу.

У процесі буріння виникають похибки комп'ютерних систем обумовлені прийнятою методикою розрахунку координат осі стовбура свердловини, що впливають на точність вимірювання азимута і візирного кута та досягають 6° , зенітного кута — 1.5° . Інші похибки пов'язані з високими температурами та тиском, вібраційними та ударними перевантаженнями, магнітними перешкодами, додатковими електричними колами створеними приладдям, а також викликані непаралельною установкою бурового приладу щодо осі свердловини і

помітним викривленням її стовбура на довжині приладу [57, 58, 68, 69].

Ці похибки впливають на строки будівництва та продуктивність буріння та призводять до погіршення не тільки точності та надійності існуючих вимірювальних пристроїв, але й призводять до отримання недостовірної інформації та збільшення часу в процесі прокладання свердловин.

Проведені дослідження дозволили закласти основи проектування комп'ютерних систем для експлуатації в особливо жорстких умовах у процесі буріння. Такі системи розроблені на основі ферозондів, що дозволяє скоротити існуючі похибки, які виникають у процесі буріння свердловин.

Ферозонди мають достатню високу чутливість, надійні в експлуатації і не схильні до механічних впливів на відміну від магнітних стрілок.

Зазвичай застосовують стрижневі диференціальні ферозонди з обмотками збудження та сигнальною обмоткою соленоїдного типу (витки дроту) [57, 58, 51, 62]. Причиною похибок вимірювань, що виникають, служить відстань між стрижнями ферозонду та їх непаралельність, а також додаткова ємність викликана витками обмоток [62].

При розробці комп'ютерних систем необхідно враховувати дані вимоги і працювати над створенням малогабаритних систем на основі магніточутливих первинних перетворювачів, які забезпечать ряд переваг: великий діапазон вимірюваних параметрів, вібростійкість,

ударостійкість, працездатність у широкому діапазоні температур, простотою конструкцій.

До магніточутливих первинних перетворювачів відносяться магнітні стрілки, датчики Холла, магнітоопір, плівкові магніторезистори і ферозондові перетворювачі [57, 58].

Аналіз відомих робіт у галузі застосування магніточутливих первинних перетворювачів в комп'ютерних системах орієнтації бурового інструменту свідчить про зростаючий інтерес дослідників до математичних методів поліпшення технічних характеристик датчиків, проте переважаючими все ще є конструкторські та технологічні рішення. Слід зазначити, що можливості останніх у час значною мірою вичерпані, тоді як застосування математичних методів разом із обчислювальної техніки має широкі перспективи розвитку.

Відомі конструкції ферозондових перетворювачів складаються із сердечника та кількох обмоток із тонкого дроту. Такі конструкції мають недостатньо високу чутливість і точність, обумовлену низьким опором і перешкодами, викликаними складними конструкціями з обмотками [57, 58, 61, 62].

Для підвищення продуктивності та надійності похило-спрямованого та горизонтального буріння, одним з найважливіших завдань є підвищення точності засобів вимірювання, що входять до складу комп'ютерних систем.

У зв'язку з цим розробка методів та пристроїв перетворення кутових параметрів та розширення областей застосування датчиків орієнтації є актуальним науково-технічним завданням.

В даний час для комп'ютерних систем контролю та керування просторовою орієнтацією об'єкта, використовують датчики на основі магніточутливих первинних перетворювачів призначені для вимірювання [27, 28, 31-37]:

- кутових переміщень;
- напруженості магнітного поля;
- компонент та повного вектора індукції магнітного поля Землі;
- слабкі магнітні поля.

Магніточутливі первинні перетворювачі в датчиках використовують для інклінометрії свердловин, проведення геофізичних досліджень, розвідки корисних копалин, залізорудних родовищ, магніторозвідки, геологорозвідки, навігації, медицини, контролю якості різних металоконструкцій.

Датчики на основі магніточутливих первинних перетворювачів мають ряд переваг: великий діапазон вимірюваних параметрів, можливість застосування в умовах високих температур до 200 °С при бурінні надглибоких свердловин і проводити вимірювання в процесі буріння з високими ударними і вібраційними навантаженнями (до 50g), фонду в умовах впливу магнітних перешкод, простотою конструкцій та порівняльною дешевизною.

Показники магніточутливих первинних перетворювачів інформаційно-вимірювальних систем залежать від магнітного поля у якому знаходиться датчик та виникаючої ЕРС.

Основними показниками магніточутливих первинних перетворювачів є:

- чутливість (В/Тл), яка залежить від магнітної індукції;
- похибка лінійності (нелінійність, %), відхилення статичної характеристики перетворення датчика від прямої лінії у заданому діапазоні;
 - час відклику (мкс), визначається як час зміни вихідного сигналу від 10% до 90% усталеного значення при стрибкообразній зміні магнітного поля;
 - полоса пропускання (кГц) визначається за рівнем зниження чутливості на 3 дБ;
 - напруга нуля магнітного поля, це значення вихідної напруги, яке відповідає відсутності магнітного поля;
 - температурний дрейф нуля ($\%/^{\circ}\text{C}$), це зміна напруги нуля, викликане зміною температури;
 - температурний дрейф чутливості ($\%/^{\circ}\text{C}$), це зміна чутливості, викликана зміною температури;
 - діапазон вимірюваної величини (Тл);
 - напруга живлення (В);
 - струм споживання (мА);
 - діапазон робочих температур ($^{\circ}\text{C}$);
 - габаритні розміри (мм).

У цьому розділі розглянуті конструкції розроблених датчиків на основі магніточутливих первинних перетворювачів для систем контролю та управління просторовою орієнтацією об'єкта.

4.2 Конструкція без каркасного ферозонда на основі тонких плівок

Комп'ютерні системи, які використовують для розвідувальних робіт та буріння свердловин у складних гірничо-геологічних умовах, повинні забезпечувати високу точність на глибині понад 6000 метрів та при високих температурах до 200 °С [31-33, 35, 38, 41-54].

Ферозонді на основі тонких плівок для комп'ютерних систем дозволяти підвищити точність вимірювань, значно спростити та зменшити конструкцію.

Для таких систем з метою підвищення чутливості, спрощення конструкції та зменшення габаритних розмірів ферозонда, розроблено конструкцію без каркасного ферозонда на основі тонких плівок, яка наведена на рисунку 1.

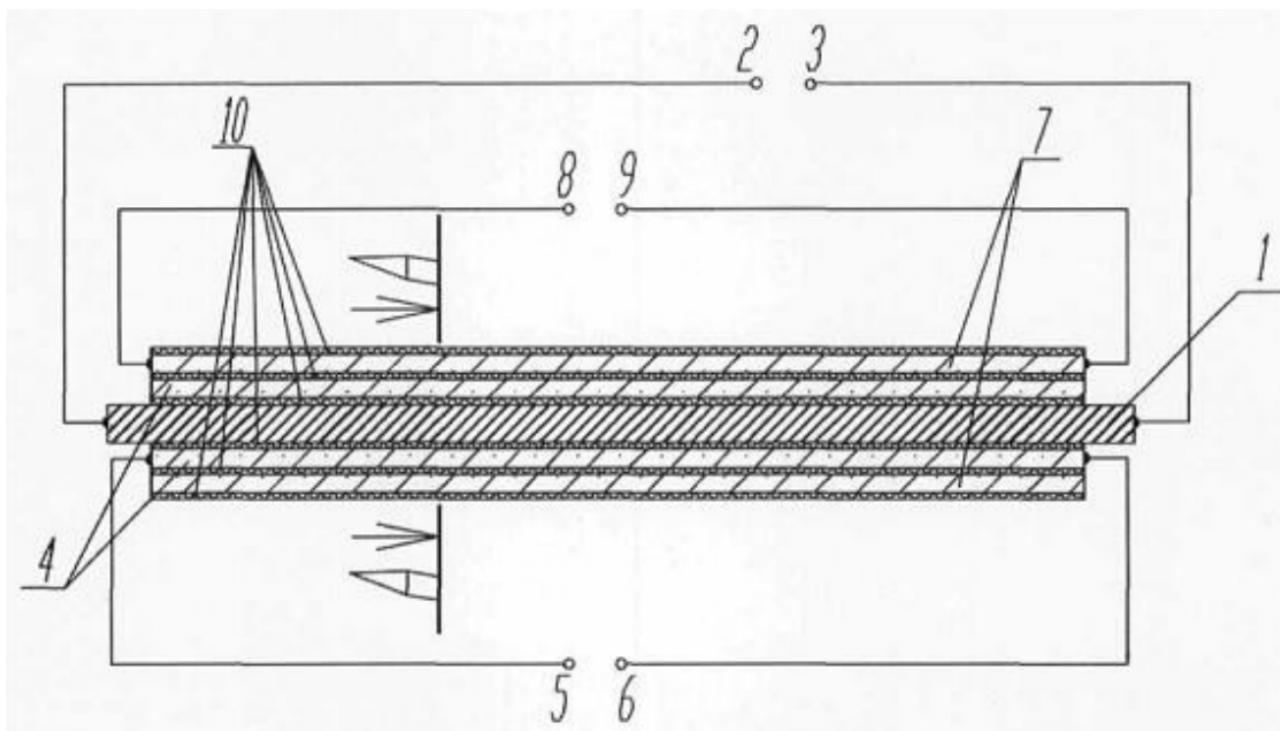


Рисунок 1 - Конструкція без каркасного ферозонда

Конструкція без каркасного ферозонду, складається з стрижньового осердя 1, виводи 2-3 кола збудження, послідовно нанесених двох шарів циліндричних феромагнітних плівок 4, 7, виводи 5-6 сигнального кола, виводи 8-9 кола зворотного зв'язку, тонкої ізоляційної плівки 10.

На рисунку 2 наведено переріз А-А без каркасного ферозонду з рисунка 1.

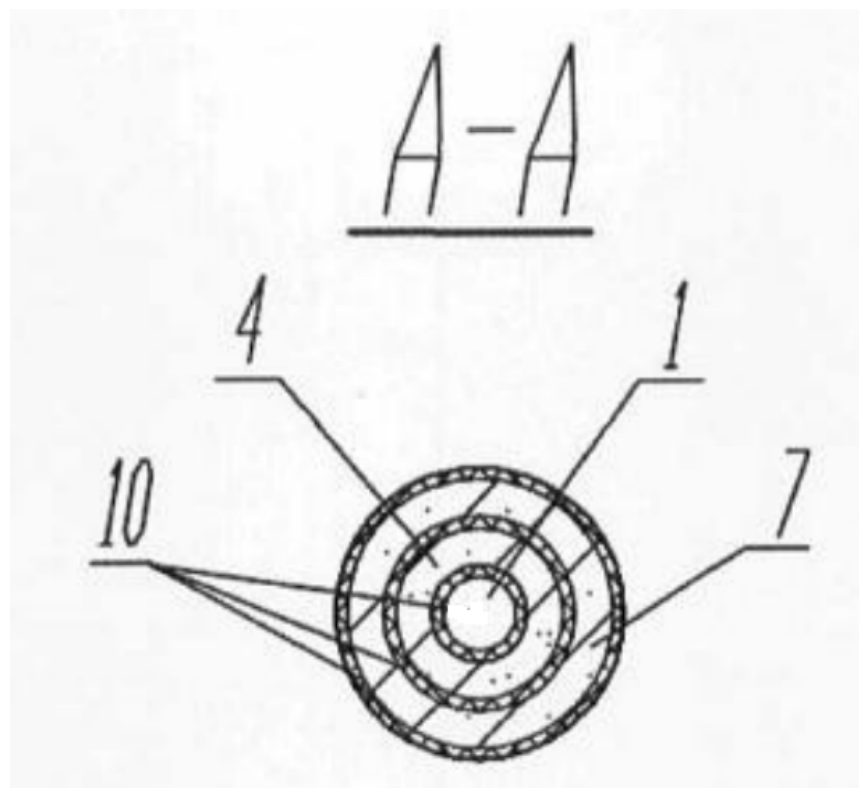


Рисунок 2 - Переріз конструкції без каркасного ферозонда

Ферозонд містить стрижньове осердя, виконане з немагнітного матеріалу та яке є колом збудження, наприклад, з берилієвої латуні у вигляді струмопровідного дроту діаметром 0,15-0,2 мм.

На стрижньове осердя 1, що є каркасом, а його виводи 2-3 утворюють коло збудження, послідовно нанесені два тонкі шари 4, 5

циліндричної феромагнітної плівки, наприклад з пермалою. При цьому виводи 6-7 першого шару 4 та виводи 8-9 другого шару 7 утворюють сигнальне коло та коло зворотного зв'язку відповідно, причому ці шари відокремлені один від одного та від осердя шарами тонкої ізоляційної плівки 10.

Ферозонд працює наступним чином. На стрижньове осердя 1, у вигляді струмопровідного дроту, а саме на його виводи 2-3, що утворюють коло збудження, від генератора перемінного струму подаються імпульси з високою частотою від часток до декількох МГц. При цьому утворюється перемінне магнітне поле, яке доводить перший тонкий шар 4 циліндричної феромагнітної плівки до стану магнітного насичення. При наявності поздовжньої складової вимірювального поля виникає поздовжня складова індукції, яка характеризується парногармонічним спектром. Внаслідок чого у сигнальному колі з'являється ЕРС парних гармонік, амплітуда та фази яких пов'язані з величиною та знаком вимірюваного магнітного поля. Другий тонкий шар 7 циліндричної феромагнітної плівки, що є колом зворотного зв'язку, дозволяє створювати постійне магнітне поле, зрівноважуюче магнітне поле Землі.

Зазвичай у конструкція ферозондів коло збудження та сигнальне коло утворюють обмотками з тонкого мікродроту, а у запропонованій конструкції цю функцію виконують стрижньове осердя 1 та перший тонкий шар 4 циліндричної феромагнітної плівки, відповідно.

Така конструкція дозволяє усунути перешкоди, викликані міжвитковою ємністю та індуктивністю витків обмоток і тим самим зменшити похибки та підвищити точність ферозонда.

Ферозонд можливо використовувати як магніточутливі первинні перетворювачі у датчиках кутових переміщень, перемінних та постійних магнітних полів або відхилювача від заданого кутового положення. Отже, пропонований ферозонд є значно чутливішим, більш простим за конструкцією та меншим за габаритами.

Розроблена конструкція без каркасного ферозонду на основі тонких плівок характеризується:

- високою точністю вимірювань, яка обумовлена відсутністю котушок з мікродроту, що створюють перешкоди, викликані міжвитковою ємністю та індуктивністю;

- високою чутливістю, за рахунок подачі на обмотку збудження від генератора змінного струму, імпульсів з високою частотою живлення від часток до кількох МГц;

- простотою конструкції та малими габаритними розмірами, за рахунок обумовлену заміною котушок з мікродроту на обмотки, виготовлені з тонких циліндричних плівок.

На запропоновану конструкцію магнітометричного датчика кута нахилу одержано патент України на корисну модель [70].

4.3 Конструкція каркасного ферозонда

На основі проведеного аналіз існуючих конструкції, убуло визначено, що більшість існуючих ферозондів мають складну конструкцію та наявність обмоток, виконаних з мікродроту, які утворюють додаткові перешкоди при вимірюванні [57, 58, 61-67].

Для вирішення задачі збільшення опору ферозонда, підвищення чутливості магнітного поля та зменшення габаритних розмірів, а також підвищення точності вимірювання, розроблено конструкція каркасного ферозонда, яка наведена на рисунку 3.

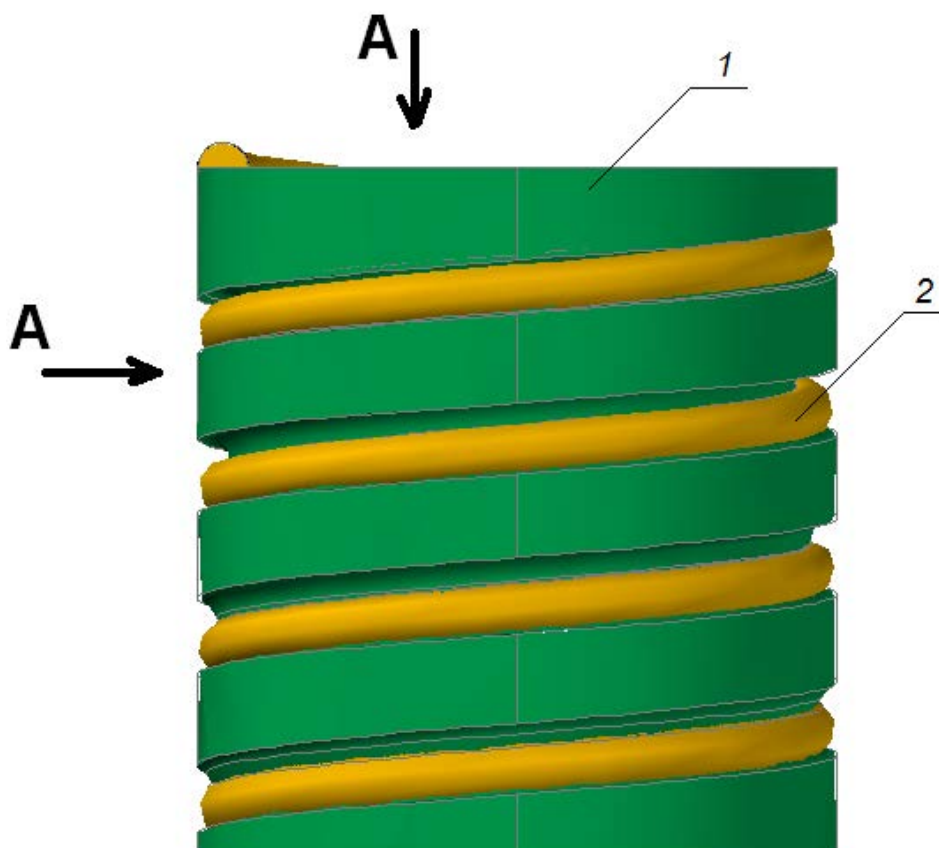


Рисунок 3 - Конструкція каркасного ферозонда

Каркасний ферозонді, складається із стрижневого осердя, у якому зроблено профільований спіральний паз (рисунок 4) та укладений без каркасний ферозонд.

На рисунку 3, основу ферозонда складає циліндричний каркас 1, виготовлений з немагнітного матеріалу, по всій довжині якого виконаний профільований спіральний паз, у який укладене стрижневе

осердя 2, виконане з немагнітного матеріалу, наприклад з берилієвої латуні у вигляді струмопровідного дроту діаметром 0,15-0,2 мм.

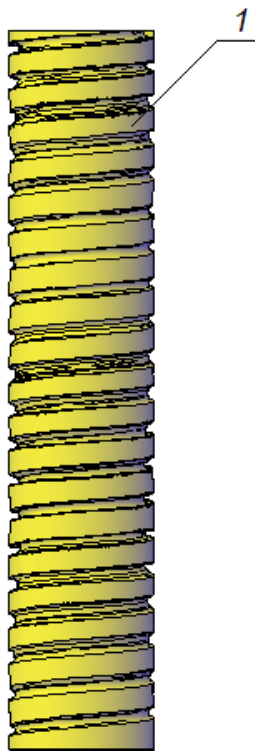


Рисунок 4 - Циліндричний каркас з профільованим спіральним пазом.

На рисунку 5 наведено переріз А-А з рисунка 3, на якому стрижневое осердя 2, що утворює коло збудження, послідовно нанесені два тонкі шари 3, 4 циліндричної феромагнітної плівки, наприклад з пермалою. При цьому перший шар феромагнітної плівки 3 та другий шар 4 утворюють сигнальне коло та коло зворотного зв'язку відповідно, причому ці шари відокремлені 30 один від одного та від осердя шарами тонкої ізоляційної плівки 5.

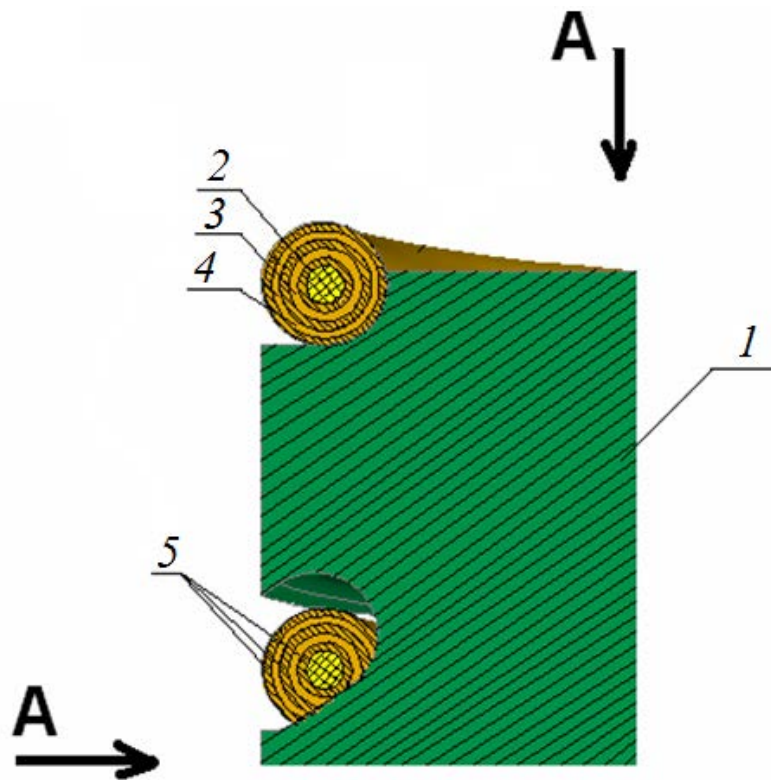


Рисунок 5– Переріз А-А каркасного ферозонда

Ферозонд працює наступним чином. На кінці стрижневого осердя 2, що утворює коло збудження, від генератора перемінного струму подаються імпульси з високою частотою від часток до декількох МГц. При цьому утворюється перемінне магнітне поле, яке доводить перший тонкий шар 3 циліндричної феромагнітної плівки до стану магнітного насичення. При наявності поздовжньої складової вимірювального поля виникає поздовжня складова індукції, яка характеризується парногармонічним спектром. Внаслідок цього у сигнальному колі з'являється електрорушійна сила парних гармонік, амплітуда та фази яких пов'язані з величиною та знаком вимірюваного магнітного поля. Другий тонкий шар 4 циліндричної феромагнітної плівки, що є колом зворотного зв'язку, дозволяє створювати постійне

магнітне поле, що врівноважує магнітне поле Землі. Далі сигнал величини вимірюваного поля надходить на вимірювальний пристрій.

Перевагою даної конструкції є циліндричний каркас з нанесеним по всій довжині спіральним пазом, у який вкладене стрижневе осердя, що дозволяє збільшити його довжину, за рахунок чого збільшується опір і, як наслідок, збільшується стійкість до перешкод. У більшості існуючих конструкції ферозондів каркас виконаний у вигляді скляної трубки, а стрижневе осердя - з мікродроту.

Ще однією особливістю каркасного ферозонда є коло збудження та сигнальне коло, функції яких виконують стрижневе осердя 2 та перший тонкий шар 3 циліндричної феромагнітної плівки відповідно, що дозволяє усунути перешкоди, викликані міжвитковою ємністю та індуктивністю витків обмоток, і тим самим зменшити похибки та підвищити точність ферозонда.

Товщина осердя 0,15-0,2 мм дозволяє підвищити частоту поля збудження (100 кГц - 10 МГц) і, як наслідок, збільшити чутливість та досягти перемагнічення ферозонда.

Каркас виготовлений з немагнітного матеріалу, по всій довжині якого виконаний профільований спіральний паз, що забезпечує утворення жорстко фіксованої магнітної осі. З допомогою каркаса можливо збільшувати опір ферозонда, не збільшуючи довжину конструкції, отже чутливість залишається незмінною. Змінюючи довжину каркаса, можна змінювати магнітну чутливість ферозонда, а за рахунок збільшення кількості спіральних пазів збільшувати опір конструкції.

Залежність опору ферозонда від довжини осердя та площі його перетину, представлена формулою [66]:

$$R = \frac{2 \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_f \cdot S} \quad (1)$$

де l - довжина осердя ферозонда;

S - площа перетину ферозонда;

μ_0 - магнітна постійна

μ_f - диференціальна магнітна проникність осердя

Збільшення числа витків вимірювальної обмотки істотно збільшує її опір, а це призводить до зниження завадостійкості. Таким чином можна зробити висновок, що на чутливість ферозонда впливає частота збудження і його магнітна проникність, яка залежить від довжини l і перетину сердечника S_c , записується:

$$\mu_f = \frac{l^2}{5 \cdot S} \quad (2)$$

Таким чином, можливо не змінюючи довжину каркаса збільшити довжину осердя, а відповідно збільшити опір і стійкість до перешкод датчика, але при цьому чутливість не зміниться. При збільшенні довжини каркаса збільшується й магнітна чутливість каркасного ферозонда.

Ферозонд можна використовувати як первинний перетворювач в датчиках магнітного поля і датчиках азимуту.

Розроблена конструкція каркасного ферозонду на основі тонких плівок характеризується:

високою точністю вимірювань, яка обумовлена відсутністю котушок з мікродроту, що створюють перешкоди, викликані міжвітковою ємністю та індуктивністю;

високою чутливістю, за рахунок подачі на обмотку збудження від генератора змінного струму, імпульсів з високою частотою живлення від часток до кількох МГц;

— простотою та універсальністю конструкції, малими габаритними розмірами, за рахунок циліндричного каркаса з профільованим спіральним пазом;

— жорстко фіксованою магнітною віссю, за допомогою циліндричного каркасу феррозонду.

На запропоновану конструкцію магнітометричного датчика кута нахилу одержано патент України на корисну модель [71].

4.4 Конструкція магніметра на основі диференціального плівкового ферозонда

Для підвищення точності вимірювання магнітного поля, розроблений магнітометр на основі диференціального плівкового ферозонду, структурна схема представлена на рисунку 6.

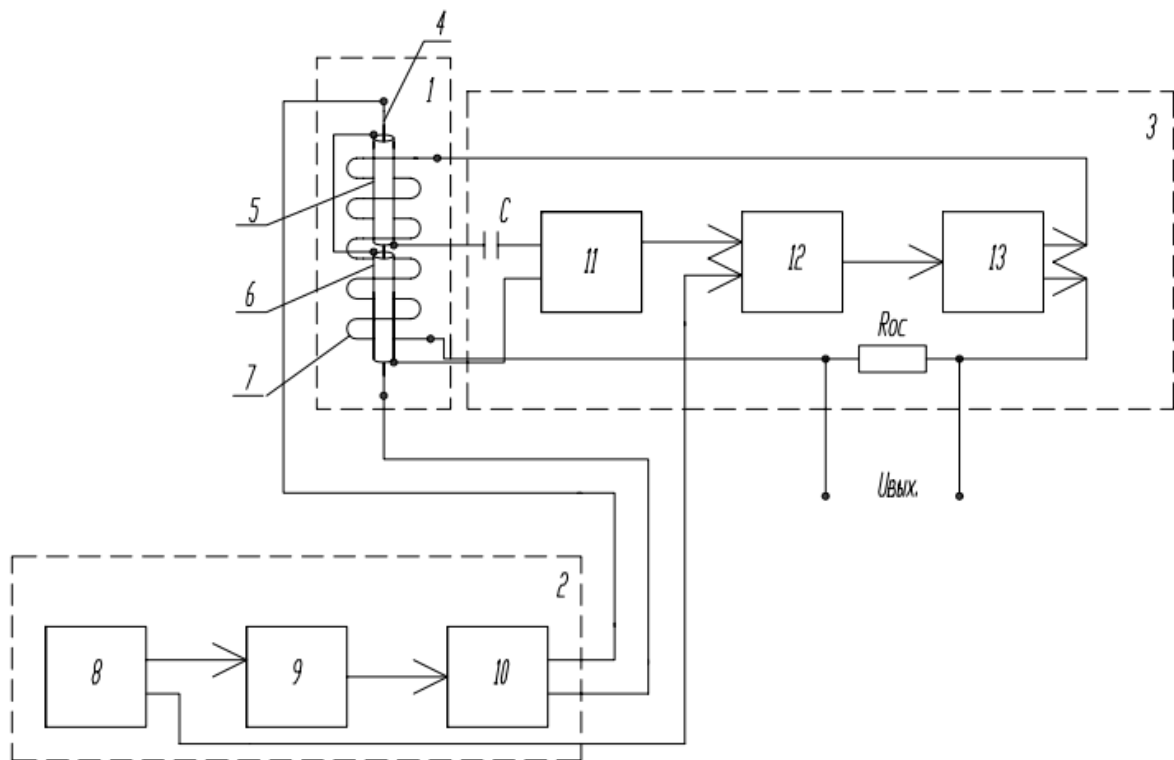


Рисунок 6 - Структурна схема магнетометра

На рисунку 6 наведена структурна схема магнітометра, на якому представлені наступні позиції:

- 1 – диференціальний плівковий ферозонд;
- 2 – джерело живлення;
- 3 – вибірковий підсилювач;
- 4 – немагнітне осердя диференціального плівкового ферозонда;
- 5, 6 – циліндрична плівка диференціального плівкового ферозонда;
- 7 – котушка зворотного зв'язку диференціального плівкового ферозонда;
- 8 – генератор періодичних коливань;
- 9 – подільник частоти;
- 10 – джерело струму;

- 11 – диференціальний підсилювач;
- 12 – двопівперіодний синхронний детектор;
- 13 – підсилювач потужності.

Датчик магнітного поля містить диференційний ферозонд 1, який складається з гнучкого струмопровідного немагнітного осердя малого діаметра 4, наприклад з берилієвої латуні. На поверхню осердя нанесені дві однакові циліндричні плівки 5, 6, наприклад, з пермалою. Зверху намотане з тонкого дроту коло зворотного зв'язку 7. Початок і кінці циліндричних плівок 5, 6 з'єднані між собою послідовно зустрічно і утворюють два напівелементи сигнального кола диференційного ферозонда, яке видає сигнал, пропорційний величині магнітного поля Землі. Блок живлення 2 складається з генератора періодичних коливань 8, подільника частоти на два 9 і джерела струму 10, що видає сигнали у вигляді різнополярних імпульсів. Вибірковий підсилювач 3 складається з конденсатора С, диференційного підсилювача 11, двопівперіодного синхронного детектора 12, вихідного підсилювача потужності 13 з усереднюючим фільтром і опір зворотного зв'язку R_{oc} .

Пристрій працює наступним чином. Від джерела живлення 2, сигнал надходить з першого виходу генератора періодичних коливань 8 на вхід подільника частоти на два 9, з виходу якого сигнал надходить на вхід джерела струму 10, потім сигнал у вигляді різнополярних імпульсів надходить на осердя 4 диференціального ферозонда 1, яке є колом збудження. Амплітуда струму збудження вибирається так, щоб забезпечити насичення сигнальних циліндричних плівок 5, 6,

внаслідок чого виникає поздовжня складова індукції, яка характеризується парногармонічним спектром. А саме з'являється ЕРС парних гармонік, яка є несучою інформацією про амплітуду та фази, пов'язані з величиною та знаком вимірюваного магнітного поля.

Далі сигнал з сигнальної циліндричної плівки 5 через роздільний конденсатор С надходить на перший вхід диференційного підсилювача 11, а на другий вхід надходить сигнал з циліндричної плівки 6. З виходу підсилювача сигнал надходить на перший вхід двопівперіодного синхронного детектора 12, а на другий вхід детектора з другого виходу генератора періодичних коливань 8 надходить сигнал управління ключами подвоєної частоти. З виходу синхронного детектора 12 сигнал надходить на вхід підсилювача потужності 13 з усереднюючим фільтром. З першого виходу підсилювача потужності 13 і з другого виходу через опір зворотного зв'язку R_{oc} сигнал надходить на обмотку зворотного зв'язку 7 диференційного ферозонда 1, падіння напруги на стабільному опорі зворотного зв'язку пропорційно проекції магнітного поля Землі на вісь чутливості ферозонда та є електричною мірою величини вимірюваного магнітного поля, який далі подається на вимірювальний пристрій (на кресленні не вказано).

Використання в даній конструкції як сигнального кола диференційного ферозонда циліндричних плівок дозволить значно підвищити частоту живлення (100 кГц-10 МГц) і як наслідок збільшити чутливість датчика і отримати поздовжню складову індукції магнітного поля, яка характеризується парногармонічним спектром. Розроблено спрощену конструкції та зменшені габарити, а також

знижено порог чутливості; за рахунок виключення резонансних явищ від внутрішніх обмоток ферозонда, викликаних міжвитковими ємністю та індуктивністю, неадекватного розсіювання і зниження енергоспоживання на перемагнічування.

У даній конструкції в складі вибіркового підсилювача відсутні смугові фільтри другої гармоніки, у яких параметри котушки значно залежать від зміни напруги живлення і температури навколишнього середовища. Отже, запропонована конструкція датчика дозволяє підвищити чутливість і точність, спростити конструкцію і зменшити габаритні розміри, усунути перешкоди, викликані міжвитковими ємністю та індуктивністю.

На запропоновану конструкцію магнітометра на основі диференціального плівкового ферозонда отримано патент України на корисну модель [72].

4.5 Компенсаційний датчик з магніточутливим перетворювачем

Для первинних перетворювачів комп'ютерних систем характерні похибки спрямованості, що виникають через відхилення положення осей чутливості первинних перетворювачів від взаємної ортогональності відносно один одного й опорного тригранника осей, пов'язаного з корпусом інклінометра; похибки чутливості (зміна передатного коефіцієнта) і похибка нуля перетворювача (нульовий сигнал), що характеризує зміщений нуль (зрушення) і шум каналу. При зміні температури навколишнього середовища змінюються як

передатний коефіцієнт перетворювача, так і його нульовий сигнал. Неврахування цих похибок при обчисленні шуканих кутів Ейлера приводить до значних помилок [57, 58, 68, 69].

Запропоновано для підвищення точності комп'ютерної системи орієнтації, у якості магніточутливого перетворювача використати магніторезистивний датчик НМС 1022 компанії Honeywell (рисунок 7) [43].



Рисунок 7 - Магніторезистивний датчик НМС 1022 компанії Honeywell

Магніторезистивні датчики НМС 1022 компанії Honeywell характеризуються високою чутливістю до 0,07 мГс, забезпечують високий рівень первинного сигналу, широкий робочий температурний діапазон (-55°C до +150°C), високу ступінь лінійності (похибка < 0,5%), міцність, надійність та точність роботи, але їх головна особливість - це мале зміщення та значна нечутливість до магнітних та механічних впливів [74].

У комп'ютерних системах орієнтації для вимірювання слабких магнітних полів використовується двовісний магніторезистивний датчик НМС 1022, який складається з двох мостових схем, двох плоских котушок SET/RESET (S/R) і двох котушок OFFSET. Кожна

схема включає чотири ідентичні магніторезистивні плівки, які з'єднані між собою, плоску котушок SET/RESET (S/R) і котушку OFFSET. На рисунку 8 наведена спрощена схема магніторезистивного датчика компанії Honeywell [75].

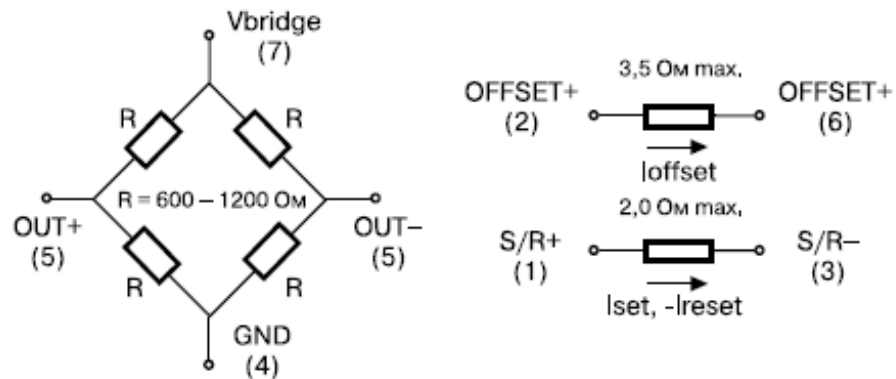


Рисунок 8 - Схема магніторезистивного датчика компанії Honeywell

На рисунку 9 наведена мікросхема магніторезистивного датчика НМС 1022 компанії Honeywell [43].

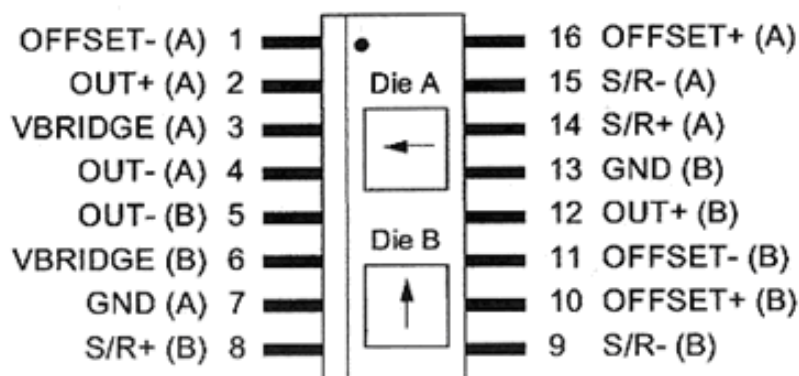


Рисунок 9 - Мікросхема магніторезистивного датчика НМС 1022 компанії Honeywell.

На входи датчика 2, 4, 5, 12 (рисунок 9) поступає напруга живлення $U_{вх}$ (1,8...12)В та датчик починає вимірювати зовнішнє магнітне поле, яке діє вздовж його вісі чутливості. Діюче поле викликає зміну опорів на плечах мосту та на його виході з'являється напруга $U_{вих}$.

Комп'ютерна система орієнтації з магніточутливими перетворювачами, виконана на основі компенсаційного датчика з магніточутливим перетворювачем.

У магніторезистивному датчику НМС 1022 компанії Honeywell вбудована плоска котушка SET/RESET призначена для переведу датчика в режим максимальної чутливості. Для цього через неї подається короткий інсталяційний імпульс струму (2 ... 5)А тривалістю 1-2 мкс, який формує поле та орієнтує магнітні домени всіх плівок в одному напрямку. Це напрямок називають «легкою віссю» та вказується у технічних характеристиках на датчик. Така процедура виконується перед кожним виміром магнітного поля, а датчик переводять у режим максимальної чутливості.

У запропонованій конструкції компенсаційного датчика з магніточутливими перетворювачами котушка SET / RESET використовується для модуляції вихідної напруги моста з метою подальшого посилення вихідного сигналу за допомогою підсилювачів змінного струму.

Інша плоска котушка OFFSET призначена для компенсації паразитних полів та інвертування передатної характеристики датчика.

В розробленому компенсаційному датчику з магніточутливим перетворювачем використовується, як компенсаційна котушка

ланцюга зворотного зв'язку при вимірюванні поля в режимі врівноважуючого перетворення. Така схема включення магніторезистивного датчика забезпечує лінійність вихідного сигналу і температурну стабільність схеми вимірювання магнітного поля притаманну всім пристроїв реалізованим за схемою врівноважує або компенсаційної перетворювача.

Структурна схема компенсаційного датчика з магніточутливими перетворювачами наведена на рисунку 10, де 1 – магніторезистивний датчик, 2 – підсилювач перемінного струму, 3 – фазочутливий детектор, 4 – підсилювач - інтегратор постійного струму, 5 – підсилювач, 6 – генератор струму, 7 – підсилювач потужності, R_{oc} – опір зворотного зв'язку, який включено послідовно до котушки OFFSET датчика.

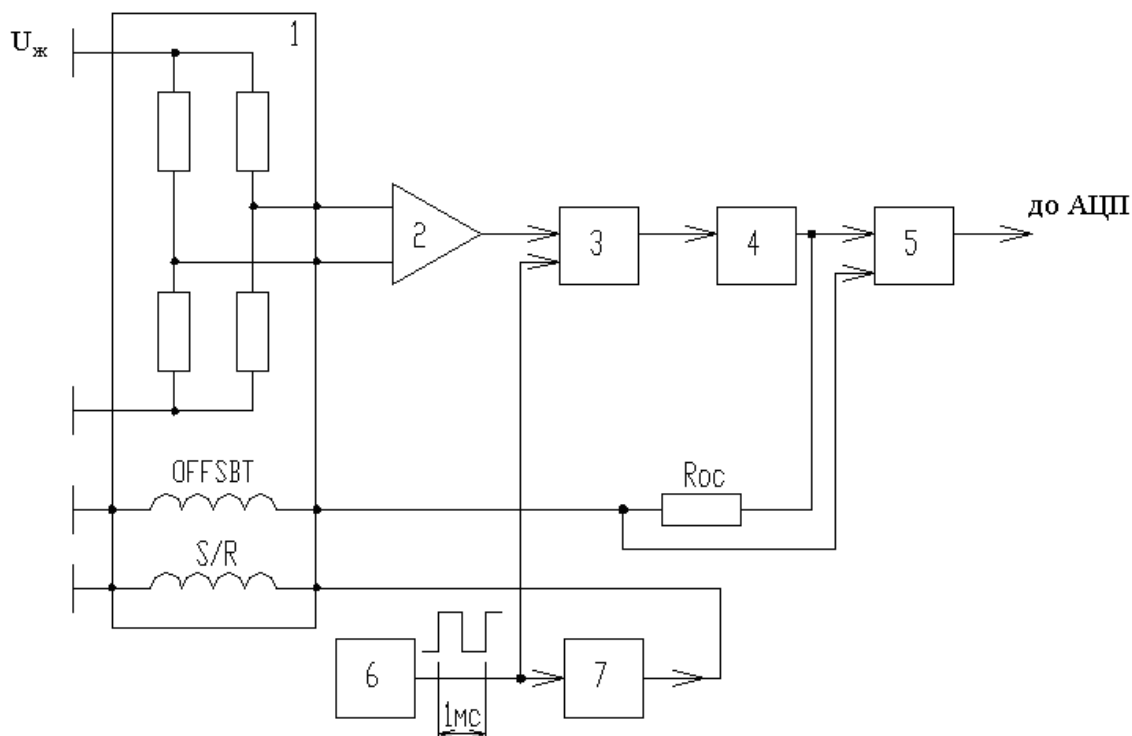


Рисунок 10 - Структурна схема компенсаційного датчика з магніточутливими перетворювачами

Генератор струму 6 складається з генератора змінного струму, що працює на високій частоті та подільника частоти. Вихідна напруга генератора в якості опорної подається на вхід фазового детектора 3 і підсилювача потужності з струмовим виходом 7. Останній, формує імпульси з високою послідовністю і амплітудою, які подаються на вхід плоскої котушки SET/RESET, активного опору. Магнітне поле цієї котушки, змінюється з високою частотою та модулює постійне магнітне поле Землі, що вимірюється. Це дозволяє посилювати промодульований сигнал, що надходить з виходу моста датчика 1, підсилювачем змінного струму з великим коефіцієнтом посилення. Змінна напруга далі випрямляється фазочутливим детектором 3, тактуючи імпульси, які надходять з генератора 6. Підсилювач-інтегратор 4 усуває пульсацію постійної напруги. Посилений сигнал через резистор зворотного зв'язку R_{oc} надходить на вхід плоскою котушки OFFSET, що створює постійне магнітне поле, яке врівноважує магнітне поле Землі в обсязі магніторезистивного датчика 1, створюючи таким чином схему врівноважуючого перетворювача. Напруга на резисторі R_{oc} є вихідним сигналом, який через підсилювач 5 надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача.

Таким чином, струм, що протікає в плоскій компенсаційній котушці OFFSET, пропорційний проекції вектора напруженості магнітного поля Землі \vec{T} на вісь чутливості магніторезистора \vec{i} . При цьому вихідна напруга на резисторі R_{oc} є вихідним сигналом, який пропорційний добутку модуля вимірюваного вектора \vec{T} напруженості МПЗ на кут кута повороту осі чутливості \vec{i} датчика щодо вектора \vec{T} :

$$U_1^m = U_{01}^M + U_{m1}^M \cos(\vec{T}, \vec{i}) \quad (3)$$

де U_{01}^M - нульовий сигнал датчика, який не залежить від вимірюваного значення \vec{T} ;

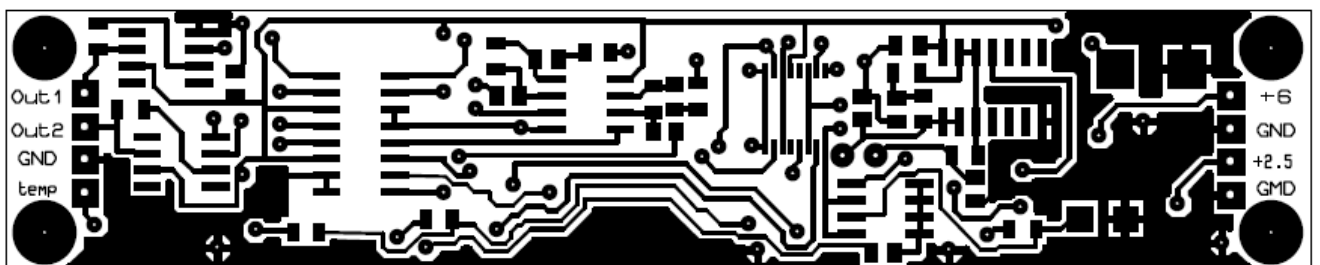
U_{m1}^M - найбільше значення вихідного сигналу.

Відповідно другий та третій датчики опору спрямовані ортогонально першому і утворюють прямокутну праву систему координат $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ мають математичну модель (ММ) аналогічну першому:

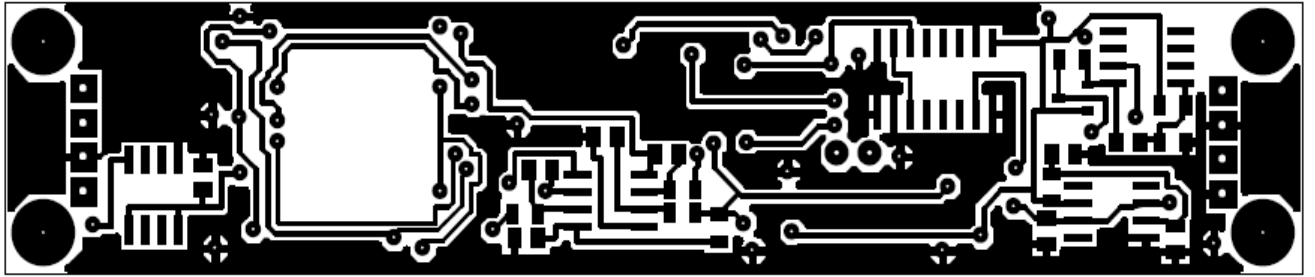
$$U_2^m = U_{02}^M + U_{m2}^M \cos(\vec{T}, \vec{j}) \quad (4)$$

$$U_3^m = U_{03}^M + U_{m3}^M \cos(\vec{T}, \vec{k}) \quad (5)$$

На рисунку 11 представлено трасування плати датчика магнітного поля на основі магніторезистивного датчика НМС 1022 компанії Honeywell.



a).



б).

Рисунок 11 - Плата датчика магнітного поля на основі магніторезистивного датчика НМС 1022 компанії Honeywell

В корпусі датчика магнітного поля рисунку 12, магніточутливий перетворювач знаходиться на платі (позиція 1) та представляє собою мікросхему двовісного магніторезистивного датчика НМС 1022. Конструктивно у магніторезистивному датчику вісі чутливості взаємно ортогональні. Діапазон вимірювання 10^{-3} - 1г.

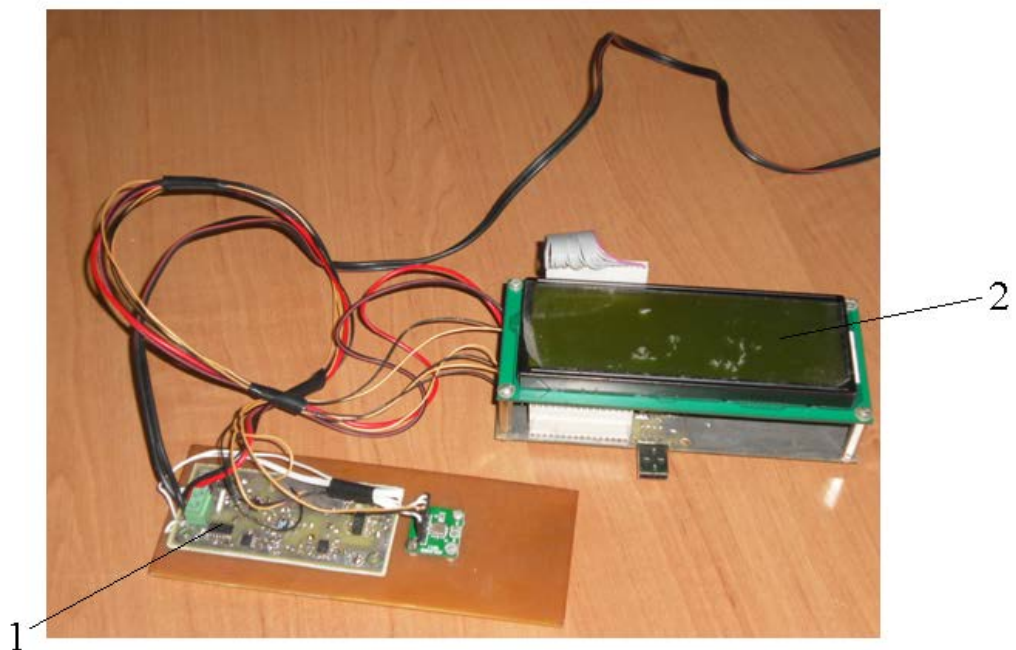


Рисунок 12 - . Датчик магнітного поля з індикатором на основі магніторезистивного датчика НМС 1022 компанії Honeywell

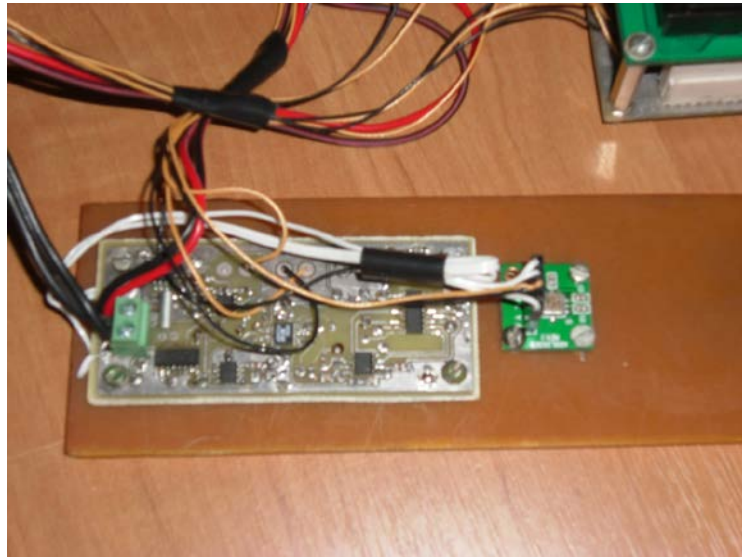


Рисунок 13 - Датчик магнітного поля на основі магніторезистивного датчика HMC 1022 компанії Honeywell

Розроблений датчик магнітного поля з використанням двовісного магніторезистивного датчика HMC 1022 [44] компанії Honeywell на основі схеми врівноважує (компенсаційного) перетворення. Запропоновано принцип модуляції постійного магнітного поля Землі в обсязі магніторезистора за допомогою змінного магнітного поля, що змінюється із частотою 1кГц, що створюється плоскою котушкою SET/RESET. Інша плоска котушка OFFSET призначена для компенсації паразитних полів та автокалібрування посилення МР-моста [75]. У цій схемі OFFSET використовується як компенсаційна котушка ланцюга зворотного зв'язку при вимірі поля в режимі перетворення.

Розроблений датчик магнітного поля характеризується:

- високою лінійністю вихідного сигналу;

— температурною стабільністю схеми врівноважуючого перетворення;

— малими габаритними розмірами, простотою виготовлення, низькою вартістю.

Висновки. Розроблено без каркасний ферозонд на основі тонких плівок, який має високу чутливість, малими габаритними розмірами та простою конструкцією;

Розроблено каркасний ферозонд на основі тонких плівок, який дозволяє змінювати опір та чутливість конструкції, а також має жорстко фіксовану магнітну вісь.

Розроблено магнітометр на основі диференціального плівкового ферозонду, який має високу чутливість та завадостійкість;

Розроблено датчик магнітного поля, який характеризується високою точністю, лінійністю та температурною стабільністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року [Електронний ресурс]: Постанова Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. №145. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua>. – Загол. з екрану. Перевірено : 07.11.2019.

2. Національна акціонерна компанія “НАФТОГАЗ України” [Електронний ресурс]. – Добыча углеводородов. – Режим доступу :<http://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.ru.nsf/0/386113CD276234E5C2257AD800281660?Eхрand=4&OpenDocument> – Загол. з екрану. – Перевірено: 04.07.17.

3. Ніконенко, У. М. Паливно-енергетичні ресурси України: сьогодення та майбутні перспективи. / У.М Ніконенко // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Економіка. – 2014. – Випуск 3 (44). – С. 54 – 59.

4. Тарнавский, В. Черноморский шельф в нефтегазовом балансе Украины. [Электронный ресурс] / В. Тарнавский // Электронный журнал энергосервисной компании “Экологические системы” 2010. – №8. – Режим доступу: http://esco.co.ua/journal/2010_8/art084.htm. – Загол. з екрану. – Перевірено: 07.11.2019.

5. Технологія розкриття пластів на рівноазі пластового та вибійного тисків під час буріння свердловин Передкарпаття / О.М. Чорний, Г.М. Левицькі, І.М. Кузів, Е.О. Чорний // Нафтогазова галузь України. – 2015. – №3. – С. 14–18.

6. “Укрнафта” возобновляет бурение горизонтальной скважины на Бугруватинском месторождении. [Электронный ресурс]. “Энергобизнес новости” 23.08.2016 – Режим доступу: <http://www.eb.com.ua/get/?t=news&id=9978> – Загол. з екрану. – Перевірено: 07.11.2020.

7. Відновлення свердловин – перспективний напрям збільшення обсягів видобутку вуглеводів у Західному нафтопромисловому районі України / Є. М. Ставичний, С. А. П’ятківський, М. М. Плитус, Л. Я. Притула, М. Б. Ковальчук // Нафтогазова галузь України. – 2014. – №6. – С. 3 – 6.

8. Рыжков И. В. Феррозондовые датчики ориентации повышенной точности / И. В. Рыжков. — Днепропетровск : Издательство ПГАСА, 2009. – 146 с.

9. Рыжков И.В. Инклинометрические приборы. Конструкции и способы повышения точности / И.В. Рыжков // Saarbrücken, Deutschland: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2016. – 274 с.
10. ADXL103/203. Precision $\pm 1,7$ g, ± 5 g, ± 18 g Single-/Dual-Axis iMems Accelerometer [Электронный ресурс]: Analog Devices, Inc. – 2004-2014. – Режим доступа: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADXL103_203.pdf. – Загол. з екрану. – Перевірено: -07.11.2020.
11. Electromagnetic Tool // Offshore. – 1998. – Vol.58, № 10. – 200 р..
12. Baily R. L. // J. of Magnetism and Magnetic Materials, 1983. V. 39. P. 178–182.
13. Doshier, J. Accelerometer Design and Application. / J. Doshier // Analog Devices. – 1998.
14. MEMS accelerometers and the energy market. [Электронный ресурс]: Offshore Technology International. – P. 29–30. – Режим доступа: <http://www.colibrys.com/wp-content/uploads/2015/04/Offshore-Technology-article-2011-final.pdf>. – Загол. з екрану. – Перевірено :08.11.2020.
15. Бауск Е.А. Эксплуатация технологического комплекса «Мониторинг строительных конструкций АЭС». Общие положения / Е.А.Бауск, И.Н.Матюшенко, И.В. Рыжков // Стандарт государственного предприятия «Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом». СОУ НАЭК 109:2016. – Киев, 2016. – 48с.
16. Рыжков И.В. Влияние алгоритма использования феррозондовых датчиков на точность измерения ориентации / И.В. Рыжков // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – 2007. – №39. – С. 172 – 177.
17. Ковшов Г.Н. Математическая модель феррозондового инклинометрического преобразователя с учетом погрешности от колонны буровых труб / Г.Н. Ковшов, И.В. Рыжков, Е.А. Пономарева, А.В. Садовникова // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2008. – №1 – 2. – С. 35 – 39.

18.Ковшов Г.Н. Определение улов пространственной ориентации при отказе первичных преобразователей / Г.Н. Ковшов, И.В. Рыжков, Е.А. Пономарева, А.В. Садовникова // Строительство, материаловедение, машиностроение. Интенсификация рабочих процес сов строительных и дорожных машин. Серия: подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – 2008. – №46. – С. 170 – 176.

19.Рыжков И.В. Методы повышения термостойкости инклинометрических преобразователей / И.В. Рыжков, Е.А. Пономарева / Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. – №10. – С. 4 – 9.

20.Рыжков И.В. Математическая модель инклинометра с карданными рамками на основе магниточувствительных преобразователей / И.В. Рыжков, Е.А. Пономарева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2010. – №10. – С. 6 – 11.

21.Г.Н. Ковшов. Способ определения азимута наклонно-направленной скважины с учетом влияния магнитной помехи / Г.Н. Ковшов, Е.А. Пономарева, И.В. Рыжков, А.В. Садовникова // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения 2010. – 2010. – №54.– С. 150 – 157.

22.Рыжков И.В. Определение погрешности чувствительности первичных датчиков инклинометров / И.В. Рыжков, Е.А. Пономарева, // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения 2011. – 2011. – №58. – С. 719 – 728.

23.Рыжков И.В. Алгоритмический метод компенсации погрешностей инклинометра / Рыжков И.В., Садовникова А.В., Лукашук А.А.// Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: «Подъемно – транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование» // Сб. науч. тр. Вып. 63 – Дн – ск: ПГАСА, 2011. – С. 128 – 134.

24.Рыжков И.В. Определение углов пространственной ориентации керноотборника и слоев породы керна в наклонных скважинах / И.В. Рыжков, Е.А. Пономарева // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения 2012. – 2012. – №64. – С. 395 – 402.

25.Ковшов Г.Н. К вопросу использования микроконтроллера в качестве управляющего блока процесса бурения / Г.Н. Ковшов, И.В. Рыжков, А.В. Ужеловский // Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: НГУ, 2012. – Вип. 89. – С. 96-98.

26.Рыжков И.В. Эффективность применения инклинометрических устройств, учитывающих индивидуальные электрические характеристики первичных преобразователей / И.В. Рыжков, Е.А. Пономарева // Строительство, материаловедение, машиностроение. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин. Серия: подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – 2012. – №66. – С. 288 – 295.

27.Ковшов Г.Н. До питання підвищення точності визначення положення бурового снаряда при дослідженні впливу температури на результати первинних перетворювачів / Г.Н. Ковшов, И.В. Рыжков, А.В. Ужеловский //Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2013. – Вип.№ 3. – С. 78-82.

28.Ковшов Г.Н. Автоматизированная система управления ориентации бурового инструмента с использованием электропривода роторного стола бурового станка / Г.Н. Ковшов, И.В. Рыжков, А.В. Ужеловский // Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: НГУ, 2013. – Вип. 90. – С. 48-53.

29. Поворотний стіл для випробування приладів : пат. 117778 Україна: МПК А47В 37/00.№ 201700139;заявл. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

30. Вібронезалежна опора : пат. 113941 Україна: МПК Е04В 1/74 ;заяв. 11.07.2016 ; опуб. 27.02.1017, Бюл. № 4.

31. Спосіб тестування поворотного стола для вимірювання малих кутів відхилення : пат. 113940Україна : МПК G01В 11/26. № u2016 07516 ;заявл. 11.07.2015 ; опубл. 27.02.2016, Бюл. № 4.

32. МикроконтроллерATMEGA 328P. *Arduino.ua*: веб-сайт. URL:<https://arduino.ua/cat71-literatyra>(дата звернення 11.11.2019).

33. Найбільші родовища нафти і газу в Україні. Пізнавального сайту «Географія» : веб-сайт. URL:

https://geoknigi.com/view_stat.php?id=121 (дата звернення 19.01.2023).

34. Ставичний Є. М., П'ятківський С. А., Плитус М. М., Притула Л. Я., Ковальчук М. Б. Відновлення свердловин – перспективний напрям збільшення обсягів видобутку вуглеводнів у Західному нафтопромисловому районі України. *Нафтогазова галузь України*. 2014. № 6. С. 3 – 6.

35. Чорний О. М., Левицька Г. М., Кузів І. М., Чорний Е. О. Технологія розкриття пластів на рівновазі пластового та вибійного тисків під час буріння свердловин Передкарпаття. *Нафтогазова галузь України*. 2015. № 3. С. 14-18.

36. Ферозонд : пат. 78458 України : МПК G01R 33/00. u 2012 08288; заявл. 06.07.2012; опубл. 25.03.2013, Бюл.№ 6.

37. Ферозонд : пат. 81112 України : МПК G01R 33/00. № u 201213799; заявл. 03.12.12; опубл. 25.06.2013 , Бюл. № 12.

38. Датчик магнітного поля : пат. 77249 України : МПК G01R 33/00. u 2012 07845; заявл. 26.06.2012; опубл. 11.02.2013, Бюл.№ 3.

39. H. Cheng-Yu, Z. Yi-Fan, Z. Meng-Xi, L. M. G. Leung, and L. Li-Qiang, "Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 244, pp. 184–197, Jun. 2016.

40. Инклинометр GNAMG [Электронный ресурс]: Каталог продукции «BaumerIVO» Режим доступа: <http://www.germany-electric.ru/48> – Загл. с экрана. – Проверено : 14.11.2020.

41. ИМГ-36А [Электронный ресурс]: Каталог продукции Geosystems, Київ, Україна – Режим доступа: <http://geosystems.com.ua/> – Загл. с экрана. – Проверено: 14.11.2020.

42. G. A. Miller, "Fabrication of a multifiber optical inclinometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 12, pp. 1289–1292, Jun. 15, 2015.

43. H. B. Xiong, J. X. Cao, F. L. Zhang, "Inclinometer-based method to monitor displacement of high-rise buildings", *Structural Monitoring and Maintenance*, Vol. 5, No. 1 (2018) 111-127, DOI: <https://doi.org/10.12989/smm.2018.5.1.111>.

44. Q. Li, Y. He, H. Wang, K. Zhou, B. Yan, "Monitoring and time dependent analysis of vertical deformations of the tallest building in China". *Struct Control Health Monit.* 2017;24:e1936. <https://doi.org/10.1002/stc.1936>.

45. Mikkelsen, P.E.; DiBiagio, E. Depth position errors in inclinometer surveys and false displacement results. In *Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, Sydney, Australia, 8–10 September 2015; pp. 117–123.

46.Бауск Е.А. Эксплуатация технологического комплекса «Мониторинг строительных конструкций АЭС». Общие положения / Е.А.Бауск, И.Н.Матюшенко, И.В.Рыжков // Стандарт государственного предприятия «Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом». СОУ НАЭК 109:2016. – Киев, 2016.– 48 с.

47.Рыжков И.В. Инклинометрические приборы. Конструкции и способы повышения точности / И.В. Рыжков // Saarbrücken, Deutschland: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2016. – 274 с.

48.Maheshwari, Muneesh & Yang, Yaowen & Upadrashta, Deepesh & Chaturvedi, Tanmay. (2018). A Rotation Independent In-Place Inclinometer/Tilt Sensor Based on Fiber Bragg Grating. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. PP. 1-11. 10.1109/TIM.2018.2870246.

49.Jeng, C.-J.; Yo, Y.-Y.; Zhong, K.-L. Interpretation of slope displacement obtained from inclinometers and simulation of calibration tests. Nat. Hazards 2017, 87, 623–657.

50.Allasia, P.; Lollino, G.; Godone, L.; Giordan, D.G. Deep displacements measured with a robotized inclinometer system. In Proceedings of the 10th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics, Rio de Janeiro, Brasil, 16–20 July 2018.

51.Відновлення свердловин – перспективний напрям збільшення обсягів видобутку вуглеводів у Західному нафтопромисловому районі України / Є. М. Ставичний, С. А. П'ятківський, М. М. Плитус, Л. Я. Припула, М. Б. Ковальчук // Нафтогазова галузь України. – 2014. – №6. – С. 3 – 6.

52.Ніконенко, У. М. Паливно-енергетичні ресурси України: сьогодення та майбутні перспективи. / У.М Ніконенко // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Економіка. – 2014. – Випуск 3 (44). – С. 54 – 59.

53.Нафтогазова промисловість України. Інформаційна довідка. [Електронний ресурс]. – Режим доступу https://www.naftogaz.com/files/Oil_Gas_Industry_Ukraine.pdf – Загл. С екрана. – Перевірено; 14.11.2020

54.Національна акціонерна компанія “НАФТОГАЗ України” [Електронний ресурс]. – Добыча углеводородов. – Режим доступу: <https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.ru.nsf/0/74B2346ABA0C6C69C22570D80031A365?OpenDocument> – Загл. с екрана. – Проверено: 14.11.2020.

55.R. Yang, H. Bao, S. Zhang, K. Ni, Y. Zheng, and X. Dong, “Simultaneous measurement of tilt angle and temperature with pendulum-based fiber Bragg grating sensor,” IEEE Sensors J., vol. 15, no. 11, pp. 6381–6384, Nov. 2015.

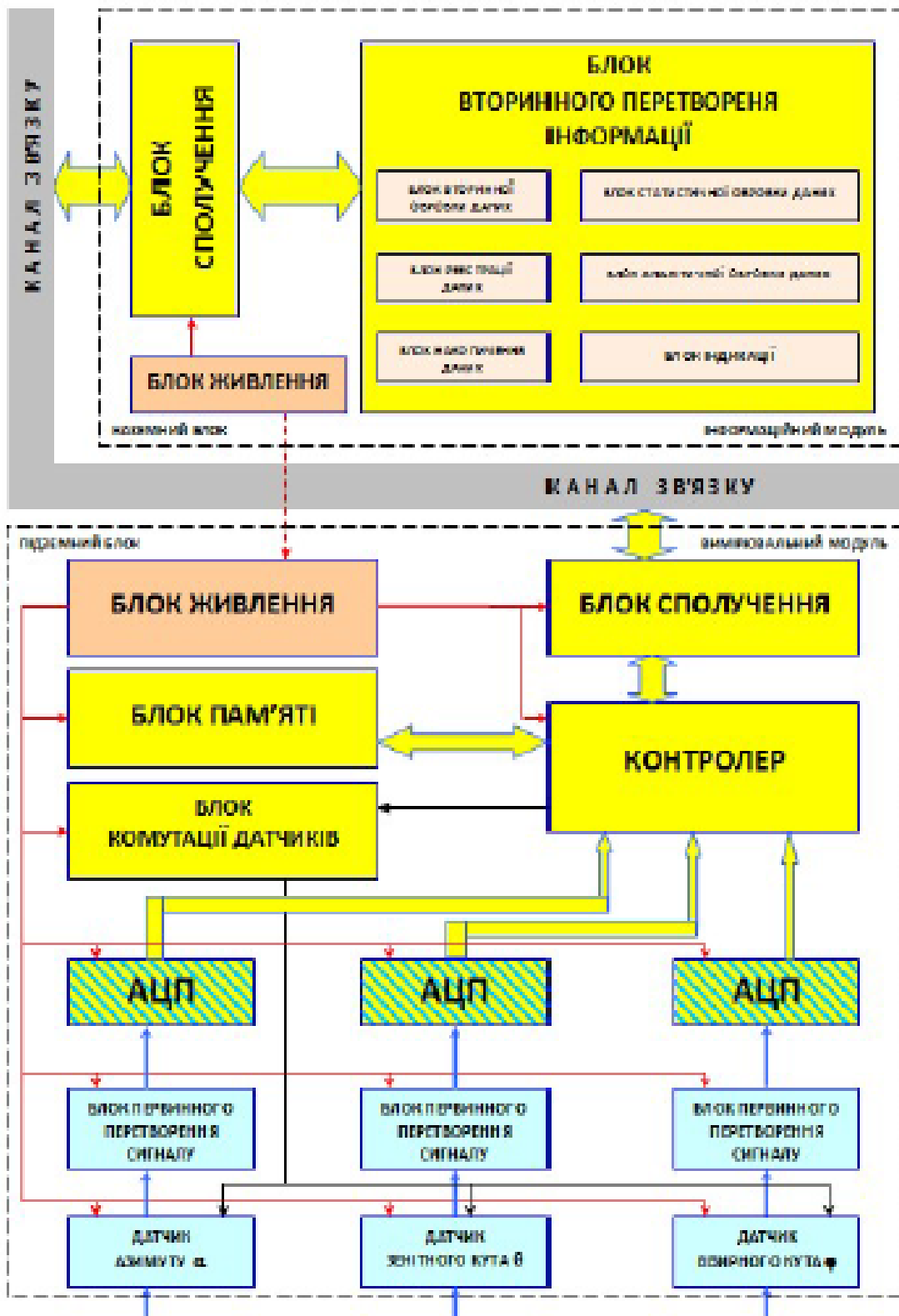
56.Xu, H.; Zhao, Y.; Zhang, K.; Jiang, K. A Capacitive MEMS Inclinometer Sensor with Wide Dynamic Range and Improved Sensitivity. Sensors 2020, 20, 3711.

57. Dai, K.; Wang, X.; Yi, F.; Jiang, C.; Li, R.; You, Z. Triboelectric nanogenerators as self-powered acceleration sensor under high-g impact. *Nano Energy* 2018, 45, 84–93. [Google Scholar] [CrossRef]
58. Anandan, N.; George, B. A wide-range capacitive sensor for linear and angular displacement measurement. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 5728–5737. [Google Scholar] [CrossRef]
59. Pu, H.; Liu, H.; Liu, X. A novel capacitive absolute positioning sensor based on time grating with nanometer resolution. *Mech. Syst. Signal Process.* 2018, 104, 705–715. [Google Scholar] [CrossRef]
60. Giordan, D.; Adams, M.S.; Aicardi, I.; Alicandro, M.; Allasia, P.; Baldo, M.; De Berardinis, P.; Dominici, D.; Godone, D.; Hobbs, P.; et al. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 2020, 1–45.
61. Ken Shoemake, Animating Rotation with Quaternion Curves Proc. SIGGRAPH 1985, pp. 245 - 254.
62. Jeng, C.J., Yo, Y.Y. & Zhong, K.L. Nat Hazards (2017). Interpretation of slope displacement obtained from inclinometers and simulation of calibration tests. *Natural Hazards*. June 2017, Volume 87, Issue 2, pp 623–657.
63. Ryzhkov I.V. Les systèmes inclinométriques dans les conditions d'un champ magnétique anomal / Ryzhkov I. / *Langues, Sciences et Pratiques: du 2 Colloque international francophone en Ukraine*, 3-4 octobre 2018. – Dnipro, 2018. – p.181-182.
64. Rice, J. A., Mechitov, K., Sim, S. H., Nagayama, T., Jang, S., Kim, R., Spencer, B. F. J., Agha, G., Fujino, Y. Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring. *Smart Structures and Systems*. 2010. Vol. 6. P. 423–438, DOI: https://www.doi.org/10.12989/sss.2010.6.5_6.423
65. Araujo, A., García-Palacios, J., Blesa, J., Tirado-Andrés, F., Romero, E., Samartín, A., Nieto-Taladriz, O. Wireless measurement system for structural health monitoring with high time-synchronization accuracy. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012. Vol. 61, Issue. 3. P. 801-810. DOI: <https://www.doi.org/10.1109/TIM.2011.2170889>
66. Fu, Y., Hoang, T., Mechitov, K., Kim, J., Zhang, D., Spencer, B. Sudden event monitoring of civil infrastructure using demand-based wireless smart sensors. *Sensors*. 2018. Vol. 18, Issue. 12. P. 1-17. DOI: <https://www.doi.org/10.3390/s18124480>
67. Hailing, F., Khodaei Z.S., Ferri Aliabadi, M.H. An event-triggered energy-efficient wireless structural health monitoring system for impact detection in composite airframes. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6, Issue. 1. P. 1183-1192. DOI: <https://www.doi.org/10.1109/JIOT.2018.2867722>
68. Wang, P., Yan, Y., Gui, Y.T., Bouzid, O., Ding, Z. Investigation of wireless sensor networks for structural health monitoring. *Journal of*

- Sensors. 2012. Vol. 2012. P. 1-7. DOI: <https://www.doi.org/10.1155/2012/156329>
69. Kluga, A., Kluga, J. Dynamic Data Processing with Kalman Filter. *Elektronika Ir Elektrotechnika*. 2011. Vol. 111, Issue. 5. P. 33–36. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.eee.111.5.351>
70. Yang, Z., Gu, Z., Zhang, W. Dynamic data processing method based on generalized least square method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2108, Issue. 1. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2108/1/012057>
71. Gorski, J., Dziendzikowski, M., Dworakowski, Z. Recommendation System for Signal Processing in SHM. *Artificial Intelligence and Soft Computing*. 2021. Vol. 12854. P. 328–337. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87986-0_29
72. Gordan, M., Razak, H. A., Ismail, Z., Ghaedi, K. Recent Developments in Damage Identification of Structures Using Data Mining. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017. Vol. 14, Issue. 13. P. 2373–2401. DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78254378>
73. Finotti, R. P., Cury, A. A., Barbosa, F. D. S. An SHM approach using machine learning and statistical indicators extracted from raw dynamic measurements. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019. Vol. 16, Issue. 2. P. 1–17 DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78254942>
74. Figueiredo, E., Santos, A. Machine Learning Algorithms for Damage Detection. *Vibration-Based Techniques for Damage Detection and Localization in Engineering Structures*. 2018. P. 1–39. DOI: https://doi.org/10.1142/9781786344977_0001
75. Caballero-Russi, D., Ortiz, A. R., Guzman, A., Canchila, C. Design and Validation of a Low-Cost Structural Health Monitoring System for Dynamic Characterization of Structures. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Issue. 6. P. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12062807>
76. Baraccani, S., Palermo, M., Azzara, R. M., Gasparini, G., Silvestri, S., Trombetti, T. Structural Interpretation of Data from Static and Dynamic Structural Health Monitoring of Monumental Buildings. *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 747. P. 431–439. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.747.431>
77. Aime, J. O. O., Jean, P. N., Guy-Germain, A., Pierre, E. Compression of Vibration Data by the Walsh-Hadamard Transform. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15, Issue. 10. P. 2256–2260.
78. Fenerci, A., Andreas Kvale, K., Wiig Petersen, Y., Ronnquist, A., Oiseth, O. Data Set from Long-Term Wind and Acceleration Monitoring of the Hardanger Bridge. *Journal of Structural Engineering*. 2021. Vol. 147, Issue. 5. P. 1–13. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002997](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002997)

Класифікація методів контролю й діагностики

Ієрархічний номер	Ім'я групи методів контролю й діагнозу	Рівень ієрархії					
		1	2	3	4	5	6
1.	Детерміноване	+					
2.	Імовірнісне	+					
3.	Інтелектуальне	+					
4.	Зовнішнє	+					
5.	Самодіагностування	+					
6.	Апаратне	+					
7.	Програмне	+					
1-7.1.	Робоче		+				
1-7.2.	Тестове		+				
1-7.1-2.1.	Однокомпонентне						
1-7.1-2.2.	Декомпозиційне структурно-просторове			+			
1-7.1-2.3.	Декомпозиційне структурно-часове			+			
1-7.1-2.2-3.1.	Модульне				+		
1-7.1-2.3.2.	Мікропрограмне				+		
1-7.1-2.2.2.	Регістрове				+		
1-7.1-2.2-3.3.	Перевірка «механізмів»				+		
1-7.1-2.1.1.	Автоматне				+		
1-7.1-2.1.2.	На основі мереж Петрі				+		
1-7.1-2.1.3.	Граматичне				+		
1-7.1-2.1.4.	Абстрактне				+		
1-7.1-2.2.5.	Мережне				+		
1-7.1-2.2-3.6.	Ієрархічне				+		
1-7.1-2.1.2. 1.	Досяжні розмітки					+	
1-7.1-2.1.2. 2.	Бісімуляція					+	
1-7.1-2.1. 1-2.1.	Експерименти					+	
1-7.1-2.1. 1-2.1.1.	Що розпізнають						+
1-7.1-2.1. 1-2.1.2.	Контрольні						+
1.2. 1.	Псевдовипадкові			+			
1.2. 2.	Сигнатурний аналіз			+			
1.2. 3.	Частотний аналіз			+			
1.3. 1.	Експертне			+			
1.3. 2.	На основі нейронних мереж			+			
1.3. 3.	Еволюційно-генетичне			+			



ДОДАТОК В

Результати розкладу даних у ряд Фур'є

Градусы	B1	Рadianы(L)	cos(L)	B1*cosL	2*L	cos2L	B1*cos2L	3*L
0	-0,287	0	1	-0,287	0	1	-0,287	0
5	0,174	0,087266463	0,996194698	0,173338	0,174533	0,984808	0,171357	0,261799
10	0,698	0,174532925	0,984807753	0,687396	0,349066	0,939693	0,655905	0,523599
15	1,2	0,261799388	0,965925826	1,159111	0,523599	0,866025	1,03923	0,785398
20	1,68	0,34906585	0,939692621	1,578684	0,698132	0,766044	1,286955	1,047198
25	2,16	0,436332313	0,906307787	1,957625	0,872665	0,642788	1,388421	1,308997
30	2,61	0,523598776	0,866025404	2,260326	1,047198	0,5	1,305	1,570796
35	3,07	0,610865238	0,819152044	2,514797	1,22173	0,34202	1,050002	1,832596
40	3,48	0,698131701	0,766044443	2,665835	1,396263	0,173648	0,604296	2,094395
45	3,89	0,785398163	0,707106781	2,750645	1,570796	6,13E-17	2,38E-16	2,356194
50	4,26	0,872664626	0,64278761	2,738275	1,745329	-0,17365	-0,73974	2,617994
55	4,6	0,959931089	0,573576436	2,638452	1,919862	-0,34202	-1,57329	2,879793
60	4,9	1,047197551	0,5	2,45	2,094395	-0,5	-2,45	3,141593
65	5,17	1,134464014	0,422618262	2,184936	2,268928	-0,64279	-3,32321	3,403392
70	5,4	1,221730476	0,342020143	1,846909	2,443461	-0,76604	-4,13664	3,665191
75	5,58	1,308996939	0,258819045	1,44421	2,617994	-0,86603	-4,83242	3,926991
80	5,72	1,396263402	0,173648178	0,993268	2,792527	-0,93969	-5,37504	4,18879
85	5,8	1,483529864	0,087155743	0,505503	2,96706	-0,98481	-5,71188	4,45059
90	5,85	1,570796327	6,12574E-17	3,58E-16	3,141593	-1	-5,85	4,712389
95	5,85	1,658062789	-0,087155743	-0,50986	3,316126	-0,98481	-5,76113	4,974188
100	5,81	1,745329252	-0,173648178	-1,0089	3,490659	-0,93969	-5,45961	5,235988
105	5,73	1,832595715	-0,258819045	-1,48303	3,665191	-0,86603	-4,96233	5,497787
110	5,6	1,919862177	-0,342020143	-1,91531	3,839724	-0,76604	-4,28985	5,759587
115	5,42	2,00712864	-0,422618262	-2,29059	4,014257	-0,64279	-3,48391	6,021386
120	5,2	2,094395102	-0,5	-2,6	4,18879	-0,5	-2,6	6,283185
125	4,93	2,181661565	-0,573576436	-2,82773	4,363323	-0,34202	-1,68616	6,544985
130	4,63	2,268928028	-0,64278761	-2,97611	4,537856	-0,17365	-0,80399	6,806784
135	4,28	2,35619449	-0,707106781	-3,02642	4,712389	-1,8E-16	-7,9E-16	7,068583
140	3,92	2,443460953	-0,766044443	-3,00289	4,886922	0,173648	0,680701	7,330383
145	3,52	2,530727415	-0,819152044	-2,88342	5,061455	0,34202	1,203911	7,592182
150	3,09	2,617993878	-0,866025404	-2,67602	5,235988	0,5	1,545	7,853982
155	2,66	2,705260341	-0,906307787	-2,41078	5,410521	0,642788	1,709815	8,115781
160	2,2	2,792526803	-0,939692621	-2,06732	5,585054	0,766044	1,685298	8,37758
165	1,72	2,879793266	-0,965925826	-1,66139	5,759587	0,866025	1,489564	8,63938
170	1,23	2,967059728	-0,984807753	-1,21131	5,934119	0,939693	1,155822	8,901179
175	0,74	3,054326191	-0,996194698	-0,73718	6,108652	0,984808	0,728758	9,162979
180	0,248	3,141592654	-1	-0,248	6,283185	1	0,248	9,424778
185	-0,254	3,228859116	-0,996194698	0,253033	6,457718	0,984808	-0,25014	9,686577
190	-0,745	3,316125579	-0,984807753	0,733682	6,632251	0,939693	-0,70007	9,948377
195	-1,23	3,403392041	-0,965925826	1,188089	6,806784	0,866025	-1,06521	10,21018
200	-1,7	3,490658504	-0,939692621	1,597477	6,981317	0,766044	-1,30228	10,47198
205	-2,2	3,577924967	-0,906307787	1,993877	7,15585	0,642788	-1,41413	10,73377
210	-2,66	3,665191429	-0,866025404	2,303628	7,330383	0,5	-1,33	10,99557
215	-3,1	3,752457892	-0,819152044	2,539371	7,504916	0,34202	-1,06026	11,25737
220	-3,52	3,839724354	-0,766044443	2,696476	7,679449	0,173648	-0,61124	11,51917
225	-3,93	3,926990817	-0,707106781	2,77893	7,853982	3,06E-16	-1,2E-15	11,78097

230	-4,29	4,01425728	-0,64278761	2,757559	8,028515	-0,17365	0,744951	12,04277
235	-4,64	4,101523742	-0,573576436	2,661395	8,203047	-0,34202	1,586973	12,30457
240	-4,94	4,188790205	-0,5	2,47	8,37758	-0,5	2,47	12,56637
245	-5,21	4,276056667	-0,422618262	2,201841	8,552113	-0,64279	3,348923	12,82817
250	-5,43	4,36332313	-0,342020143	1,857169	8,726646	-0,76604	4,159621	13,08997
255	-5,62	4,450589593	-0,258819045	1,454563	8,901179	-0,86603	4,867063	13,35177
260	-5,74	4,537856055	-0,173648178	0,996741	9,075712	-0,93969	5,393836	13,61357
265	-5,82	4,625122518	-0,087155743	0,507246	9,250245	-0,98481	5,731581	13,87537
270	-5,86	4,71238898	-1,83772E-16	1,08E-15	9,424778	-1	5,86	14,13717
275	-5,87	4,799655443	0,087155743	-0,5116	9,599311	-0,98481	5,780822	14,39897
280	-5,83	4,886921906	0,173648178	-1,01237	9,773844	-0,93969	5,478408	14,66077
285	-5,75	4,974188368	0,258819045	-1,48821	9,948377	-0,86603	4,979646	14,92257
290	-5,63	5,061454831	0,342020143	-1,92557	10,12291	-0,76604	4,31283	15,18436
295	-5,45	5,148721293	0,422618262	-2,30327	10,29744	-0,64279	3,503192	15,44616
300	-5,24	5,235987756	0,5	-2,62	10,47198	-0,5	2,62	15,70796
305	-4,97	5,323254219	0,573576436	-2,85067	10,64651	-0,34202	1,69984	15,96976
310	-4,66	5,410520681	0,64278761	-2,99539	10,82104	-0,17365	0,809201	16,23156
315	-4,32	5,497787144	0,707106781	-3,0547	10,99557	-4,3E-16	1,85E-15	16,49336
320	-3,96	5,585053606	0,766044443	-3,03354	11,17011	0,173648	-0,68765	16,75516
325	-3,57	5,672320069	0,819152044	-2,92437	11,34464	0,34202	-1,22101	17,01696
330	-3,14	5,759586532	0,866025404	-2,71932	11,51917	0,5	-1,57	17,27876
335	-2,7	5,846852994	0,906307787	-2,44703	11,69371	0,642788	-1,73553	17,54056
340	-2,24	5,934119457	0,939692621	-2,10491	11,86824	0,766044	-1,71594	17,80236
345	-1,78	6,021385919	0,965925826	-1,71935	12,04277	0,866025	-1,54153	18,06416
350	-1,28	6,108652382	0,984807753	-1,26055	12,2173	0,939693	-1,20281	18,32596
355	-0,78	6,195918845	0,996194698	-0,77703	12,39184	0,984808	-0,76815	18,58776

cos3L	B1*cos3L	4*L	cos4L	B1*cos4L	5*L	cos5L	B1*cos5L
1	-0,287	0	1	-0,287	0	1	-0,287
0,965926	0,168071	0,349066	0,939693	0,163507	0,436332	0,906308	0,157698
0,866025	0,604486	0,698132	0,766044	0,534699	0,872665	0,642788	0,448666
0,707107	0,848528	1,047198	0,5	0,6	1,308997	0,258819	0,310583
0,5	0,84	1,396263	0,173648	0,291729	1,745329	-0,17365	-0,29173
0,258819	0,559049	1,745329	-0,17365	-0,37508	2,181662	-0,57358	-1,23893
6,13E-17	1,6E-16	2,094395	-0,5	-1,305	2,617994	-0,86603	-2,26033
-0,25882	-0,79457	2,443461	-0,76604	-2,35176	3,054326	-0,99619	-3,05832
-0,5	-1,74	2,792527	-0,93969	-3,27013	3,490659	-0,93969	-3,27013
-0,70711	-2,75065	3,141593	-1	-3,89	3,926991	-0,70711	-2,75065
-0,86603	-3,68927	3,490659	-0,93969	-4,00309	4,363323	-0,34202	-1,45701
-0,96593	-4,44326	3,839724	-0,76604	-3,5238	4,799655	0,087156	0,400916
-1	-4,9	4,18879	-0,5	-2,45	5,235988	0,5	2,45
-0,96593	-4,99384	4,537856	-0,17365	-0,89776	5,67232	0,819152	4,235016
-0,86603	-4,67654	4,886922	0,173648	0,9377	6,108652	0,984808	5,317962
-0,70711	-3,94566	5,235988	0,5	2,79	6,544985	0,965926	5,389866
-0,5	-2,86	5,585054	0,766044	4,381774	6,981317	0,766044	4,381774
-0,25882	-1,50115	5,934119	0,939693	5,450217	7,417649	0,422618	2,451186
-1,8E-16	-1,1E-15	6,283185	1	5,85	7,853982	3,06E-16	1,79E-15
0,258819	1,514091	6,632251	0,939693	5,497202	8,290314	-0,42262	-2,47232
0,5	2,905	6,981317	0,766044	4,450718	8,726646	-0,76604	-4,45072
0,707107	4,051722	7,330383	0,5	2,865	9,162979	-0,96593	-5,53475

0,866025	4,849742	7,679449	0,173648	0,97243	9,599311	-0,98481	-5,51492
0,965926	5,235318	8,028515	-0,17365	-0,94117	10,03564	-0,81915	-4,4398
1	5,2	8,37758	-0,5	-2,6	10,47198	-0,5	-2,6
0,965926	4,762014	8,726646	-0,76604	-3,7766	10,90831	-0,08716	-0,42968
0,866025	4,009698	9,075712	-0,93969	-4,35078	11,34464	0,34202	1,583553
0,707107	3,026417	9,424778	-1	-4,28	11,78097	0,707107	3,026417
0,5	1,96	9,773844	-0,93969	-3,6836	12,2173	0,939693	3,683595
0,258819	0,911043	10,12291	-0,76604	-2,69648	12,65364	0,996195	3,506605
3,06E-16	9,46E-16	10,47198	-0,5	-1,545	13,08997	0,866025	2,676018
-0,25882	-0,68846	10,82104	-0,17365	-0,4619	13,5263	0,573576	1,525713
-0,5	-1,1	11,17011	0,173648	0,382026	13,96263	0,173648	0,382026
-0,70711	-1,21622	11,51917	0,5	0,86	14,39897	-0,25882	-0,44517
-0,86603	-1,06521	11,86824	0,766044	0,942235	14,8353	-0,64279	-0,79063
-0,96593	-0,71479	12,2173	0,939693	0,695373	15,27163	-0,90631	-0,67067
-1	-0,248	12,56637	1	0,248	15,70796	-1	-0,248
-0,96593	0,245345	12,91544	0,939693	-0,23868	16,1443	-0,90631	0,230202
-0,86603	0,645189	13,2645	0,766044	-0,5707	16,58063	-0,64279	0,478877
-0,70711	0,869741	13,61357	0,5	-0,615	17,01696	-0,25882	0,318347
-0,5	0,85	13,96263	0,173648	-0,2952	17,45329	0,173648	-0,2952
-0,25882	0,569402	14,3117	-0,17365	0,382026	17,88962	0,573576	-1,26187
1,35E-15	-3,6E-15	14,66077	-0,5	1,33	18,32596	0,866025	-2,30363
0,258819	-0,80234	15,00983	-0,76604	2,374738	18,76229	0,996195	-3,0882
0,5	-1,76	15,3589	-0,93969	3,307718	19,19862	0,939693	-3,30772
0,707107	-2,77893	15,70796	-1	3,93	19,63495	0,707107	-2,77893
0,866025	-3,71525	16,05703	-0,93969	4,031281	20,07129	0,34202	-1,46727
0,965926	-4,4819	16,40609	-0,76604	3,554446	20,50762	-0,08716	0,404403
1	-4,94	16,75516	-0,5	2,47	20,94395	-0,5	2,47
0,965926	-5,03247	17,10423	-0,17365	0,904707	21,38028	-0,81915	4,267782
0,866025	-4,70252	17,45329	0,173648	-0,94291	21,81662	-0,98481	5,347506
0,707107	-3,97394	17,80236	0,5	-2,81	22,25295	-0,96593	5,428503
0,5	-2,87	18,15142	0,766044	-4,3971	22,68928	-0,76604	4,397095
0,258819	-1,50633	18,50049	0,939693	-5,46901	23,12561	-0,42262	2,459638
5,51E-16	-3,2E-15	18,84956	1	-5,86	23,56194	-2,7E-15	1,58E-14
-0,25882	1,519268	19,19862	0,939693	-5,516	23,99828	0,422618	-2,48077
-0,5	2,915	19,54769	0,766044	-4,46604	24,43461	0,766044	-4,46604
-0,70711	4,065864	19,89675	0,5	-2,875	24,87094	0,965926	-5,55407
-0,86603	4,875723	20,24582	0,173648	-0,97764	25,30727	0,984808	-5,54447
-0,96593	5,264296	20,59489	-0,17365	0,946383	25,74361	0,819152	-4,46438
-1	5,24	20,94395	-0,5	2,62	26,17994	0,5	-2,62
-0,96593	4,800651	21,29302	-0,76604	3,807241	26,61627	0,087156	-0,43316
-0,86603	4,035678	21,64208	-0,93969	4,378968	27,0526	-0,34202	1,593814
-0,70711	3,054701	21,99115	-1	4,32	27,48894	-0,70711	3,054701
-0,5	1,98	22,34021	-0,93969	3,721183	27,92527	-0,93969	3,721183
-0,25882	0,923984	22,68928	-0,76604	2,734779	28,3616	-0,99619	3,556415
-2,5E-15	7,69E-15	23,03835	-0,5	1,57	28,79793	-0,86603	2,71932
0,258819	-0,69881	23,38741	-0,17365	0,46885	29,23426	-0,57358	1,548656
0,5	-1,12	23,73648	0,173648	-0,38897	29,6706	-0,17365	0,388972
0,707107	-1,25865	24,08554	0,5	-0,89	30,10693	0,258819	-0,4607
0,866025	-1,10851	24,43461	0,766044	-0,98054	30,54326	0,642788	-0,82277
0,965926	-0,75342	24,78368	0,939693	-0,73296	30,97959	0,906308	-0,70692

Градусы	B1	Рadianы(L)	SIN(L)	B1*SINL	2*L	SIN2L	B1*SIN2L	3*L
0	-0,287	0	0	0	0	0	0	0
5	0,174	0,087266463	0,087156	0,015165	0,174533	0,173648	0,030215	0,261799
10	0,698	0,174532925	0,173648	0,121206	0,349066	0,34202	0,23873	0,523599
15	1,2	0,261799388	0,258819	0,310583	0,523599	0,5	0,6	0,785398
20	1,68	0,34906585	0,34202	0,574594	0,698132	0,642788	1,079883	1,047198
25	2,16	0,436332313	0,422618	0,912855	0,872665	0,766044	1,654656	1,308997
30	2,61	0,523598776	0,5	1,305	1,047198	0,866025	2,260326	1,570796
35	3,07	0,610865238	0,573576	1,76088	1,22173	0,939693	2,884856	1,832596
40	3,48	0,698131701	0,642788	2,236901	1,396263	0,984808	3,427131	2,094395
45	3,89	0,785398163	0,707107	2,750645	1,570796	1	3,89	2,356194
50	4,26	0,872664626	0,766044	3,263349	1,745329	0,984808	4,195281	2,617994
55	4,6	0,959931089	0,819152	3,768099	1,919862	0,939693	4,322586	2,879793
60	4,9	1,047197551	0,866025	4,243524	2,094395	0,866025	4,243524	3,141593
65	5,17	1,134464014	0,906308	4,685611	2,268928	0,766044	3,96045	3,403392
70	5,4	1,221730476	0,939693	5,07434	2,443461	0,642788	3,471053	3,665191
75	5,58	1,308996939	0,965926	5,389866	2,617994	0,5	2,79	3,926991
80	5,72	1,396263402	0,984808	5,6331	2,792527	0,34202	1,956355	4,18879
85	5,8	1,483529864	0,996195	5,777929	2,96706	0,173648	1,007159	4,45059
90	5,85	1,570796327	1	5,85	3,141593	1,23E-16	7,17E-16	4,712389
95	5,85	1,658062789	0,996195	5,827739	3,316126	-0,17365	-1,01584	4,974188
100	5,81	1,745329252	0,984808	5,721733	3,490659	-0,34202	-1,98714	5,235988
105	5,73	1,832595715	0,965926	5,534755	3,665191	-0,5	-2,865	5,497787
110	5,6	1,919862177	0,939693	5,262279	3,839724	-0,64279	-3,59961	5,759587
115	5,42	2,00712864	0,906308	4,912188	4,014257	-0,76604	-4,15196	6,021386
120	5,2	2,094395102	0,866025	4,503332	4,18879	-0,86603	-4,50333	6,283185
125	4,93	2,181661565	0,819152	4,03842	4,363323	-0,93969	-4,63268	6,544985
130	4,63	2,268928028	0,766044	3,546786	4,537856	-0,98481	-4,55966	6,806784
135	4,28	2,35619449	0,707107	3,026417	4,712389	-1	-4,28	7,068583
140	3,92	2,443460953	0,642788	2,519727	4,886922	-0,98481	-3,86045	7,330383
145	3,52	2,530727415	0,573576	2,018989	5,061455	-0,93969	-3,30772	7,592182
150	3,09	2,617993878	0,5	1,545	5,235988	-0,86603	-2,67602	7,853982
155	2,66	2,705260341	0,422618	1,124165	5,410521	-0,76604	-2,03768	8,115781
160	2,2	2,792526803	0,34202	0,752444	5,585054	-0,64279	-1,41413	8,37758
165	1,72	2,879793266	0,258819	0,445169	5,759587	-0,5	-0,86	8,63938
170	1,23	2,967059728	0,173648	0,213587	5,934119	-0,34202	-0,42068	8,901179
175	0,74	3,054326191	0,087156	0,064495	6,108652	-0,17365	-0,1285	9,162979
180	0,248	3,141592654	1,23E-16	3,04E-17	6,283185	-2,5E-16	-6,1E-17	9,424778
185	-0,254	3,228859116	-0,08716	0,022138	6,457718	0,173648	-0,04411	9,686577
190	-0,745	3,316125579	-0,17365	0,129368	6,632251	0,34202	-0,25481	9,948377
195	-1,23	3,403392041	-0,25882	0,318347	6,806784	0,5	-0,615	10,21018
200	-1,7	3,490658504	-0,34202	0,581434	6,981317	0,642788	-1,09274	10,47198
205	-2,2	3,577924967	-0,42262	0,92976	7,15585	0,766044	-1,6853	10,73377
210	-2,66	3,665191429	-0,5	1,33	7,330383	0,866025	-2,30363	10,99557
215	-3,1	3,752457892	-0,57358	1,778087	7,504916	0,939693	-2,91305	11,25737
220	-3,52	3,839724354	-0,64279	2,262612	7,679449	0,984808	-3,46652	11,51917
225	-3,93	3,926990817	-0,70711	2,77893	7,853982	1	-3,93	11,78097
230	-4,29	4,01425728	-0,76604	3,286331	8,028515	0,984808	-4,22483	12,04277
235	-4,64	4,101523742	-0,81915	3,800865	8,203047	0,939693	-4,36017	12,30457
240	-4,94	4,188790205	-0,86603	4,278165	8,37758	0,866025	-4,27817	12,56637
245	-5,21	4,276056667	-0,90631	4,721864	8,552113	0,766044	-3,99109	12,82817

250	-5,43	4,36332313	-0,93969	5,102531	8,726646	0,642788	-3,49034	13,08997
255	-5,62	4,450589593	-0,96593	5,428503	8,901179	0,5	-2,81	13,35177
260	-5,74	4,537856055	-0,98481	5,652797	9,075712	0,34202	-1,9632	13,61357
265	-5,82	4,625122518	-0,99619	5,797853	9,250245	0,173648	-1,01063	13,87537
270	-5,86	4,71238898	-1	5,86	9,424778	3,68E-16	-2,2E-15	14,13717
275	-5,87	4,799655443	-0,99619	5,847663	9,599311	-0,17365	1,019315	14,39897
280	-5,83	4,886921906	-0,98481	5,741429	9,773844	-0,34202	1,993977	14,66077
285	-5,75	4,974188368	-0,96593	5,554074	9,948377	-0,5	2,875	14,92257
290	-5,63	5,061454831	-0,93969	5,290469	10,12291	-0,64279	3,618894	15,18436
295	-5,45	5,148721293	-0,90631	4,939377	10,29744	-0,76604	4,174942	15,44616
300	-5,24	5,235987756	-0,86603	4,537973	10,47198	-0,86603	4,537973	15,70796
305	-4,97	5,323254219	-0,81915	4,071186	10,64651	-0,93969	4,670272	15,96976
310	-4,66	5,410520681	-0,76604	3,569767	10,82104	-0,98481	4,589204	16,23156
315	-4,32	5,497787144	-0,70711	3,054701	10,99557	-1	4,32	16,49336
320	-3,96	5,585053606	-0,64279	2,545439	11,17011	-0,98481	3,899839	16,75516
325	-3,57	5,672320069	-0,57358	2,047668	11,34464	-0,93969	3,354703	17,01696
330	-3,14	5,759586532	-0,5	1,57	11,51917	-0,86603	2,71932	17,27876
335	-2,7	5,846852994	-0,42262	1,141069	11,69371	-0,76604	2,06832	17,54056
340	-2,24	5,934119457	-0,34202	0,766125	11,86824	-0,64279	1,439844	17,80236
345	-1,78	6,021385919	-0,25882	0,460698	12,04277	-0,5	0,89	18,06416
350	-1,28	6,108652382	-0,17365	0,22227	12,2173	-0,34202	0,437786	18,32596
355	-0,78	6,195918845	-0,08716	0,067981	12,39184	-0,17365	0,135446	18,58776

ДОДАТОК Г Технічні характеристики блока акселерометрів

Град.	Радіани	f(B1)	51	0,89011792	4,339065334	102	1,78023584	5,785581583
0	0	-0,308094153	52	0,90757121	4,41042702	103	1,79768913	5,770397676
1	0,01745329	-0,213588399	53	0,9250245	4,480186525	104	1,81514242	5,753464229
2	0,03490659	-0,119014337	54	0,9424778	4,548310653	105	1,83259571	5,734763537
3	0,05235988	-0,024363193	55	0,95993109	4,614769084	106	1,85004901	5,714277842
4	0,06981317	0,070373447	56	0,97738438	4,679534427	107	1,8675023	5,691989545
5	0,08726646	0,165203393	57	0,99483767	4,742582238	108	1,88495559	5,667881412
6	0,10471976	0,2601336	58	1,01229097	4,803891033	109	1,90240888	5,641936797
7	0,12217305	0,355169938	59	1,02974426	4,863442265	110	1,91986218	5,614139856
8	0,13962634	0,450316957	60	1,04719755	4,9212203	111	1,93731547	5,584475765
9	0,15707963	0,545577671	61	1,06465084	4,977212355	112	1,95476876	5,552930929
10	0,17453293	0,640953347	62	1,08210414	5,031408426	113	1,97222205	5,519493202
11	0,19198622	0,736443313	63	1,09955743	5,083801203	114	1,98967535	5,484152081
12	0,20943951	0,832044775	64	1,11701072	5,134385954	115	2,00712864	5,446898908
13	0,2268928	0,927752655	65	1,13446401	5,183160405	116	2,02458193	5,40772706
14	0,2443461	1,023559439	66	1,15191731	5,230124599	117	2,04203522	5,36663212
15	0,26179939	1,119455052	67	1,1693706	5,27528074	118	2,05948852	5,323612045
16	0,27925268	1,215426743	68	1,18682389	5,318633031	119	2,07694181	5,278667318
17	0,29670597	1,311458999	69	1,20427718	5,360187489	120	2,0943951	5,231801084
18	0,31415927	1,40753347	70	1,22173048	5,399951764	121	2,11184839	5,183019266
19	0,33161256	1,503628922	71	1,23918377	5,437934939	122	2,12930169	5,132330673
20	0,34906585	1,599721211	72	1,25663706	5,474147329	123	2,14675498	5,079747085
21	0,36651914	1,695783275	73	1,27409035	5,508600273	124	2,16420827	5,025283313
22	0,38397244	1,791785146	74	1,29154365	5,541305924	125	2,18166156	4,968957253
23	0,40142573	1,887693995	75	1,30899694	5,572277037	126	2,19911486	4,910789906
24	0,41887902	1,983474183	76	1,32645023	5,601526758	127	2,21656815	4,850805386
25	0,43633231	2,079087342	77	1,34390352	5,629068413	128	2,23402144	4,789030906
26	0,45378561	2,174492475	78	1,36135682	5,654915305	129	2,25147474	4,725496743
27	0,4712389	2,269646073	79	1,37881011	5,679080511	130	2,26892803	4,660236175
28	0,48869219	2,364502254	80	1,3962634	5,701576691	131	2,28638132	4,593285415
29	0,50614548	2,459012914	81	1,41371669	5,722415906	132	2,30383461	4,524683505
30	0,52359878	2,553127902	82	1,43116999	5,741609437	133	2,32128791	4,454472204
31	0,54105207	2,646795202	83	1,44862328	5,759167632	134	2,3387412	4,382695853
32	0,55850536	2,739961135	84	1,46607657	5,775099749	135	2,35619449	4,309401221
33	0,57595865	2,83257057	85	1,48352986	5,789413826	136	2,37364778	4,234637338
34	0,59341195	2,924567145	86	1,50098316	5,802116558	137	2,39110108	4,158455309
35	0,61086524	3,015893502	87	1,51843645	5,813213197	138	2,40855437	4,080908111
36	0,62831853	3,106491521	88	1,53588974	5,822707464	139	2,42600766	4,002050388
37	0,64577182	3,196302567	89	1,55334303	5,830601477	140	2,44346095	3,92193822
38	0,66322512	3,285267739	90	1,57079633	5,83689571	141	2,46091425	3,840628892
39	0,68067841	3,373328116	91	1,58824962	5,841588954	142	2,47836754	3,758180652
40	0,6981317	3,46042501	92	1,60570291	5,844678307	143	2,49582083	3,674652463
41	0,71558499	3,546500214	93	1,6231562	5,846159186	144	2,51327412	3,590103744
42	0,73303829	3,631496245	94	1,6406095	5,846025347	145	2,53072742	3,50459412
43	0,75049158	3,715356586	95	1,65806279	5,844268935	146	2,54818071	3,418183159
44	0,76794487	3,798025915	96	1,67551608	5,840880548	147	2,565634	3,330930118
45	0,78539816	3,87945033	97	1,69296937	5,835849318	148	2,58308729	3,242893685
46	0,80285146	3,959577567	98	1,71042267	5,829163012	149	2,60054059	3,154131732
47	0,82030475	4,038357192	99	1,72787596	5,820808149	150	2,61799388	3,064701065
48	0,83775804	4,115740799	100	1,74532925	5,810770133	151	2,63544717	2,974657196
49	0,85521133	4,191682177	101	1,76278254	5,799033402	152	2,65290046	2,884054109

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <math.h>
#include <iomanip>
using namespace std;
int main()
{
    setlocale(LC_ALL, "rus"); // корректное отображение Кириллицы
    const int first_h = 72; // первоначальный шаг измерений:  $360/72 = 5$ 
    градусов от 0 до 355 (0 = 360)
    const int col_vo_izmereniy = 6;
    float chere_gradus = 5.0f; // начальные значения через сколько
    градусов
    ifstream Error_Table; // погрешности необходимо указывать в
    минутах от 0 до 60
    ifstream Znach_Datc;
    ofstream Koef_Table; // коэффициенты Фурье для стола
    ofstream Koef_Dat; // коэффициенты Фурье для датчика
    ofstream Znach_Sahg_Table; // теоретические значения стола через
    заданный шаг
    ofstream Znach_Sahg_Dat; // теоретические значения датчика через
    шаг
    ofstream Result_Teor; // теоретические значения угла, погрешность
    стола, датчик
    ofstream Znach_Sr_Ar_ET;
    ofstream Znach_Sr_MZ_dat;
```

```

float MError_Table[first_h][col_vo_izmereniy]; //массивы значений
КО-30
float Sr_Ar_ET[first_h]; //среднестатистические значения при
каждом угле
float MZnach_Datc[first_h][col_vo_izmereniy]; //значения датчиков
float Sr_MZ_dat[first_h]; //среднестатистические значения датчиков
float A_st[6]; //коэффициенты ряда Фурье для стола
float B_st[5];
float A_dat[6]; // коэффициенты ряда Фурье для датчика
float B_dat[5];
float N = 36;
float shag = 0.0f; // шаг теоритического разбиения
//Обнуление массива = 0.0f
    for (int i = 0; i < first_h; i++)
{
    for (int j = 0; j < col_vo_izmereniy; j++)
    {
        MError_Table[i][j] = 0.0f;
        MZnach_Datc[i][j] = 0.0f;
    }
}
//Обнуление массива = 0.0f
for (int i = 0; i < first_h; i++)
{
    Sr_MZ_dat[i]=Sr_Ar_ET[i] = 0.0f;
}
for (int i = 0; i < 6; i++)

```

```

    {
        A_st[i] = 0.0f;
        A_dat[i] = 0.0f;
    }
for (int i = 0; i < 5; i++)
{
    B_st[i] = 0.0f;
    B_dat[i] = 0.0f;
}
cout << "
#####
#####" << endl;

    cout << "      #                      #" <<
endl;

    cout << "      # Программа для обработки данных полученных при
испытаниях прецизионных инклинометрических систем. #" << endl;

    cout << "      #                      #" <<
endl;

    cout << "
#####
#####" << endl <<
endl;;

    cout << "1.Введите значения погрешностей стола в файл ->
Error_Table.txt, сохраните и закройте его." << endl;

    cout << "Нажмите Enter для продолжения."; getchar();
Error_Table.open("Error_Table.txt");
cout <<endl<< "Проверьте ваши данные:" << endl;
cout << "      ";
for (int i = 0; i < col_vo_izmereniy; i++)

```

```

    {
        cout << setw(10) << (i + 1);
    }
    cout << endl << "_____ " <<
endl;
    for (int i = 0; i < first_h; i++)
    {
        cout << setw(4) << i * chere_gradus << " -> ";
        for (int j = 0; j < col_vo_izmereniy; j++)
        {
            Error_Table >> MError_Table[i][j];
            cout << setw(9) << MError_Table[i][j] << " ";
        }
        cout << endl;
    }
    Error_Table.close();
    cout << endl << "Если данные введены правильно то нажмите Enter
для продолжения, иначе перезапустите программу."; getchar();
    cout << "Введите значения датчика в файл -> Znach_Datc.txt,
сохраните и закройте его." << endl;
    cout << "Нажмите Enter для продолжения."; getchar();
    Znach_Datc.open("Znach_Datc.txt");
    cout << endl << "Проверьте ваши данные:" << endl;
    cout << " ";
    for (int i = 0; i < col_vo_izmereniy; i++)
    {
        cout << setw(10) << (i + 1);

```

```

    }
    cout << endl << " _____ " <<
endl;
    for (int i = 0; i < first_h; i++)
    {
        cout << setw(4) << i * chere_gradus << " -> ";
        for (int j = 0; j < col_vo_izmereniy; j++)
        {
            Znach_Datc >> MZnach_Datc[i][j];
            cout << setw(9) << MZnach_Datc[i][j] << " ";
        }
        cout << endl;
    }
    Znach_Datc.close();
    cout<<endl << "Если данные введены правильно то нажмите Enter
для продолжения, иначе перезапустите программу."; getchar();
    cout << endl;
    cout << "Расчет среднестатистического значения стола:" << endl;
    Znach_Sr_Ar_ET.open("Znach_Sr_Ar_ET.txt");
    for (int i = 0; i < first_h; i++)
    {
        cout << setw(4) << i * chere_gradus << " -> ";

        for (int j = 0; j < col_vo_izmereniy; j++)
        {
            Sr_Ar_ET[i]+=(MError_Table[i][j]/col_vo_izmereniy);

```

```

    }
    cout << setw(9) << Sr_Ar_ET[i]<< endl;
    Znach_Sr_Ar_ET << Sr_Ar_ET[i];
    Znach_Sr_Ar_ET.close();
}

cout << endl;

cout << "Расчет среднестатистического значения датчика:" << endl;
Znach_Sr_MZ_dat.open("Znach_Sr_MZ_dat.txt");
for (int i = 0; i < first_h; i++)
{
    cout << setw(4) << i * chere_gradus << " -> ";
    for (int j = 0; j < col_vo_izmereniy; j++)
    {
        Sr_MZ_dat[i] += (MZnach_Datc[i][j] / col_vo_izmereniy);
    }
    cout << setw(9) << Sr_MZ_dat[i] << endl;
    Znach_Sr_MZ_dat << Sr_MZ_dat[i]<<endl;
}
cout << endl;
Znach_Sr_MZ_dat.close();

cout << endl << "Чтобы начать разложение в ряд Фурье
нажмите Enter."; getchar();

cout <<endl<< "Разложение в ряд Фурье до пятой гармоники:" <<
endl;//;по методу трапеций *(2/72) или *(1/36)

```

```

for (int i = 0; i < first_h; i++)
{
    A_st[0] += (Sr_Ar_ET[i] / N);
    A_st[1] += ((Sr_Ar_ET[i] * cosf(1 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    A_st[2] += ((Sr_Ar_ET[i] * cosf(2 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    A_st[3] += ((Sr_Ar_ET[i] * cosf(3 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    A_st[4] += ((Sr_Ar_ET[i] * cosf(4 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    A_st[5] += ((Sr_Ar_ET[i] * cosf(5 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    B_st[0] += ((Sr_Ar_ET[i] * sinf(1 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    B_st[1] += ((Sr_Ar_ET[i] * sinf(2 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    B_st[2] += ((Sr_Ar_ET[i] * sinf(3 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    B_st[3] += ((Sr_Ar_ET[i] * sinf(4 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    B_st[4] += ((Sr_Ar_ET[i] * sinf(5 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    //Daticik
    A_dat[0] += (Sr_MZ_dat[i] / N);
    A_dat[1] += ((Sr_MZ_dat[i] * cosf(1 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    A_dat[2] += ((Sr_MZ_dat[i] * cosf(2 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
    A_dat[3] += ((Sr_MZ_dat[i] * cosf(3 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180))) /
N);
}

```



```

    A_dat[4] += ((Sr_MZ_dat[i] * cosf(4 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180)))
/ N);
    A_dat[5] += ((Sr_MZ_dat[i] * cosf(5 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180)))
/ N);
    B_dat[0] += ((Sr_MZ_dat[i] * sinf(1 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180)))
/ N);
    B_dat[1] += ((Sr_MZ_dat[i] * sinf(2 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180)))
/ N);
    B_dat[2] += ((Sr_MZ_dat[i] * sinf(3 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180)))
/ N);
    B_dat[3] += ((Sr_MZ_dat[i] * sinf(4 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180)))
/ N);
    B_dat[4] += ((Sr_MZ_dat[i] * sinf(5 * ((chere_gradus * i*3.14f) / 180)))
/ N);
}

```

```

    cout << "Получены коэффиценты ряда Фурье для датчика:"
<<endl;

```

```

    cout << "A_0 = " << A_dat[0] << endl;

```

```

    cout << "A_1 = " << A_dat[1] << endl;

```

```

    cout << "A_2 = " << A_dat[2] << endl;

```

```

    cout << "A_3 = " << A_dat[3] << endl;

```

```

    cout << "A_4 = " << A_dat[4] << endl;

```

```

    cout << "A_5 = " << A_dat[5] << endl;

```

```

    cout << "B_1 = " << B_dat[0] << endl;

```

```

    cout << "B_2 = " << B_dat[1] << endl;

```

```

    cout << "B_3 = " << B_dat[2] << endl;

```

```

    cout << "B_4 = " << B_dat[3] << endl;

```

```

    cout << "B_5 = " << B_dat[4] << endl;

```

```

    cout << endl;

```

```
Koef_Dat.open("Koef_Dat.txt");
Koef_Dat.clear();
Koef_Dat << "A_0 = " << A_dat[0] << endl;
Koef_Dat << "A_1 = " << A_dat[1] << endl;
Koef_Dat << "A_2 = " << A_dat[2] << endl;
Koef_Dat << "A_3 = " << A_dat[3] << endl;
Koef_Dat << "A_4 = " << A_dat[4] << endl;
Koef_Dat << "A_5 = " << A_dat[5] << endl;
Koef_Dat << "B_1 = " << B_dat[0] << endl;
Koef_Dat << "B_2 = " << B_dat[1] << endl;
Koef_Dat << "B_3 = " << B_dat[2] << endl;
Koef_Dat << "B_4 = " << B_dat[3] << endl;
Koef_Dat << "B_5 = " << B_dat[4] << endl;
Koef_Dat.close();
cout << "Получены коэффициенты ряда Фурье для стола:" << endl;
cout << "A_0 = " << A_st[0] << endl;
cout << "A_1 = " << A_st[1] << endl;
cout << "A_2 = " << A_st[2] << endl;
cout << "A_3 = " << A_st[3] << endl;
cout << "A_4 = " << A_st[4] << endl;
cout << "A_5 = " << A_st[5] << endl;
cout << "B_1 = " << B_st[0] << endl;
cout << "B_2 = " << B_st[1] << endl;
cout << "B_3 = " << B_st[2] << endl;
cout << "B_4 = " << B_st[3] << endl;
cout << "B_5 = " << B_st[4] << endl;
```

```

cout << endl;
Koef_Table.open("Koef_Table.txt");
Koef_Table.clear();
Koef_Table << "A_0 = " << A_st[0] << endl;
Koef_Table << "A_1 = " << A_st[1] << endl;
Koef_Table << "A_2 = " << A_st[2] << endl;
Koef_Table << "A_3 = " << A_st[3] << endl;
Koef_Table << "A_4 = " << A_st[4] << endl;
Koef_Table << "A_5 = " << A_st[5] << endl;
Koef_Table << "B_1 = " << B_st[0] << endl;
Koef_Table << "B_2 = " << B_st[1] << endl;
Koef_Table << "B_3 = " << B_st[2] << endl;
Koef_Table << "B_4 = " << B_st[3] << endl;
Koef_Table << "B_5 = " << B_st[4] << endl;
Koef_Table.close();
cout << endl;
cout << "Чтобы получить теоритические значения при меньших
углах введите шаг разбиения:"; cin >> shag;
cout <<endl<< "Полученны следующие теоритические значения
датчика:" << endl;
Znach_Sahg_Table.open("Znach_Sahg_Table.txt");
Znach_Sahg_Table.clear();
Znach_Sahg_Table << "Шаг равен -> " << shag << endl;
Znach_Sahg_Dat.open("Znach_Sahg_Dat.txt");
Znach_Sahg_Dat.clear();
Znach_Sahg_Dat << "Шаг равен -> " << shag << endl;
Result_Teor.open("Result_Teor.txt");

```

```

Result_Teor.clear();

//для датчика

cout <<setw(10)<< "Угол поворота"<<setw(20)<<"Погрешность
стола" <<setw(20)<< "Показание датчика" << endl;

Result_Teor << setw(10) << "Угол поворота" << setw(20) <<
"Погрешность стола" << setw(20) << "Показание датчика" << endl;

for (float i = 0; i < 360.0f; i+= shag)
{

cout<<setw(10)<<i<<setw(20)<< ((A_st[0] / 2) + (A_st[1] *
cosf(1*((i*3.14f)/180))) + (B_st[0] * sinf(1 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[2] *
cosf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_st[1] * sinf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[3] *
cosf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_st[2] * sinf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[4] *
cosf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_st[3] * sinf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[5] *
cosf(5 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_st[4] * sinf(5 * ((i*3.14f) / 180)))));

cout <<setw(20) << ((A_dat[0] / 2) + (A_dat[1] * cosf(1 * ((i*3.14f) / 180))) +
(B_dat[0] * sinf(1 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[2] * cosf(2 * ((i*3.14f) / 180)))
+ (B_dat[1] * sinf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[3] * cosf(3 * ((i*3.14f) /
180))) + (B_dat[2] * sinf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[4] * cosf(4 * ((i*3.14f)
/ 180))) + (B_dat[3] * sinf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[5] * cosf(5 *
((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[4] * sinf(5 * ((i*3.14f) / 180)))) << endl;

Znach_Sahg_Table << ((A_st[0] / 2) + (A_st[1] * cosf(1 * ((i*3.14f) / 180))) +
(B_st[0] * sinf(1 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[2] * cosf(2 * ((i*3.14f) / 180))) +
(B_st[1] * sinf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[3] * cosf(3 * ((i*3.14f) / 180))) +
(B_st[2] * sinf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[4] * cosf(4 * ((i*3.14f) / 180))) +
(B_st[3] * sinf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[5] * cosf(5 * ((i*3.14f) / 180))) +
(B_st[4] * sinf(5 * ((i*3.14f) / 180))))<<endl;

Znach_Sahg_Dat << ((A_dat[0] / 2) + (A_dat[1] * cosf(1 * ((i*3.14f) / 180))) +
(B_dat[0] * sinf(1 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[2] * cosf(2 * ((i*3.14f) / 180)))
+ (B_dat[1] * sinf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[3] * cosf(3 * ((i*3.14f) /
180))) + (B_dat[2] * sinf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[4] * cosf(4 * ((i*3.14f)

```

```
/ 180))) + (B_dat[3] * sinf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[5] * cosf(5 *
((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[4] * sinf(5 * ((i*3.14f) / 180))))<<endl;
```

```
Result_Teor<< setw(10) << i << setw(20) << ((A_st[0] / 2) + (A_st[1] * cosf(1 *
((i*3.14f) / 180))) + (B_st[0] * sinf(1 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[2] * cosf(2 *
((i*3.14f) / 180))) + (B_st[1] * sinf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[3] * cosf(3 *
((i*3.14f) / 180))) + (B_st[2] * sinf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[4] * cosf(4 *
((i*3.14f) / 180))) + (B_st[3] * sinf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_st[5] * cosf(5 *
((i*3.14f) / 180))) + (B_st[4] * sinf(5 * ((i*3.14f) / 180))))<< setw(20) <<
((A_dat[0] / 2) + (A_dat[1] * cosf(1 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[0] * sinf(1 *
((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[2] * cosf(2 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[1] * sinf(2
* ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[3] * cosf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[2] *
sinf(3 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[4] * cosf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (B_dat[3]
* sinf(4 * ((i*3.14f) / 180))) + (A_dat[5] * cosf(5 * ((i*3.14f) / 180))) +
(B_dat[4] * sinf(5 * ((i*3.14f) / 180))))<<endl;
```

```
}
```

```
Znach_Sahg_Table.close();
```

```
Znach_Sahg_Dat.close();
```

```
Result_Teor.close();
```

```
cout << endl << "Для продолжения нажмите Enter."; getchar();
```

```
cout << setiosflags(ios::left) <<endl<< endl << "Справка по документах: " <<
endl;
```

```
cout << setw(30) << "Имя файла:" << setw(70)<<"Что находится в файле:"
<< endl;
```

```
cout <<
```

```
"
```

```
_____ " << endl;
```

```
cout << setw(30) << "Error_Table.txt" << setw(70) <<
"Первоначальные значения погрешности стола." << endl;
```

```
cout << setw(30) << "Znach_Datc.txt" << setw(70) <<
"Первоначальные значения датчика." << endl;
```

```
    cout << setw(30) << "Koeff_Dat.txt" << setw(70) << "Коэффициенты  
полученные при разложении в ряд Фурье для датчика." << endl;  
  
    cout << setw(30) << "Koeff_Table.txt" << setw(70) << "Коэффициенты  
полученные при разложении в ряд Фурье для стола." << endl;  
  
    cout << setw(30) << "Znach_Sahg_Table.txt" << setw(70) <<  
"Теоритические значения погрешности стола при заданном угле  
поворота." << endl;  
  
    cout << setw(30) << "Znach_Sahg_Dat.txt" << setw(70) <<  
"Теоритические значения датчика при заданном угле поворота." << endl;  
  
    cout << setw(30) << "Result_Teor.txt" << setw(70) << "Таблица  
теоритического расчета погрешности стола и значения датчика при  
заданном угле поворота." << endl;  
  
    cout << endl << "Для закрытия программы нажмите Enter.";  
    getchar();  
  
    return 0;  
  
}
```

Наукове видання

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
МОНІТОРИНГУ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ
ОБ'ЄКТІВ**

Пономарьов Сергій Михайлович

Пономарьова Олена Анатоліївна

Лукашук Ганна Олександрівна

Рижков Ігор Віктрорович

Колективна монографія

Комп'ютерна верстка авторів

Відповідальна за випуск к.т.н. О. А. Пономарьова

Підп. до друку 24.01.2023, відп. до рішення Вченої ради ПДАБА
(Протокол №7 від 24 січня 2023 року). Формат А5. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк офсетний. Ум. друк. арк. 10.45. Тираж 300 прим.

Віддруковано в ТОВ ВКФ "ВІЗІОН"

49107, м. Дніпро, вул. Катерини Мессарош, буд. 64

Код ЄДРПОУ 30832330