

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Комп'ютерне моделювання тензорезисторних вимірювальних систем
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи АКТСІ-20-2
Семененко М. А.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ромашов Ю. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2024р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

«____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Семененко Максиму Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерне моделювання тензорезисторних вимірювальних систем

затверджена наказом по університету від “ 03 ” червня 2024р. № 545 Ст.

2. Термін подання студентом роботи “ 22 ” червня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Електромеханічні аналогії, рівняння Лагранжа 2-го роду;

3.2 Перетворення Лапласа та передаточна функція;

3.3 Частотні характеристики динамічної ланки;

3.4 Комп'ютерне моделювання у середовищі Simulink.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ;

4.2 Загальні відомості про мехатронні тензорезисторні системи;

4.3 Математична модель мехатронної тензорезисторної системи для визначення навантажень;

4.4 Комп'ютерне моделювання мехатронної тензорезисторної системи для визначення навантажень;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 12 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Загальні відомості про мехатронні тензорезисторні системи</i>	<i>13.05 – 17.05.24</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Математична модель мехатронної тензорезисторної системи для визначення навантажень</i>	<i>18.05 – 01.06.24</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Комп'ютерне моделювання мехатронної тензорезисторної системи для визначення навантажень</i>	<i>02.06 – 06.06.24</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Охорона праці</i>	<i>07.06 – 09.06.24</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>10.06 – 12.06.24</i>	<i>виконано</i>
6			

Дата видачі завдання 13.05.2024р.

Студент _____ Семененко М. А.
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Ромашов Ю. В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«12» червня 2024 р.

Семененко М. А.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 44 с., 1 табл., 17 рисунку, 1 дод., 13 джерел.

МЕХАТРОННА ТЕНЗОРЕЗИСТОРНА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА,
ТЕНЗОДАТЧИК, ДИНАМІЧНА ТЕОРІЯ ПРУЖНОСТІ, МЕТОД ПРЯМИХ,
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ, SIMULINK.

Мета роботи – комп'ютерне моделювання за допомогою Simulink мехатронної тензорезисторної вимірювальної системи.

Об'єкт розробки – вплив механічних та електричних характеристик, а також математичних моделей і програмних засобів обробки даних на результати вимірювань.

Предмет розробки – комп'ютерна модель процесів в мехатронній тензорезисторній вимірювальній системі.

Розглянуто моделювання пружного стрижневого елементу, що деформується під дією зовнішнього навантаження, закріпленого на ньому тензодатчику, перетворювача вимірюваного сигналу та програмної обробки результатів вимірювань. Математична модель пружного стрижневого елементу, що знаходиться в умовах розтягування-стискання, сформульовано на основі спрощених рівнянь динамічної теорії пружності та методу прямих; модель тензорезистору – на основі поняття про коефіцієнт тензочутності; модель перетворювача сигналів – на основі законів Кирхгофа; програмна обробка результатів – на основі розв'язування спеціально сформульованої зворотної задачі динамічної теорії пружності. Комп'ютерне моделювання здійснене за допомогою Simulink; показано наявність високочастотних механічних коливань пружного елементу, детальне дослідження яких може вимагати використання спеціальної техніки високочастотних радіовимірювань.

ABSTRACT

Explanatory note: 44 pp., 1 tab., 17 figs., 1 appendices, 13 sources.

MECHATRONIC TENSION RESISTANCE MEASURING SYSTEM, TENSION GAUGE, DYNAMIC THEORY OF ELASTICITY, METHOD OF LINES, MATHEMATICAL MODEL, COMPUTER MODEL, SIMULINK.

The purpose of the work is computer modeling using Simulink of a mechatronic tensor-resistor measuring system.

The object of development is the influence of mechanical and electrical characteristics, as well as mathematical models and software data processing tools on measurement results.

The subject of development is a computer model of processes in a mechatronic strain-resistor measuring system.

Modeling of an elastic rod element deforming under the action of an external load, a strain gauge attached to it, a transducer of the measured signal and software processing of the measurement results are considered. The mathematical model of an elastic rod element under tension-compression conditions is formulated on the basis of simplified equations of the dynamic theory of elasticity and the method of straight lines; strain gauge model – based on the concept of strain sensitivity coefficient; signal converter model – based on Kirchhoff's laws; software processing of results – based on solving a specially formulated inverse problem of dynamic theories of elasticity. Computer modeling was carried out using Simulink; the presence of high-frequency mechanical vibrations of an elastic element is shown, the detailed study of which may require the use of a special technique of high-frequency radio measurements.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	7
Вступ	8
1 Загальні відомості про мехатронні тензорезисторні системи	10
1.1 Мехатронні системи та мехатроніка	10
1.2 Принцип дії, конструкції та підключення тензорезисторів	11
1.3 Використання тензорезисторів	13
2 Математична модель мехатронної тензорезисторної системи для визначення навантажень	15
2.1 Загальна будова мехатронної тензорезисторної системи	15
2.2 Модель механічної частини мехатронної тензорезисторної системи ...	17
2.3 Модель електронної частини мехатронної тензорезисторної системи	21
3 Комп'ютерне моделювання мехатронної тензорезисторної системи для визначення навантажень	25
3.1 Моделювання механічної частини	25
3.2 Моделювання електронної частини	32
4 Охорона праці.....	37
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці	37
4.2 Промислова безпека на робочому місці	37
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні	38
4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення	40
Висновки	42
Перелік джерел посилання	43
Додаток А Демонстраційний матеріал	45

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Е.р.с. – електрорушійна сила;

ПК – персональний комп'ютер.

ВСТУП

Тензорезисторні системи вже тривалий час широко використовуються для вимірювання деформацій при проведенні наукових досліджень та для забезпечення функціонування технічних систем [4-8]. Сьогодні достатньо повно розв'язані фундаментальні проблеми щодо принципів роботи та практичні питання щодо проектування, виробництва та використання тензорезисторних датчиків та тензорезисторних вимірювальних систем.

Подальший розвиток тензорезисторних вимірювальних пристроїв та систем сьогодні здійснюється переважно за рахунок удосконалення їхніх електронних компонент, використання цифрових перетворювачів та програмної обробки результатів на комп'ютерах з використанням математичних моделей. Такий підхід до удосконалення тензорезисторних систем вимагає розглядати такі системи як мехатронні.

Актуальність роботи обумовлена її узгодженістю із сучасними світовими тенденціями розвитку тензорезисторних вимірювальних систем, які передбачають наявність в таких системах електронних приладів, математичного та програмного забезпечення для комп'ютерної обробки даних.

Метою роботи є комп'ютерне моделювання за допомогою Simulink мехатронної тензорезисторної вимірювальної системи, яке дозволить у подальшому досліджувати вплив механічних та електричних характеристик, а також математичних моделей і програмних засобів обробки даних на результати вимірювань.

Використання результатів передбачається у навчальному процесі при створенні лабораторних макетів для ознайомлення із принципами роботи та характерною будовою тензорезисторних вимірювальних систем та у подальших наукових дослідженнях процесів в мехатронних тензорезисторних системах; використання результатів можливе для удосконалення підходів щодо

проектування мехатронних тензорезисторних систем промислового призначення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз вимог технічного завдання;
- розглянути відомості про принципи дії мехатронних тензорезисторних систем;
- проаналізувати мехатронні тензорезисторні системи;
- виконати огляд використання мехатронних тензорезисторних систем;
- побудувати математичну модель пружного стрижневого елементу;
- здійснити комп'ютерне моделювання за допомогою середовища Simulink;
- розглянути питання охорони праці.

Пояснювальну записку кваліфікаційної роботи оформлено згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], а також з рекомендаціями з підготовки і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [2-3].

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

ПРО МЕХАТРОННІ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНІ СИСТЕМИ

Тензорезисторні системи забезпечують вимірювання деформацій у досліджуваному об'єкті. За рахунок належної обробки результатів вимірювання деформацій можна визначати інші фізичні величини, дія яких на досліджуваний об'єкт викликає його деформування, що значно розширює використання тензорезисторних вимірювальних систем [4, 5]. В той же час, обробка результатів вимірювання деформацій для визначення за ними іншої фізичної величини може бути достатньо складною, наприклад містити розв'язування крайових та початково-крайових задач, та практично може здійснена виключно за допомогою комп'ютерів зі спеціальним програмним забезпеченням. Завдяки цьому, сучасні тензорезисторні вимірювальні системи мають розвинену електронну частину, математичне та програмне забезпечення.

1.1 Мехатронні системи та мехатроніка

Типова мехатронна система містить механічну базову конструкція, приводи, датчики, контролери, перетворювачі сигналів, цифрові комп'ютери та програмне забезпечення [6]. Слід підкреслити, що мехатронна система складається із суто механічних, електричних та електронних компонентів, які взаємодіють один з одним таким чином, що уся система функціонує як єдине ціле для забезпечення передбачених функцій відповідно до її призначення. Відповідно до цього, тензометрична система, що забезпечує вимірювання деформації об'єкту шляхом її перетворення в аналоговий електричний сигнал, подальшого аналогово-цифрового перетворення та обробки результатів на комп'ютері із використанням математичних моделей та програмного забезпечення є мехатронною системою, оскільки вона містить усі складові, притаманні типовій мехатронній системі.

Галузь знань, в якій розглядаються мехатронні системи, прийнято називати мехатронікою [6, 7], і ця галузь знань інтенсивно розвивається сьогодні. Мехатроніка охоплює результати фізики, механіки, електротехніки, електроніки та широко використовує математичні методи, що ґрунтуються на поняттях та результатах інтегрального та диференціального числення, математичної фізики та теорії диференціальних рівнянь. Це значно ускладнює вивчення мехатроніки, оскільки потребує значної теоретичної підготовки з галузей знань, які в університетах традиційно викладаються окремо, наприклад як механіка окремо від електротехніки та електроніки і навпаки.

На відміну від механічних та електромеханічних систем мехатронні системи мають значні переваги, оскільки завдяки наявності електронних компонентів дозволяють значно розширити можливості виробів, до яких такі системи вклучені. Таке розширення можливе за рахунок притаманних мехатронним системам властивостей щодо значно більших можливостей визначення поточного стану за рахунок обробки результатів вимірювань датчиків та формування сигналів управління з використанням складних математичних моделей.

1.2 Принцип дії, конструкції та підключення тензорезисторів

Тензорезистор представляє собою пристрій для вимірювання деформації, який заснований на зміні електричного опору провідника при його деформуванні [4-8], яка має наступний вигляд:

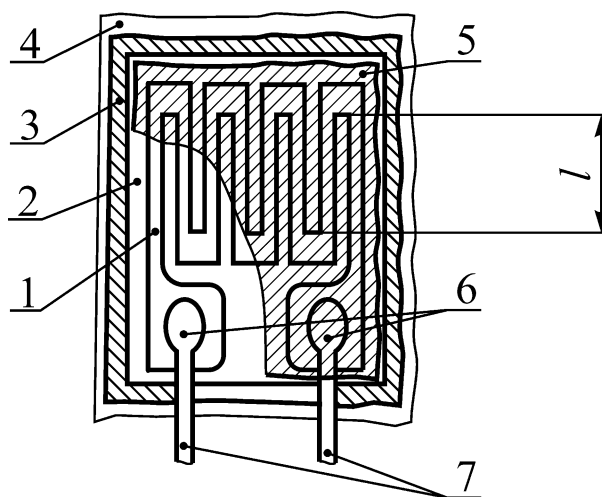
$$\frac{\Delta R}{R} = S_A \frac{\Delta l}{l}, \quad (1.1)$$

де ΔR та R – зміна опору та відповідний нульовий деформації опір провідника;
 S_A – коефіцієнт тензочутливості;

Δl та l – зміна довжини та відповідна нульовій деформації довжина провідника.

Коефіцієнт тензочутливості в залежності (1.1) залежить від геометричних розмірів провідника, але більш усього – від матеріалу [4-8].

Типова конструкція тензорезистору [4-8] показана на рисунку 1.1 [6]. Чутливим елементом тензорезистору може бути металевий надтонкий дріт або фольга, що змінює опір при деформуванні, яке передається від досліджуваного об'єкту через в'язучу речовину та підкладку; чутливий елемент може покриватися захисною речовиною. Вибір розмірів та матеріалу чутливого елементу, матеріалу підкладки та способу закріплення на ній чутливого елементу, матеріалу та способу нанесення в'язучої та захисної речовини, технологія виконання пайки та закріплення вивідних дрітів добре вивчені сьогодні [4, 6]. Характеру довжину l чутливого елементу тензорезистору (рисунок 1.2) називають базою [7].



1 – чутливий елемент; 2 – підкладка; 3 – в'язуча речовина; 4 – досліджуваний об'єкт; 5 – захисна речовина; 6 – вузол пайки (зварювання); 7 – вивідні дроти

Рисунок 1.1 – Типова конструкція тензорезистору

Тензодатчик підключається вивідними дротами до вимірювальної системи (рисунок 1.2). Підключення здійснюється таким чином, що наруга $U_{дж}$ джерела живлення перетворюється у вимірювальну напругу $U_{вим}$ у залежності

від зміни опору R'_d тензодатчику. Перевагою мостової схеми є те, що за відсутності деформації наруга вимірювана напруга дорівнює нулю.

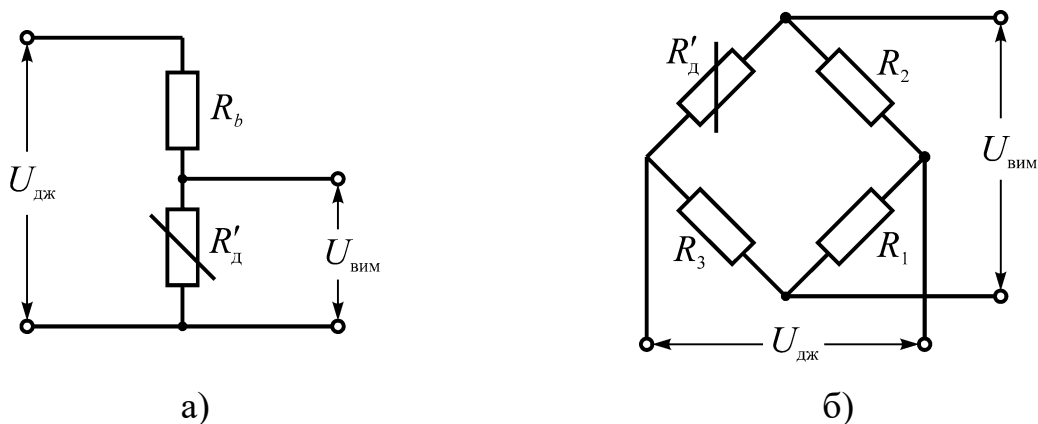


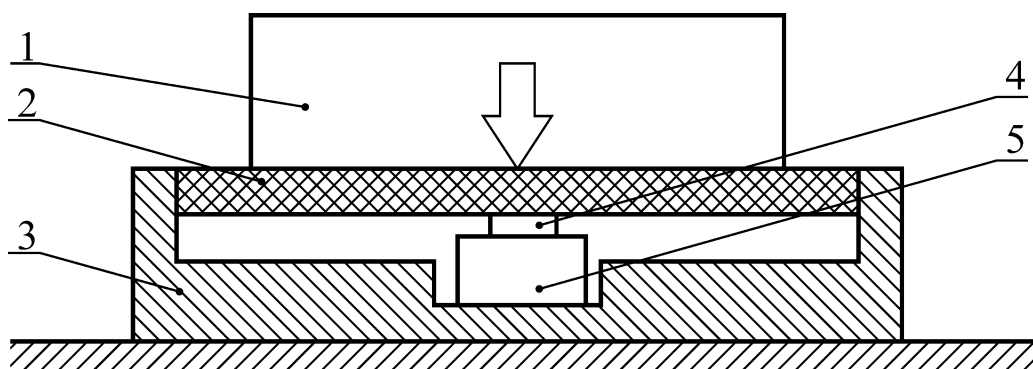
Рисунок 1.2 – Підключення тензорезистору до вимірювальної системи за потенціометричною (а) та за мостовою (б) схемою

Аналоговий сигнал у вигляді вимірюваної напруги $U_{\text{вим}}$ (рисунок 1.2) може вимірюватися звичайним вольтметром, а може після аналого-цифрового перетворення оброблятися на комп'ютері.

1.3 Використання тензорезисторів

Широке використання тензорезисторів засновано на тому, що механічне деформування може бути наслідком різноманітних процесів. Дійсно, за вимірюною механічною деформацією можна визначати фізичні величини, що характеризують процеси, які призвели до цієї деформації. Завдяки цьому, тензорезисторні вимірювальні системи використовуються для вимірювання різноманітних фізичних величин, а саме – для вимірювання маси, переміщення, тиску середовищ, прискорень, характеристик вібрацій та крутних моментів [8]. Обов'язковою умовою використання тензорезисторів для вимірювання деякої фізичної величини є обробка результатів вимірювання відповідно до заздалегідь відомих закономірностей, які визначають вплив вимірюваної величини на деформацію чутливого елемента.

В якості прикладу використання тензорезисторів на рисунку 1.3 показана схема вимірювання маси. В цій схемі маса вимірюваного вантажу-1 завдяки силам тяжіння через вантажну платформу-2, що рухається поступально уздовж напрямних-3, передається до штовхача-4, який деформує розташований в корпусі-5 пружний елемент, на якому закріплений тензорезистор. Вимірюванням деформації цього тензорезистору за даними щодо жорсткості пружного елемента можемо встановити силу, що призвела до його деформації; ця сила буде відповідати вазі вимірюваного вантажу, за яким можемо встановити його масу.



1 – вимірюваний вантаж; 2 – вантажна платформа; 3 – напрямні;

4 – штовхач; 5 – корпус тензовимірювального датчику

Рисунок 1.3 – Використання тензодатчиків для вимірювання маси

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕХАТРОННОЇ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ

Математичне моделювання є актуальним достатньо тривалий час і сьогодні та широко використовується при виконанні наукових досліджень та розв'язування практичних завдань в різних галузях діяльності [8]. Використання математичного моделювання дозволить виконати дослідження для перевірки можливих шляхів щодо удосконалення мехатронної системи для визначення навантажень.

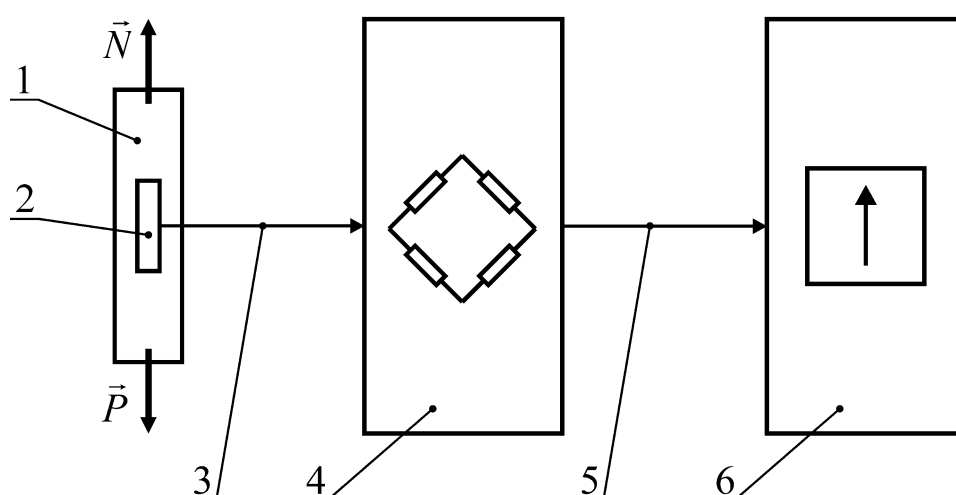
2.1 Загальна будова мехатронної тензорезисторної системи

Математична модель має відображати властивості досліджуваного об'єкту – тензорезисторної системи для визначення навантажень, тому слід уявити що представляє собою досліджуваний об'єкт [8].

В мехатронній тензорезисторній системі для визначення навантажень (рисунок 2.1) деформація від зовнішнього навантаження пружного елементу-1 передається до закріпленого на ньому тензорезисторі-2 та перетворюється у вимірюваний сигнал-3, що відповідає зміні електричного активного опору тензорезистору. Далі (рисунок 2.1) вимірюваний сигнал-3 подається на перетворювач-4, який здійснює необхідні перетворення та видає сигнал вимірювання-5, придатний для використання у вимірювальному приладі-6.

Слід підкреслити, що в розглянутій тензорезисторній системі (рисунок 2.1) пружний елемент-1 є механічною компонентою (системою), тензорезистор-2 є електромеханічною компонентою (системою), а перетворювач-4 та вимірювальний прилад-5 – є електронними компонентами (системами). Стан електронних компонент в розглянутій тензорезисторній системі вимірювання навантажень визначається деформацією пружного

елементу від зовнішнього навантаження, тобто залежить від стану механічної компоненти. Таким чином, розглянута тензорезисторна система вимірювання зовнішніх навантажень (рисунок 2.1) є мехатронною системою, оскільки містить обов'язково притаманні таким системам механічну та електронну компоненти, які взаємодіють між собою за допомогою електромеханічної компоненти.



1 – пружний елемент; 2 – тензорезистор; 3 – вимірний сигнал;
 4 – перетворювач; 5 – результат вимірювання; 6 – вимірювальні прилади
 Рисунок 2.1 – Загальна будова мехатронної тензорезисторної системи для вимірювання навантажень

Зрозуміло що характеристики окремих компонентів мехатронної тензорезисторної системи вимірювання навантажень (рисунок 2.1) мають бути відповідним чином узгодженими між собою, оскільки недосконалості будь-якої окремої компоненти будуть впливати на результати роботи усієї системи незалежно від характеристик інших компонентів. Далі умовно представляємо мехатронну систему у вигляді механічної частини, що містить пружний елемент та тензорезистор, а також електронної частини, що містить тензорезистор, перетворювач та вимірювальні прилади. Зрозуміло, що тензорезистор належить

як до механічної частини, так і до електронної частини, оскільки саме через нього здійснюється зв'язок механічної частини з електронною частиною.

2.2 Модель механічної частини мехатронної тензорезисторної системи

Механічна частина мехатронної тензорезисторної системи для визначення навантажень складається із пружного елементу та закріпленого на ньому тензорезистору, що вимірює деформацію цього пружного елементу.

Пружний елемент (рисунок 2.2, а) представляє прямолінійний однорідний стрижень довжиною L з однаковим уздовж довжини прямокутним перерізом із розмірами a та b . Один край пружного елементу є закріпленим, а інший – навантаженим деякою повздовжньою силою $\vec{N}(t)$, що залежить від часу t та приводить до деформації розтягування-стискання (рисунок 2.2, а).

Для визначення деформування пружного елементу введемо уздовж його довжини вісь x (рисунок 2.2, б) та розглядатимемо переміщення (рисунок 2.2, б) перерізів, деформацію та напруження (рисунок 2.2, в) як функції координати $x \in [0, L]$ та часу $t \geq 0$:

$$u = u(x, t), \varepsilon = \varepsilon(x, t), \sigma = \sigma(x, t), \quad (2.1)$$

де u , ε та σ – переміщення, деформація та напруження уздовж довжини пружного стрижневого елементу.

У випадку малих деформацій та лінійно-пружного деформування параметри напружено-деформованого стану стрижня (рисунок 2.2) мають задовольняти кінематичному рівнянню, рівнянню руху закону Гука:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad x \in [0, L], \quad t \geq 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad x \in (0, L), \quad t > 0, \quad (2.3)$$

$$\sigma = E\varepsilon, \quad x \in [0, L], \quad t \geq 0, \quad (2.4)$$

де ρ та E – густина та модуль Юнга матеріалу стрижня.

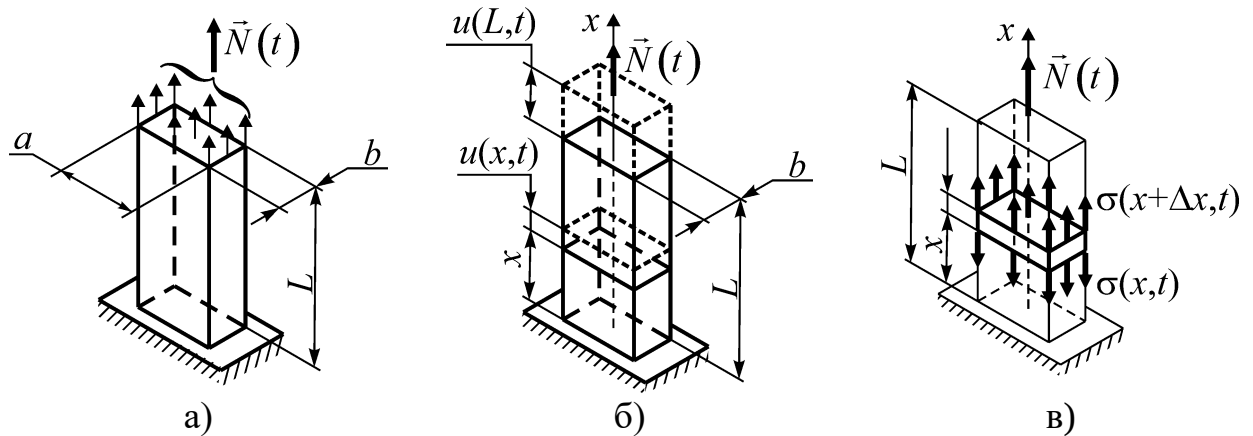


Рисунок 2.2 – Стрижневий пружний елемент (а), переміщення його перерізів (б) та напруження (в) в перерізах при деформуванні

Рівняння (2.2)-(2.3) є спрощенням відомих рівнянь лінійної теорії пружності [9] щодо випадку розтягування-стискання стрижня та мають розглядатися із крайовими та початковими умовами. Стан пружного стрижневого елементу (рисунок 2.2) відповідає крайовим умовам:

$$u(0, t) = 0, \quad \sigma(L, t) = \frac{N(t)}{A}, \quad t \geq 0, \quad (2.5)$$

де $A = ab$ – площа перерізу стрижневого пружного елементу (рисунку 2.2).

Початкові умови відповідні нерухомому недеформованому стану:

$$u(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = 0, \quad x \in [0, L], \quad (2.6)$$

Замість трьох рівнянь (2.2)-(2.4) зазвичай розглядають одне рівняння відносно переміщення [9]. Для цього за допомогою рівнянь (2.2) та (2.4) визначимо напруження наступним чином:

$$\sigma = E \frac{\partial u}{\partial x}, \quad x \in [0, L], \quad t \geq 0. \quad (2.7)$$

Завдяки співвідношенню (2.7) рівняння рівноваги (2.3) набуває вигляду

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad x \in (0, L), \quad t > 0, \quad (2.8)$$

де $c = \sqrt{E/\rho}$.

Крайові умови (2.5) з урахуванням співвідношення (2.7) запишуться так:

$$u(0, t) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x}(L, t) = \frac{N(t)}{EA}, \quad t \geq 0. \quad (2.9)$$

Визначення напружено-деформованого стану пружного стрижневого елементу зведено до розв'язування початково-крайової задачі для диференціального рівняння (2.8) з крайовими умовами (2.9) та початковими умовами (2.6).

Тензорезистор має бути закріплений на пружному елементі. Найкраще місце закріплення має відповідати максимальним переміщенням пружного елементу, але воно має забезпечити достатнього простору для закріплення тензорезистору. Таким чином, в даному випадку маємо:

$$L/2 \leq x_d < L, \quad (2.10)$$

де x_d – координата точки закріплення тензорезистору.

Деформацію тензорезистору наближено визначимо наступними чином:

$$\varepsilon_d(t) \approx \frac{u(x_d, t)}{l}, \quad (2.11)$$

де l – база тензорезистору, тобто його довжина в недеформованому стані.

Залежність зміни активного електричного опору тензорезистору від деформації зазвичай представляють у вигляді [4-8]:

$$\frac{\Delta R_d}{R_d} = S_A \varepsilon_d, \quad (2.12)$$

де ΔR_d – зміна опору тензодатчику внаслідок деформації;

R_d – опір тензорезистору при відсутності деформації;

S_A – коефіцієнт тензочутливості тензорезистору.

Завдяки виразу (2.12) маємо можливість визначити:

$$R'_d(t) = R_d(1 + S_A \varepsilon_d(t)), \quad (2.13)$$

де $R'_d(t)$ – залежність від часу активного опору тензорезистору.

Підставимо деформацію (2.11) до виразу (2.13) та одержимо залежність від часу активного опору тензорезистору, що встановлений на пружному стрижневому елементі у наступному вигляді:

$$R'_d(t) = R_d \left(1 + \frac{S_A}{l} u(x_d, t) \right). \quad (2.14)$$

Таким чином, у вигляді (2.14) маємо математичну модель тензорезистору, що встановлений на пружному стрижневому елементі, який деформується під дією вимірюваного навантаження.

Математична модель механічної частини мехатронної тензорезисторної системи для вимірювання навантажень представлена у вигляді диференціального рівняння (2.8) із крайовими умовами (2.9) та початковими умовами (2.6), а також додатковим співвідношенням (2.14).

Диференціальне рівняння (2.8) із крайовими умовами (2.9) та початковими умовами (2.6) визначає напружено-деформований стан пружного стрижневого елемента, що перебуває у стані розтягування-стискання під дією вимірюваного навантаження. Завдяки визначенню напружено-деформованого стану пружного елемента маємо можливість визначити переміщення закріпленого на ньому тензорезистору.

Співвідношення (2.14) дозволяє визначати активний опір тензорезистору у залежності від переміщення в точці його закріплення на пружному елементі.

2.3 Модель електронної частини мехатронної тензорезисторної

Електронна частина мехатронної тензорезисторної системи для визначення навантажень представляє собою перетворювач сигналу зміни активного опору тензорезистору, закріпленого на пружному елементі, а також вимірювальні (аналогові та цифрові) прилади (вольтметри, осцилографи тощо) та аналого-цифровий перетворювач й комп'ютер, які є завершеними незалежно від досліджуваної системи приладами. Далі розглядатимемо математичне моделювання перетворювача сигналу, та математичне формулювання задачі динаміки деформівного твердого тіла щодо визначення навантаження за заданим переміщенням точки пружного елемента.

Для підключення тензорезистору обираємо широко розповсюджену мостову схему (рисунок 2.3), оскільки вона забезпечує нульове напруження результуючого сигналу відповідне нульовій деформації [4-8]. Відповідно до такої схеми (рисунок 2.3) напруга $U_{дж}$ джерела живлення перетворюється в напругу $U_{вим}$ вимірювання за рахунок зміни активного опору $R'_д$

тензорезистору; щоб забезпечити нульове напруження $U_{\text{вим}}$ при нульовій деформації, коли $R'_d = R_d$, опори в мості (рисунок 2.3) обирають однаковими:

$$R_1 = R_2. \quad (2.15)$$

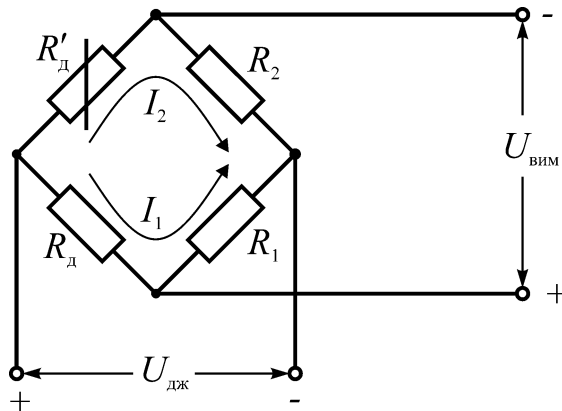


Рисунок 2.3 – Мостова схема підключення тензорезистору

Другий закон Кирхгофа (перший закон врахований при виборі струмів I_1 та I_2) [10] дозволяє записати для мостової схеми на рисунку 2.3 два наступні співвідношення:

$$I_1(R_1 + R_d) = U_{\text{дж}}, \quad I_2(R_2 + R'_d) = U_{\text{дж}}, \quad (2.16)$$

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = U_{\text{вим}}, \quad (2.17)$$

За допомогою співвідношень (2.16) виключимо струми I_1 та I_2 із співвідношення (2.17):

$$\left(\frac{R_1}{R_1 + R_d} - \frac{R_2}{R_2 + R'_d} \right) U_{\text{дж}} = U_{\text{вим}}. \quad (2.18)$$

Здійснимо послідовні тотожні перетворення виразу (2.18):

$$\left(\frac{R_1 R_2 + R_1 R'_d - R_1 R_2 - R_2 R_d}{(R_1 + R_d)(R_2 + R'_d)} \right) U_{дж} = U_{вим},$$

$$(R_1 R'_d - R_2 R_d) U_{дж} = U_{вим} (R_1 + R_d)(R_2 + R'_d),$$

$$(R_1 R'_d - R_2 R_d) U_{дж} = U_{вим} (R_2 (R_1 + R_d) + R'_d (R_1 + R_d)),$$

$$R'_d (U_{дж} R_1 - U_{вим} (R_1 + R_d)) = R_2 (U_{дж} R_d + U_{вим} (R_1 + R_d)),$$

$$R'_d = R_2 \frac{U_{дж} R_d + U_{вим} (t) (R_1 + R_d)}{U_{дж} R_1 - U_{вим} (t) (R_1 + R_d)}. \quad (2.19)$$

Завдяки співвідношенню (2.19) та виразу активного опору (2.14) тензодатчику можемо визначити:

$$u_d(t) = \frac{l}{R_d S_A} \left(R_2 \frac{U_{дж} R_d + U_{вим} (t) (R_1 + R_d)}{U_{дж} R_1 - U_{вим} (t) (R_1 + R_d)} - R_d \right), \quad (2.20)$$

де $u_d(t)$ – переміщення пружного стрижневого елемента в точці закріплення тензорезистору.

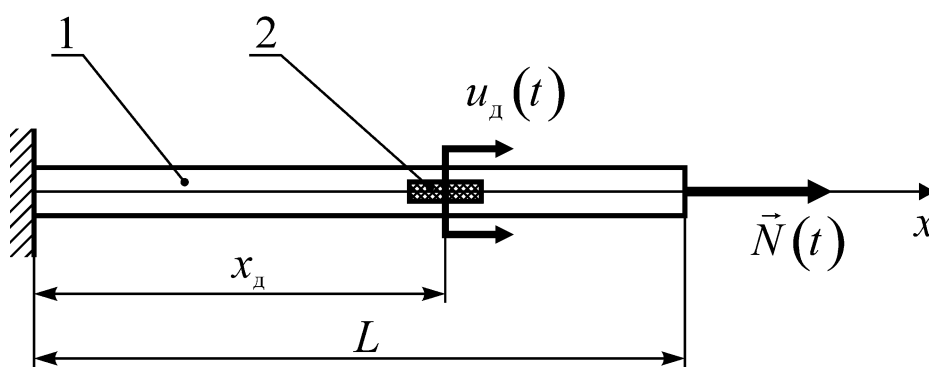
Співвідношення (2.20) дозволяє визначити залежність від часу переміщення точки закріплення тензодатчику на пружному елементі через вимірювану залежність у від часу напруження $U_{вим}$, яке у загальному випадку змінюється з часом.

Можемо досить легко визначати переміщення точки закріплення тензодатчику за даними вимірювання напруження $U_{\text{вим}}$ за допомогою формули (2.20), але основним призначенням мехатронної тензорезисторної системи є визначення навантаження, тобто сили $\vec{N}$ (див. рисунок 2.2). Таким чином, маємо наступну задачу: за заданим переміщенням (2.20) пружного стрижневого елементу в точці закріплення тензодатчику слід визначити зовнішню поздовжню силу $\vec{N}$ (див. рисунку 2.2), що діє на пружний елемент (рисунок 2.4).

Розв'язування задачі про визначення навантаження зводиться до розгляду диференціального рівняння (2.8) із крайовими умовами (2.9) та початковими умовами (2.6) разом із додатковою умовою наступного вигляду:

$$u(x_d, t) = u_d(t), \quad (2.21)$$

де $u_d(t)$ задана функція часу, що визначена за результатами вимірювань за допомогою формули (2.20).



1 – пружний елемент; 2 – тензорезистор

Рисунок 2.4 – Схема визначення зовнішнього навантаження

З КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАТРОННОЇ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ

Одним із розповсюджених сьогодні підходів щодо виконання наукових досліджень та розв'язування практичних завдань є комп'ютерне моделювання. Такий підхід зводиться до виконання розрахунків відповідно до математичних моделей за допомогою необхідних обчислювальних методів на комп'ютері з використанням спеціального програмного забезпечення. Комп'ютерна система математичних обчислень та моделювання MatLab [11] є програмним забезпеченням, яке широко використовується сьогодні для виконання наукових та інженерних розрахунків, що обумовлено великими можливостями, передбаченими в цій системі. Середовище Simulink є складовою системи MatLab [11], що дозволяє представляти математичні моделі об'єктів у графічному вигляді сукупності з'єднаних динамічних ланок.

3.1 Моделювання механічної частини

Відповідно до п. 2.2.3 математична модель механічної частини зводиться до диференціального рівняння (2.8) із крайовими умовами (2.9) та початковими умовами (2.6), а також додаткового співвідношення (2.14).

Для розв'язування початково-крайової задачі (2.8), (2.9), (2.6) використовуємо метод прямих [12]. Відповідно до цього методу, в області $x \in [0, L]$ уздовж довжини пружного стрижневого елемента (див. рисунок 2.2) введемо сітку у вигляді $n + 2$ рівновіддалених один від одного вузлів (рисунок 3.1):

$$x_k = k\Delta x, \tag{3.1}$$

де x_k – координата вузла з номером $k = 0, 1, 2, \dots, n, n+1$;

$\Delta x = L/(n+1)$ – шаг сітки.

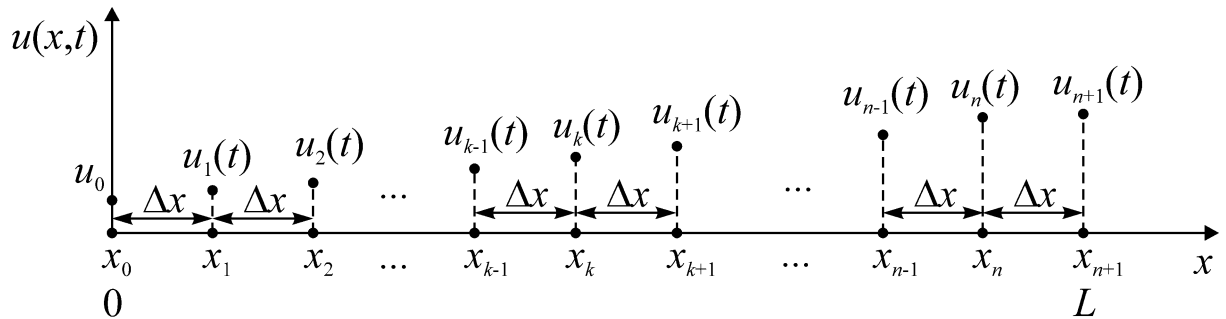


Рисунок 3.1 – Сітка в області пружного стрижневого елементу

Сітка (3.1) дозволяє звести пошук неперервної функції $u(x, t)$ переміщення до наближеного визначення її вузлових значень (рисунок 3.1):

$$u_k(t) = u(x_k, t), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n, n+1, \quad (3.2)$$

де u_k – переміщення пружного стрижневого елементу у вузлі з номером k .

Для побудови звичайних диференціальних рівнянь для наближеного визначення вузлових значень (3.2) використовуємо добре відомі [12] формули наближеного обчислення похідних сіткових функцій, які щодо розглядуваного диференціального рівняння (2.8) та граничних умов (2.9) мають такий вигляд:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_k, t) \approx \frac{u_{k-1} - 2u_k + u_{k+1}}{\Delta x^2}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_k, t) \approx \frac{3u_k - 4u_{k-1} + u_{k-2}}{2\Delta x}, \quad k = n+1. \quad (3.4)$$

Формули (3.3) та (3.4) дозволяють представити диференціальне рівняння (2.8) з крайовими умовами (2.9) у наступному вигляді:

$$u_0 = 0, \quad (3.5)$$

$$\frac{d^2 u_k}{dt^2} = c^2 \frac{u_{k-1} - 2u_k + u_{k+1}}{\Delta x^2}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3.6)$$

$$\frac{3u_{n+1} - 4u_n + u_{n-1}}{2\Delta x} = \frac{N}{EA}. \quad (3.7)$$

Співвідношення (3.7) представимо у вигляді:

$$u_{n+1} = \frac{4}{3}u_n - \frac{1}{3}u_{n-1} + \frac{2\Delta x N}{3EA}. \quad (3.8)$$

Граничні умови (3.5) та (3.7) дозволяють виключити вузлові значення u_0 та u_{n+1} із диференціальних рівнянь (3.6), і, таким чином, отримати n звичайних диференціальних рівнянь для визначення переміщення у внутрішніх точках сітки (3.1) у вигляді (2.6), (3.5), (3.8). Ці звичайні диференціальні рівняння мають бути розглянутими із відповідними початковими умовами, які одержимо із початкових умов (2.6) з урахуванням вузлових значень (3.2) у вигляді:

$$u_k(0) = 0, \quad \frac{du_k}{dt}(0) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3.9)$$

Таким чином, математична модель пружного стрижневого елементу тензорезисторної системи визначення навантажень зведена до звичайних диференціальних рівнянь (3.6), (3.5), (3.8) з початковими умовами (3.9).

Для моделювання пружного стрижневого елементу розглянемо найпростіший випадок звичайних диференціальних рівнянь (3.6), (3.5), (3.8) з початковими умовами (3.9), який відповідає $n = 1$. В цьому випадку маємо одне звичайне диференціальне рівняння (3.6), яке для $k = 1$ з урахуванням

співвідношень (3.5) та (3.8) разом із відповідними початковими умовами (3.9) прийме вигляд:

$$\frac{d^2 u_1}{dt^2} + \frac{8c^2}{3L^2} u_1 = \frac{4c^2}{3LEA} N(t), \quad u_1(0) = 0, \quad \frac{du_1}{dt}(0) = 0, \quad (3.10)$$

де враховано $\Delta x = L/2$ у випадку $k = 1$.

Для розв'язування задачі (3.10) за допомогою середовища Simulink слід розуміти про перетворення Лапласу [13]:

$$U_1(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} u_1(t) dt, \quad N(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} N(t) dt, \quad (3.11)$$

де s – комплексна змінна.

Перетворення Лапласу (3.11) дозволяє представити диференціальне рівняння (3.10) у вигляді [13]:

$$(3L^2 s^2 + 8c^2) U_1(s) = \frac{4Lc^2}{EA} N(s). \quad (3.12)$$

За рівнянням (3.12) встановлюємо передатну функцію

$$W(s) = \frac{4Lc^2}{EA(3L^2 s^2 + 8c^2)}. \quad (3.13)$$

Вигляду передатної функції (3.13) досить, щоб розв'язувати задачу (3.10) за допомогою середовища Simulink [11].

Координату (2.10) закріплення тензорезистору у випадку (3.10) обираємо наступним чином:

$$x_d = x_1, \quad x_1 = L/2. \quad (3.14)$$

З урахуванням координати (3.14), деформація (2.11) тензорезистору буде визначатися так:

$$\varepsilon_d(t) \approx \frac{u_1(t)}{l}. \quad (3.15)$$

Розглянемо моделювання за допомогою середовища Simulink механічної частини мехатронної тензорезисторної системи вимірювання навантаження для наступних вихідних даних:

$$L = 100 \text{ мм}, a = 30 \text{ мм}, b = 1 \text{ мм}, E = 200 \text{ ГПа}, \rho = 7500 \text{ кг/м}^3, \quad (3.16)$$

$$l = 10 \text{ мм}. \quad (3.17)$$

Зовнішню силу $N(t)$, що діє на пружний елемент (див. рисунок 2.2 та 2.3) приймемо у наступному вигляді:

$$N(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 1 \text{ с}, \\ 1000 \text{ Н}, & t \leq 1 \text{ с}. \end{cases} \quad (3.18)$$

Введення вихідних даних (3.16), (3.17) та визначення допоміжних величин, що входять до передаточної функції (3.13) виконаємо за допомогою скрипта MatLab (рисунок 3.2). Змінні, що будуть утворені в робочому просторі MatLab при виконанні скрипта з рисунку 3.2, можна безпосередньо використовувати в середовищі Simulink. Модель механічної частини системи, відповідна передаточній функції (3.13) та зовнішній силі (3.18) показано на рисунку 3.3, а результати моделювання – на рисунку 3.4 та 3.5.

```

MTSML_InputData.m*  +
1      % elastic element's sizes in m
2      L=0.1; a=0.03; b=0.001;
3      % elastic element's material in Pa and kg/m^3
4      E=2.0E11; ro=7500;
5      % base of the strain gage
6      l=0.01;
7      % supplementary values
8      A=a*b; c2=E/ro;

```

Рисунок 3.2 – Введення вихідних даних та визначення допоміжних величин

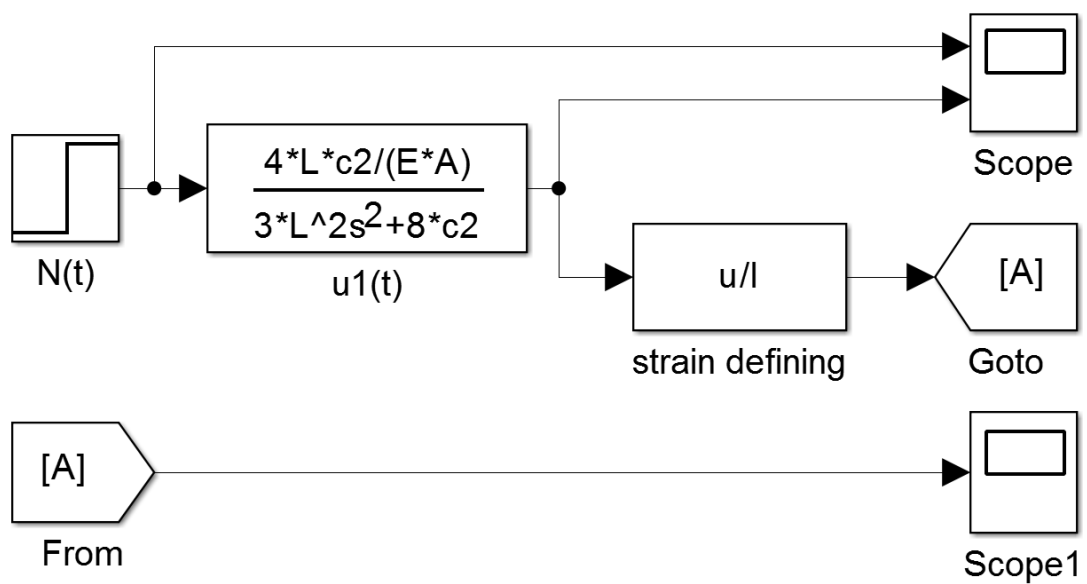


Рисунок 3.3 – Модель механічної частини

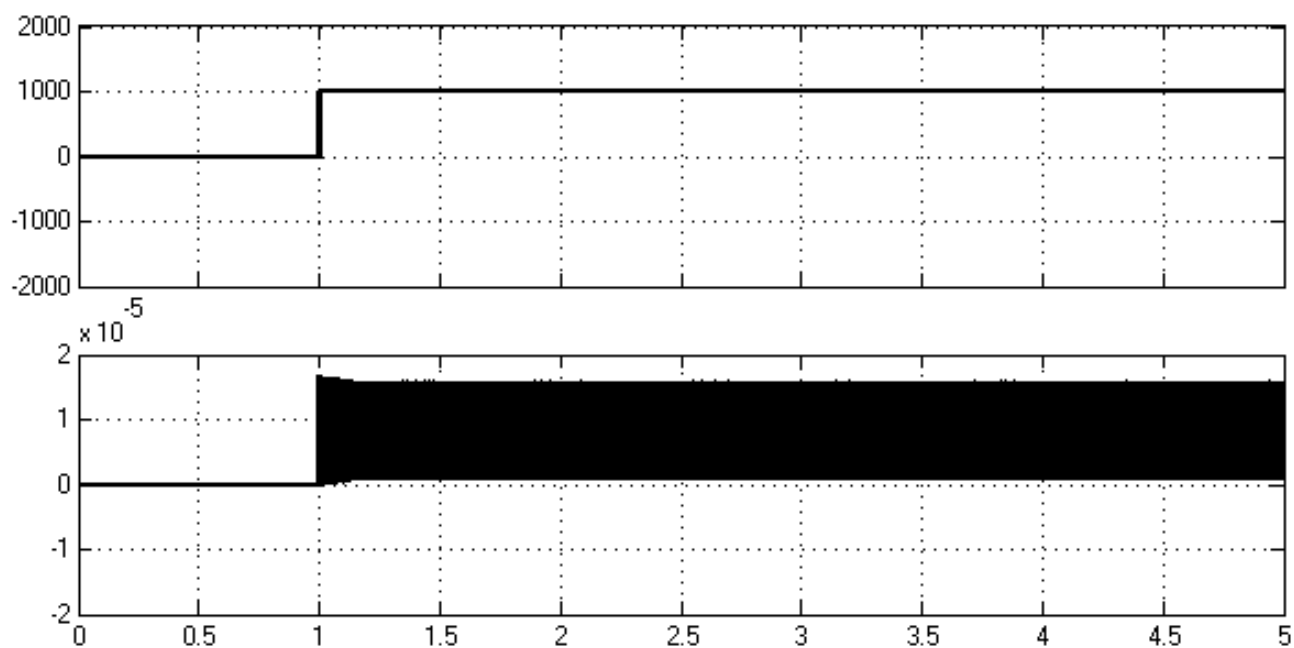


Рисунок 3.4 – Залежності від часу зовнішньої сили (вгорі)
та переміщення центральної точки пружного елемента (внизу)

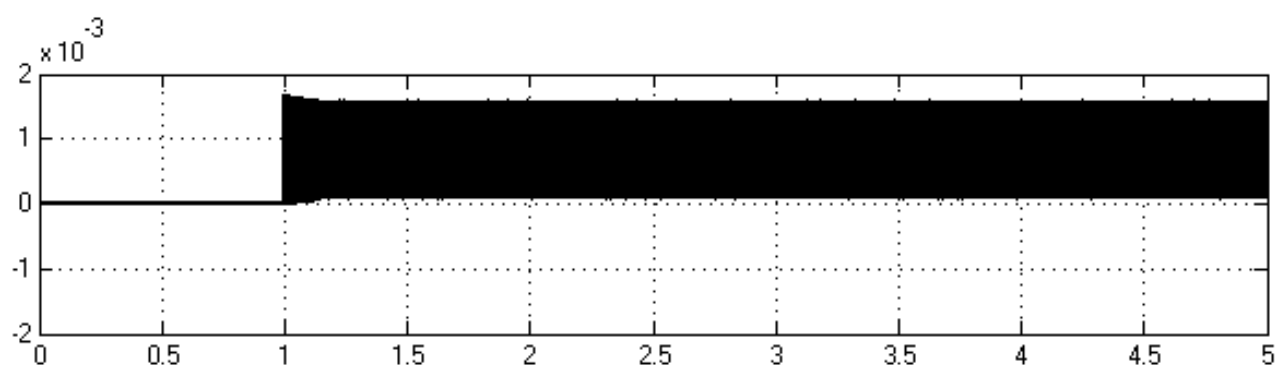


Рисунок 3.5 – Залежність від часу деформації тензорезистору

В моделі (рисунок 3.3) передбачено формування результуючого сигналу у вигляді мітки (Goto) для подальшого використання в якості вхідного сигналу моделі електронної частини. Результати розрахунків одержані у вигляді високочастотних коливань, що узгоджується із математичною моделлю (3.10).

3.2 Моделювання електронної частини

Відповідно до п.р. 2.3 електронна частина мехатронної тензорезисторної системи для вимірювання навантажень містить перетворювач вимірюного сигналу та комп'ютерну систему обробки відцифрованих даних для визначення навантаження з використанням математичної моделі пружного елементу та результатів вимірювання, як обговорювалася в п.р. 2.3.

Математична модель перетворювача електронної частини зводиться до співвідношення (2.20), що одержане для мостової схеми підключення тензорезистору (див. рисунок 2.3). Розглянемо моделювання за допомогою середовища Simulink перетворювача електронної частини мехатронної тензорезисторної системи вимірювання навантаження для наступних вихідних даних:

$$R_d = 100 \text{ Ом}, S_A = 2 \text{ Ом}, R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}, U_{дж} = 32 \text{ В}. \quad (3.19)$$

Введення вихідних даних (3.19) виконаємо за допомогою скрипта MatLab (рисунок 3.6). Змінні, що будуть утворені в робочому просторі MatLab при виконанні скрипта з рисунку 3.6, можна безпосередньо використовувати в середовищі Simulink. Модель перетворювача електронної частини системи, відповідна мостовій схемі підключення тензорезистору показана на рисунку 3.7, а результати моделювання – на рисунку 3.8. Результати моделювання свідчать, що вольтметр, який вимірює результуючу напругу, є фільтром високих частот, які присутні у вимірюваному сигналі (див. рисунок 3.5).

```

MTSML_InputData.m  x  +
9      % strain gage electrical parameters
10 -   Rd=100; SA=2;
11     % measuring transducer electrical parameters
12 -   R1=1000; R2=R1; Udcv=32;

```

Рисунок 3.6 – Введення вихідних даних електричних параметрів

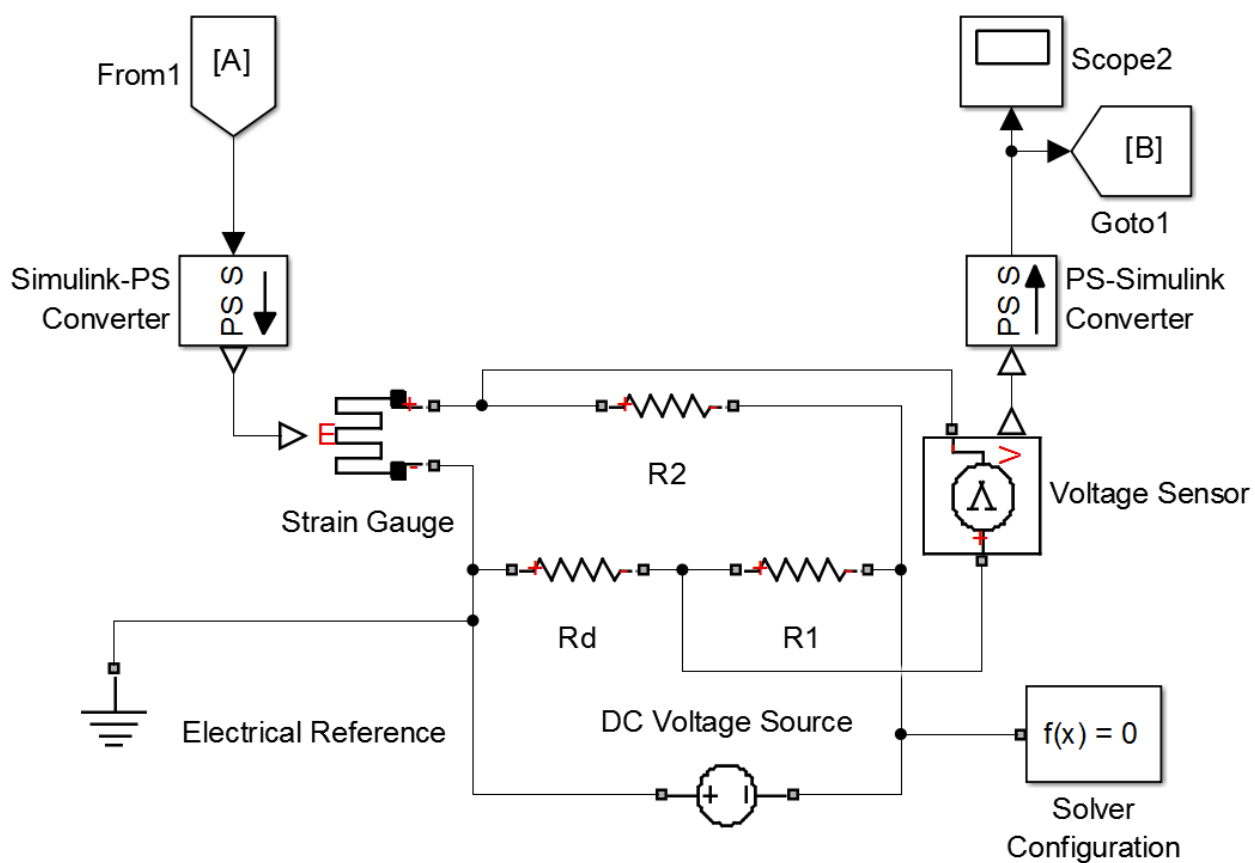


Рисунок 3.7 – Модель перетворювача електронної частини

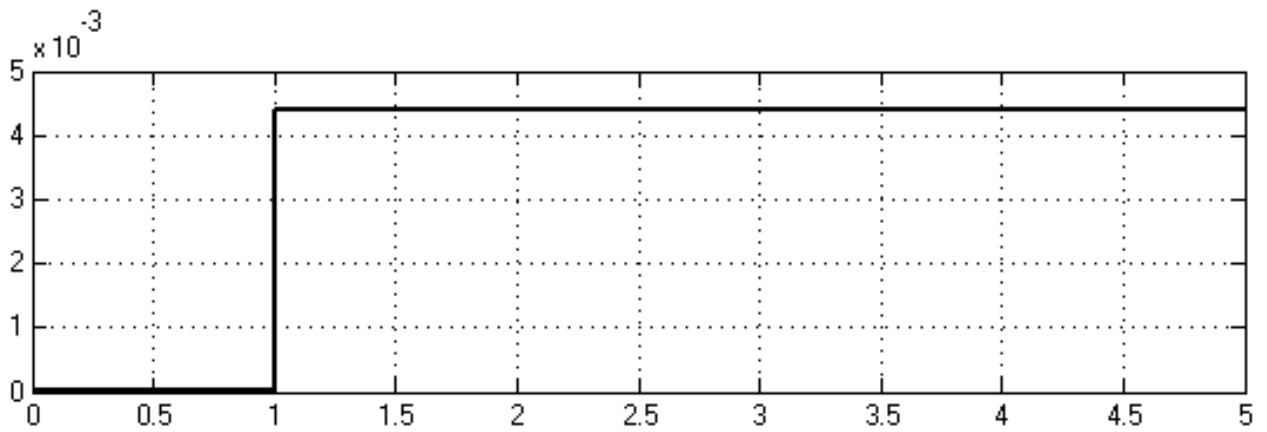


Рисунок 3.8 – Залежність від часу вимірюваног наруження,
що визначає деформацію тензорезистору

Основним призначенням розглядуваної мехатронної тензорезисторної системи є вимірювання навантаження – поздовжньої сили $N(t)$, що діє на пружний елемент (див. рисунок 2.2). Вимірювана електрична напруга (див. рисунку 3.8) дозволяє визначити переміщення пружного стрижневого елементу в точці закріплення тензорезистору за допомогою формули (2.20). У розглянутому випадку математичної моделі (3.10) пружного стрижневого елементу маємо:

$$u_1(t) = u_d(t). \quad (3.20)$$

Співвідношення (3.20) та диференціальне рівняння (3.10) дозволяє визначити зовнішнє навантаження наступним чином:

$$N(t) = \frac{2EA}{L} u_d(t) + \frac{3LEA}{4c^2} \frac{d^2 u_d(t)}{dt^2}. \quad (3.21)$$

Схема програмної компоненти мехатронної системи, що має здійснювати обробку результатів вимірювань для визначення зовнішнього навантаження наведено на рисунку 3.9. В цій схемі послідовно здійснюються розрахунок за формулою (2.20) для визначення переміщення пружного стержневого елементу

в точці закріплення тензорезистору та визначення шуканої сили за формулою (3.21).

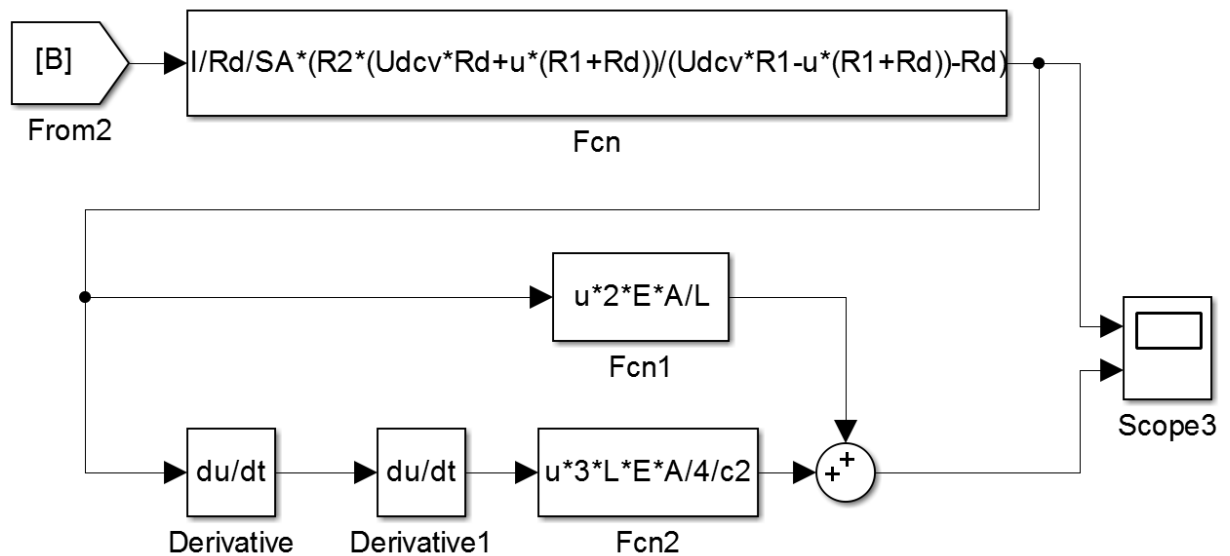


Рисунок 3.9 – Модель програмної частини мехатронної системи

Результати розрахунків переміщення пружного стержневого елементу в точці закріплення тензорезистору за формулою (2.20) та визначення шуканої сили за формулою (3.21) наведені на рисунку 3.10. Бачимо, що запропонована мехатронна тензорезисторна система дозволяє достатньо точно вимірювати зовнішнє навантаження.

Наявність моделі, що охоплює механічну та електронну частини дозволить у подальшому дослідити вплив механічних та електричних характеристик на результати вимірювання і за рахунок цього обґрунтовувати можливості щодо удосконалення такої системи.

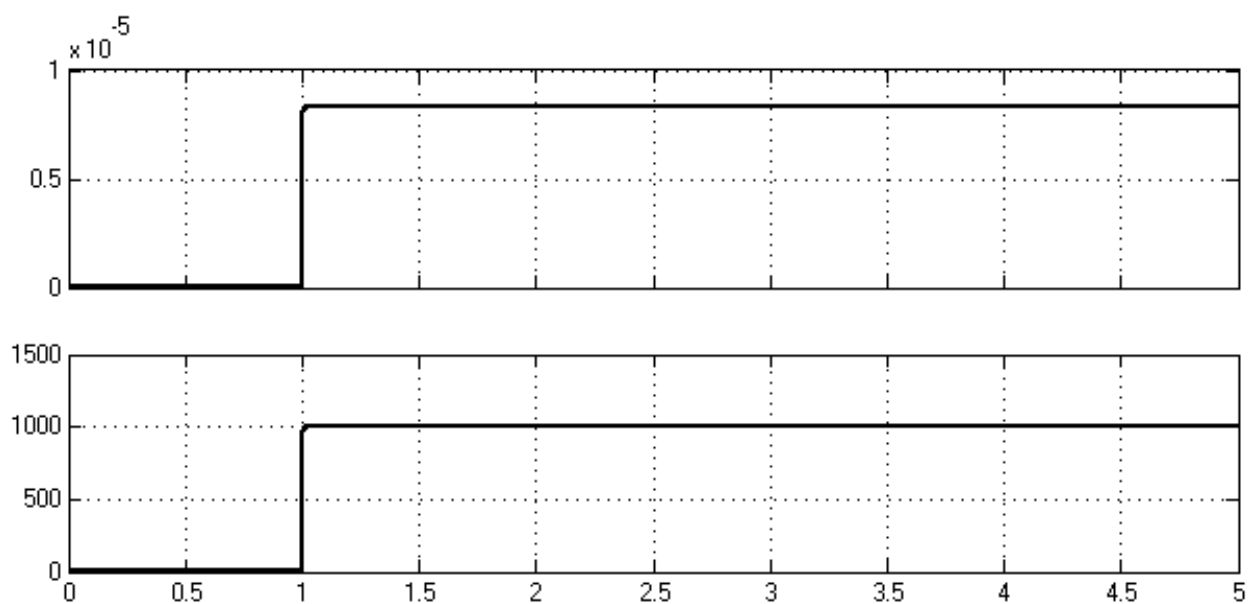


Рисунок 3.10 – Результати розрахунку за вимірюваннями переміщення пружного стрижневого елементу в точці закріплення тензодатчику (вгорі) та поздовжньої сили, що діє на пружний елемент (внизу)

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому

На робочому місці оператора ПК згідно виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці оператора ПК є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих факторів.

Організація робочого місця. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце оператора ПК, загальною площею 48 м², і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні знаходиться 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочим столом, стільцем та персональним комп'ютером, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

4.2 Промислова безпека на робочому

Живлення ПК здійснюється від трифазної чотирьох електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення.

4.3 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота оператора ПК за енерговитратами відноситься до категорії легких робіт. В таблиці 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [13].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24 °С; 40 – 60 %; до 0,1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25 °С; 40 – 60 %; 0,1 – 0,2 м/с

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціонування повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Лабораторія, де виконується розробка конструкції модуля, має наступні характеристики:

- площа приміщення 48 м² (8 м × 6 м);
- висота 3,5 м;
- кількість робочих місць – 6 шт.;

– обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м² площі та 20 м³ обсягу на одне окреме робоче місце з ПК [13]. Площа приміщення 48 м² та об'єм 168 м³, на кожне робоче місце приходить 8 м² площі і об'єм 28 м³, тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [13].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{cv} \cdot n_{cv}, \quad (4.2)$$

де W_{cv} – потужність одного світильника, Вт;

n_{cv} – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

$$W = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Питомої потужності 8,33 Вт/м² по таблиці Б.3 із [19] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов в лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення

Пожежна безпека – стан об'єкта, при яким виключається можливість пожежі, а у випадку його виникнення запобігає вплив на людей небезпечних факторів пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у виробничому приміщенні є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщенні можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості друг від друга розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори які мають масляне охолодження. У зв'язку із цим перевагу слід віддавати сухим трансформаторам.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну задачу комп'ютерного моделювання мехатронної тензорезисторної вимірювальної системи, яке дозволило одержати результати, що свідчать про можливість досліджувати у подальшому вплив механічних та електричних характеристик на зв'язані процеси в механічній та електронній частинах досліджуваної мехатронної системи. Одержані результати дозволяють зробити наступні висновки.

Тензорезисторні вимірювальні пристрої та системи є мехатронними за ознаками їхньої будови через наявність в них механічних та електронних компонентів, а також програмного забезпечення.

Математична модель пружного стрижневого елементу може бути побудована на основі рівнянь теорії пружності та представлена у вигляді початково-крайової задачі для визначення залежності від часу поля переміщення уздовж довжини елементу.

Математична модель перетворювача вимірюваних електричних сигналів може бути побудована на основі законів Кірхгофа для лінійних електричних ланцюгів та представлена у вигляді залежності опору тензорезистору від вимірюваного результуючого напруження.

Для комп'ютерного моделювання мехатронної тензорезисторної системи можна використовувати метод прямих, який дозволяє звести рівняння у частинних похідних до звичайних диференціальних рівнянь.

Одержані шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою середовища Simulink результати дослідження процесів в мехатронній тензорезисторній системі свідчать про можливість вимірювання зовнішніх навантажень з високою точністю, а також про наявність високочастотних механічних коливань пружного елементу, детальне дослідження яких може вимагати використання спеціальної техніки високочастотних радіовимірювань.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Полішук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарева, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 66 с.
3. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: довід. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – Київ, 2018. – 320 с.
4. Northrop R.B. Introduction to instrumentation and measurements / R.B. Northrop. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 898 p.
5. Huan Huang, Natalie Baddour, Ming Liang, A method for tachometer-free and resampling-free bearing fault diagnostics under time-varying speed conditions, Measurement, Volume 134, 2019, Pages 101-117, ISSN 0263-2241.
6. de Silva C.W. Mechatronics. A Foundation Course / C.W. de Silva. – Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. – 867 p.
7. Yang Kang, Zizhen Qiu, Qiming Fan, Hao Zhang, Zhanqun Shi, Fengshou Gu, Tachless estimation of time-varying dynamic coefficients of journal bearing based on the square-root cubature Kalman filter, Measurement, Volume 203, 2022, 111956, ISSN 0263-2241.

8. Божидарник В.В., Сулим Г.Т. Елементи теорії пластичності та міцності. Навч. посібник для студ. вузів, які навч. за спец. "Механіка", "Фізика твердого тіла". – Т.2. – Львів: Світ, 1999. – 417 с.
9. Божидарник В. В., Сулим Г.Т. Елементи теорії пружності. – Львів: Світ, 1994. – 560 с.
10. Можаровський М.С. Теорія пружності, пластичності і повзучості. – К.: Вища школа, 2002. – 308 с.
11. D Xue, Fen Pan, MATLAB and Simulink in Action, Tribology International, Volume 144, 2020, 106125, ISSN 0301-679X.
12. Dongdong Liu, Lingli Cui, Weidong Cheng, Fault diagnosis of wind turbines under nonstationary conditions based on a novel tacho-less generalized demodulation, Renewable Energy, Volume 206, 2023, Pages 645-657, ISSN 0960-1481.
13. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стищенко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.