

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

бакалавра

на тему: **Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система
моніторингу несучих конструкцій висотних будівель**

Виконав: студент 4 курсу, групи МТ-4

Спеціальності: 152 «Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка»

Тужик В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: професор кафедри ІВТ,

д.е.н., к.т.н., професор

Єфіменко Н.А.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: _____

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Житомир – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій

д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу бакалавра

Студент _____ Тужик Владислав Віталійович

1. Тема роботи: Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система
моніторингу несучих конструкцій висотних будівель

Керівник роботи: професор кафедри ІВТ, д.е.н., к.т.н., професор

Єфіменко Н.А.

затверджена наказом по університету від « 04 » квітня 2025 р. № 131/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 10 » червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт контролю – комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система моніторингу несучих конструкцій висотних будівель, параметри вимірювання – прискорення, напруженість магнітного поля, кут нахилу; Діапазони вимірювання: прискорення $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16g$; напруженості магнітного поля $\pm 1.3-8$ Гаус; похибка вимірювання: прискорення LSB/g 2.048, напруженості магнітного поля 5 мілігаус.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)

огляд та аналіз питань моніторингу напружено-деформованого стану
конструктивних елементів, розробка структурної схеми, розробка принципової
схеми, розробка алгоритму та програми роботи системи, розрахунок
метрологічних характеристик, оцінка показників надійності роботи системи,
безпека життєдіяльності та охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень)
структурна схема, електрична принципова схема, перелік елементів,
блок-схема алгоритму роботи системи

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Узгодження технічного завдання	25.02.25 – 15.03.25	Виконано
2	Огляд та аналіз питань моніторингу напружено-деформованого стану	25.02.25 – 15.03.25	Виконано
3	Розробка структурної схеми	16.03.25 – 15.04.25	Виконано
4	Розробка електричної принципової схеми	16.04.25 – 24.04.25	Виконано
5	Розробка алгоритму та програми системи	25.04.25 – 09.05.25	Виконано
6	Розрахунок метрологічних характеристик	10.05.25 – 24.05.25	Виконано
7	Розрахунок показників надійності	25.05.25 – 03.06.25	Виконано
8.	Розгляд питань безпеки життєдіяльності та охорона праці	04.06.25 – 15.06.25	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	03.06.25 – 17.06.25	Виконано

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Тужик В.В.

(прізвище та ініціали)

Єфіменко Н.А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В даній кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему моніторингу несучих конструкцій висотних будівель. Система призначена для моніторингу несучих конструкцій висотних будівель. Розглянуто фактори, що впливають на напружено-деформований стан несучих конструкцій висотних будівель. Виконано аналіз існуючих систем моніторингу несучих конструкцій висотних будівель.

Розроблено структурну та електричну принципову схеми автоматизованої системи, вибрано сучасну елементну базу та приведено алгоритм роботи мікроконтролера. Проведено розрахунок метрологічних характеристик, показників надійності та розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: система моніторингу елементів конструкцій, автоматизована станція, контроль параметрів напружено-деформованого стану будівель та споруд, нахил будівлі.

ABSTRACT

In this qualification work, a computerized information and measuring system for monitoring the load-bearing structures of high-rise buildings is developed. The system is designed to monitor the load-bearing structures of high-rise buildings. Factors influencing the stress-strain state of load-bearing structures of high-rise buildings are considered. An analysis of existing systems for monitoring load-bearing structures of high-rise buildings is conducted.

The structural and electrical schematic diagram of the system has been developed, a modern element base has been selected, and the microcontroller's work algorithms have been presented. The calculation of metrological characteristics, reliability indicators and the problems of labor safety and safety technology were considered.

Key words: monitoring system for structural elements, automated station, monitoring of parameters of stress-strain state of buildings and structures, building tilt.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота представлена пояснювальною запискою в обсязі 67 сторінок формату А4, записка містить вступ, основну частину, що складає вісім розділів, висновки, список використаних джерел та додатків.

Темою роботи є розробка комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу несучих конструкцій висотних будівель.

Перший розділ містить основні завдання та вимоги до системи, а саме: умови експлуатації, технічні характеристики та показники надійності,

Другий розділ містить аналіз факторів, що впливають на напружено-деформований стан несучих конструкцій висотних будівель, напрямки контролю стану висотних будівель та споруд та огляд існуючих систем моніторингу несучих конструкцій висотних будівель.

У третьому розділі виконано розробку структурної схеми комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу несучих конструкцій висотних будівель.

У четвертому розділі виконано вибір елементної бази та розроблено електричну принципову схему системи.

У п'ятому розділі виконано моделювання напружено-деформованого стану конструктивних елементів будівель та споруд.

Шостий розділ містить огляд розробленого алгоритмічного та програмного забезпечення для комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу несучих конструкцій висотних будівель.

Сьомий розділ містить розрахунок основних метрологічних характеристик системи.

Восьмий розділ містить розрахунок показників надійності розробленої системи.

У дев'ятому розділі розглянуто питання безпеки життєдіяльності та охорони праці.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ	9
2. ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ БУДІВНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	10
2.1. Вплив якості конструкцій будівель та споруд у процесі будівництва та експлуатації на їх надійність	10
2.2. Напрямки контролю стану висотних будівель та споруд.....	10
2.3. Моніторинг напружено-деформованого стану конструктивних елементів	13
2.4. Система неперервного моніторингу несучих конструкцій будівель і споруд	14
2.5. Автоматизований моніторинг елементів несучого каркасу висотної будівлі з урахуванням температурного фактора.....	20
3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ	33
4. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ	34
5. МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД.....	44
5.1. Система контролю вигину балки	44
5.2 Система контролю деформацій балки	45
6. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ РОБОТИ СИСТЕМИ	48
7. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	52
7.1. Похибка каналу вимірювання деформації.....	52
7.2. Оцінка похибки МЕМС і методи її зменшення	54

					<i>МІМТ.480.015.035 – ПЗ</i>			
<i>Вим</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Комп'ютеризована інформаційно- вимірювальна система моніторингу несучих конструкцій висотних будівель Пояснювальна записка	<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Тужик В.В.</i>						
<i>Перевір.</i>		<i>Єфіменко Н.А.</i>					6	67
<i>Реценз.</i>						Державний університет «Житомирська політехніка», гр. МТ-4		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Єфіменко Н.А.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Подчаїнський Ю</i>						

8. ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ.....	60
9. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	62
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66
ДОДАТКИ.....	68

					МІМТ.480.015.035 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

В даній кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему моніторингу несучих конструкцій висотних будівель із застосуванням технології безплатформових інерційних навігаційних систем (БІНС) та датчиків деформацій, що включає алгоритм обробки та сигналізації при досягненні неприпустимих значень контрольованих параметрів.

Висотна будівля є унікальною спорудою і утворюється єдиною технічною системою в даному геологічному середовищі. Кожен об'єкт відповідає архітектурному та конструктивному особливості, що знаходяться в індивідуальних інженерно-геоморфологічних, тектонічних і геологічних умовах, характерних кліматах для територій, на яких він зводиться та проектується.

Вимога забезпечення безпеки конструкцій будівель у процесі використання та експлуатації потребує постійного контролю стану об'єкта. Тому висотні будівлі мають бути оснащені постійно діючою системою моніторингу напружено деформованого стану його конструкції.

Головною метою огляду є отримання всебічної інформації про повну характеристику системи моніторингу з потрібними параметрами вимірювання, відповідним обладнанням, що застосовується для вибору елементів виконання системи забезпечення контролю технічного стану будівель.

Автоматична система моніторингу контролює порушення геометрії, статичні та динамічні опади основ, напружено-деформаційний стан несучих конструкцій, частоту власних коливань споруд, вплив кліматичних впливів, температуру та вологість.

Для вимірювання динаміки розвитку напружено-деформованого стану у конструктивних елементах застосовуються акселерометри, тензометричні датчики, вібродатчики, нахилометри різних типів.

1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1. Підстава для розробки, призначення та галузь застосування

Підставою для розробки є завдання на дипломне проектування.

Система призначена для моніторингу стану несучих конструкцій висотних будівель.

Потрібно розробити структурну схему системи та вибрати елементну базу, розробити електричну принципову схему системи моніторингу несучих конструкцій висотних будівель. Розробити програмно-алгоритмічне забезпечення та оцінити точність системи вимірювання.

Початок розробки – лютий 2025 р. Кінець розробки – червень 2025 року.

1.2. Умови експлуатації

1.2.1. Температура зовнішнього середовища від 0 до +45 °С;

1.2.2. Відносна вологість не більше 80%4

1.2.3. Атмосферний тиск 600-800 мм. рт. ст.;

1.2.4. Хімічно активних речовин немає;

1.2.5. Характер роботи неперервний.

1.3. Вимоги до технічних характеристик

1.3.1. Об'єкт контролю – комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система моніторингу несучих конструкцій висотних будівель.

1.3.2. Діапазон вимірювання прискорення $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16g$;

1.3.3. Похибка вимірювання прискорення LSB/g 2.048;

1.3.4. Діапазон вимірювання магнітометра, $\pm 1.3-8$ Гаус;

1.3.5. Похибка вимірювання магнітометра, 5 мілігаус;

1.3.6. Тип виміру коливань конструкції: вертикальний по двом осям для датчиків CMS-1D-C и CSM-2D-R.

1.4. Вимоги до надійності

Система є що відновлюється, не резервується, ремонтпридатною. Наробіток на відмову складає не менше 45000 годин.

2. ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ БУДІВНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

2.1. Вплив якості конструкцій будівель та споруд у процесі будівництва та експлуатації на їх надійність

Останніми роками проблема часто озвучуються проблеми, що стосуються безпеки не лише експлуатованих, а й будівельних споруд та споруд, що знаходяться на етапі будівництва. Забезпечення надійності конструкцій елементів, що будуються, збереження і термін служби, скорочення витрат і способи відновлення не втрачають своєї актуальності. Фінансування цих робіт виправдане насамперед тому, що створення таких систем призводить до підвищення якості та безпеки будівель та споруд [1].

Причиною аварій найчастіше стає банальне недбале ставлення до об'єктів. Вважаючи, що будівля не впаде, власники об'єктів виділені кошти витрачають зовсім на інші потреби. Часто трапляється, що замість необхідного посилення будівлі починається, наприклад, будівництво додаткового поверху, що ще більше посилює положення. У той же час і посилення проводиться з порушенням запропонованих спеціалістами технологій та застосуванням неякісних матеріалів. Слід зазначити, що чимало аварій трапляється при неправильній експлуатації споруди, а також у процесі реконструкції чи демонтажу.

2.2. Напрямки контролю стану висотних будівель та споруд

Висотна будівля є унікальною спорудою і утворюється єдиною літо технічною системою в даному геологічному середовищі. Кожен об'єкт відповідає архітектурному та конструктивному особливості, що знаходяться в індивідуальних інженерно-геоморфологічних, тектонічних і геологічних умовах, характерних кліматах для територій, на яких він зводиться та проектується [1].

Вимога забезпечення безпеки конструкцій будівель у процесі використання та експлуатації потребує постійного контролю стану об'єкта. Тому висотні будівлі мають бути оснащені постійно діючою системою моніторингу напружено деформованого стану його конструкції.

Будівлі та споруди найбільш інтенсивно впливають на ґрунтові масиви. Тому дуже важливо при проектуванні будівель розраховувати величини статичних навантажень, тисків, ваг та інших видів різноманітних зовнішніх навантажень. Таким чином, контроль виміру стану будівлі пов'язаний з вивченням процесів у поверхні Землі як одного з найважливіших факторів стабільності конструкцій об'єктів.

В даний час для реалізації геотехнічного та будівельного моніторингу існує набір інструментів та багато методик для вимірювання стабільності конструкцій, процесу деформацій в експлуатації об'єкта.

Залежно від технічних параметрів споруди контроль можна здійснювати за одним із напрямків:

1. Визначення зміни напружено-деформованого конструкцій стану основних елементів будівель;
2. Визначення зміни просторових повних характеристик будівель (нахил, переміщення та положення основних елементів у просторі);
3. Вимірювання інформації стану ґрунтового масиву в околиці будівлі на підставі, що впливає на навколишню забудову;
4. Вимірювання вібрації (власні частоти коливань) будівель як частину характеристики стану конструкції.

Головною метою огляду є отримання всебічної інформації про повну характеристику системи моніторингу з потрібними параметрами вимірювання, відповідним обладнанням, що застосовується для вибору елементів виконання системи забезпечення контролю технічного стану будівель.

Автоматична система моніторингу контролює порушення геометрії,

статичні та динамічні опади основ, напружено-деформаційний стан несучих конструкцій, частоту власних коливань споруд, вплив кліматичних впливів, температуру та вологість. Технічні дані системи наведені в таблиці 3. Комплексні моніторингу застосовує одночасно багато датчиків і не має регулярного ринку для будівництва. Недоліком системи є велика маса та складність підключення.

Таблиця 2.1 Технічні характеристики АККЕ

Сенсори	
Роздільна здатність	0,001 градуса
Частота виміру	Макс. 1 Гц
Точність виміру	не гірше +/- 0,075 град. в діапазоні температур +/- 25 °C
Тип виміру коливань конструкції вертикальний	по двом осям для датчиків CMS-1D-C и CSM-2D-R
Робоча температура	40.....+65 °C
Контроль за напругою живлення	Для моделей CMS-1D-R та CSM-2D-R
Локальний температурний контроль	В будь-якій конфігурації
Термін служби	8 років
Базова станція	
Максимальне число датчиків	100 шт./станція
Локальна мережа	інтерфейси RS2323/485, GPRS
Напруга живлення	від мережі 90–265 VAC або UPS

Комплексний моніторинг застосовує багато датчиків і не регулярно має в ринку для будівництва. Недоліком системи є велика маса та складність підключення.

В даний час розроблені автоматизовані системи моніторингу з вимірюванням параметрів, які передаються до комп'ютера і дозволяють проводити контроль дистанційно з високою швидкістю та точністю.

2.3. Моніторинг напружено-деформованого стану конструктивних елементів

До напружено-деформованого стану конструкцій у будинках може бути привести безліч причин: вибір матеріалів низької якості, порушення порядку проведення будівельно-монтажних процесів, нерівномірні осади будівель, додаткові навантаження в процесі використання тощо.

Для вимірювання динаміки розвитку напружено-деформованого стану у конструктивних елементах застосовуються акселерометри, тензометричні датчики, вібродатчики, нахилометри різних типів.

Акселерометр застосовується для вимірювання проекцій прискорення, що здається. Чутливим елементом є маса, закріплена в пружному підвісі. Робота тензодатчика ґрунтується на простому принципі. При деформації конструкції (розтягування або стиснення) відразу змінює форму (базову довжину датчика) і електричний опір тензодатчика змінюється пропорційно деформації (напрузі). Для визначення вібро швидкості, вібро прискорення та вібро переміщення використовують вібродатчик, який є простим осцилятором. Такий датчик видає інформацію про параметри коливань (частоту та амплітуду) і навіть про спектральні характеристики коливального процесу.

Аналізатор напруг і структури феромагнітних матеріалів INTROSKAN здійснює контроль залишкових та прикладених напруг, поверхневої пластичної деформації, оцінює напруження у поверхневих шарах. Його технічні характеристики наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Основні технічні характеристики INTROSKAN

Режими роботи приладу	Стабілізація магнітного поля та магнітного потоку
Час виміру	0,1 ..10 с

Комплектація	Набір перетворювачів, аксесуари, програмне забезпечення, методики контролю та періодичної перевірки
Форма уявлення результатів	В абсолютних значеннях контрольованого параметра, у відносних одиницях
Вага приладу	5 кг
Габарити приладу, не більше	318x180x105 мм
Живлення	Від мережі 220 В / 50 Гц та від акумулятора 12 В (споживання не більше 30 Вт)

Згідно [8] ДДТ тензометричні датчики деформації вимірюють деформації елементів матеріалів при розтягувань/стискань. Технічні характеристики датчиків деформації показані у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Технічні характеристики датчиків деформації

Вимірювальна база деформації, мм	25; 50; 100
Відносна похибка вимірювань, % від вимірювальної величини	± 1
Рівень вихідного сигналу, В*	± 8
Напруга живлення, В	± 15

Таким чином, в майбутньому часі автоматизовані системи моніторингу будуть ефективно застосовуватися для спостереження вимірювань деформацій конструкцій і сигналізувати про небезпеку, що насувається.

2.4. Система неперервного моніторингу несучих конструкцій будівель і споруд

Щорічно зростаючі швидкість та обсяги будівництва об'єктів різного

призначення обумовлені економічним зростанням країн та розвитком промисловості. Архітектурний вигляд зазначених держав змінюється, з'являються нові об'єкти культури, охорони здоров'я та спорту, житлові квартали, промислові підприємства. Сучасні інженерні споруди являють собою складні технічні об'єкти, що включають як унікальні архітектурні новації, так і засоби контролю стану, що дозволяють прогнозувати зміну технічного стану. У період свого життєвого циклу компоненти будівельних систем піддаються різного роду впливам як плановим у вигляді експлуатаційних та природно-кліматичних навантажень, так і позаплановим з боку навколишнього середовища та зовнішньої інфраструктури, що може призводити до аварійних ситуацій, особливо характерних для споруд, які розташовуються в обмежених умовах великих міст (рис. 2.11).

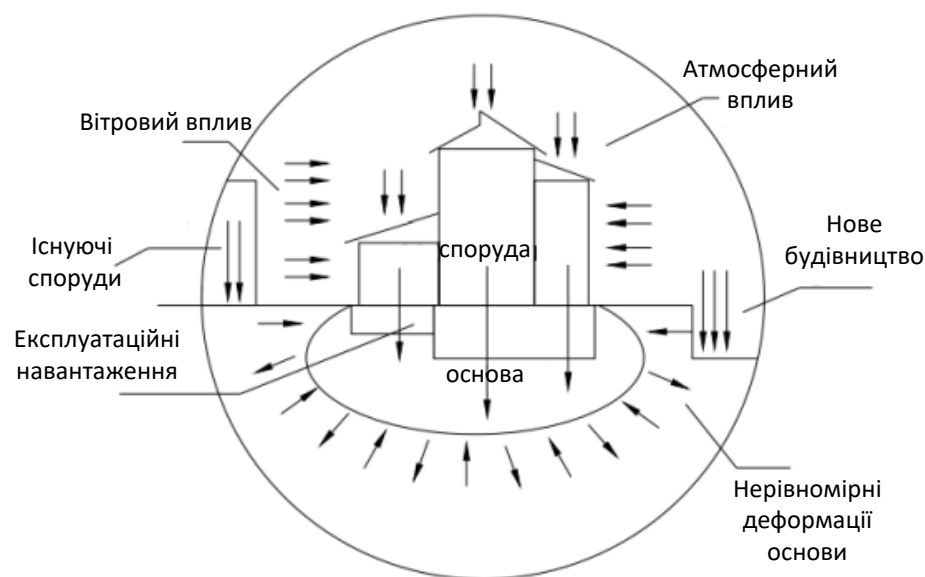


Рис. 2.1. Схема взаємодії споруди з довкіллям міста

Аналіз статистичних даних показує, що велика кількість надзвичайних ситуацій (НС), пов'язаних із руйнуванням будівель та споруд, відбувається через порушення роботи елементів основних несучих конструкцій. Руйнування будівель та споруд завдає значних економічних збитків і часто

супроводжується загибеллю людей. При цьому виявлення ознак аварійного стану елементів основних несучих конструкцій будівель та споруд шляхом візуального огляду досить важко [1]–[4].

Технічний стан будівель та споруд у загальному випадку є функцією працездатності окремих конструктивних елементів та зв'язків між ними. Проведений аналіз НС, пов'язаних із руйнуванням будівель та споруд, дозволив встановити основні причини їхнього руйнування. До цих причин належать: підвищені навантаження на несучі конструкції будівель та споруд, що перебувають в експлуатації тривалий період часу; вплив на конструкції природних та техногенних факторів, таких як перепади температур, вітрові та снігові навантаження, вібрації, аварії, пожежі, а також вибухи, наприклад, зумовлені терористичними актами; недотримання технології зведення будівель та споруд. Так, невідповідність вимогам проекту класів бетону та марок розчину, застосованих для замонолічування стиків та швів, не забезпечує рівномірного розподілу навантаження між елементами конструкцій будівлі, що призводить до втрати стійкості стін. Використання залізобетонних конструкцій з наскрізними тріщинами значно знижує здатність окремих конструктивних елементів, що в кінцевому рахунку веде до істотного збільшення ймовірності порушення цілісності будівлі або споруди [5], [6]. Найбільш поширеними помилками проектування будівель та споруд є неправильна оцінка гідрогеологічних умов ділянки будівництва та помилки при визначенні не існуючої здатності фундаменту.

Регулярно проведені трудомісткі обстеження, що вимагають значних витрат коштів, на сьогоднішній день є єдиним шляхом своєчасного виявлення порушень роботи несучих конструкцій будівель і споруд. При цьому ТКП 45-1.04-305–2016 вказує на те, що періодичне обстеження будівель, їх окремих зон та видів конструкцій з оцінкою їх технічного стану та уточненням режиму подальшої експлуатації необхідно проводити із залученням спеціалізованих організацій. Обсяги обстежень будівель і споруд

щорічно зростають, що є наслідком їх фізичного та морального зносу, переозброєння та реконструкції виробничих будівель промислових підприємств та об'єктів енергетики, реконструкції малоповерхової старої забудови.

Заміна трудомістких досліджень, які проводяться вручну, на моніторинг, що здійснюється в автоматичному режимі, дозволить суттєво зменшити витрати, пов'язані з підтриманням працездатності складних конструкцій будівель та споруд. В даний час існує потреба в надійних системах моніторингу технічного стану несучих конструкцій, які можуть в автоматичному режимі обробляти отримані дані, проводити оцінку технічного стану та сповіщати про необхідність втручання людини. Цікавим є використання подібних систем моніторингу технічного стану конструкцій при зведенні та експлуатації великих технічно складних будівель та споруд,

Системи моніторингу характеризуються дуже невеликим набором обладнання і складністю. Проте отримані результати підтвердили перспективність впровадження автоматизованої системи моніторингу напружено-деформаційного стану несучих конструкцій на спорудах з більшпролітними покриттями [8].

Системи як періодичного, так і безперервного моніторингу зараз активно розвиваються та впроваджуються на критично важливих об'єктах, що дозволяє зробити висновок про настання епохи застосування засобів автоматичного розпізнавання та прогнозування технічного стану будівель та споруд.

Для оцінки динаміки розвитку напруженого стану та деформаційних процесів у елементах будівельних конструкцій використовуються тензодатчики різних типів. Найбільшого поширення набули тензодатчики з резистивними елементами (тензорезисторами), основу роботи яких лежить здатність провідників змінювати свій опір при розтягуванні чи стисканні. При цьому для точної роботи системи моніторингу необхідне застосування

кількох тензодатчиків або тензодатчиків, що мають кілька тензорезисторних елементів, розташованих під певним кутом. Загальний вигляд робочих елементів системи безперервного моніторингу представлено рис. 2.2.

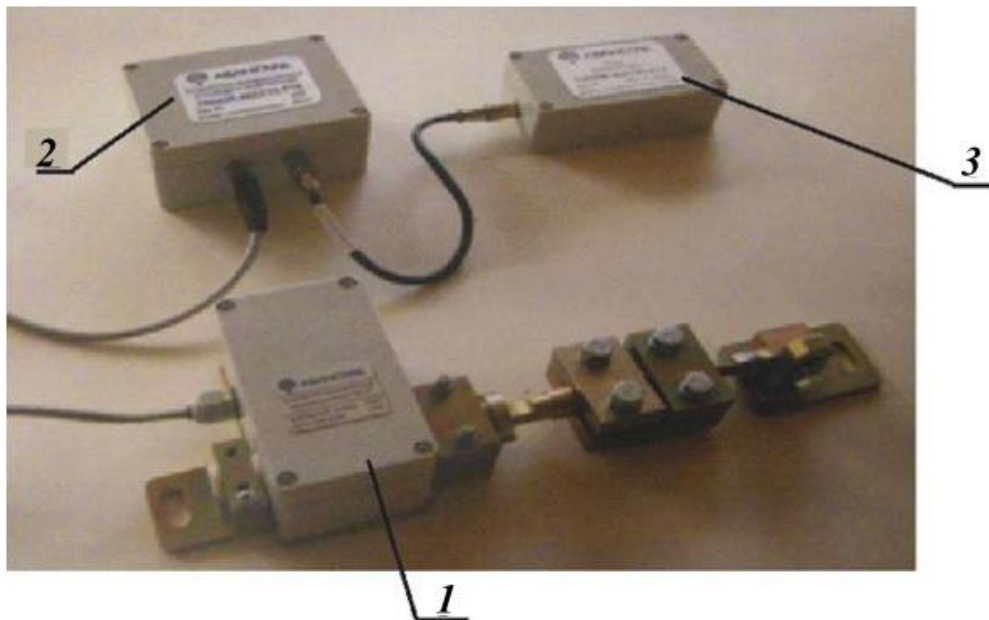


Рис. 2.2. Елементи системи безперервного моніторингу:

- 1 – вимірювальний пристрій на основі тензодатчиків;
- 2 – перетворюючий блок; 3 – блок передачі інформації

Розроблена система безперервного моніторингу (рис. 2.3), що дозволяє контролювати напружено-деформований стан елементів конструкції, має явну перевагу в порівнянні з використовуваним на сьогоднішній день обладнанням неруйнівних методів контролю [9], так як безперервний потік даних, отриманих з використанням великого числа датчиків, розміщених у різних точках. програмного забезпечення і зіставляється з допустимими технічними параметрами контролюваного об'єкта. Застосування систем безперервного моніторингу в будівлях та спорудах з масовим перебуванням людей, а також на небезпечних виробничих об'єктах дозволить отримувати необхідну точну інформацію про стан елементів несучих конструкцій об'єкта з моменту його будівництва, а також, що має особливо важливе значення – в

умовах ліквідації НС.

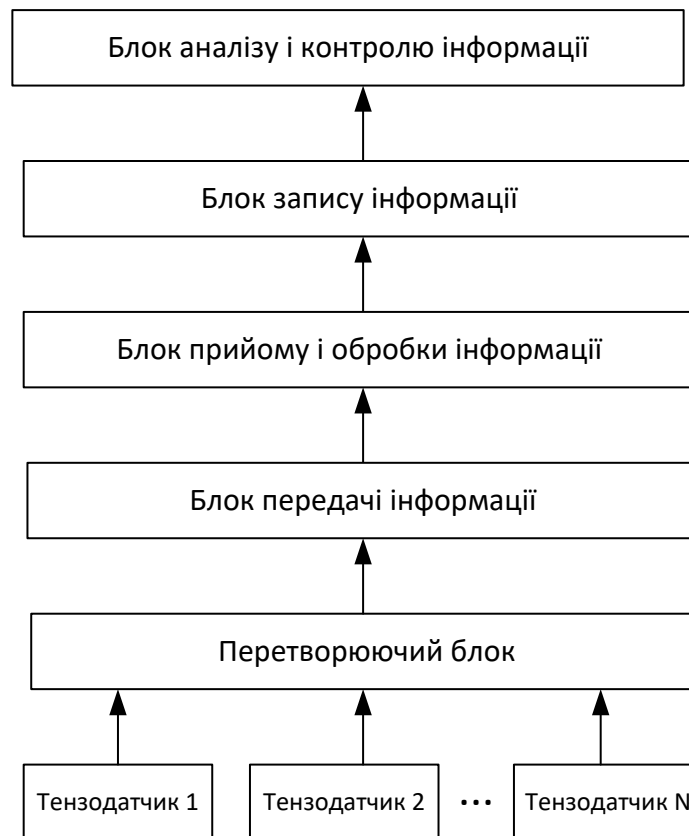


Рис. 2.3. Структура системи безперервного моніторингу

Система безперервного моніторингу дозволяє отримувати дані в автоматичному режимі про величину напруги, що виникають в елементах конструкцій, відстежувати зміну напруги в основних конструктивних елементах споруди протягом всього етапу її експлуатації, оцінювати роботу конструкції в цілому та ефективність застосування використаних матеріалів, а також відстежувати виникнення критичних та передаварійних станів.

Установка тензодатчиків системи моніторингу проводиться на основних конструктивних елементах будівель і споруд, руйнування або неприпустимі деформації яких ведуть до порушення стійкості або руйнування будівлі в цілому, а також на елементах, що забезпечують просторову жорсткість, незмінність і стійкість споруди. Сучасні технічні

рішення в галузі комунікаційного обладнання дозволяють здійснювати передачу даних по мережах, що не потребує додаткового обладнання каналів зв'язку.

Виконаний аналіз робіт [10-12] дозволив визначити перелік будівель та споруд, що підлягають обов'язковому обладнанню системами безперервного моніторингу. До цих об'єктів належать аеропорти, мости, тунелі, метрополітени, великі промислові підприємства, висотні будинки висотою понад 75 метрів та унікальні споруди з прольотами понад 100 метрів, об'єкти з масовим перебуванням людей, а також готелі місткістю понад 100 номерів.

Використання систем безперервного моніторингу на всіх стадіях процесу будівництва та експлуатації будівель та споруд різного призначення дозволить значно підвищити рівень забезпечення безпеки перебування у них людей. Використання даних систем є інструментом забезпечення безпеки та надійності в умовах сучасного будівництва. У майбутньому дані системи, отримавши розвиток, дозволять прогнозувати технічний стан усіх об'єктів сучасної інфраструктури.

2.5. Автоматизований моніторинг елементів несучого каркасу висотної будівлі з урахуванням температурного фактора

Використання у висотному будівництві бетонів високої міцності, схильних до крихкого руйнування, посилює небезпеку прогресуючого обвалення конструкцій [1], коли аж до катастрофічного розвитку цього процесу, явних зовнішніх ознак зниження несучої здатності конструкції може і не спостерігатися. конструкцій, що мають високу чутливість до параметрів деформації.

Практичне використання систем автоматизованого моніторингу стану несучих конструкцій висотних будівель є відносно новою темою у переліку

питань безпечної експлуатації будівельних споруд. Проте накопичений досвід експлуатації кількох таких систем на різних об'єктах протягом останніх 5 років дозволяє сформулювати деякі загальні для всіх систем ключові питання, які потребують вирішення як на стадії проектування та монтажу системи автоматизованого моніторингу, так і в період експлуатації.

Перше завдання, з яким стикається проектувальник системи автоматизованого моніторингу – скорочення переліку контрольованих параметрів, що значною мірою визначає її вартість. Забезпечувати кожен елемент силового каркасу будівлі всім переліком сенсорів не є доцільним не тільки через збільшення вартості системи, а й через інформаційну надмірність отриманого потоку даних. Показання більшої частини сенсорів або дублюватимуть один одного, або матимуть сильну взаємну кореляцію, зумовлену просторовою зв'язаністю елементів каркасу будівлі, що несе, при якій зміна геометрії або просторового положення одного елемента неминуче позначиться на стані інших.

Для відстеження деформації несучого каркаса найбільш поширеними типами сенсорів є: датчики лінійної деформації (стиснення-розтягування), датчики кутів нахилу елементів (інклінометри), датчики акустичної емісії, датчики вібрації (акселерометри), датчики вітрового навантаження (анемометри). Встановлення датчиків лінійної деформації, незалежно від фізичного принципу їх роботи, вимагає, як правило, досить протяжної бази, на якій проводиться реєстрація взаємного переміщення контрольних точок конструкції [2, 4], що може бути неприйнятним з архітектурних або естетичних міркувань. Сильна зв'язаність елементів залізобетонного монолітного каркасу будівлі в межах кожного поверху і, відповідно, – взаємна залежність деформації елементів дозволяє мінімізувати кількість контрольованих елементів каркасу. Для виявлення накопичувальних деформацій несучого каркаса в якості інформаційних параметрів можуть бути використані тільки кути нахилу декількох ключових конструкцій

каркасу, що вимірюються високочутливими сенсорами. Саме таким чином вирішується завдання моніторингу висотної будівлі «Сучасний багатофункціональний торгово-розважальний комплекс» (рис. 2.4).

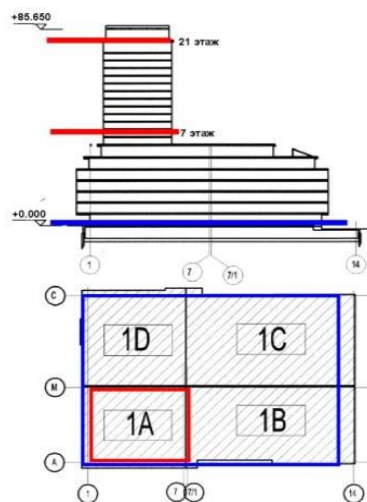


Рис. 2.4. Загальний план об'єкта та периметрів монтажу сенсорів.

Комплекс являє собою 21-поверхову будівлю, що складається з двох основних частин: шестиповерхової стилобатної частини (торгового центру) та 14-поверхового готелю. Верхня позначка будівлі: +85,650 м. Основу несучого каркаса об'єкта складають несучі монолітні колони, диски монолітних перекриттів та елементи поперечної жорсткості. Реєстрація деформаційних змін стану несучого каркаса здійснювалася датчиками кутових переміщень - інклінометрами, що забезпечують вимірювання кутів свого нахилу в двох ортогональних вертикальних площинах X і Y з похибкою, що не перевищує 10^{-3} кутового градуса.

Компактність конструкції використовуваної моделі інклінометрів разом із бездротовим інтерфейсом дозволяють легко їх встановлювати на елементах каркасу будівель, що знаходяться в експлуатації, а при необхідності – міняти місце встановлення.

Інше важливе питання, що виникає на початку експлуатації системи автоматизованого моніторингу - вибір алгоритму розпізнавання перед

аварійної ситуації об'єкта і формування так званого аларм - сигналу. Наразі чіткої однозначної регламентації цього питання немає. Вітчизняні нормативи дають лише загальні рекомендації для граничного кутового відхилення всієї будівлі в цілому. Для відстані від верху фундаменту до верху несучих конструкцій покриття h кутове відхилення не повинно перевищувати:

– $1/500$ при h до 150 м,

– $1/600$ для h до 200 м,

що становить у перерахунку кутові одиниці відповідно $0,114^\circ$ і $0,095^\circ$. Ці значення зазвичай закладаються в систему як граничні.

Найбільш інформативними показниками вичерпання несучої здатності елемента конструкції є напруги у ньому [2]. Фактично контролюються показники деформації, що створює певну проблему в розпізнаванні перед аварійної ситуації. Зміна кутів нахилу контрольованої конструкції може бути зумовлена різними факторами. Очевидно, що для одного і того ж збільшення кута нахилу збільшення внутрішньої напруги в конструкції можуть виявитися різними, в залежності від причин, що викликали деформацію. Зміна вектора навантаження не еквівалентна змінам пружно міцних властивостей матеріалу конструкції. А обидва ці фактори не можуть розглядатися як рівнозначні температурному розширенню-стиску залізобетону. Ця обставина має враховуватись алгоритмом розпізнавання перед аварійної ситуації об'єкта. У системі моніторингу температура конструкцій береться до уваги.

Як додатковий орієнтир для оцінки перед аварійного стану будівлі можна розглядати тенденцію у розвитку деформації елементів каркасу: швидкість (і прискорення) деформативних змін та, відповідно, прогнозний час досягнення деформацією граничних значень.

Не менш важливою є задача вибору ключових елементів, найбільш чутливих до ймовірних деформацій каркасу. Перспективу у розв'язанні

зазначеної задачі може відкрити технологія інформаційного моделювання будівель (*Building Information Modelling – BIM*). Розроблена на стадії проектування та доповнювана в процесі зведення та експлуатації тривимірна інформаційна модель будівлі, де для кожного елемента моделі закладаються відомості про його фактичні пружно - деформативні та параметри міцності, дозволить по зміні стану групи контрольованих елементів розрахувати стан інших. Відповідно, можна вирішувати і зворотне завдання – вибрати «ключові» елементи. Розробка комп'ютерної моделі повинна бути невід'ємною частиною проекту будівлі.

Таким чином, створення системи моніторингу включає рішення наступних задач:

- вибору ключових контрольованих елементів каркасу будівлі, що мають найбільшу чутливість до можливих видів деформації каркасу;
- вибору апаратної основи вимірювальної системи, насамперед – переліку використовуваних сенсорів;
- формування алгоритму оцінки деформації силового каркасу будівлі за даними вимірювань стану ключових елементів каркасу, і на його основі – розпізнавання *alarm*-ситуації, при якій потрібне прийняття оперативних рішень.

Технічні засоби системи моніторингу

Основними апаратними елементами системи збору інформації, що розглядається, є двоосьові сенсори-інклінометри і центральний базовий блок, зв'язок між якими організований за мережевим принципом. Передбачені засоби доступу до базового блоку виділеного каналу Internet. Контроль кутових відхилень колон несучого каркаса здійснюється сенсорами-інклінометрами, що мають бездротовий інтерфейс, встановленими на колонах підвального поверху стилобатної частини, на 7 та 21 поверхах висотної частини будівлі (відмітки +28,800 та +78,800). Додатково на покрівлі будівлі встановлені сенсор швидкості та напрямки вітру та сенсор-

акселерометр. Крім власне датчика кутових переміщень, кожен сенсор-інклінометр має у своєму складі датчик температури з роздільною здатністю 0,1 °С. Обробка сигналів сенсорів відбувається у режимі реального часу у центральному базовому блоку. Автономний режим базового блоку системи дозволяє отримувати інформацію від усіх сенсорів, виробляючи накопичення даних з різним дозволом часу. Зберігання даних моніторингу у базовому блоці проводиться протягом 20 років безперервного функціонування системи. У типовому налаштуванні базового блоку передбачена організація масиву накопичених даних з тимчасовим дозволом 1 добу, 1 година і 15 хв. Типове розташування сенсорів - інклінометрів - на кутових колонах каркаса будівлі, що несе (див. рис. 2.5). Програмно - схемотехнічне виконання інклінометрів та базового блоку дозволяє їх дистанційне конфігурування: встановлення параметрів чутливості сенсорів та їхнього початкового – нульового значення відліків, періоду опитування, параметрів конфігурування інформаційної мережі та ін.

Аналіз даних моніторингу

Методичну основу моніторингу несучих конструкцій будівлі становить реєстрація кутових відхилень сенсора від нормального (початкового) положення в режимі реального часу. Основними вхідними інформаційними параметрами системи моніторингу деформації несучого каркаса є кути нахилу ключових конструкцій каркаса – монолітних колон у двох ортогональних вертикальних площинах X і Y (рис. 2.5). Аналіз деформації каркаса базується на методиці, що базується на зіставленні коефіцієнтів взаємної кореляції кутів нахилу кутових колон. Конструктивна схема будівлі обумовлює сильну механічну зв'язаність елементів каркасу в межах кожного поверху і, відповідно, – взаємну залежність деформації елементів (див. рис. 2.4), яка проявлятиме себе значними величинами коефіцієнтів взаємної кореляції кутів нахилу контрольованих колон.

Деякі з найімовірніших деформаційних змін каркаса, що несе, представлені на рисунках 2.6 – 2.8. Для всіх наведених схем факт деформації каркаса може бути зареєстрований зі зміни кутів нахилу контрольованих колон, а конкретний вид деформації – за показниками кореляційних зв'язків кутів нахилу. Рис. 2.6 відображає зв'язок нахилу колон каркаса з прогином диска перекриття.

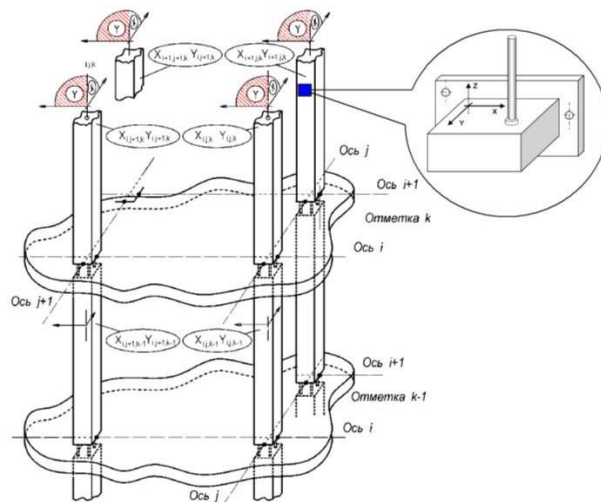


Рис. 2.5 Схема прив'язки індексів інклінометрів та кутів нахилу колон до осей будівлі.

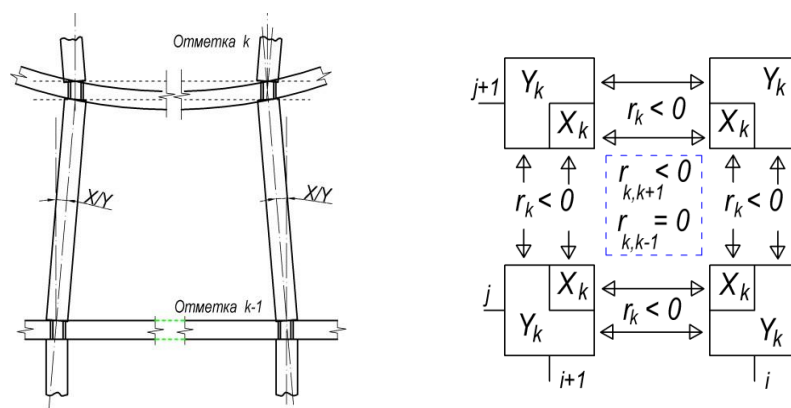


Рис. 2.6. Схеми деформації диска перекриття та колон несучого каркаса будівлі (ліворуч); співвідношення коефіцієнтів кореляції кутів нахилу колон (праворуч)

На рис. 2.7 показано деформацію горизонтального зсуву каркасу в межах одного поверху будівлі: змінюються кути нахилу колон одного поверху, колони, суміжні по висоті з контрольованими, зберігають своє кутове положення.

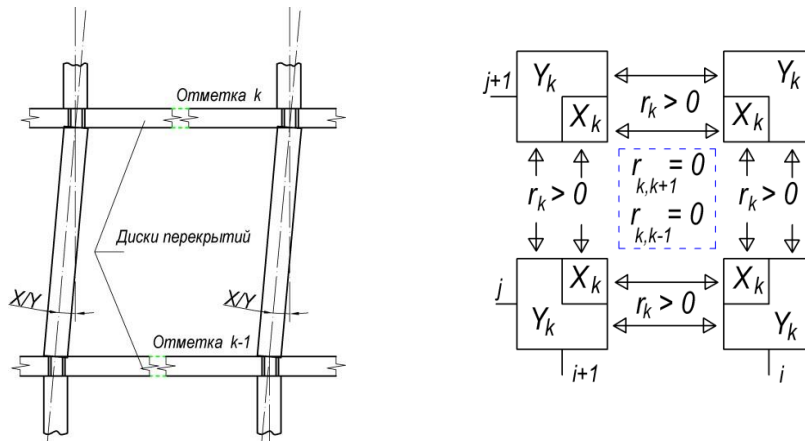


Рис. 2.7. Схеми деформації горизонтального зсуву диска перекрытия (ліворуч).

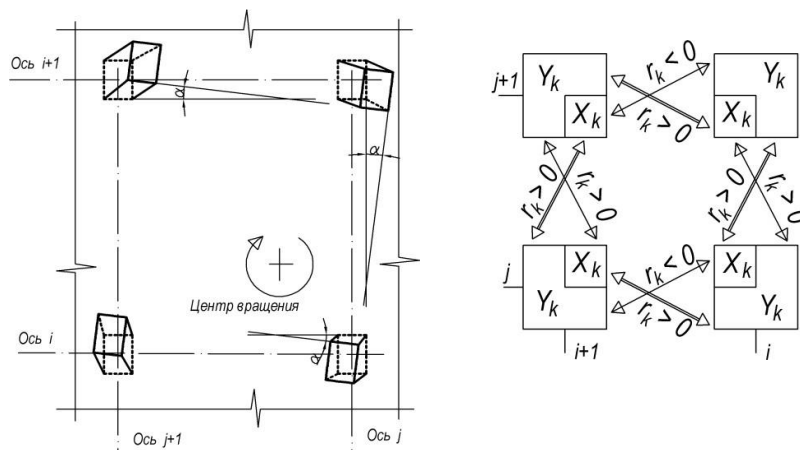


Рис. 2.8. Схема деформації кручення фрагмента каркаса будівлі, що несе.

Аналогічним чином можна скласти схему кореляційних зв'язків для випадків нахилу всього каркасу будівлі і більш складних видів деформації

каркаса, наприклад деформації кручення каркаса в горизонтальній площині (рис. 2.8).

Візуалізацію деформаційних змін каркасу будівлі зручно здійснювати за допомогою побудови годографів кутових переміщень колон у полярних координатах, прив'язаних до координатної сітки будівлі (рис. 2.9) Кутова координата (азимут) *ang* годографа розраховується за формулою:

$$ang = \arctg\left(\frac{X}{Y}\right), \quad (2.1)$$

де X , Y – значення кутової складової кожного сенсора у наведеній системі координат.

Розрахунок модулів *mod* кутів проводиться за формулою

$$mod = \sqrt{(X)^2 + (Y)^2} \quad (2.2)$$

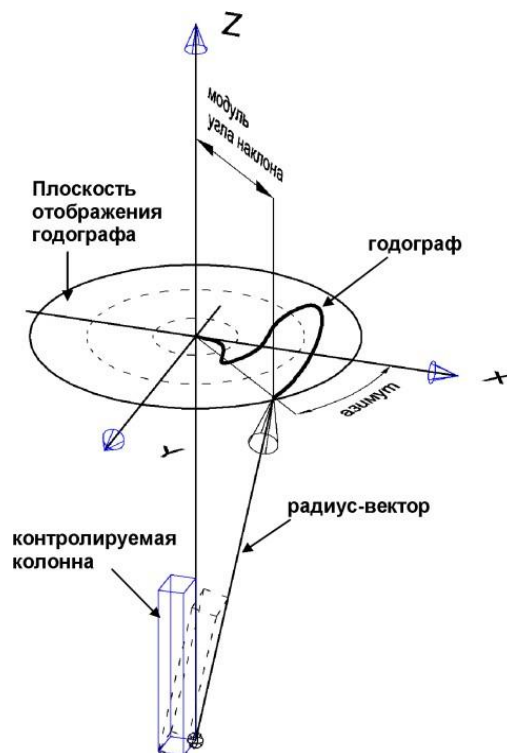


Рис. 2.9. Схема відображення даних кутових відхилень колон будівлі.

За період спостережень (19.08.2023 – 13.03.2023) середня величина модуля кутових переміщень колон поверхами становила 0,007...0,031 кутового градуса. На рис. 2.10 наведено годограф переміщень одного із сенсорів 21 поверху в площині осей X, Y.

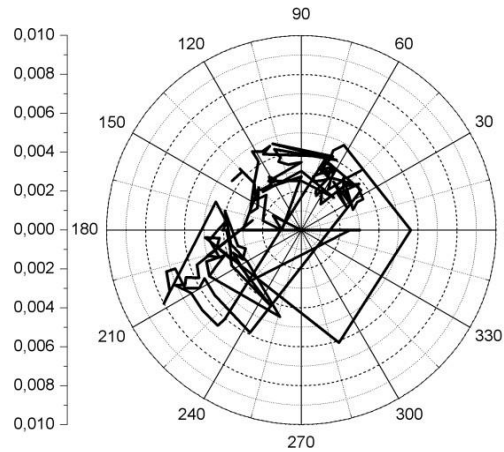


Рис. 7. Годограф нахилу колони 21 поверху будівлі за період 2022–2023 років.

Значної кореляції середніх значень кута нахилу колон по поверхах не виявлено, що опосередковано вказує на відсутність похилих переміщень всієї будівлі цілком.

Для уточнення спостерігається деформаційної картини виконано кореляційний аналіз сигналів сенсорів у межах окремих поверхів, а також оцінка кореляції усереднених кутів нахилу між поверхами, також визначено кореляцію кутових відхилень контрольованих елементів об'єкта з їх температурою. У таблиці наведено значення міжповерхових коефіцієнтів взаємної кореляції середніх значень модулів нахилу та середніх значень азимутів нахилу колон.

Таблиця 2.1 Коефіцієнти кореляції середніх по поверхах модулів векторів нахилу колон

Поверхи	Коефіцієнт кореляції <i>mod</i> годографів	Коефіцієнт кореляції азимутів годографів
21–7	0,71	0,06
21–підвал	0,86	–0,04
7–підвал	0,85	0,26

Дані таблиці свідчать про значну ($r = 0,7...0,86$) взаємну кореляцію середнього значення модулів кутів нахилу колон поверхів, що, мабуть, обумовлено загальною причиною варіації модулів кутів нахилу. У той же час, кореляція азимутальних кутів практично відсутня. Це опосередковано вказує на відсутність похилих переміщень всієї будівлі цілком. Годографи векторів деформації окремих колон (див. рис. 2.10) мають стохастичний характер і не виходять за межі характерної стійкої області, що також свідчить про відсутність накопичення деформацій внаслідок усадкових процесів в елементах конструкцій та фундаменті будівлі. Зіставлення параметрів кутових переміщень та температури колон дозволило виявити їх значну кореляцію. Сильна залежність кутів нахилу колон від температури призводить до того, що при різких коливаннях температури кут нахилу колони також різко змінюється. Швидке зростання кута нахилу, навіть у межах нижче встановлених максимальних допусків, може розцінюватися як стан, близький до передаварійного. Щоб уникнути помилкових спрацьовувань системи тривоги, слід враховувати температурний фактор. Розроблена автором методика компенсації температурного фактора базується на розрахунку та введенні температурної поправки для кожної з ортогональних складових кута нахилу колони.

Чутливість кутів нахилу X , Y колони до зміни температури t визначається коефіцієнтом регресії A_1 у відповідних рівняннях:

$$\begin{aligned} X &= A_{1,X} \cdot t + A_{0,X} \\ Y &= A_{1,Y} \cdot t + A_{0,Y} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Як показав аналіз даних моніторингу більш ніж дворічний період спостереження об'єкта, коефіцієнти регресії A_1 є постійними величинами. Найбільші їх зміни пов'язані з періодом монтажу технологічного обладнання, а також із сезонними запусками та відключеннями системи опалення та кондиціонування повітря. Крім того, спостерігався ефект, зумовлений температурною інерційністю будівельних конструкцій: максимального значення коефіцієнт кореляції кутів нахилу колон і температури досягався не для поточних значень температури, а для її значень, зареєстрованих приблизно 1...1,5 діб раніше. Критерієм визначення характеристичного часу затримки Δt було досягнення максимального значення коефіцієнта кореляції $r_{X,t}$

$$\begin{aligned} X_i^* &= X_i + A_{1,X}(t_0 - t_{i-1}) \\ Y_i^* &= Y_i + A_{1,Y}(t_0 - t_{i-1}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

де T_i – поточний час реєстрації кута нахилу.

Врахування теплової інерції конструкцій будівлі дозволило дещо підвищити точність визначення температурної поправки. Характеристичний час затримки деформаційної реакції від моменту температурного перепаду склало для сенсорів системи близько 20..28 годин. Уточнені значення кутів нахилу X^* та Y^* розраховувалися за формулами

$$\begin{aligned} X_i^* &= X_i + A_{1,X}(t_0 - t_{i-1}) \\ Y_i^* &= Y_i + A_{1,Y}(t_0 - t_{i-1}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

де t_0 – наведене значення температури (приймали $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$); t – поточне значення температури; i – поточна дата спостереження.

Результати спостережень показали ефективність інклінометрів як чутливу вимірювальну основу автоматизованої системи моніторингу деформації несучого каркасу будівельних об'єктів. Дані моніторингу підтверджують статистичну обґрунтованість значень чутливості сенсорів інклінометрів лише на рівні 0,001 кутового градуса.

Як методична основа обробки даних системи пропонується кореляційний аналіз прирощень кутів нахилу ключових конструкцій.

Виявлено сильний вплив на показники деформації каркасу будівлі варіації температури. Кутові відхилення колон за рахунок температурного фактора мають оборотний характер. Значний вплив на величини температурних складових деформації має режим роботи системи кондиціонування - опалення будівлі.

За період спостереження будівлі температурний фактор визначав 30...80 % всього діапазону варіації кутів нахилу контрольованих колон. У зв'язку з цим особливе значення набуває питання про ступінь адекватності похилих переміщень, зумовлених варіацією температури, та фактичних напружень у конструкціях. Вирішення цього питання бачиться у використанні комп'ютерних моделей каркасу будівлі. Для калібрування моделі та її адаптації до реальних величин, що реєструються, деформації каркасу та окремих його елементів слід оснащувати окремі групи сенсорів-інклінометрів сенсорами лінійної деформації, а також використовувати дані прямих геодезичних вимірювань, особливо на початковій стадії експлуатації системи.

Варіація температурної чутливості (коефіцієнтів регресії) кутів нахилу контрольованих колон становила 0...0,002 кут. град/ $^{\circ}\text{C}$. Зв'язок температурної чутливості до температури не виявлено.

3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ

Ідея створення та застосування безперервного моніторингу конструкцій до будівельних споруд та споруд привнесена з реальних вимог людської діяльності. Останнім часом ідея створення системи моніторингу технічного стану будівельних споруд із метою підвищення експлуатаційної надійності знайшла втілення у низці масштабних проєктів.

При створенні автоматичної системи моніторингу необхідно контролювати нахил, вібрації та напружено деформований стан конструкцій споруди. Результати вимірювань повинні передаватися на станцію (комп'ютер), аналізуватись, протоколюватись, зберігатись у пам'яті, відтворюватись на екрані монітора комп'ютера, відображатись у реальному масштабі часу. У разі виникнення нахилів і деформацій, що наближаються до небезпечних значень, система повинна включати систему оповіщення, звукову, світлову та передавати ці сигнали до служб, що несуть відповідальність за безпеку.

Структурна схема станції моніторингу наведена на рис. 3.1.

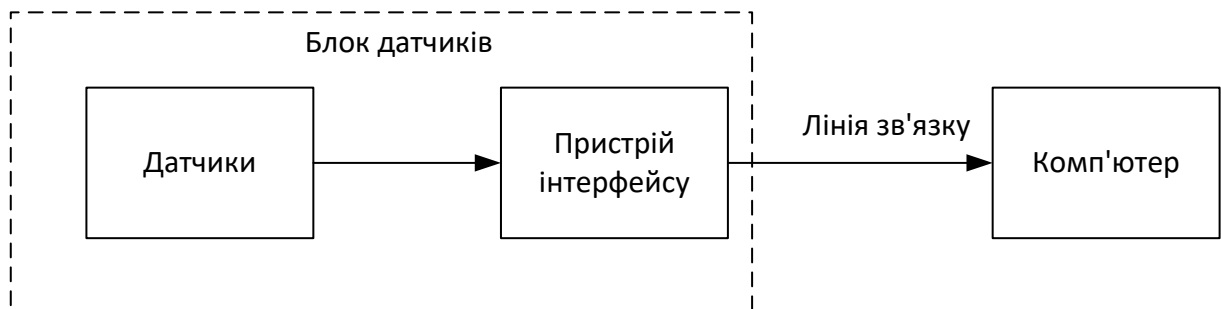


Рис. 3.1. Структурна схема станції моніторингу

4. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

4.1. Вибір датчик прискорення

Для контролю технічного просторового стану будівель застосовується акселерометр [9], що вимірює проекції прискорення і представляє собою масу, підвішену на пружному підвісі (рис. 4.1).

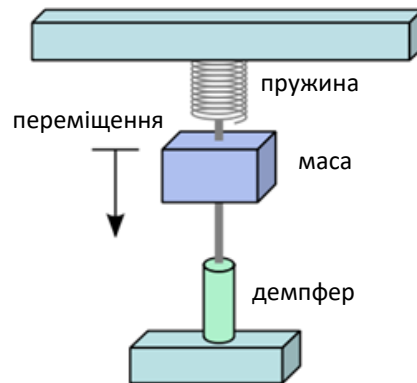


Рис. 4.1 Схема найпростішого акселерометра

Крім акселерометра можна застосувати гіроскоп, який вимірює кутову швидкість обертання. Він знадобиться для вирішення задачі навігації чи визначення кута нахилу.

Для контролю температурного середовища (рідина, газ, тверда поверхня) застосовують датчик температури. Можна виділити основні типи: кремнієві датчики температури, рідинні і газові термометри, термистори, термометри опору, біметалічні датчики, термоіндикатори, термопари, інфрачервоні датчики температури. В даний час для вирішення багатьох завдань стали застосовувати мікроелектромеханічні системи (MEMS). В одному корпусі інтегруються акселерометр, гіроскоп та температурний датчик. MEMS є пристроєм мікросистемою техніки, що виконується за технологією об'ємної мікромеханіки і сформований шляхом локального витравлення підкладки, легування, нанесення на неї матеріалу і т.п. буд. Часто виготовляються з кремнію з малим

розміром (від 1 мікрона до декількох міліметрів), залежно від сфери застосування, потужності, наявності вбудованої схеми кількості елементів та обробки.

Використання МЕМС є основні переваги: висока функціональність, мініатюрність, надійність, можливість інтеграції електроніки з оптичними, механічними та іншими вузлами, мале енергоспоживання, в межах однієї партії виробів малий розкид параметрів, низька вартість, висока повторюваність та технологічність.

Вибираємо модуль GY-521[8], що використовується для вимірювання прискорення об'єкта, яке воно набуває при зміщенні відносно свого нульового положення, також для визначення розташування у просторі та для вимірювання температури навколишнього середовища.

Практичне застосування модуля GY-521 – вимірювання вібрації, руху, ударів, кутів крену, кутів повороту. Гіроскоп акселерометр GY-521 може використовуватися в авіамоделях на мікроконтролерах.

Модуль GY-521 створений на мікросхемі MPU6050, що складається з 3-осьового гіроскопа та акселерометра на три координати та температурного датчика. На платі модуля GY-521 розміщені електричні елементи (резистори, конденсатор, стабілізатор напруги тощо). Обмін даними управління здійснюється по шині ІІС (I2C).

Відповідно до [11] акселерометр використовує окремі маси кожної осі. Прискорення вздовж певної осі викликає відповідне зсув маси, і ємнісні датчики виявляють це зміщення. Коли пристрій поміщається на плоску поверхню, вона вимірюватиме $0g$ на осі X і Y і $1g$ на осі. Шкала акселерометра відкалібрована на заводі-виробнику і є номінально незалежною від напруги живлення. Повний діапазон шкали цифрового виходу можна регулювати в межах $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, або $\pm 16g$.

MPU-6050 модуль має три осі гіроскопа та три осі прискорення. MPU-6050 побудований з використанням трьох незалежних вібраційних гіроскопів

МЕМС, які виявляють обертання навколо осей X, Y і Z. Коли гіроскопи повертаються навколо будь-якої осі, ефект Коріоліса викликає вібрацію, яка виявляється за допомогою ємнісних датчик.

Крім того, додаткові функції включають вбудований температурний датчик, що визначає зміну факту температури. Корпус MPU-6050 наведено на рис. 4.2.

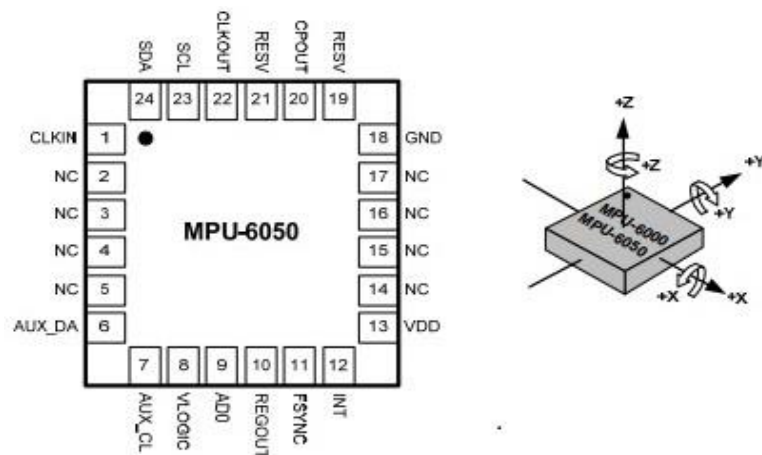


Рис. 4.2 Мікросхеми MPU-6050

На модулі GY-521 закладено чіп MPU-6050 представлений на рис. 4.3.

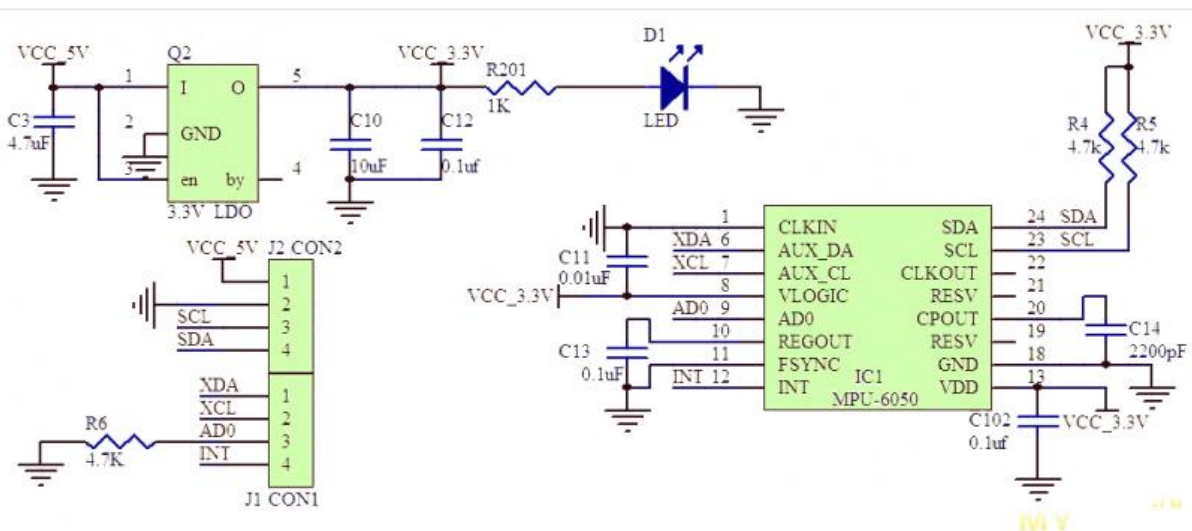


Рис. 4.3 Принципова схема модуля GY-521 на базі мікросхеми MPU-6050

Технічні характеристики модуля GY-521 показані у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Технічні характеристики модуля GY-521

Мікросхема	MPU-6050
Напруга живлення модуля	від 3,3V до 5V (DC)
Струм споживання гіроскопу	3,6 mA, у режимі очікування 5 μ A
Струм споживання акселерометра	350 μ A, в режимі очікування: 10 μ A для 1,25 Hz, 20 μ A для 5 Hz, 60 μ A для 20 Hz, 110 μ A для 40 Hz
Формат даних	кути Ейлера, кватерніони, матриця повороту або необроблені дані
Діапазон акселерометра:	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16g$
Діапазон гіроскопа:	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ градусів за секунду
Осі	X,Y,Z
Розрядність АЦП	16біт
Розрядність введення даних:	16біт
Розрядність виведення даних:	16біт
Резонансна частота:	27 kHz
Частота зрізу	1000 Hz
Нелінійність	% 0.2
Зв'язок з контролером	ІІС (I2C)
Максимальна частота інтерфейсу I2C	400 kHz
Чутливість	LSB/g 2.048
Чутливість	°/сек./LSB 0.06097
Шум:	0,005 °/сек.
Розміри модуля	15x20 мм
Вага модуля	5 грам
Відстань між контактами:	2,54 мм

Отвори під гвинт:	3 мм
-------------------	------

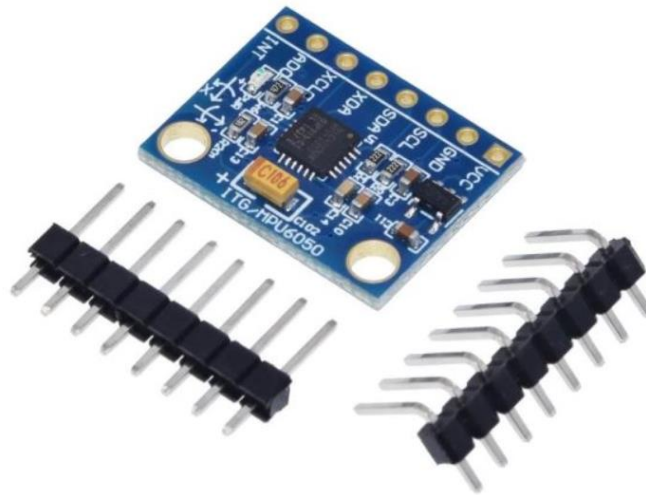


Рис. 4.4 Зовнішній вигляд модуля GY-521

Для роботи з модулем серед Arduino IDE використовується бібліотека WIRE. Також є бібліотека I2Cdevlib для доступу до MPU-6050.

Вибрано модуль GY-271 на мікросхемі HMC5883L[15].

Принципова схема роботи показана на рис. 4.5.

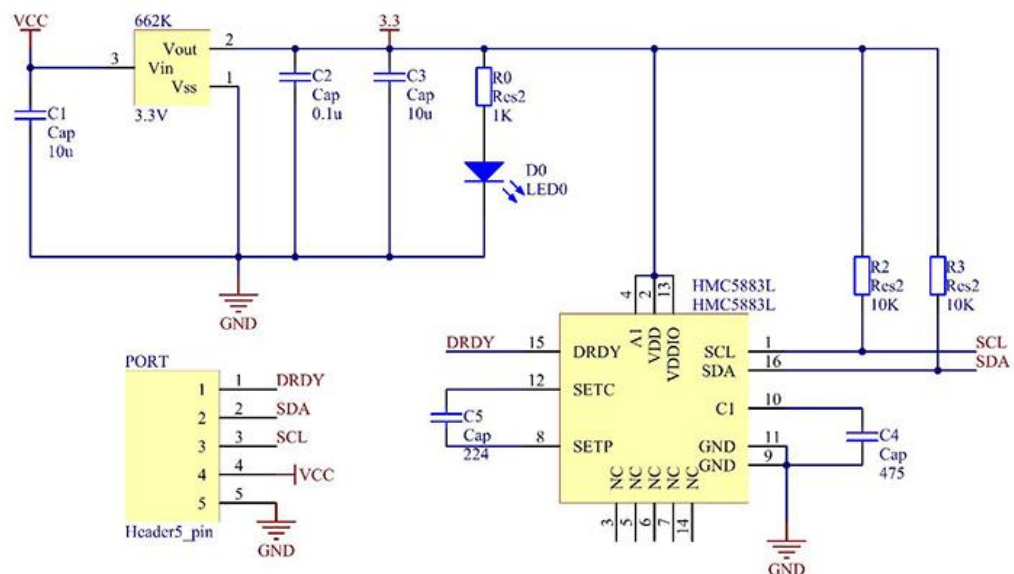


Рис. 4.5 Принципова схема модуля GY-271 на мікросхемі HMC5883L

Технічні характеристики модуля GY-521 показані у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Технічні характеристики модуля GY-271

Мікросхема	HMC5883L
Напруга живлення	от 3V до 5V (DC)
Струм	2,5 мА
Кількість осей магніторезистивного сенсора	3
Інтенсивність магнітного поля	+/-8 Гаусса
Точність	1~2 град
Частота оновлення даних	160 Гц
Інтерфейс	I2C



Рис. 4.3. Модуль GY-271

Модуль GY-271 на мікросхемі HMC5883L - це трьохосьовий цифровий магніторезистивний компас (магнітометр на три координати). Використовується в системах позиціонування, туристичному устаткуванні і особливо потрібний в авіамоделях, мультикоптерах.

На платі модуля GY-271 розміщені необхідні для надійного функціонування підтягуючі резистори а так само dc/dc перетворювач, що дозволяє живити модуль від 5В . В цілому модуль може працювати з контролерами з 5В рівнем сигналів по шині I2C. Як сенсори використовується три магніторезистивні датчики. Алгоритми збирають інформацію з магнітометрів і інших датчиків через шину I2C без участі системного процесора.

Для використання його як звичайного компаса для орієнтації на місцевості, потрібна строга фіксація плати по горизонталі, бо будь-який нахил призводитиме до включення в роботу 3-й осі, яка забиратиме на себе частину горизонтальних складових магнітного поля Землі.

Основні характеристики:

- Напруга живлення: 3.3-5 В
- Інтерфейс: I2C
- Чутливість датчика: 5 мілігаус.
- Діапазон виміру: $\pm 1.3-8$ Гаус
- Габарити: 15x15x4 мм
- Роздільна здатність: 12 біт (2мГ)

Модуль магнітометра GY-271 (QMC5883L) – компактний і потужний трьохосовий цифровий компас, що дозволяє визначати напрямок магнітного поля Землі по осях X, Y та Z. Цей мініатюрний сенсор ідеально підходить для створення електронних компасів, навігаційних систем, роботів та інших проектів, де необхідно визначити орієнтацію в просторі. Модуль використовує чіп QMC5883L, який забезпечує достатню точність вимірювань для більшості аматорських та освітніх проектів. Завдяки простому I2C інтерфейсу, модуль легко інтегрується з платформами Arduino, Raspberry Pi, ESP32 та іншими мікроконтролерами, що робить його універсальним рішенням для широкого спектру електронних розробок.

Технічні переваги:

- **Трьохосьове вимірювання** – сенсор вимірює напруженість магнітного поля одночасно по осях X, Y та Z, що дозволяє точно визначати напрямок у тривимірному просторі незалежно від орієнтації пристрою
- **I2C інтерфейс зв'язку** – простий і надійний двопровідний інтерфейс дозволяє швидко підключити модуль до будь-якого мікроконтролера та отримувати дані за стандартним протоколом, що спрощує інтеграцію та зменшує кількість необхідних виводів
- **Компактні розміри** – невеликі габарити модуля дозволяють встановлювати його навіть у мініатюрні проєкти, де критичні розміри та вага кінцевого пристрою
- **Широкий діапазон живлення** – модуль працює від напруги 3.3-5В, що забезпечує сумісність з різними типами мікроконтролерів без необхідності використання додаткових перетворювачів рівнів сигналів
- **Підтримка бібліотек** – доступні спеціалізовані бібліотеки для Arduino та інших платформ (наприклад, DFRobot_QMC5883), що значно спрощують розробку та калібрування компаса на базі даного модуля

Широкі можливості застосування:

- **Створення електронного компаса** – підключіть модуль GY-271 до Arduino разом з OLED дисплеєм і отримайте повноцінний цифровий компас, що показує напрямок магнітної півночі. Завдяки можливості калібрування можна досягти точності, достатньої для орієнтування на місцевості та навігаційних завдань початкового рівня.
- **Розробка автономних роботів** – встановіть модуль на мобільного робота для надання йому можливості визначати своє положення відносно сторін світу. Це дозволить роботу підтримувати заданий напрямок руху або автоматично повертатися до початкової точки маршруту за допомогою простих алгоритмів навігації.

- **Системи стабілізації камер** – у поєднанні з гіроскопом та акселерометром, магнітометр GY-271 може бути частиною системи визначення орієнтації для стабілізаторів камер, дронів та інших рухомих платформ, що потребують точної інформації про просторове положення та напрямок.

- **Метеорологічні станції** – інтеграція модуля в домашні метеостанції дозволяє додатково відображати напрямок вітру та інші параметри, пов'язані з орієнтацією в просторі, що значно розширює функціональність таких пристроїв.

- **Освітні проекти з електроніки** – модуль ідеально підходить для навчальних проектів, демонструючи принципи роботи магнітометрів, систем навігації та дозволяючи на практиці вивчати електромагнітні явища та їх використання в електроніці.

Arduino Uno R3

Для підключення датчиків та комп'ютера використовується пристрій інтерфейсу і в даній роботі використовується програмований контролер ArduinoUno R3 (рис. 4.4) [11].



Рис. 4.4 Програмований контролер ArduinoUno R3

Для обробки та передачі сигналу застосовано персональний комп'ютер

(ПК можна вибрати LenovoG510 IntelCorei7 [18] або будь-який комп'ютер).

Для вирішення поставленої задачі використовуються виходи акселерометра 1 (VCC, GND, SCL і SDA), які підключені до входу пристрою Arduino 2 (VCC, GND, A4 і A5) і магнітометра 3 (VCC, GND, SCL і SDA), які підключені до входу пристрою Arduino 2 (VCC, VCC, ACL, SCL, SCL). підключено до комп'ютера 4 за допомогою кабелю (рис. 4.5).

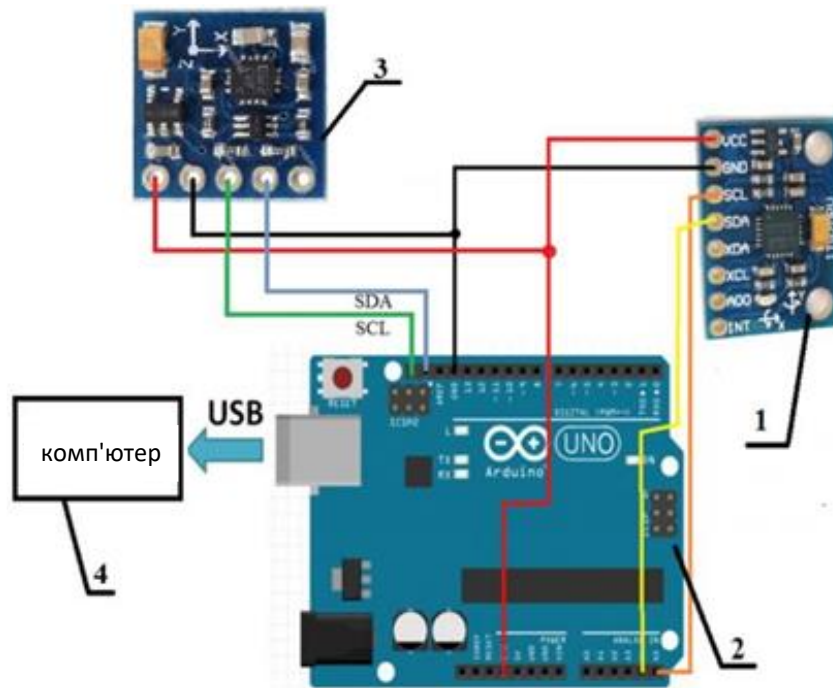


Рис. 4.5 Схеми підключення модуля GY-521 і GY-271 до контролера Arduino Uno R3:

1 – модуль GY-521; 2 – Arduino Uno R3; 3 – магнітометр GY-271 і 4 - комп'ютер

5. МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

5.1. Система контролю вигину балки

Для створення макета застосований датчик вигину 2.2" . При деформації конструкції, на яку наклеєний датчик вигину, виникає зміна опору датчика і, відповідно вихідної напруги. Датчик вигину 2.2" застосовується для вимірювання зміщення об'єкта, в робототехніці, в іграх (Virtual Motion), медичному обладнанні.

Значення опору датчика вигину 2.2" змінюється в конкретному діапазоні в залежності від рівня вигину (деформації) елементів конструкції. Схема включення датчика вигину в систему вимірювання наведена на рис. 5.1).

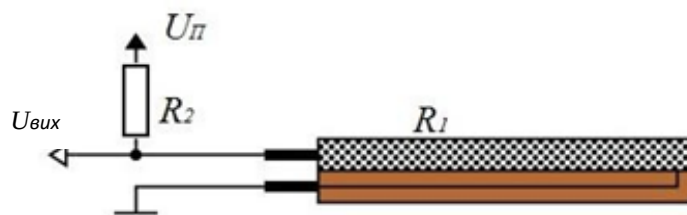


Рис. 5.1 Схема включення датчика

Принципову схему макетного зразка системи контролю деформацій показано на рис. 5.2.

Датчик вигину наклеюється на контрольований елемент конструкції. Один висновок датчика згину підключений до живлення 5 В, через резистор 2 з'єднаний з землею, а другий вихід датчика на платі Arduino. Вихід датчика підключений до входу плати A0 Arduino 3, який здає сигнал ноутбук 4. Комп'ютер обробляє програму LabVIEW.

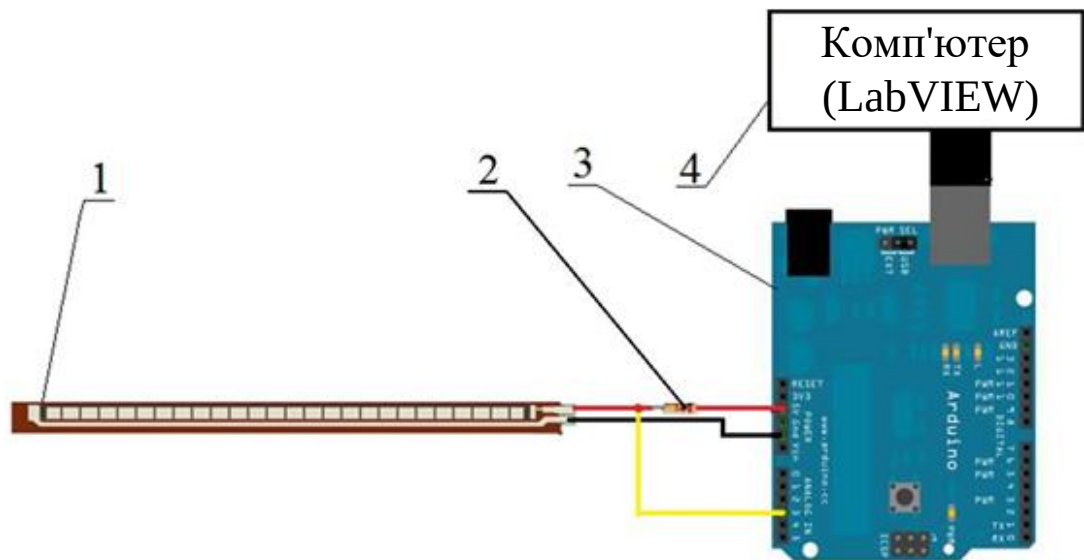


Рис. 5.2 Принципова схема системи контролю деформацій:
1 – датчик вигину; 2 – резистор; 3 – Arduino Uno R3; 4 – комп'ютер

5.2. Система контролю деформацій балки

Для контролю деформацій на поверхні конструкцій елементів (балка) застосовується тензометричний перетворювач. Принцип роботи датчика заснований на явищі тензоефекту, що змінює опір провідника відповідно до вимірювання геометричних розмірів. Кожен датчик має коефіцієнт тензочутливості, що визначає відношення відносної зміни опору відносної зміни довжини провідника тензодатчика.

У цій роботі використовується тензорезистор ФКПА-1-100 (фалові з базою 100 мм) . Метою є контроль балки, яка виготовлена з металу (сталь).

Технічна характеристика тензорезисторного чутливого елемента показана у таблиці 5.1 [12].

На тонкий папір або плівку 1 наклеюється тензочутливий дріт діаметром близько 0,025 мм. До кінців дроту приєднуються вивідні провідники 3. Зверху наносять шар лаку 4, будучи прикріпленим до тензодеталі 5, сприймає деформації її поверхневого шару. Такий фольговий шар є травленою фольгою товщиною 0,005-0,025 мм із

висновками 7 (рис. 5.3).

Таблиця 5.1 Технічна характеристика тензорезистор ФКПА-1-100

Модель	Тип	Відносна деформація $\Delta l/l$ в %	Тензо- чутливість S	Робочий струм I, мА	Розміри, мм	
					Довжина	Ширина
ФКПА	Фольго- вий	0,2	3	30	11	5

Принципова схема системи контролю деформацій спостерігається рис. 5.4.

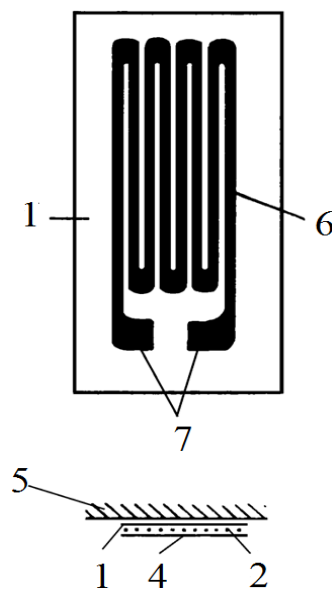


Рис. 5.3 Фольговий тензорезистор

Тензодатчик 1 наклеюється на поверхні балки 2, яка защемлена на будівництві 3. Один висновок тензодатчика підключений до живлення 5В, а другий вихід тензодатчика, через резистор 4 з'єднаний з «землею» на платі Arduino 5. Вихід датчика підключений до входу плати А6 Ardu. Комп'ютер обробляє програму LabVIEW.

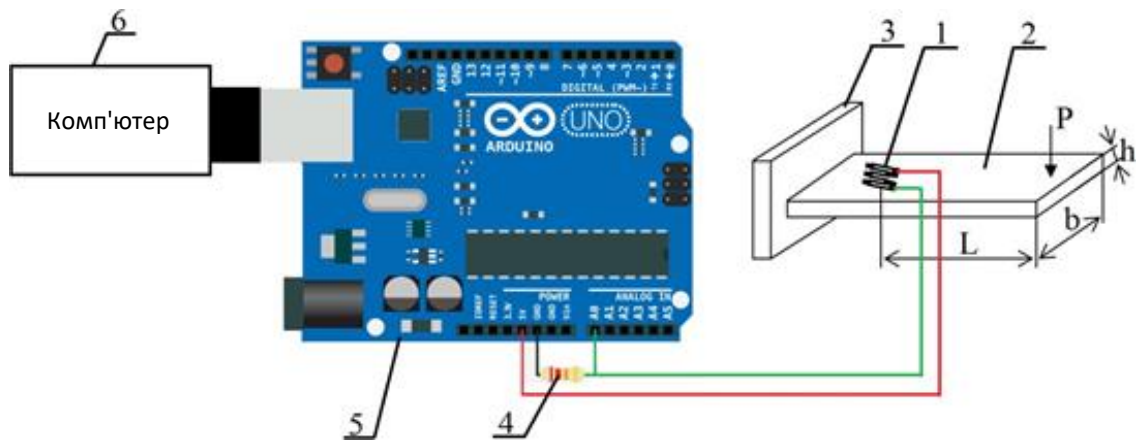


Рис. 5.4 Принципова схема системи контролю деформацій:

1 – тензодатчик; 2 – балка; 3 – налаштування; 4 – резистор; 5 – Arduino Uno R3; 6 – комп'ютер

6. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ РОБОТИ СИСТЕМИ

Схема включення датчика вигину до системи вимірювання наведена на (рис. 5.1). Вихідна напруга визначається за формулою

$$U_{вих} = \frac{U_{ж}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \Rightarrow R_1 = \frac{U_{вих} \cdot R}{U_{вих} - U_{ж}} \quad (6.1)$$

де $U_{ж}$ – напруга живлення, В; R_1 – опір датчика, Ω ; R_2 – опір резистора, Ω .

Таким чином, при дії зовнішньої сили на балці, що вимірює вихідну напругу та її різницю відповідає опір.

$$P \rightarrow \Delta R \rightarrow U \rightarrow \Delta U$$

Алгоритм виміру вигину елемента конструкції представлений на рис. 6.1.

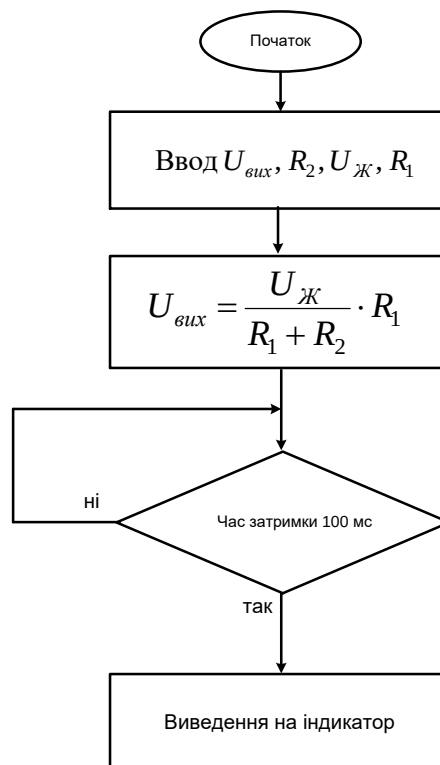


Рис. 6.1 Алгоритм виміру вигину елемента конструкції

Значення кута нахилу балки порівнюються з допустимими значеннями і якщо його значення перевищують допустимі, то включається світлова сигналізація на моніторі комп'ютера.

Статична характеристика тензорезистора лінійна за пружної деформації, коли $K = \text{постійно}$.

$$\Delta R = f(\Delta l) = K \frac{R}{l} \Delta l; \gamma_R = f(\Delta l) = K \gamma_l \quad (6.2)$$

де K – коефіцієнт чутливості.

При вимірі зосередженої сили F консольна балка є пружним механічним перетворювачем.

$$\Delta l = f(F) = \frac{6 \cdot l^2 \cdot F}{E \cdot b \cdot h^2}, \quad (6.3)$$

де Δl - абсолютна лінійна деформація поверхні балки у точці вимірювання, см;

F – зосереджена сила – навантаження балки, кг;

l - довжина ділянки балки між точкою застосування навантаження і точкою вимірювання, см;

h – товщина балки, см;

b – ширина балки, см;

E - модуль пружності матеріалу балки, кг/см².

Тарування тензоперетворювача здійснюємо за формулою.

$$\gamma_R = f(F) = K \frac{6 \cdot l \cdot F}{E \cdot b \cdot h_2}, \quad (6.4)$$

Вихідну напругу $U_{\text{вих.}}$ визначаємо за формулою

$$U_{вих} = U_{ж} \frac{R}{R_1 + R_2} \Rightarrow R = \frac{U_{ж} - U_{вих}}{U_{вих}} \cdot R_1 \quad (6.5)$$

де $U_{ж}$ – напруга живлення, В;

R_1 – опір резистора, Ω ;

R – номінальний опір датчика, Ω .

Деформації балки можна застосовувати

$$\Delta l = \frac{\Delta R}{R} \cdot K, \quad (6.6)$$

або

$$\begin{aligned} \Delta l &= \frac{1}{K \cdot R} \cdot R_1 \cdot \left(\frac{U_{ж}}{U_{вих1}} - \frac{U_{ж}}{U_{вих2}} \right) = \\ &= \frac{1}{K \cdot R} \cdot R_1 \cdot U_{ж} \cdot \left(\frac{1}{U_{вих1}} - \frac{1}{U_{вих2}} \right) \end{aligned} \quad (6.7)$$

$U_{вих1}$ - напруга датчика при номінальному опорі, В;

$U_{вих2}$ - напруга датчика за наявності навантаження.

Алгоритм перетворення можна подати схемою:

$$P \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta l \rightarrow U \rightarrow \Delta U$$

Алгоритм вимірювання стріли прогину (деформації) елемента конструкції наведено на рис. 6.2.

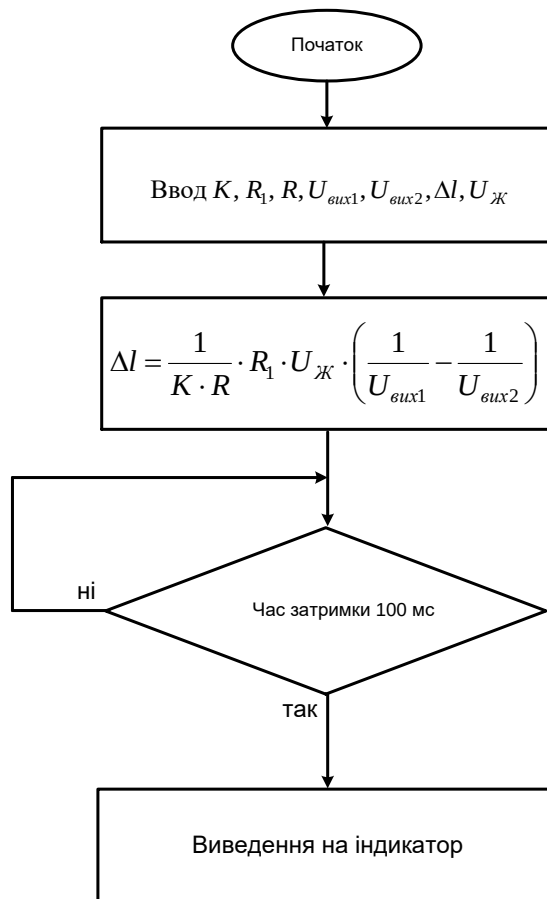


Рис. 6.2 Алгоритм вимірювання стріли прогину (деформації) елемента конструкції

Алгоритм роботи комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу несучих конструкцій висотних будівель складається з зчитування датчиками показів датчиків, передачі цих параметрів на мікроконтролер та виведення на дисплей. Блок-схема алгоритму роботи системи і блок-схема алгоритму опитування датчиків наведено у графічній частині. Програма роботи наведена у додатку.

7. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

7.1. Похибка каналу вимірювання деформації

Нормування похибки каналу вимірювання виконується відповідно до ДСТУ-Н РМГ 62:2006 "Забезпечення ефективності вимірювань під час керування технологічними процесами. Оцінювання похибки вимірювань при обмеженій вихідній інформації" [13].

Розглянемо приклад розрахунку похибки каналу вимірювання. Як канал вимірювання виберемо канал вимірювання деформації. Вимога до похибки каналу вимірювання не більше 0,2%. Розрядність АЦП становить 16 розрядів.

Розрахунок допустимої похибки вимірювань деформації здійснюється за формулою (1):

$$\delta_1 \leq \sqrt{\delta^2 - (\delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2 + \delta_7^2)}, \quad (7.1)$$

де $\delta = 0,2\%$ - необхідна сумарна похибка вимірювання каналу при довірчій ймовірності 0,95;

δ_2 – похибка передачі по каналу вимірювань;

δ_3 – похибка, яку вносить АЦП;

$\delta_4, \delta_5, \delta_6, \delta_7$ – додаткові похибки, що вносяться температурою навколишнього повітря, перешкодами різного виду, тиском вимірюваного середовища та іншими факторами відповідно.

Похибка передачі по каналу вимірювань встановлюється рекомендаціями [13]:

$$\delta_2 = \frac{0,2 \cdot 4}{100} = 0,008 \text{ \%}.$$

Похибка, що вноситься 16-ти розрядним АЦП, розраховується наступним чином:

$$\delta_3 = \frac{0,2 \cdot 100}{2^{16}} = 0,0003 \text{ \%}.$$

При розрахунку також враховуються додаткові похибки, викликані впливом:

- температури навколишнього повітря;
- перешкод різного виду;
- тиску вимірюваного середовища;
- інших факторів.

Додаткова похибка, яку вносить вплив температури навколишнього повітря, встановлюється рекомендаціями [13]:

$$\delta_5 = \frac{0,2 \cdot 1}{100} = 0,002 \text{ \%}.$$

Додаткова похибка, яку вносить перешкоди різного виду, встановлюється рекомендаціями [13]:

$$\delta_5 = \frac{0,2 \cdot 1}{100} = 0,002 \text{ \%}.$$

Додаткова похибка, яку вносить тиск вимірюваного середовища, встановлюється рекомендаціями [13]:

$$\delta_6 = \frac{0,2 \cdot 1}{100} = 0,002 \text{ \%}.$$

Додаткова похибка, яку вносять інші фактори, встановлюється рекомендаціями [13]:

$$\delta_7 = \frac{0,2 \cdot 36}{100} = 0,072 \text{ \%}.$$

Таким чином, підставивши в формулу (6.1) отримані значення, розрахуємо допустиму основну похибку вимірювача деформації:

$$\delta_1 = \sqrt{0,2^2 - (0,008^2 + 0,0003^2 + 0,066^2 + 0,002^2 + 0,002^2 + 0,072^2)} = 0,17 \text{ \%}.$$

В результаті розрахунку видно, що основна похибка обраного вимірювача деформації не перевищує допустимої розрахункової похибки. Отже, прилад придатний для використання.

7.2. Оцінка похибки MEMC і методи її зменшення

Для вимірювання кутів нахилу та вібрацій використовується акселерометр, гіроскоп та магнітометр [35]. У цьому розділі оцінимо похибку чутливих елементів.

7.2.1. Типи помилок MEMC

Сигнали MEMC можна подати

$$y(t) = u(t) + e(t) + b(T) + N(a, w, T, t), \quad (7.2)$$

де t - час, T - температура, a/w - реальні кінетичні величини, вимірювальні датчики, $y(t)$ - вихідні сигнали датчиків, $u(t)$ – інформації складової сигналу, $b(T)$ - показник, що залежить від температури навколишньої середовища, $N(a, w, T, t)$ – похибки, що викликані умовами середовища, $e(t)$ - шумові компоненти, залежить від часу ($b(T)$ - відхилення зазвичай постійно).

Опис факторів впливу на вихідні сигнали MEMC нижче:

Шум квантування: У перетворювачі АЦП обумовлено дискретне значення датчиків. Частота дискретизації та роздільна здатність датчиків впливають на результатах вихідних сигналів.

Випадкове блукання (дрейф) кута: основна шумова компонента у вихідних даних MEMS. Являє собою компонент адитивного білого шуму, проявляється у відхиленні значень від очікуваних випадковим чином; впливає на результат інтегрування (для перетворення вимірюваної датчиком кутової швидкості у кут повороту).

Фліккер - шум або нестабільність зміщення нуля: в електронних пристроях датчиків виникає випадкове значення "миготіння", що називається рожевим шумом. У низькій частоті: збільшення частоти, потужність шуму поступово зменшується. У високій частоті: шум перекривається білим шумом.

Випадкове блукання швидкості (дрейф): виникає у великих проміжках часу роботи датчиків та вплив умов середовища (шум обумовлений зміною температури).

Мультиплікативна систематична похибка є детермінованим відхиленням показань датчика на значних проміжках часу, причина шуму: стабільність джерела живлення, стаціонарність датчика, стабільність температури.

Синусоїдальний шум: при дії вібрацій MEMС, що породжуються, виникає цей шум.

7.2.2. Метод зменшення похибки MEMС

Підвищення точності та стабільності вимірювальних сигналів інерційних датчиків є актуальною проблемою для приладів та систем орієнтації, стабілізації та навігації. Для забезпечення точності вимірювань застосовують різні методи обробки сигналу з датчиків.

Метод зменшення зміщення нуля та шуму модуля MPU-6050

Похибка датчика складе зі зміщення нуля, помилки коефіцієнта масштабу та шуму (рис. 7.1) [35].

Для зменшення помилок потрібне калібрування датчика та фільтрація вимірювального сигналу.

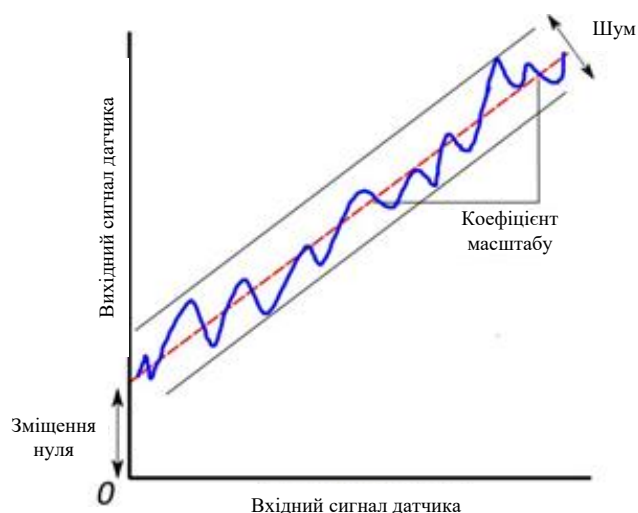


Рис. 7.1 Загальний вигляд вихідного сигналу MPU-6050

Експериментальний зразок інерційної системи орієнтації (ICO) (рис. 7.2) побудований на базі модуля MPU-6050 (1), модуля HMC5883L (2) та Arduino Uno R3.

У процесі експериментальних досліджень ICO вона була виставлена в площину горизонту. У певний інтервал часу було отримано по 100 значень сигналів з гіроскопа та акселерометра датчика MPU-6050 та визначено середні значення вимірювальних сигналів цих датчиків. Віднімаючи середньо значення вимірювального сигналу з фактичного значення, можна отримати значення зміщення нуля характеристики. Це значення є зміщенням нуля сигналів гіроскопа та акселерометра модуля MPU. Для вміщення шумів можна використовувати фільтр низьких частот. Результати експериментальних досліджень датчиків модуля MPU-6050 показані на рис. 7.3 і 7.4.

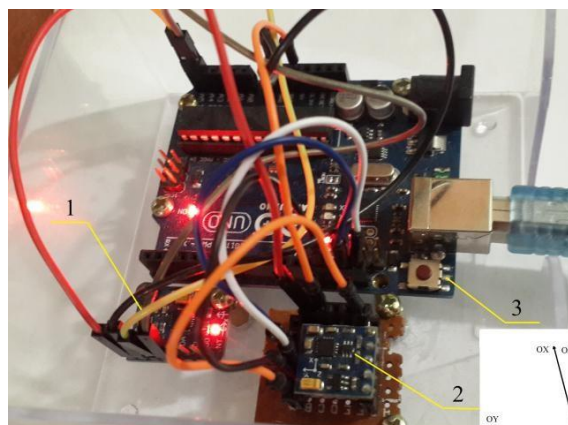


Рис. 7.2 Експериментальний зразок інерційної системи орієнтації:

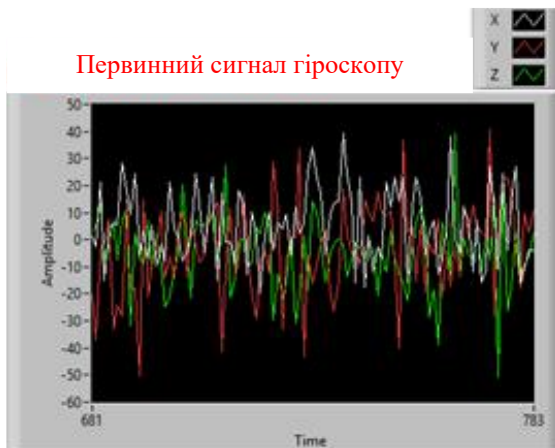
1- модуль MPU- 6050 , 2- модуль HMC5883L та 3- Arduino Uno R3



а)

б)

Рис. 7.3 Сигнали акселерометрів модуля MPU-6050: а) первинний сигнал; б) сигнал без зміщення нуля та шуму



а)

б)

Рис. 7.4 Сигнали з гіроскопів модуля MPU- 6050:

а) первинний сигнал; б) сигнал з виключенням зміщення нуля та шуму

7.2.3. Метод калібрування модуля HMC5883L

Для калібрування магнітометра використано програму майстра [36]. Магнітометр закріпить на межі куба. Грань куба з магнітометром може бути встановлена перпендикулярно кожної осі тригранника OXYZ. (рис. 7.5). Після встановлення магнітометра у позицію 1 натиснути кнопку, що

відповідає цьому напрямку на екрані монітора (рис. 45). Виконати цю операцію для всіх інших позицій до позиції 12 включно. Після заповнення всіх вікон таблиці натиснути кнопку "Розрахувати перетворення" та отримати необхідну матрицю та зміщення (рис. 7.5).

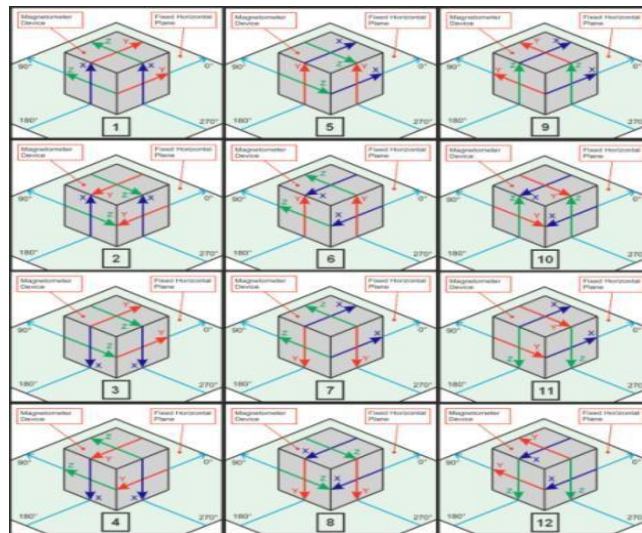


Рис. 7.5 Орієнтація магнітометра щодо опорної системи координат:
1,2,3....12 позиції орієнтації

Axis	Point	X	Y	Z
X+	Point 0°	-699	-152	-80
	Point 180°	-670	-69	-31
X-	Point 0°	663	-113	-50
	Point 180°	605	-60	-90
Y+	Point 0°	-83	-788	-17
	Point 180°	34	-789	-106
Y-	Point 0°	-19	525	-74
	Point 180°	-48	520	-98
Z+	Point 0°	4	-145	-636
	Point 180°	-64	-198	-627
Z-	Point 0°	-93	-37	511
	Point 180°	29	-126	507

Transformation Matrix			Bias	Information
M11= 0.97	M12= 0.007	M13= 0.001	Bx= -29.315	How to Use the Results How to Use the Program
M21= -0.018	M22= 0.974	M23= -0.088	By= -113.405	
M31= 0.01	M32= 0.018	M33= 1.12	Bz= -68.358	

Рис. 7.6 Таблиця для визначення значень матриці та усунення нуля
магнітометра

Обробка результатів вимірювань магнітометра здійснюється за виразом

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} X_{nc} \\ Y_{nc} \\ Z_{nc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \right), \quad (7.3)$$

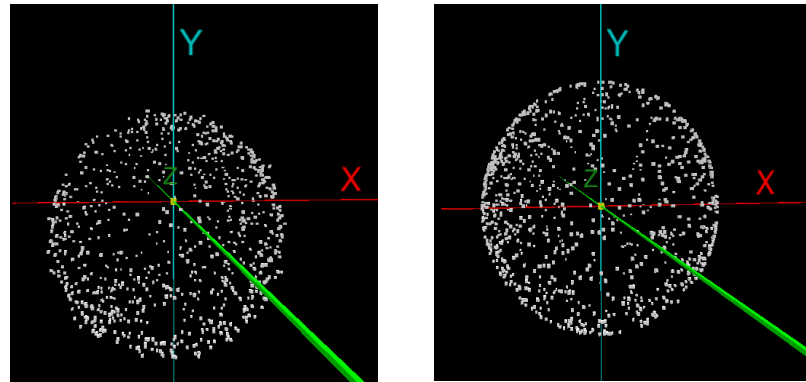
де X_c , Y_c , Z_c - значення сигналів магнітометра по осях X, Y, Z після калібрування;

$M_{11} \dots M_{33}$ – значення елементів матриці;

X_{nc} , Y_{nc} , Z_{nc} – значення сигналів магнітометра без калібрування; B_x ,

B_y , B_z – значення зміщення сигналу магнітометра.

Результати розрахунку сигналу магнітометра показано на рис. 7.7.



а)

б)

Рис. 7.7 Результати значення магнітометра:

а) до калібрування; б) після калібрування

В результаті проведених досліджень експериментального зразка інерційної системи орієнтації застосовані методики, які дозволили усунути зсув нуля та зменшити шум вимірювальної характеристики модуля гіроскопа та акселерометра MPU-6050 та усунути зсув нуля магнітометра HMC5883L.

8. ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ

Розрахунок надійності робимо у відповідності зі схемою електричною підключення, з обліком заданої кліматичної категорії і виконання системи.

Параметр потоку відмов визначається по формулі:

$$\lambda_{\text{сис}} = \sum N_i \lambda_i,$$

де N - число груп комплектуючих, що входять до складу системи; N_i - кількість і інтенсивність відмов комплектуючих i -ої групи.

Інтенсивність відмов комплектуючих i -ої групи в робочому режимі визначається як:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} * a_1 * \dots * a_n,$$

де λ_{0i} - інтенсивність відмов комплектуючого виробу в номінальному режимі і нормальних умовах $a_1 \dots a_n$ - коефіцієнти, що враховують умови роботи.

Для визначення коефіцієнта a_1 скористаємося довідниковими даними:

$$a_1 = k_{11} * k_{12} * \dots * k_{15};$$

з огляду на умови експлуатації, вибираємо $k_{11}=2$, $k_{12}=1$, $k_{13}=1$, $k_{14}=2$, k_{15} ; таким чином, $a_1=2$. Зробимо розрахунок, скориставшись таблицею 8.1.

Інтенсивність потоку відмов елементів системи: $\lambda_{\text{сис}} = 13,2054 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

Можливість безвідмовної роботи протягом часу t :

$$P(t) = e^{-\lambda T} \quad (8.1)$$

де T - час роботи системи, годин,

$\lambda_{\text{сис}}$ - інтенсивність потоку відмов.

Середній час наробітку на відмову визначимо по формулі:

$$T_0 = \lambda_{\text{сис}}^{-1}$$

При $\lambda_{\text{сис}} = 13,2054 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹ значення $T_0 = 41086$ годин.

Ймовірність безвідмовної роботи за час $T = 1000$ год. визначимо по формулі (8.1). Вона склала 0,9869 відповідно до рис. 8.1.

Таблиця 8.1. Інтенсивність потоку відмов елементів системи

Прилад	$\lambda_{0i} \cdot 10^{-6}$	N_i	a_1	a_2	a_3	$N_i \cdot \lambda_{0i} \cdot 10^{-6}$
Модуль 521	1,723	1	2	0,5	1	1,723
Модуль 271	3,793	1	2	0,5	1	1,895
Arduino Uno R3	3,424	1	2	0,5	1	1,547
Блок живлення	2,160	1	2	0,5	1	2,160
Роз'єми	0,010	400	2	0,5	1	4,0
Всього						13,205

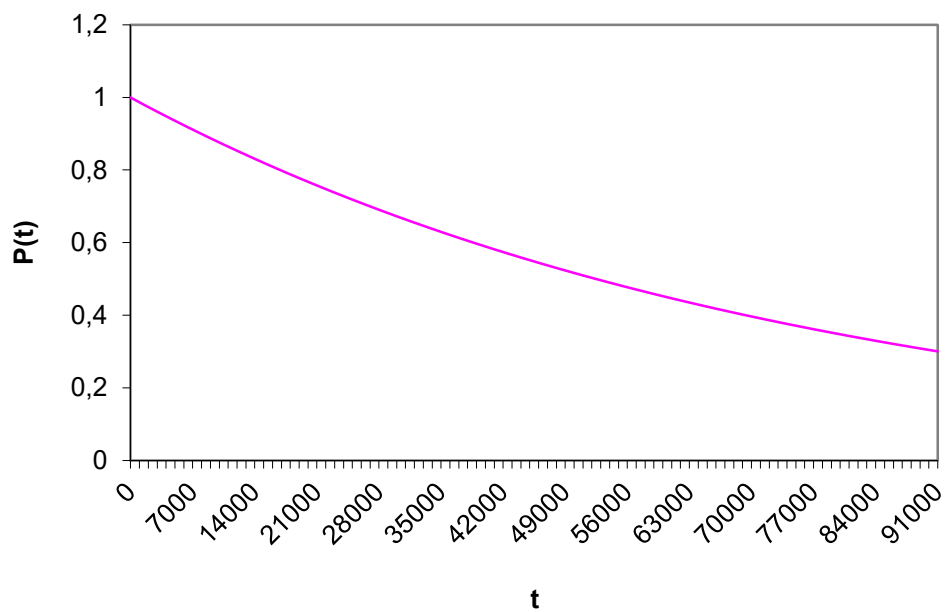


Рис. 8.1. Ймовірність безвідмовної роботи

9. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

Надійність системи "людина – комп'ютер" значною мірою визначається функціональним станом людини. Психофізіологічні та емоційні перенапруження, втома людини-оператора можуть призвести в комп'ютеризованих системах керування до помилок і як наслідок – до значних економічних втрат.

Визначення та вивчення факторів, що впливають на функціональний стан користувачів комп'ютерів дозволить виділити основні причини виникнення станів напруженості, втоми, стресу і здійснити відповідні профілактичні заходи.

Трудова діяльність користувачів комп'ютерів відбувається у певному виробничому середовищі, яке впливає на їх функціональний стан. Виробниче середовище характеризується такими шкідливими факторами:

- фізичні фактори виробничого середовища, до яких належать електромагнітні хвилі різних частотних діапазонів, електростатичні поля, шум, параметри мікроклімату та ціла низка світлотехнічних показників;
- хімічні: пил, шкідливі хімічні речовини, що виділяються при роботі принтера і копіювальної техніки;
- біологічні: підвищений вміст в повітрі патогенних мікроорганізмів (в приміщеннях з великою кількістю працівників, при недостатній вентиляції, та в період епідемії);
- психофізіологічні: напруженнями сенсорного апарату (зору, уваги), вищих нервових центрів (інтелектуальні та емоційні навантаження), які забезпечують функції уваги, мислення, регуляції рухів, монотонність праці;

2) трудовий процес суттєво впливає на психофізіологічні можливості користувачів комп'ютерів, оскільки їх діяльність характеризується значними

статичними фізичними навантаженнями; недостатньою руховою активністю. Окрім того, трудовий процес користувачів комп'ютерів відзначається значними інформаційними навантаженнями.

3) внутрішні засоби – це професійні риси та виробничий досвід, що обумовлюють надійну та безпомилкову діяльність користувачів комп'ютерів, дозволяють знаходити безпечні методи розв'язання виробничих завдань навіть у нестандартних ситуаціях;

4) зовнішні засоби діяльності - визначаються ергономічними показниками щодо організації робочого місця, формою та параметрами його елементів, просторового розташування основного і допоміжного устаткування, можуть суттєво знизити фізичні та психофізіологічні навантаження, що діють на користувачів комп'ютерів;

5) соціально-психологічні фактори трудових взаємовідносин.

Для забезпечення нормованих метеоумов використовують освітлення, кондиціювання повітря і припливно-витяжну вентиляцію згідно з СНіПом 2.04.05-91, та застосовують установки або прилади зволоження та штучної іонізації.

Освітлення виробничих приміщень для роботи з комп'ютером має бути природним і штучним, згідно зі СНіПом II-4-79.

Штучне освітлення в приміщенні та на робочих місцях повинно забезпечувати хорошу видимість інформації на екрані, машинописного і рукописного тексту, оптимальні співвідношення яскравості робочих і навколишніх поверхонь, виключення відбиття екрана і клавіатури.

Штучне освітлення має здійснюватися системою загального рівномірного освітлення, а в разі необхідності й комбінованого (суміжного загального і місцевого) освітлення. При цьому світильники місцевого освітлення слід встановити таким чином, щоб не створювати відблисків на поверхні екрана, а освітленість екрана не повинна перевищувати 300 лк. Крім

того, вони повинні мати просвічуючий відбивач із захисним кутом не менше 40°.

Нормована освітленість на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має бути 300-500 лк.

Для забезпечення нормованих значень освітленості шибки і світильники необхідно чистити двічі на рік. З метою усунення в" блисків поверхня екрана обробляється різними засобами (кислотою, нанесенням розсіювальних покриттів тощо) або використовують спеціальні фільтри (скляні, пластмасові, сітчасті).

Таким чином, для створення комфортних умов праці, запобігання втомленості очей і професійним захворюванням освітлення повинно:

- відповідати нормованим значенням освітленості на кожному робочому місці;
- бути рівномірним і постійним;
- не створювати тіней;
- не засліплювати;
- зменшувати до мінімуму стробоскопічний ефект;
- дотримувати необхідний контраст об'єктів і фону на екрані ВДТ;
- забезпечуватися правильно підібраними світильниками; ?
- уникати відблисків на екрані;
- передбачати заходи для обмеження осліплювальної дії вікон прямих сонячних променів з метою вимкнення на робочих поверхнях яскравих і темних плям, засвічування екрана;
- зменшувати тепловий ефект від інсоляції.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему моніторингу несучих конструкцій висотних будівель.

Система моніторингу несучих конструкцій висотних будівель призначена для збору інформації з датчиків, встановлених на несучих конструкціях висотних будівель з метою моніторингу технічного стану та попередження про небезпеку руйнування.

У процесі дослідження проводився огляд існуючих методів експериментального визначення кута нахилу та напружено-деформації будівель та споруд, обрані елементи та метод обробки сигналу датчика MEMS, що забезпечує найвищу точність із усіх експериментальних методів, розроблена комп'ютерна система вимірювань, оцінена похибка вимірів.

В результаті дослідження розроблено оптимальний алгоритм комп'ютерної вимірювальної системи.

Область застосування: у висотних будівлях та спорудах. Проведено розрахунок похибок системи, які не перевищують допустимі значення, що відповідає вимогам до точності систем моніторингу технічного стану будівель. Визначено основні показники надійності системи, що дозволяє забезпечити її стабільну роботу протягом тривалого часу без збоїв.

Отримані результати підтверджують працездатність і ефективність розробленої системи. Вона може бути застосована для контролю несучих конструкцій висотних будівель. Розробка вирізняється простотою, доступністю, модульністю та високою точністю, що робить її перспективною для подальшого вдосконалення та модернізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Belyi, A. A. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint–Petersburg example) / A. A. Belyi, E. S. Karapetov, Yu. S. Efimenko // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – P. 145–151.
- 2) Wenzel, H. Health monitoring of bridges / H. Wenzel. – Chichester: John Wiley & Sons, 2009. – 621 p.
- 3) Structural health monitoring system of bridges / C. C. Comisu [et al.] // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 199. – P. 2054–2059.
- 4) ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016. Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд. – Чинний від 2017–04–01. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 47 с.
- 5) ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ : ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва», 2017. 44 с.
- 6) Войтенко С. Визначення кренів інженерних споруд методом наземного лазерного сканування / С. Войтенко, Р. Шульц, М. Білоус // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва : зб. наук. пр. – Київ, 2009. – Вип. I (17). – С. 144–150.
- 7) Попруга Д. В., Валовой О. І. Проблеми моніторингу технічного стану будівель і споруд. Вісник Криворізького національного університету. Вип 34. 2013. С. 186–190.
- 8) <https://mehanika.net.ua/product/modul-akselerometra-i-giroskopy-512-mpu-6050-6dof/>
- 9) https://voron.ua/uk/catalog/029691--datchik_gy-271_hmc5883l
- 10) <https://myproject.com.ua/magnitometr-gy-271-3-osovij-cifrovij-i2c-hmc5883l-ua.html>

- 11) <https://arduino kit.com.ua/ua/p2443129646-plata-arduino-uno.html>
- 12) <https://standart-pribor.com.ua/product/tenzorezistor-kf4p1-1-100/>
- 13) ДСТУ-Н РМГ 62:2006 "Забезпечення ефективності вимірювань під час керування технологічними процесами. Оцінювання похибки вимірювань при обмеженій вихідної інформації"
- 14) <https://www.instructables.com/Easy-hard-and-soft-iron-magnetometer-calibration/>