

Магістерська дисертація

на тему: Комп'ютерно-інтегрована вимірювальна система для дослідження
імпульсних процесів

Київ – 2021 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудування

Приладобудування

«На правах рукопису»
УДК 681.269

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__»_____ 2021 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-науковою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології
проектування приладів»**

**зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Комп'ютерно-інтегрована вимірювальна система для
дослідження імпульсних процесів»**

Виконав :

студент II курсу, групи ПМ-91мн

Криницький Олександр Васильович _____

Керівник:

Старший викладач Зайцев Віктор Миколайович _____

Консультант з розділу Розробка СТАРТАП-проекту:

д. е. н., доцент, Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

Технічний директор АТЗТ «УКРВЕСКОМ» _____ Петренко І.В.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____ Криницький О.В.

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудування

Приладобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-наукова програма «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Криницький Олександр Васильович

1. Тема дисертації «Комп'ютерно-інтегрована вимірювальна система для дослідження імпульсних процесів», науковий керівник дисертації старший викладач Зайцев Віктор Миколайович, затверджені наказом по університету від «22» 03 2021 р. № 871-с
2. Термін подання студентом дисертації 12.05.2021 р.
3. Об'єкт дослідження Комп'ютерно-інтегрована вимірювальна система для дослідження силових імпульсних навантажень військових шоломів
4. Предмет дослідження Обґрунтування метрологічних параметрів вимірювальних перетворювачів імпульсних силових навантажень для забезпечення вимог сучасних стандартів до сертифікаційних випробовувань військових шоломів
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналіз вимог сучасних нормативно-технічних документів до випробувань військових шоломів на імпульсні силові навантаження; 2. Обґрунтування необхідності дослідження на основі критичного огляду аналогів існуючих вимірювальних систем сертифікації шоломів; 3. Розробка математичних моделей динамічних характеристик тензорезисторних силовимірювальних перетворювачів з пружними елементами балочного, стрижневого та мембранного типів; 4. Експериментальні дослідження силовимірювальних перетворювачів;

5. Розробка стартап проекту; 6. Висновки.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 1. Презентаційний лист 1 арк. ф. А1; 2. Лист аналогів систем визначення імпульсних впливів на шоломи 1 арк. ф. А1; 3. Збіркові кресленники силовимірювальних перетворювачів з пружними елементами балочного, стрижневого та мембранного типів 3 арк. ф. А1; 4. Лист математичних моделей силовимірювальних перетворювачів 1 арк. ф. А1; 5. Листи результатів експериментальних досліджень силовимірювальних перетворювачів з балочними, стрижневими та мембранними пружними елементами 3 арк. ф. А1. А1.

7. Орієнтовний перелік публікацій 1) Установка для дослідження характеристик шоломів; 2) Математичні моделі силовимірювальних перетворювачів в динамічних режимах.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проекту	Бояринова К. О., доцент, доктор економічних наук		

9. Дата видачі завдання 03.02.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Ознайомлення з завданням	03.02.2021	
2	Огляд матеріалів за темою дисертації	04-02.2021-19.03.2021	
3	Розробка структурної та принципової схеми	20.03.2021-31.03.2021	
4	Розробка математичної моделі	01.04.2021-20.04.2021	
5	Розробка стартап-проекту	20.04.2021-01.05.2021	
6	Оформлення текстової та графічної частини	02.05.2021-07.05.2021	
7	Представлення МД на перевірку науковому керівнику	08.05.2021-10.05.2021	
8	Передача матеріалів МД на перевірку виявлення збігів/схожості текстів сервісом Unichек	10.05.2021 - 12.05.2021	
9	Представити МД до екзаменаційної комісії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»	12.05.2021	

Студент

Олександр КРИНИЦЬКИЙ

Науковий керівник

Віктор ЗАЙЦЕВ

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію	2	
2	A4	МД ПМ9101.000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	98	
3	A1	МД ПМ9101.001.001	Презентаційний аркуш	1	
4	A1	МД ПМ9101.002.000	Огляд аналогів	1	
5	A1	МД ПМ9101.003.000	Математична модель власних частот тензорезисторних датчиків сили	1	
6	A1	МД ПМ9101.004.000	Динамічні характеристики тензорезисторних датчиків сили (графічні залежності)	1	
7	A1	МД ПМ9101.005.000	Динамічні характеристики тензорезисторного датчика сили стрижневого типу (графічні залежності)	1	
8	A1	МД ПМ9101.006.000	Динамічні характеристики тензорезисторного датчика сили мембранного типу (графічні залежності)	1	
9	A1	МД ПМ9101.007.(000...001)	Креслення датчика стрижневого типу	1	
10	A1	МД ПМ9101.008.(000...001)	Креслення датчика балочного типу	1	
11	A1	МД ПМ9101.009.(000...001)	Креслення датчика мембранного типу	1	
Загальна кількість графічних документів - 9 арк.ф. А1					

				МД.ВМД		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Криницький О.В			Відомість магістерської дисертації	Лист	Листів
Керівн.	Зайцев В.М.				1	1
Конс.					КПІ імені Ігоря Сікорського каф. ПБ гр. ПМ - 91мн	
Н.контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.					

РЕФЕРАТ

Актуальність

Одне з найбільш значущих завдань оборонної промисловості з підвищенням захисних можливостей від різних навантажувальних станів зосереджена на бойовому шоломі. Під час різних конфліктів, в яких армія України брала участь з 1992 року, спостерігалась велика кількість черепно-мозкових травм.

В бойових ситуаціях діяльність солдата передбачає високий силовий вплив на голову. Найбільш типовими видами травм при падіннях, зіткненнях, невдалих стрибків з парашутом або навіть дорожньо-транспортних пригодах є незначні черепно-мозкові травми при яких найбільш поширеними наслідками є дифузні травми, струс і удари головного мозку.

Об'єктом дослідження даної дисертації є стенд для випробування військових шоломів на поглинання ударів згідно стандартів НАТО.

Предметом дослідження являється розробка математичної моделі тензорезисторних датчиків сили з чутливим елементом стрижневого, мембранного та балочного типів, експериментальні дослідження датчиків на показники власних частот при імпульсних навантаженнях та експериментальні дослідження на ударостійкість шолом з використанням високоточної вимірювальної системи.

Робота складається із магістерської дисертації, яка містить вступ, 4 основних розділи, список використаних джерел, 45 малюнків, 25 таблиць. Загальний обсяг складає 98 сторінок. Та графічної частини, що містить 1 аркуш ф.А1 теоретичних моделей, 3 аркуша ф. А1 графічних залежностей, 1 аркуш ф. А1 аналогів стендів, 3 аркуша ф. А1 креслеників та презентаційний лист ф. А1. Загальний обсяг графічної частини складає 9 аркушів формату А1.

Ключові слова: тензорезисторний датчик, шолом, ударостійкість, власна частота.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Криницький				Комп'ютерно-інтегрована система для дослідження імпульсних процесів	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.								
Реценз.						ПБФ, КПІ		
Н. Контр.								
Затверд.	Зайцев							

Summary

Actual continuity

One of the most significant tasks of the defense industry with increasing protective capabilities against various load conditions is focused on the combat helmet. During various conflicts in which the Ukrainian army has participated since 1992, a large number of traumatic brain injuries were observed.

In combat situations, the activity of a soldier involves a high force impact on the head. The most common types of injuries in Falls, collisions, unsuccessful skydives, or even road accidents are minor traumatic brain injuries in which the most common consequences are diffuse injuries, concussions, and bruises to the brain.

The object of research of this dissertation is a stand for testing military helmets for shock absorption in accordance with NATO standards.

The subject of research is the development of a mathematical model of strain gauges with a sensitive element of Rod, membrane and beam types, experimental studies of sensors for natural frequency indicators under pulsed loads and experimental studies on the impact resistance of helmets using a high-precision measuring system.

The work consists of a master's thesis, which contains an introduction, 4 main sections, list of sources used, 45 Figures, 25 tables. The total volume is 98 pages. And the graphic part containing 1 sheet f. A1 of theoretical models, 3 sheets f. A1 of graphical dependencies, 1 sheet f. A1 of stand analogues, 3 sheets f. A1 of drawings and a presentation sheet f. A1. The total volume of the graphic part is 9 sheets of A1 format.

Keywords: strain gauge, helmet, impact resistance, own frequency.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1. ОГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ПРИЛАДІВ ТА КОМПОНЕНТІВ	13
1.1 Огляд аналогів.....	13
1.1.1 Hototech HT-6011-C	13
1.1.2 ZONHOW DZ-800	15
1.1.3 Gaonix GX-7001	17
1.2. Огляд тензорезисторних датчиків сили	18
1.2.1 НВМ С16 40т	18
1.2.2 НВМ RTN С3 2,2т	22
1.2.3 НВМ НLC В1С3 1,1т.....	24
1.3. Огляд основних вимог для тестування військових шоломів на ударостійкість від тупого удару	25
1.4. Висновки до розділу 1.....	29
2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	30
2.1 Розрахунок тензорезисторних датчиків сили	30
2.1.1 Розрахунок балкового тензорезисторного датчика сили	30
2.1.2 Розрахунок стрижневого тензорезисторного датчика сили	36
2.1.3 Розрахунок мембранного тензорезисторного датчика сили	46
2.2 Висновки до розділу 2.....	53
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	54
3.1 Експериментальне дослідження №1	54
3.2 Експериментальне дослідження №2	63
3.3 Висновки до розділу 3.....	66
4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «LoadHel».....	68
4.1 Опис ідеї проекту «LoadHel».....	68
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту «LoadHel».....	71
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту «LoadHel»	72

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту «LoadHel».....	84
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту «LoadHel».....	88
4.6 Висновки до розділу 4.....	93
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97
ДОДАТКИ.....	98

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЧМТ- черепно мозкова травма

ω_0 — частота власних коливань

h — висота

l — довжина

b — товщина

E — модуль пружності

ρ — щільність матеріалу

m — маса

M_6 — маса балки

M_c — маса стержня

S — площа поперечного перерізу

D — діаметр

μ — коефіцієнт Пуассона

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Одне з найбільш значущих завдань оборонної промисловості пов'язаних з підвищенням захисних можливостей військових від різних навантажувальних впливів зосереджена на бойовому шоломі. Під час конфліктів, в яких армія України брала участь з 1992 року, спостерігалась велика кількість черепно мозкова травма (ЧМТ).

Діяльність солдата передбачає високий вплив на голову в бойових ситуаціях, де легко постраждати від падінь, зіткнень, дорожньо-транспортних пригод або невдалих стрибків з парашутом, і у всіх випадках найбільш типовим типом травм є незначні ЧМТ, при яких найбільш поширеними наслідками є дифузні травми, струс і удари головного мозку.

Незалежно від умов експлуатації, навіть відносно легкі удари головою, які не загрожують життю, можуть викликати короточасне погіршення від запаморочення, головного болю, втрати пам'яті, нездатність зосередитися і роздратування. Враховуючи необхідність швидкості, агресивності та швидкості реагування на полі бою, ці симптоми набувають військового значення, незалежно від того, наскільки вони тимчасові, серйозно ставлячи під загрозу живучість солдатів і успіх місії підрозділу. Існує очевидна необхідність захистити окремого солдата і знизити рівень травматизму до мінімуму, перш за все, щоб зберегти боєздатність бойової одиниці для бою, але також і тому, що високий рівень травматизму матиме згубний вплив на моральний дух.

Однак нетривіальним завданням є підвищення захисних характеристик бойового шолома без втрати реальної мети використання композитних матеріалів, що полягає в зниженні ваги. Бойові шоломи повинні відповідати балістичним стандартам, таким як STANAG 2920 [5], які впроваджено в національні нормативні документи. Згідно цих стандартів шоломи тестуються

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при високих швидкостях удару від різних боєприпасів, а також від вибухових навантажень.

Однак при проектуванні та серійному виготовленні шоломів майже відсутні дослідження поведінки бойового шолома при низькошвидкісному навантаженні. Ці дослідження більш поширені в мотоциклетній або велосипедній практиці, оскільки шоломи повинні відповідати вимогам, встановленим ECE R22.05 чи EN 1078 [6, 7] стандартами відповідно. Для дослідження ефективності бойових шоломів при ударах з низькою швидкістю і його вплив на військових необхідна розробка спеціальних технічних засобів. Тому метою мого дослідження є розробка спеціалізованої силовимірювальної системи та стенду створення імпульсних навантажень для перевірки бойових шоломів на тупі ударах.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ПРИЛАДІВ ТА КОМПОНЕНТІВ

1.1. Огляд аналогів стенду для випробування шоломів

1.1.1 Hototech HT-6011-C

Це обладнання для випробувань на поглинання енергії удару захисного шолома відповідно до стандарту EN397 (рис.1.1.1.1).



Рис 1.1.1.1. Стенд Hototech HT-6011-C для випробувань на поглинання удару захисного шолома

Сила удару вимірюється прямим вимірюванням максимальної сили, що передається на жорстко встановлену форму голови, на якій встановлений

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шолом, тим часом може задовольнити тест на проникнення при зміні ударника.

Дана установка поставляється виробником повністю протестованою. Єдиний недолік це те, що даний стенд доставляється клієнту в розкладеному вигляді. Через це покупцеві доведеться ще складати та налаштовувати даний стенд для експлуатації.

Принцип роботи

За допомогою стаціонарного комп'ютера можна налаштувати відповідно висоту падіння ударника на форму голови, проблема виникає тільки в тому, що нульова точка, яка автоматично прописана в програмі, не варіюється, а для доцільно правильного проведення тесту потрібно мати точну висоту падіння. Зміщення нуля відбувається в тих випадках, коли на форму голови одягаються різні шоломи різними посадками, що і викликає такий недостаток. Після встановлення ударника на відповідно висоту, а по стандарту це 5м, запускається система запису даних з датчика і ударник здійснює вільне падіння на шолом. Завдяки зручному інтерфейсу, на екран виводиться одразу всі необхідні результати.

Таблиця 1.1.1.1 Технічні дані стенду Hototech НТ-6011-С

Стандарт тестування	Згідно стандарту EN397
Маса ударника	5кг±0,01кг
Форма ударника	Напівсферичний
Діаметр ударника	96мм
Максимальна висота удару	2500мм
Максимальне навантаження на датчик	50000 Н
Діапазон частотної характеристики	5000 Гц

Програмне забезпечення	НТ-6011-С спеціальне програмне забезпечення для управління тестування
Напруга	220В, 50Гц

1.1.2 ZONHOW DZ-800

Ця машина спеціально перевіряє ударостійкість протипожежних шоломів, а також може виконувати тест на антипроникаючі властивості. Визначення характеристик удароміцності шоломів (Рис.1.1.2.1)



Рис.1.1.2.1 Стенд ZONHOW DZ-800 для випробувань на поглинання удару захисного шолома

Виробники даної установки оснастили стенд автоматичною системою наведення ударника для того щоб забезпечити точний удар по зоні маківки шолома. Також висота ударника з якого виконується тест можна регулювати.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також як ми можемо бачити на рис, у стенда ZONHOW DZ-800 встановлена захисна сітка, що захищає людину, що проводить дослід від можливих ушкоджень. Адже при неконтрольованому падінні ударника він може відскочити від шолома та попасти по людині, що стоїть біля стенду, а також покриття підлоги.

Принцип роботи

Для визначення тесту на ударостійкість шолома спочатку потрібно зафіксувати модель голови на підставці, на модель голови закріпити шолом, потім виставити сталевий ударник 5 кг на висоту 1м. Після запуску тесту ударник під дією сили тяжіння здійснить вплив на шолом, а датчик сили запише результати в систему. Після тесту можна переглянути максимальну силу удару ударника для визначення відповідності шолома до загальних стандартів.

В даному стенді датчиком сили виступає плоский тензодатчик Wallop T121 з максимально можливим навантаження 2т. Датчик призначений для вимірювання навантажень при стисненні. Дана модель зі збільшеним радіусом для зниження можливості зміщення навантаження від центру.

Таблиця 1.1.2.1 Технічні дані стенду ZONHOW DZ-800

Стандарт тестування	Згідно стандарту ISO 3873
Маса ударника	5кг±0,01кг
Форма ударника	Напівсферичний
Діаметр ударника	48мм
Матеріал ударника	СТ 40Х
Максимальна висота удару	1000мм
Максимальне навантаження на датчик	2 т

Діапазон частотної характеристики	5000 Гц
Напруга	220В, 50Гц

1.1.3 Gaonix GX-7001

Gaonix GX-7001 стенд для випробування захисного шолома на удар (Рис 1.1.3.1)



Рис. 1.1.3.1. Стенд Gaonix GX-7001 для випробувань на поглинання удару захисного шолома

Унікальність даної моделі в простоті калібрування. Також стенд оснащений автоматичною системою наведення і електричним підйомним пристроєм з фотоелектричним позиціонуючим пристроєм, для забезпечення максимально точної висоти ударника над шоломом.

Один з недоліків даного стенда – це виведення результатів тільки на світлодіодний цифровий дисплей і не можливість при цьому здійснити запис даних на віддалений комп'ютер.

Принцип роботи такий же як в попередніх аналогах, що відповідає стандарту ISO 3873.

Таблиця 1.1.2.1 Технічні дані стенду Gaonix GX-7001

Стандарт тестування	Згідно стандарту ISO 3873
Маса ударника	5кг±0,01кг
Форма ударника	Напівсферичний
Діаметр ударника	96мм
Матеріал ударника	СТ 40Х
Максимальна висота удару	1000мм
Максимальне навантаження на датчик	2 т
Точність датчика	±0,02%
Діапазон частотної характеристики	5000 Гц
Напруга	220В, 50Гц, 10А
Вага стенду	135 кг
Розміри	860х430х800 мм

1.2. Огляд тензорезисторних датчиків сили

1.2.1 НВМ С16 40т

Самоустановлювальний ваговимірювальний датчик НВМ С16 (Рис .1.2.1.1) стрижневого (колонного) типу від німецького виробника тензометричних пристроїв призначений для установки в промисловому ваговому обладнанні з метою забезпечення точного вимірювання навантаження. Виріб виготовляється з високоякісної нержавіючої сталі з використанням сучасної технологічної лазерного зварювання.



Рис. 1.2.1.1. Ваговимірювальний датчик НВМ С16 стрижневого типу

Застосування і принцип роботи тензодатчика НВМ С16:

Завдяки надійності в роботі і високим метрологічним параметрам датчик С16 користується популярністю і характеризується широким спектром застосування. Він використовується багатьма виробниками в конструкції ваговимірювальних систем різного призначення. Також застосовується для модернізації застарілих ваг з метою підвищення точності вимірювань, функціональності і надійності в роботі. Датчик встановлюється:

- в автомобільних і вагонних вагах;
- в бункерні за оптовою ціною;
- на випробувальних стендах;
- в різному контрольно-вимірювальному обладнанні.

Виріб С16 по вектору вимірюваної сили є датчиком стиснення. Конструкцією передбачений спеціальний стрижень, розміри якого

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

під прикладанням навантаженням змінюються. Принцип роботи пристрою полягає в фіксації пружної деформації цього елемента. Чутливі елементи вимірюють величину стиснення і перетворюють отримане значення в електричний сигнал.

Конструктивні особливості та параметри

Датчик С16 відрізняється уніфікацією. Його габарити, посадочні місця і тип кріплення відповідає тензометричним вимогам, тому надається можливість встановлювати деталь в різні моделі вагового обладнання необхідної комплектації. Оболонка кабелю, що входить в комплект, виготовлена із силікону і термопластичного еластомеру, також може застосовуватися металева обплітка. Для установки на особливих об'єктах пристрій виготовляється у вибухобезпечному виконанні. Залежно від навантаження застосовуються різні варіанти монтажу.

За електричними параметрами, а також монтажно-габаритними розмірами пристрій С16 взаємозамінний на аналогічні вироби. При необхідності виконати його ремонт можна без проблем тимчасово встановити прилад іншої моделі. При монтажі аналога не доведеться перебудовувати конструкцію вагового обладнання. Датчик автомобільних ваг характеризується наступними параметрами:

- клас точності по OIML С3;
- номінальна чутливість становить 2,0 мВ /В;
- вхідний і вихідний опір дорівнює 700 ± 20 Ом;
- діапазон термокомпенсації від мінус 10°C до плюс 40°C;
- забезпечується функціонування в широкому температурному діапазоні від мінус 30°C до плюс 70°C;
- живлення здійснюється напругою 5-12 В, при цьому максимальне допустиме значення напруги живлення становить 18 В, передбачений захист від перенапруги;

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- граничне навантаження 150 FS;
- виріб відповідає нормам EMC EN 45501;
- вимірювальний хід стержня від 0,65 мм до 1,57 мм;
- розрахований на точні вимірювання при номінальному навантаженні від 20 до 100 тонн;
- вага з кабелем в комплекті становить до 8 кг.

Температура, в якій забезпечується зберігання виробу з дотриманням його параметрів, становить мінус 50°C - плюс 85°C. Число повірочних інтервалів, визначених виробником, так само 3000. Клас захисту оболонки IP69, що відповідає повній ізоляції від проникнення пилу і вологи.

Переваги ваговимірювального датчика

Виріб оптимізовано для здійснення паралельного підключення з можливістю кутової корекції. Затребуваність пристрою обумовлена його позитивними особливостями:

- простота конструкції і надійність в роботі;
- тривалий термін експлуатації;
- висока точність вимірювань;
- проста і швидка установка ;
- хороша стійкість;
- збільшена відстань від ваг до приладу, що становить до 1200 м.

Перетворювач сигналу монтується в корпусі пристрою і обладнаний інтерфейсом RS485 . Вплив зовнішніх перешкод нейтралізується цифровими фільтрами. Ваговимірювальний датчик С16 поставляється із спеціальним програмним забезпеченням для роботи з результатами вимірів. Крім того, на програмному рівні відмовляє в доступі до налаштувань метрологічних параметрів вагового обладнання.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2.2 HBM RTN C3 2,2t

Ваговий датчик RTN C3 2,2т (Рис .1.2.2.1.) як вимірювальний перетворювач перетворює механічну вхідну величину сили пропорційно в електронну вихідну величину напруги.



Рис. Рис .1.2.2.1. Ваговимірювальний датчик HBM RTN C3 2,2т
мемранного типу

Постійна оптимізація вагових датчиків надає користувачеві особливі переваги:

- гранично малі розміри спрощують застосування майже при всіх завданнях зважування ;
- завдяки міцній конструкції немає ніяких проблем ні з транспортуванням, ні з монтажем та експлуатацією, навіть при дуже суворих умовах навколишнього середовища (стороні впливи, температура).

Класичні області застосування:

- Автомобільні ваги ;
- Вагонні ваги;
- Зважування ємностей і бункерів;
- Дозатори;
- Кранові ваги;

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Монорельсові ваги;
- Нестандартні ваги;
- Платформенні ваги;
- Реконструкція механічних ваг.

Конструкція:

- герметичність завдяки лазерній сварці (IP68) ;
- надійний захист від корозії завдяки електролітичному поліруванню сталі, що застосовується;
- всі електричні компоненти знаходяться всередині вагового датчика і тому оптимально захищені ;
- високоякісний та міцний сполучний кабель вводиться радіально у ваговий датчик;
- у співпраці з комплектами адаптерів вагових датчиків RTN сумісний із системами більш старого виконання.

Функціонування:

- висока чутливість вимірювань;
- велика відтворюваність ;
- хороша тривалість стабільності та тим самим високої точності ;
- цілком незначна дія поперечних сил на вимірювальне значення ;
- висока функціональна надійність навіть при часто неминучих ударних навантаженнях, силах реакцій зв'язку та електричних зворотних впливів;
- вбудований захист від перенапряжень;
- ввід/вивід сили без впливу моментів внаслідок прямого вертикального потоку сили.

Датчик RTN C3 характеризується наступними параметрами:

- клас точності по OIML C3;

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- номінальна чутливість становить 2 ,85 мВ/В;
- вхідний і вихідний опір дорівнює 4350 ± 100 Ом;
- діапазон термокомпенсації від мінус 10°C до плюс 40°C;
- забезпечується функціонування в широкому температурному діапазоні від мінус 30°C до плюс 80°C ;
- живлення здійснюється напругою 5-30 В, при цьому максимальне допустиме значення напруги живлення становить 60 В , передбачений захист від перенапруги;
- виріб відповідає нормам EMC EN 45501.

1.2.3 HBM HLC B1C3 1,1m

Балковий тензодатчик ваги HLC B1C3 (Рис.1.2.3.1.) придатний для комерційного застосування. Балочний тип датчиків ідеально підходять для використання з будь-якими типами цистерн, дозаторів або платформних ваг, а також для рівня контролю.



Рис. 1.2.3.1. Ваговимірювальний датчик HLC B1C3 1,1т балочного типу

Переваги ваговимірювального датчика:

- надійна 6-дротова конфігурація для компенсації змін опору
- оптимізовано для паралельного підключення декількох тензодатчиків
- тензодатчик з нержавіючої сталі

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

- надзвичайно стійкий до хімічних речовин завдяки додатковій оболонці кабелю TPE-0
- тестування на електромагнітну сумісність згідно з IEC EN 45501: 2015
- Ступінь захисту IP68 / IP69K забезпечує довговічність при постійній вологості та в умовах високого тиску

Датчик RTN C3 характеризується наступними параметрами :

- клас точності по OIML C3;
- номінальна чутливість становить 1,94 мВ/В;
- вхідний і вихідний опір дорівнює 350 Ом;
- діапазон термокомпенсації від мінус 30°C до плюс 40°C;
- живлення здійснюється напругою 5-15 В, при цьому максимальне допустиме значення напруги живлення становить 18 В, передбачений захист від перенапруги;
- виріб відповідає нормам EMC EN 4550.

1.3 Огляд основних вимог для тестування військових шоломів на ударостійкість від тупого удару

Захист від тупого удару фокусується на відносно низькоенергетичних зіткненнях голови в шоломі від таких інцидентів, як дорожньо-транспортні пригоди, падіння, навчальні та експлуатаційні впливу. У літературі вони зазвичай згадуються як "ударні" або "тупі" удари.

В даний час існує два основних методів перевірки захисту шолома від тупого удару:

- Шолом може бути скинутий з висоти за допомогою керованого вільного падіння на ударну поверхню, що представляти собою як падіння;
- Ковадло може бути скинуте на шолом в керованому вільному падінні, щоб представити шолом, вражений іншим об'єктом .

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно до стандартів STANAG 2920 форма ударника варіюється в залежності від різних методів випробувань, але основні види такі: плоска, бордюрна і напівсферична (Рис. 1.3.1.1).

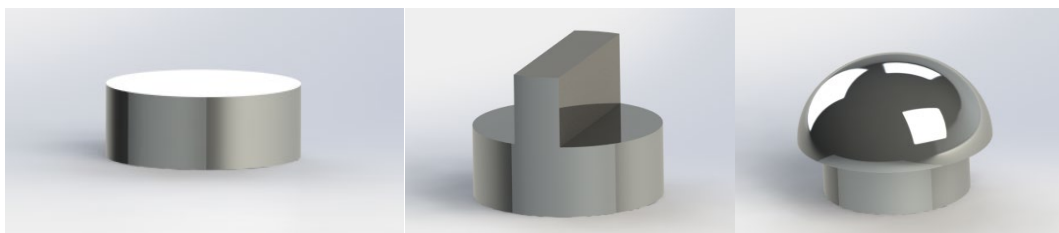


Рис. 1.3.1.1 . Типи ударників для випробувань на ударну в'язкість при падінні

Ударостійкість шолома вимірюється шляхом прямого вимірювання максимальної сили, що передається на жорстко встановлену форму голови, на якій встановлений шолом.

Підставка пристрою має бути монолітною і досить великою, щоб забезпечити повний опір впливу удару. Вона повинна мати масу не менше 500 кг і повинна бути належним чином встановлена для запобігання зворотної хвилі стиснення.

Форма голови повинна бути жорстко встановлена у вертикальному положенні на підставці.

Ударник, що має масу $5,0 \pm 0,1$ кг і напівсферичну ударну грань радіусом $50 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, повинен розташовуватися над формою голови таким чином, щоб його вісь збігалася з вертикальною віссю форми голови і щоб він міг падати як у вільному, так і в направленому падінні. При використанні керованого падіння швидкість ударника, виміряна на відстані не більше 60 мм до удару, повинна знаходитися в межах 0,5% від тієї, яка була б отримана при вільному падінні.

Сила удару повинна вимірюватися неінерційним датчиком сили, міцно прикріпленим до основи. Він повинен розташовуватися таким чином, щоб

його вісь була співвісна траєкторії руху бойка. Датчик сили повинен витримувати зусилля до 40 кН без пошкоджень.

Вимірювальна система, включаючи форму голови і її кріплення, повинна мати частотну характеристику відповідно до класу частоти каналу (CFC) 600 стандарту ISO 6487:2002.

Ударник повинен падати на центр коронки корпусу шолома з висоти 1м, вимірної від точки удару по шолому до нижньої сторони ударника. З урахуванням висоти падіння та маси ударника енергія удару номінально дорівнює 49 Дж.

Відповідно вище перелічених умов спроектуємо установку, яка буде відповідати стандартам.

На Рис .1.3.1.2. представлена схема стенду для випробування на амортизацію військових шоломів. Він розташований на монолітному бетонному фундаменті (1), який забезпечує повне опір впливу удару і встановлюється таким чином, щоб не було зворотної хвилі стиснення.

Спрямоване падіння ударника здійснюється на двох паралельних напрямних стояках (4).

Ударник закріплюється у верхнє положення і в кінці фази піднесення ударник блокується в електромагнітному спусковому пристрої (2).

Розташування пристрою регулюється і визначає відстань вільного падіння бойка. Вищезазначене рішення дозволяє зафіксувати відстань вільного падіння рівним 1000 ± 5 мм, незалежно від кута нахилу форми голови (6).

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

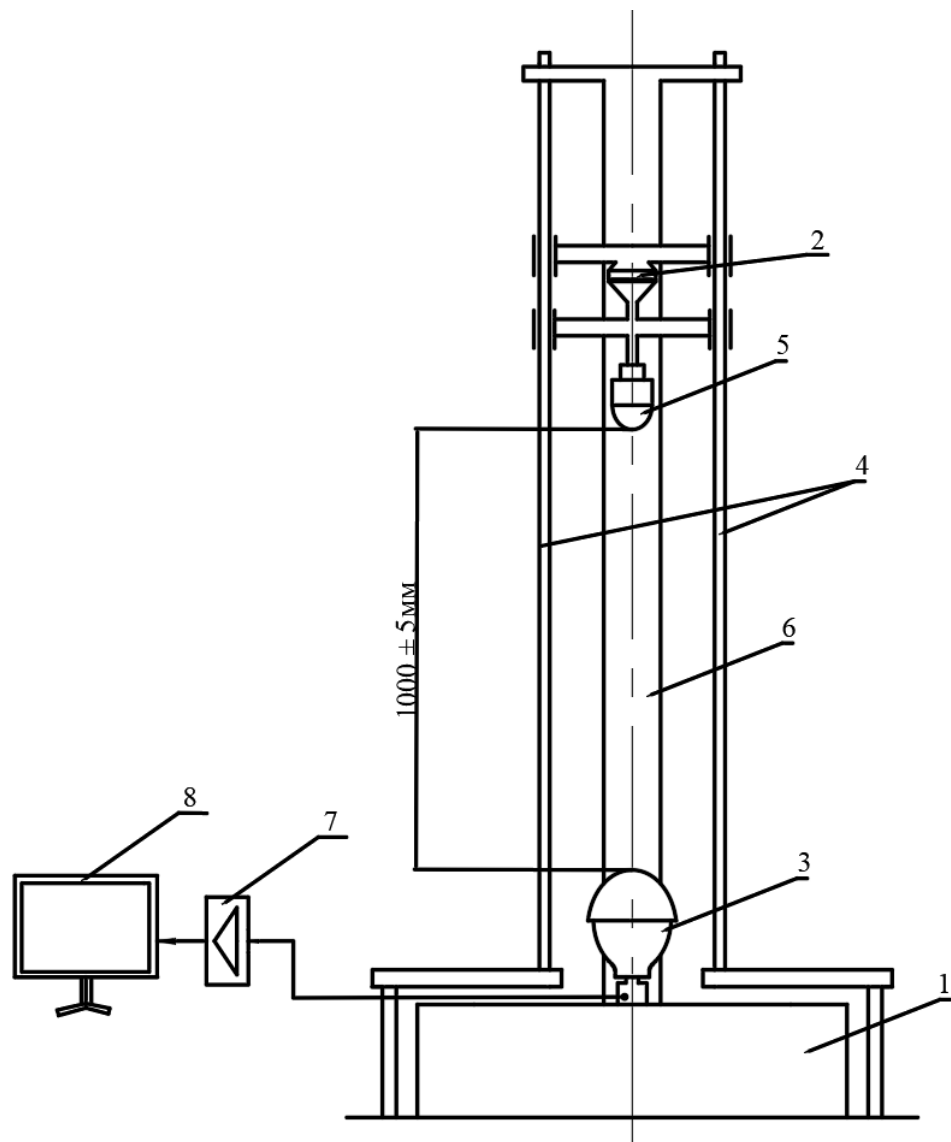


Рис.1.3.2.1. Стенд для тестування військових шоломів на ударостійкість

Примітка: 1-бетонна підставка; 2-електромагнітний спусковий пристрій; 3-форма голови; 4-рейкові стояки; 5-ударник; 6-опора; 7-підсилювач; 8-комп'ютер з програмою обробки та запису результатів

Для форми голови використовуємо модель Magnesium K1A згідно стандартів EN960: 2006 (Рис. 1.3.1.3 (а)). Дана форма використовується для того, що надійно закріпити військовий шолом з усіма реміннями (Рис. 1.3.1.3 (б)).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МД ПМ9101.000.00 ПЗ

Арк.

28



Рис.1.3.1.3 (а) Форма голови
Magnesium K1A



Рис.1.3.1.3 (б) Форма голови
Magnesium K1A із закріпленою
військовою каскою

1.4 Висновки до розділу 1

Згідно огляду аналогів установок для тестування шоломів вище, можна виділити плюси та мінуси для проектування власної установки, взявши всі домінуючі складові з установки. З перегляду технічних даних установки Hototech HT-6011-C можна виділити те, що для дослідження ударостійкості шолома не потрібно, щоб висота вежі була такою високою. Так як згідно стандарту EN397 висота з якої повинен летіти ударник рівна 1м.

Дивлячись на стенди Gaonix GX-7001 та ZONHOW DZ-800, бачимо, що при неконтрольованому падінні потрібно захисну огорожу, щоб не зашкодити людині, яка проводить тестування. Згідно цього факту, краще застосовувати структуру, яка контролювала горизонтальне падіння і ударник здійснював удар тільки перпендикулярно до шолома.

Також стенд повинен мати лінійку завдяки якій можна вирахувати точну висоту в один метр від найвищої точки шолома, розміщеного на формі голови, для того щоб дослід проводився згідно стандартів.

В загальному характеристики наведені в аналогах задовольняють умови завдання на магістерську дисертацію.

2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок тензорезисторних датчиків сили

2.1.1 Розрахунок балкового тензорезисторного датчика сили

Даний датчик включає в себе пружний елемент у вигляді балки (рис. 2.1.1.). Осьове зусилля, яке вимірюється, $Q(t) = Q_m \cos \omega t$ через перехідну деталь, яка не деформується масою M передається чутливому елементу, у вигляді прямого стрижня, і викликає його поздовжні і поперечні деформації [2].

Для спрощення розрахунку, схему пружного елемента приймаємо наступною (рис. 2.1.1.1):

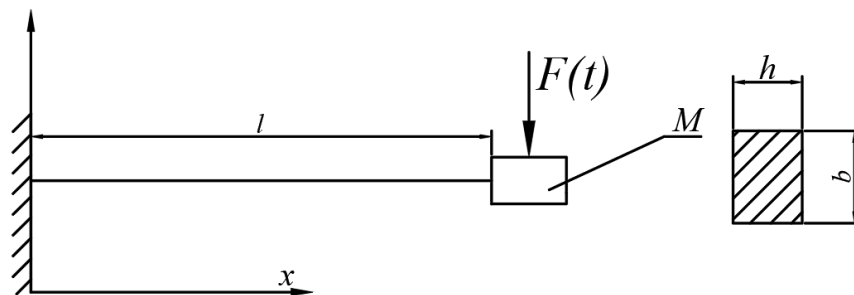


Рис. 2.1.1.1 Схема пружного елемента

Осьове зусилля $Q(t) = Q_m \cos \omega t$ через платформу викликає поперечні коливання силорезисторів датчика, на верхній і нижній площинах чутливого елемента якого поміщаються тензорезистори. Під дією навантаження верхні тензорезистори відчують деформацію розтягування, нижні - таку ж за величиною деформацію стиску.

Балка має довжину l , товщину h , ширину b , модуль пружності E , щільність матеріалу ρ .

Поперечні коливання балки описуються диференціальним рівнянням [1]:

$$\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \frac{m}{EJ} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

Де $y(x,t)$ - поперечне зміщення точки на осі балки від положення рівноваги;

m – маса;

$J = \frac{bh^3}{12}$ – момент інерції поперечного перерізу балки щодо його осі, що проходить через центр ваги перпендикулярно напрямку згину .

Функцію згинів $y(x, t)$ без урахування демпфування може бути представлена у вигляді $y(x, t) = y(x) \cos \omega t$, де форма коливань $y(x)$ визначається виразом

$$y(x) = B_1 \operatorname{ch} kx + B_2 \cos kx + B_3 \operatorname{sh} kx + B_4 \sin kx \quad (1.2)$$

Де k та ω пов'язані співвідношенням $k = \sqrt{m\omega^2 E^{-1} J^{-1}}$

Постійні інтегрування $B_1 - B_4$ визначаються з наступних граничних умов.

1) Для жорстко зацімленого кінця $x = 0$ маємо

$$y(x) = 0 \text{ і } \frac{\partial y(x)}{\partial x} = 0 \quad (1.3)$$

2) На вільному кінці $x = l$ відсутній згинний момент

$$EJ \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} = 0 \text{ або } \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} = 0 \quad (1.4)$$

3) Використовується рівняння руху загальної маси деталей 1 та 2 відповідно принципу Даламбера

$$Q(t) - M \left. \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \right|_{x=l} + EJ \left. \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^3} \right|_{x=l} = 0 \quad (1.5)$$

Визначивши постійні інтегрування, знайдемо формулу поперечних коливань балки

$$y(x) = \frac{2Q_m [T(kl)U(kx) - S(kl)V(kx)]}{EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl)} \quad (1.6)$$

де:

$$T(kl) = \frac{1}{2} (\operatorname{sh} kl + \sin kl);$$

$$S(kl) = \frac{1}{2}(chkl + \cos kl);$$

$$U(kx) = \frac{1}{2}(ch kx + \cos kx);$$

$$V(kx) = \frac{1}{2}(sh kx + \sin kx);$$

$$B(kl) = chkl \cdot \sin kl - shkl \cdot \cos kl;$$

$$E(kl) = 1 + chkl \cdot \cos kl.$$

Відносна деформація поверхневих слоїв балки визначається

$$\varepsilon(x) = \pm \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} \quad (1.7)$$

Або з урахуванням формули вище

$$\varepsilon(x) = \pm \frac{Qhk^2[T(kl)S(kx) - S(kl)T(kx)]}{EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl)} \quad (1.8)$$

Де верхній знак відповідає деформації розтягу, а нижній – деформації стиску.

Використовуючи співвідношення $\sigma(x) = E\varepsilon(x)$ знайдемо напруженість на поверхні балки

$$\sigma(x) = \pm \frac{Q_m E h k^2 [T(kl)S(kx) - S(kl)T(kx)]}{EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl)} \quad (1.9)$$

Максимальна напруженість

$$\sigma_{max}(x) = \pm \frac{Q_m E h k^2 T(kl)}{EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl)} \quad (1.10)$$

Величина не повинна перевищувати межі пропорційності $\sigma_{пр}$ для матеріалу балки.

Середня відносна деформація балки на відрізку розташування тензорезисторів визначається наступним чином

$$\varepsilon_{ср} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \varepsilon(x) dx = \pm \frac{h}{2(x_2 - x_1)} \left[\frac{\partial y(x)}{\partial x} \right]_{x_1}^{x_2} \quad (1.11)$$

Після перетворень отримаємо

$$\varepsilon_{cp} = \pm \frac{Q_m h k [T(kl)T(kx) - S(kl)U(kx)]_{x_1}^{x_2}}{(x_2 - x_1)[EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl)]} \quad (1.12)$$

Формула є функцією перетворення пружної системи в динамічному режимі. Якщо $\omega = 0$, то отримаємо співвідношення для статичного режиму вимірювань.

Отриманий вираз для статичного згину балки

$$y(x) = \frac{Q(3x^2l - x^3)}{6EJ} \quad (1.13)$$

Використовуючи формулу вище знайдемо відносну деформацію та напруженість на поверхні балки

$$\varepsilon(x) = \pm \frac{Qh(l - x)}{2EJ};$$

$$\sigma(x) = \pm \frac{Qh(l - x)}{2J};$$

$$\sigma_{max}(x) = \pm \frac{Ehl}{2J}.$$

Середня відносна деформація балки на відрізку розподілу тензорезисторів визначається з виразу

$$\varepsilon_{cp} = \pm \frac{Qhl}{2EJ} \left(l - \frac{x_1 + x_2}{2l} \right)$$

Що представляє собою функцію перетворення пружно системи в статичному режимі.

Амплітудо-частотна характеристика пружної системи матиме вигляд

$$K(\omega) = \frac{|\varepsilon_{cp}|}{Q_m} = \frac{hk[T(kl)T(kx) - S(kl)U(kx)]_{x_1}^{x_2}}{(x_2 - x_1)[EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl)]} \quad (1.14)$$

при $\omega \ll \omega_0$ маємо вигляд

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K(\omega) \approx \frac{kl}{2} \cdot \frac{1 - \frac{x_1 - x_2}{2l}}{EJ - \left(\frac{M}{3} + \frac{M_6}{2}\right) \omega^2 l^3} \quad (1.15)$$

де $M_6 = ml$ – маса балки

При $\omega_0 = 0$ отримаємо значення статичного коефіцієнта передачі

$$K_0 = \frac{kl}{2EJ} \left(1 - \frac{x_1 - x_2}{2l}\right).$$

Власні частоти коливань пружної системи

$$EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl) = 0$$

А приблизне значення основної частоти коливань, знайденого по методу Релея-Рітца

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12EJ}{\left(M + \frac{33}{35}M_6\right)l^3}} \quad (1.16)$$

Основна частота зростає при збільшенні жорсткості балки EJ та при зменшенні довжини l та маси пружної системи. Істотно впливає на частоту ω_0 довжина балки, тому при проектуванні пружної системи слід обирати тензорезистори з малою базою, від якої істотно залежить величина l .

Для вибору параметрів b та h поперечного зрізу балки виконується умова $\sigma_{max} \leq \sigma_{пр}/k^3$, де $\sigma_{пр}$ – межа пропорційності матеріалу.

Підставляючи в цю нерівність значення σ_{max} з формули (1.10) для статичного режиму, отримаємо

$$\frac{Qhl}{8J} = \frac{3Ql}{2bh^2} \leq \frac{\sigma_{пр}}{k^3}$$

звідки при відомій довжині l матимемо

$$bh^2 = \frac{3Ql k^3}{2\sigma_{пр}}$$

Ширина балки b залежить від поперечних розмірів тензорезистора .

Поставивши собі за величиною b , знайдемо

$$h = \sqrt{\frac{3Qlk^3}{2\sigma_{\text{пр}}b}}$$

Це значення необхідно уточнити по формулі (1.10), яка дає більше, ніж в статичі, напругу σ_{max} .

Якщо вимірюється зусилля містить постійну і змінну складові, то для уточнення величини h використовується співвідношення

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{Qhl}{8J} + \frac{Q_m E h k^2 T(kl)}{E J k^3 E(kl) - M \omega^2 B(kl)} \leq \frac{\sigma_{\text{пр}}}{k^3}$$

Зауважимо, що якщо зосереджена маса набагато менше маси балки, то формула (1.16) для основної частоти коливань приймає вид

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{140EJ}{11M_0l^3}} = \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{33E}{35\rho}} \quad (1.17)$$

Вивівши формулу частоти власних коливань датчика балочного типу побудуємо характеристики власних частот в залежності від зміни параметрів датчиків, такі як висота h та довжина l .

Для цього візьмемо значення величин, що відповідатимуть значенням при проведенні експериментальної частини: довжина пружного елемента $l - 0,12$ м; модуль пружності $- 210$ ГПа; густина пружного елемента $\rho - 7810$ кг/м³; висота пружного елемента $h - 0,015$ м.

Підставимо значення в формулу (1.17)

$$\omega_0 = \frac{0,015}{0,12^2} \sqrt{\frac{33 \cdot 210 \cdot 10^9}{35 \cdot 7810}} = 5244,88$$

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

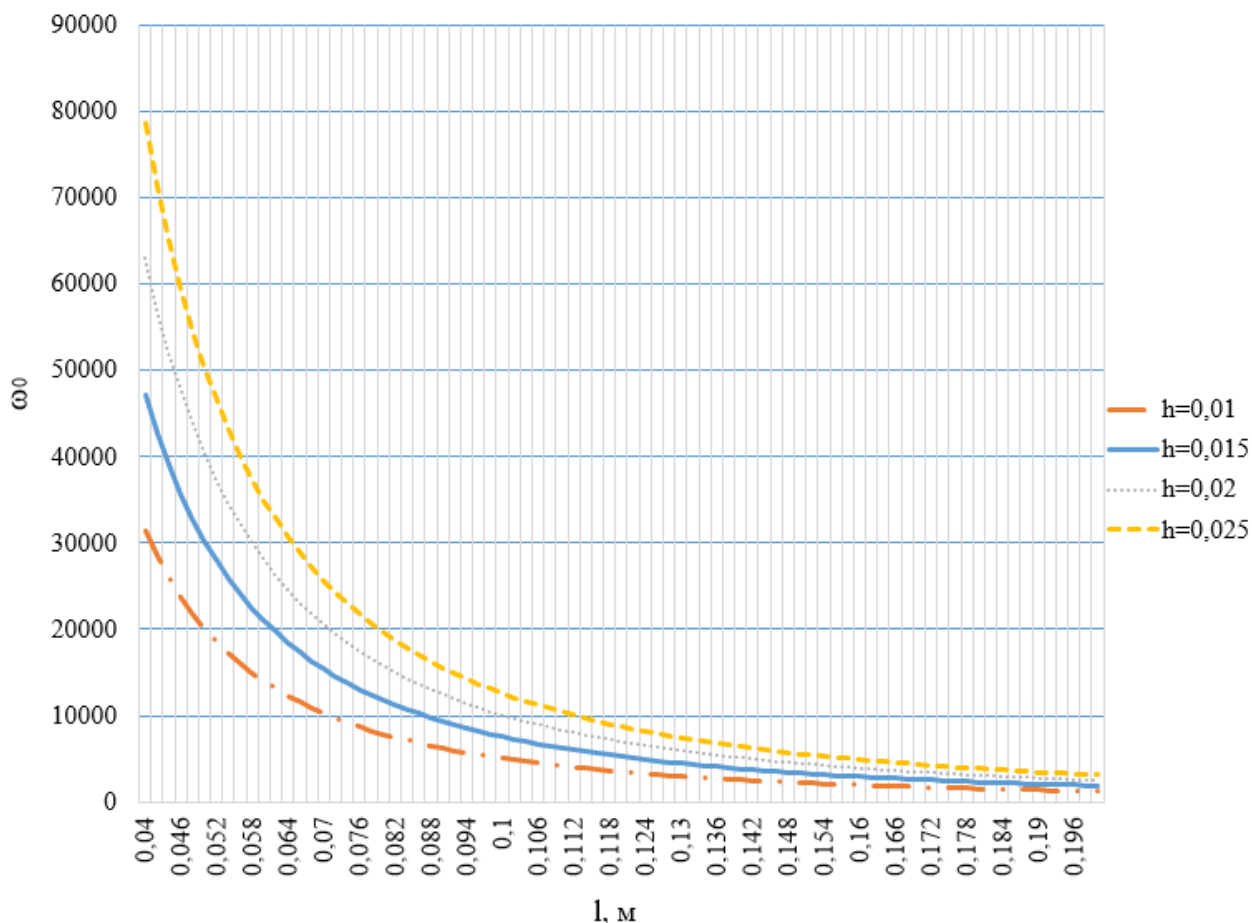


Рис. 2.1.1.2 Графік залежності власної частоти коливань пружного елемента при зміні довжини балки $\omega_0(l)$ для різних висот h

2.1.2 Розрахунок стрижневого тензорезисторного датчика сили

В склад конструкції деяких датчиків механічних величин входить стрижневий елемент у вигляді суцільного або порожнього круглого циліндра. Так, наприклад, пустий циліндр слугує сприймаючим елементом тензорезисторного датчика зусиль, пустий циліндр в поєднанні з мембраною утворює пружну систему тенорезисторного датчика тиску і т.д. Розрахункова схема стрижневого елемента датчика, що сприймає зусилля зображено на рис. 2.1.2.1.

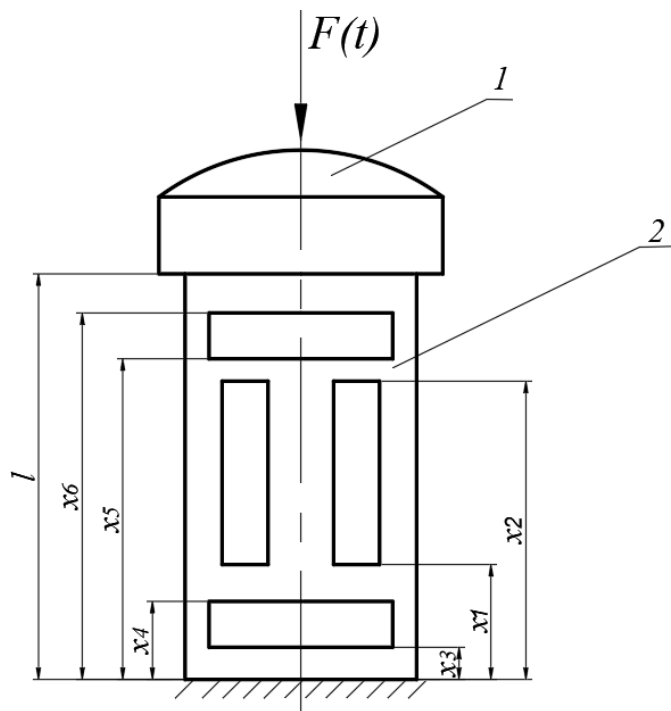


Рис. 2.1.2.1 Схема тензорезисторного датчика з стрижневим пружним елементом

Осьове зусилля $F(t)$ через недеформовану перехідну деталь 1 з масою M діє на пружний елемент 2 у вигляді пустого прямого стержня і викликає його поздовжні і поперечні деформації. Стержень має довжину l , площу поперечного перерізу S , густину матеріалу ρ , модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ .

Під дією стискаючого вимірюваного зусилля повздовжні розміри стержня зменшуються, поперечні – збільшуються. Нехай в початковий момент довільний переріз стержня матиме координату x_n , потім під навантаженням він зміщується і займає положення x . Різниця

$$y(x) = x - x_n$$

Називається зміщенням розрізу з координатою x_n , а похідна

$$\varepsilon = \frac{dy}{dx}$$

визначається відносною деформацією стержня в точці x_n .

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

По величині деформації судять по прикладеному навантаженні. Для цього на стержні розміщують тензорезистори, опір якого змінюється при його деформації. Якщо позначити ΔR , як зміна опору R тензорезистора, то

$$\frac{\Delta R}{R} = k_T \varepsilon_{\text{ср}}$$

де $\varepsilon_{\text{ср}}$ – середнє значення відносної деформації стержня на ділянці розміщення тензорезистора; k_T – коефіцієнт тензочутливості.

Для збільшення вихідного сигналу датчика і часткової компенсації температурної похибки на стержні розміщують 4 або 8 тензорезисторів, що з'єднуються в одну або дві мостових схеми. Повздовжні тензорезистори (між координатами x_1 і x_2) сприймають деформацію стиснення, поперечні (між координатами x_3 і x_4 , x_5 і x_6) – деформацію розтягнення, при чому між повздовжною деформацією $\varepsilon_{\text{прод}}$ і поперечною $\varepsilon_{\text{поп}}$ існує залежність

$$\varepsilon_{\text{поп}} = -\mu \varepsilon_{\text{прод}}$$

При лінійній залежності між механічними напругами і деформаціями повздовжнього зсуву $y(x)$ перерізу стержня описуються диференціальним рівнянням в часткових похідних:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2\delta \frac{\partial y}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (2.1)$$

де $c = \sqrt{E/\rho}$ – швидкість розповсюдження зміщення вдовж стержня; δ – коефіцієнт затухання. Рахуємо що в момент $t = 0$ на датчик, що знаходиться в стані покою, починає діяти сила $F(t)$. Потрібно знайти рішення рівняння при початкових умовах $t=0, y=0; \partial y/\partial t = 0; 0 \leq x \leq l$.

Сформуємо граничні умови

1. Нижній кінець стержня жорстко закріплений, тому при любых t для цього кінця справедлива умова

$$y=0 \text{ при } x=0, t>0$$

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. В якості другої граничної умови використовуємо рівняння руху зосередженої маси M , отримане у відповідність з принципом Даламбера:

$$M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + ES \frac{\partial y}{\partial x} = F(t) \text{ при } x = l, t > 0.$$

де $M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ сила інерції;

$ES \frac{\partial y}{\partial x}$ – пружний опір стержня

Визначивши постійні інтегрування, отримаємо

$$y(x) = \frac{F_m \sin px}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl} \quad (2.2)$$

Використовуючи формулу (2.2), запишемо вираження для функції зміщення перерізу стержня під дією навантаження:

$$y(x, t) = \frac{F_m \sin px}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl} \cos \omega t$$

Із порівняння двох останніх формул видно, що функція $y(x, t)$ описує зміщення перерізів стержня в будь-якій точці по його довжині і в любий момент часу, тоді як функція $y(x)$ дає амплітуду такого зміщення. Замітимо, що другі величини, отримані із формули коливань $y(x)$ шляхом її перетворення по координаті x , також будуть амплітудами в часовому регіоні. В подальших розрахунках згадуватимуться ці величини без додаткових спогадів про амплітудні властивості.

Маючи вираз для форми коливань, можна визначити відносну деформацію $\varepsilon(x)$ в випадковому перерізі стержня. Для цього скористаємось співвідношенням

$$\varepsilon(x) = \frac{\partial y(x)}{\partial x},$$

Яке з урахування формули (2.2) ідає наступний вираз

$$\varepsilon(x) = \frac{F_m p \cos px}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl} \quad (2.3)$$

Далі, припускаючи, що сили пружності рівномірно розподілені по всьому перетину стрижня, а між напругою і відносною деформацією існує пропорційна залежність, знайдемо напруги в довільному перерізі стержня:

$$\sigma(x) = E\varepsilon(x) = \frac{EF_m p \cos px}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl}. \quad (2.4)$$

Із формули (2.3) і (2.4) при $\omega = 0$ отримаємо вираз для відносної деформації і напруги в статичному режимі

$$\varepsilon = \frac{F}{ES}, \quad \sigma = \frac{F}{S},$$

що дають однакові значення у всіх перерізах стержня.

При фіксованому значенні частоти ω максимальне значення величини $\varepsilon(x)$ і $\sigma(x)$ будуть при таких значеннях координати x , які задовільняють рівність $|\cos px| = 1$ або $px = i\pi$ ($i = 0, 1, \dots$),

$$\text{звідки } x = \frac{i\pi}{p}.$$

В частості, при $x = 0$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{F_m p}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl},$$

$$\sigma_{\max} = \frac{E F_m p}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl}.$$

Якщо вимірювальне зусилля являється сумою постійних і змінних складових

$$F(t) = F + F_m \cos \omega t,$$

то відносна деформація і напруження в перерізі стержня можна розрахувати, використовуючи принцип суперпозиції

$$\varepsilon(x) = \frac{F}{ES} + \frac{F_m p \cos px}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl};$$

$$\sigma(x) = \frac{F}{S} + \frac{E F_m p \cos px}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl},$$

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а їх максимальне значення будуть рівні

$$\varepsilon_{max} = \frac{F}{ES} + \frac{F_{mp}}{ESpcos pl - M\omega^2 \sin pl};$$

$$\sigma_{max} = \frac{F}{S} + \frac{EF_{mp}}{ESpcos pl - M\omega^2 \sin pl}.$$

З точки зору забезпечення максимальної чутливості до вимірюваної навантаженні треба зменшувати площу поперечного перерізу стрижня, так як при цьому зростає відносна деформація. Однак на величину S накладаються наступні обмеження. По-перше, при розрахунці пружної системи необхідно мати на увазі, що величина σ_{max} не повина перевершувати напругу $\sigma_{пр}$, що відповідає межі пропорційності матеріалу стрижня, інакше при навантаженнях близьких до максимальних, функція перетворення пружної системи буде нелінійною.

По-друге, при осьовому стисненні існує небезпека втрати стійкості і виникнення поздовжнього вигину стрижня, якщо зжимна сила перевищить критичне значення $F_{кр}$. Для закріпленого одним кінцем круглого стрижня критична сила дорівнює

$$F_{кр} = \frac{\pi ES^2}{16l^2},$$

а критичне значення зжимаючої напруги

$$\sigma_{кр} = \frac{F_{кр}}{S} = \frac{\pi ES}{16l^2}.$$

Таким чином, при виборі геометричних розмірів стрижня повинні бути виконані умови

$$\sigma_{max} \leq \frac{\sigma_{пр}}{k_3} \text{ і } \sigma_{max} \leq \frac{\sigma_{пр}}{n_3},$$

де k_3 і n_3 - коефіцієнти запасу, що вказані в нормативах.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так як довжина стрижня залежить від розмірів тензорезисторів, що використовуються, то при невиконанні останніх нерівностей потрібно збільшити площу S поперечного перерізу. Із двох значень величини S , отриманих при виконанні вказаних умов, потрібно вибрати більше значення.

Якщо x_1 і x_2 - координати точок, між якими розташовані повздовжні тензорезистори, то середня відносна повздовжня деформація стержня на цій ділянці, викликана силою $F(t)$, визначається за формулою

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ср}} &= \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial y}{\partial x} dx = \frac{y(x_2) - y(x_1)}{x_2 - x_1} = \\ &= \frac{F_m(\sin p x_2 - \sin p x_1)}{(ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl)(x_2 - x_1)}.\end{aligned}\quad (2.5)$$

Так як поперечна деформація стержня ε_μ пов'язана з повздовжньою співвідношенням $\varepsilon_\mu = -\mu\varepsilon$, то для середнього відношення деформації поперечних тензорезисторів, розміщених між точками x_3 і x_4 , отримаємо вираз

$$\varepsilon_{\mu\text{ср}} = \frac{\mu F_m}{x_4 - x_3} \cdot \frac{\sin p x_4 - \sin p x_3}{ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl}.\quad (2.6)$$

Формули (2.5) і (2.6) представляють собою функції перетворення пружної системи, що відповідає двом варіантам розміщення тензорезисторів на чутливому елементі.

Із цих формул шляхом граничного переходу $\omega \rightarrow 0$ можна отримати функцію перетворення для режиму статичного вимірювання.

Так, для повздовжніх тензорезисторів $\varepsilon = \frac{F_m}{ES}$ і для поперечних $\varepsilon_\mu = -\frac{\mu F_m}{ES}$.

Вирази (2.5) і (2.6) можна використовувати для знаходження амплітудно-частотних характеристик пружної системи, для чого береться відношення амплітуди вихідної величини до постійної амплітуди вхідної величини при різноманітних її частотах.

Для повздовжніх тензорезисторів АЧХ буде мати вигляд

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K(\omega) = \frac{|\varepsilon_{cp}|}{F_m} = \frac{\sin px_2 - \sin px_1}{(x_2 - x_1)(ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl)}, \quad (2.7)$$

Для поперечних тензорезисторів

$$K_\mu(\omega) = \frac{\varepsilon_{cp}}{F_m} = \frac{\mu(\sin px_4 - \sin px_3)}{(x_4 - x_3)(ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl)}. \quad (2.8)$$

Якщо частота вимірювальної сили значно менша за основну частоту коливань пружної системи, то формули (2.7) і (2.8) можна спростити:

$$K(\omega) = \frac{1}{ES - (M + 0,5M_c)\omega^2 l}, \quad K_\mu(\omega) = \frac{\mu}{ES - (M + 0,5M_c)\omega^2 l},$$

де $M_c = \rho Sl$ – маса стрижня.

Застосувавши в останніх виразах $\omega = 0$, отримаємо статичні коефіцієнти передачі пружної системи відповідно для повздовжніх та поперечних тензорезисторів

$$K_0 = \frac{1}{ES}, \quad K_{\mu 0} = \frac{\mu}{ES}.$$

Власні частоти коливань пружної системи визначаються із трансцендентного рівняння

$$ESp \cos pl - M\omega^2 \sin pl = 0, \quad (2.9)$$

яке з урахуванням співвідношення $\omega^2 = \frac{p^2 E}{\rho}$ зводиться до вигляду

$$ESp(\cos pl - \frac{M}{M_c} pl \sin pl) = 0.$$

Оскільки $p = 0$ не може бути коренем рівняння, то скоротивши на множник ESp отримаємо

$$pl \operatorname{tg} pl = \frac{M_c}{M}. \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) має безліч коренів.

В інженерних розрахунках для обчислення основної частоти коливань пружних систем використовуються методи, зокрема Релея-Рітца [3]. Згідно з

цим методом значення ω_0 Визначається з умови рівності максимальних потенційної і кінетичної енергій пружної системи

$$\Pi_{max} = T_{max},$$

які виражаються через базисну функцію $y(x)$.

Базисна функція зазвичай вибирається у вигляді ряду

$$\varphi(x) = a_1 \varphi_1(x) + a_2 \varphi_2(x) + \dots = \sum a_i \varphi_i(x),$$

кожен елемент якого задовільняє хоча б геометрична граничною умовою задачі.

Щоб отримати більш точне значення ω_0 , виберемо в якості функції φ_i власні форми коливань стержня, в якого один кінець закріплений $x = 0$:

$$\varphi_i(x) = \sin \frac{(2i - 1)\pi x}{2l} (i = 1, 2 \dots).$$

Обмежуючись першим членом розкладення, запишемо базисну функцію у вигляді

$$\varphi(x) = y(l) \sin \frac{\pi x}{2l},$$

де $2l$ - зміщення вільного кінця стрижня.

Знайдемо вираз для Π_{max} і T_{max} :

$$\Pi_{max} = \frac{1}{2} \int_0^l ES \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 dx = \frac{y^2(l) \pi^2 ES}{16l};$$

$$T_{max} = \frac{1}{2} \int_0^l m \omega_0^2 \varphi^2(x) dx + \frac{1}{2} M \omega_0^2 y^2(l) = \frac{\omega_0^2 y^2(l)}{2} (M + 0,5M_c),$$

де m і M_c відповідно маси одиниць довжини і повна маса стержня.

В формулі для T_{max} перший член виражає кінетичну енергію розподіленої маси стрижня, а другий – кінетичну енергію зосередженої маси M .

Прирівнюючи Π_{max} і T_{max} , отримаємо

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{ES}{l(M+0,5M_c)}}. \quad (2.11)$$

Якщо в якості базисної функції взяти функцію зміщення перерізів стрижня під дією статичного навантаження

$$\varphi(x) = y(l) \frac{x}{l},$$

то формула для основної частоти коливань буде мати вигляд

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{ES}{l\left(M+\frac{1}{3}M_c\right)}}. \quad (2.12)$$

Підставимо значення величин

Вивівши формулу частоти власних коливань датчика балочного типу побудуємо характеристики власних частот в залежності від зміни параметрів датчиків, такі як висота h та довжина l .

Для цього візьмемо значення величин, що відповідатимуть значенням при проведенні експериментальної частини: довжина пружного елемента $l - 0,1$ м; модуль пружності – 210 ГПа; густина пружного елемента $\rho - 7810$ кг/м³; висота пружного елемента $S - 0,000225$ м²; маса деформованої поверхні датчика $M - 2$ кг;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,000225}{0,11 \cdot \left(0,19 + \frac{1}{3} 2\right)}} = 14424,61$$

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

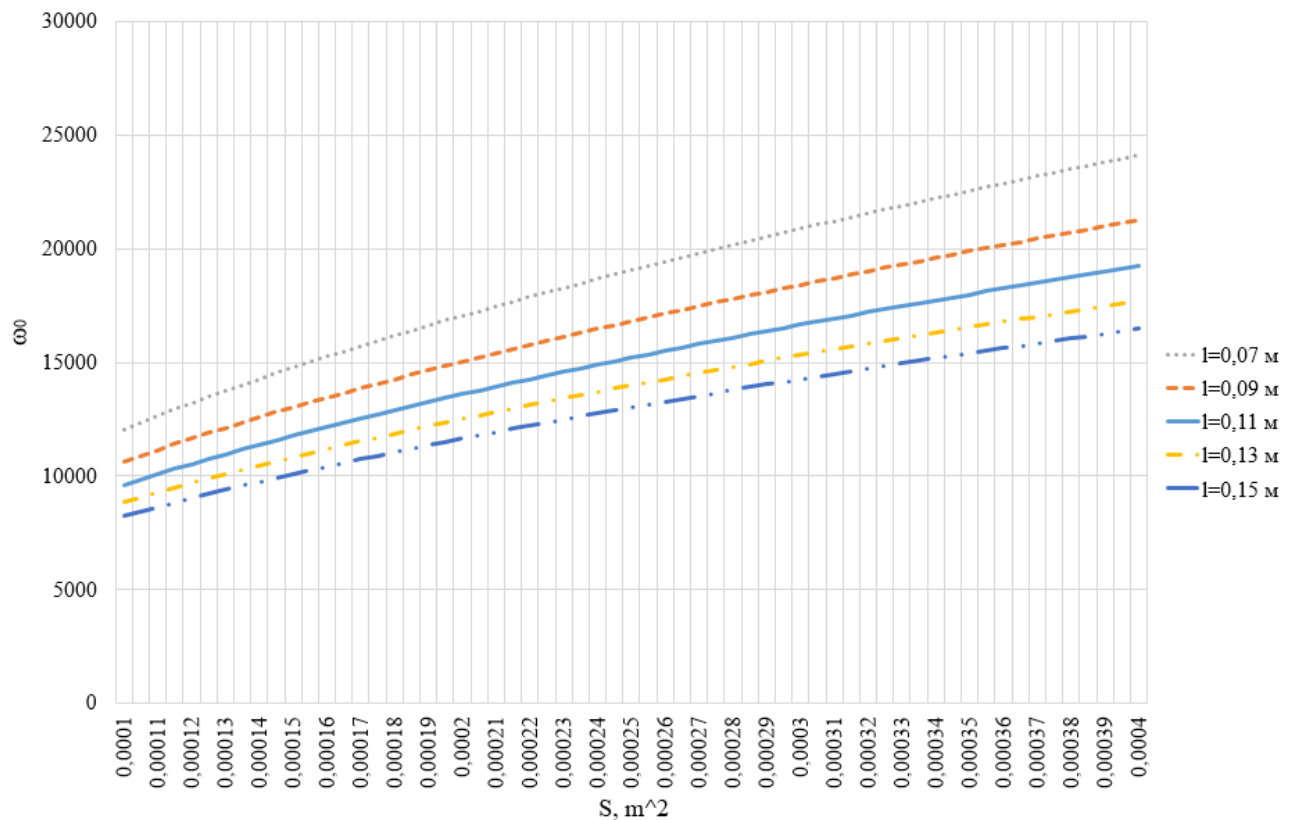


Рис. 2.1.2.2 Графік залежності власної частоти коливань при зміні поперечного перерізу стрижня $\omega_0(S)$ для різної довжини стрижня l

2.1.3 Розрахунок мембраного тензорезисторного датчика сили

Розрахункова схема датчика зображена на рис. 2.1.3.1. Тонка кругла ізотропна пластинка, що має товщину h , модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ , затиснена по зовнішньому та внутрішньому контурах $r=2a$.

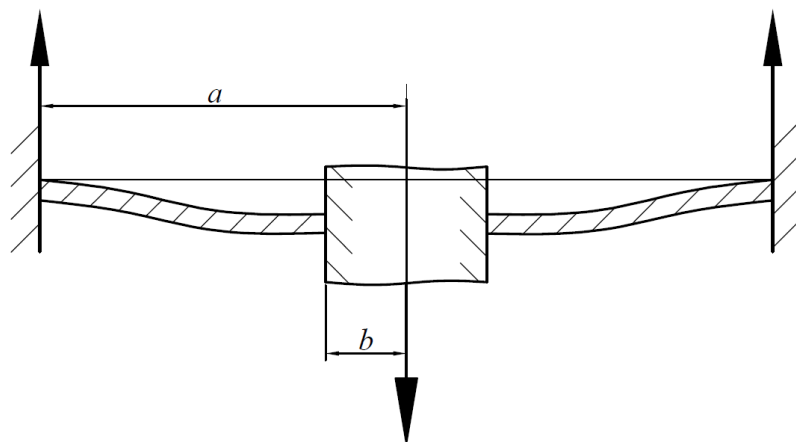


Рис. 2.1.3.1 Розрахункова схема пружної системи датчика сили

Прогин пластинки виникає під навантаженням, що рівномірно розповсюджується по зовнішньому і внутрішньому контурі. При такому прогині $q=0$, а P дорівнюватиме всьому навантаженні, що прикладається до внутрішнього контуру. Звідси ми отримаємо рівняння

$$\varphi = -\frac{Px}{8\pi D}(2 \ln x - 1) + \frac{C_1 x}{2} + \frac{C_2}{x}. \quad (3.1)$$

Постійні інтегрування C_1 і C_2 визначаються з умови на контурах. В моєму випадку для пластини закріпленої по контуру C_1 і C_2 визначаються із умов при яких $x = r$ і $x = b$, а кут $\varphi = 0$ тоді з рівняння (3.1) знайдемо

$$\begin{aligned} -\frac{Pr}{8\pi D}(2 \ln a - 1) + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} &= 0, \\ -\frac{P b}{8\pi D}(2 \ln b - 1) + \frac{C_1 b}{2} + \frac{C_2}{b} &= 0. \end{aligned}$$

Визначивши значення C_1 і C_2 і вставивши їх в рівняння (3.1), отримаємо вираз для φ .

Диференціальне рівняння вимушених поперечних коливань пластинки також залежить тільки від змінної r

$$\frac{d^4 \omega(r)}{dr^4} + \frac{2}{r} * \frac{d^3 \omega(r)}{dr^3} - \frac{1}{r^2} * \frac{d^2 \omega(r)}{dr^2} + \frac{1}{r^3} * \frac{d\omega(r)}{dr} - \gamma \omega(r) = \frac{q_m}{D} \quad (3.2)$$

і має вирішення

$$\omega(r) = C_1 J_0(\gamma r) + C_2 I_0(\gamma r) + C_3 N_0(\gamma r) + C_4 K_0(\gamma r) - \frac{q_m}{\gamma^4 D^3}, \quad (3.3)$$

Де $J_0(\gamma r)$, $N_0(\gamma r)$ – бesselеві функції першого та другого роду нульового порядку; $I_0(\gamma r)$, $K_0(\gamma r)$ – модифіковані бesselеві функції нульового порядку; $\gamma^4 = \omega^2 \rho h D^{-1}$, $D = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)}$ – циліндрична жорсткість пластинки.

При $r=0$ функція $N_0(\gamma r)$ і $K_0(\gamma r)$ перетворюються в безкінечність, тому у формулі (3.2) необхідно зазначити $C_3 = C_4 = 0$.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Постійні інтегрування C_1 та C_2 визначаються з граничних умов на зовнішньому контурі пластинки $r=a$. При жорсткому закріпленні контуру прогин і кут повороту перерізу дорівнюють нулю, так як, $\omega(r) = \frac{d\omega(r)}{dr} = 0$.

Задовольнивши граничним умовам, знайдемо

$$\omega(r) = \frac{q_m}{D\gamma^4} \left[\frac{J_0(\gamma r)I_1(\gamma a) + I_0(\gamma r)J_1(\gamma a)}{J_0(\gamma a)I_1(\gamma a) + I_0(\gamma a)J_1(\gamma a)} - 1 \right], \quad (3.4)$$

де $J_1(\gamma a)$, $I_1(\gamma a)$ - бесселеві функції першого порядку.

Відносна деформація в радіальному напрямленні підраховується за формулою

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\mu\sigma_t}{E}, \quad (3.5)$$

а в тангенціальному напрямку – по формулі

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} - \frac{\mu\sigma_r}{E}, \quad (3.6)$$

де

$$\sigma_r = -\frac{6D}{h^2} \left(\frac{d^2\omega}{dr^2} + \frac{\mu}{r} * \frac{d\omega}{dr} \right) \quad (3.7)$$

та

$$\sigma_t = -\frac{6D}{h^2} \left(\frac{1}{r} * \frac{d\omega}{dr} + \mu \frac{d^2\omega}{dr^2} \right) \quad (3.8)$$

відповідно радіальні і тангенціальні напруги.

Продиференціювавши функцію (3.3) і підставивши в формулу (3.6) і (3.7), отримаємо

$$\sigma_r = \frac{6q_m}{\gamma^2 h^2} * \frac{I_1(\gamma r)J_0(\gamma a) - J_1(\gamma r)I_0(\gamma a) + \frac{1-\mu}{\gamma r} [J_1(\gamma r)I_1(\gamma a) - I_1(\gamma r)J_1(\gamma a)]}{J_0(\gamma r)I_1(\gamma a) + I_0(\gamma a)J_1(\gamma a)}, \quad (3.9)$$

$$\sigma_t = \frac{6q_m}{\gamma^2 h^2} * \frac{\mu[I_1(\gamma r)J_0(\gamma \alpha) - J_1(\gamma r)I_0(\gamma \alpha)] + \frac{1-\mu}{\gamma r}[I_1(\gamma r)J_1(\gamma \alpha) - J_1(\gamma r)I_1(\gamma \alpha)]}{J_0(\gamma r)I_1(\gamma \alpha) + I_0(\gamma \alpha)J_1(\gamma \alpha)},$$

після чого знайдемо відносні деформації

$$\varepsilon_r = \frac{q_m h}{2\gamma^2 D} * \frac{I_1(\gamma \alpha) \left[J_0(\gamma r) - \frac{J_1(\gamma r)}{(\gamma r)} \right] - J_1(\gamma \alpha) \left[I_0(\gamma r) - \frac{I_1(\gamma r)}{(\gamma r)} \right]}{J_0(\gamma r)I_1(\gamma \alpha) + I_0(\gamma \alpha)J_1(\gamma \alpha)},$$

$$\varepsilon_t = \frac{q_m h}{2\gamma^2 D} * \frac{I_1(\gamma \alpha)J_1(\gamma r) - J_1(\gamma \alpha)I_1(\gamma r)}{\gamma r [J_0(\gamma r)I_1(\gamma \alpha) + I_0(\gamma \alpha)J_1(\gamma \alpha)]}. \quad (3.10)$$

В центрі пластинки ($r=0$) радіальна і тангенційна відносні деформації однакові і мають значення

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \frac{q_m h}{2\gamma^2 D} * \frac{I_1(\gamma \alpha) - J_1(\gamma \alpha)}{J_0(\gamma \alpha)I_1(\gamma \alpha) + I_0(\gamma \alpha)J_1(\gamma \alpha)}.$$

На зовнішньому контурі ($r=a$) $\varepsilon_t = 0$, а деформація ε_r , має вигляд

$$\varepsilon_r = \frac{q_m h}{2\gamma^2 D} * \frac{I_1(\gamma \alpha)J_0(\gamma \alpha) - I_0(\gamma \alpha)J_1(\gamma \alpha)}{J_0(\gamma \alpha)I_1(\gamma \alpha) + I_0(\gamma \alpha)J_1(\gamma \alpha)}.$$

Якщо тензорезистори розташовані радіально між точками з координатами r_1 і r_2 ($r_2 > r_1$), то їх середня відносність деформації дорівнюватиме

$$(\varepsilon_r)_{\text{ср}} = \frac{1}{r_2 - r_1} \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon_r dr = \frac{q_m h}{2\gamma^3 D(r_2 - r_1)} \times$$

$$\times \frac{I_1(\gamma \alpha)[J_1(\gamma r_2) - J_1(\gamma r_1)] - J_1(\gamma \alpha)[I_1(\gamma r_2) - I_1(\gamma r_1)]}{J_0(\gamma \alpha)I_1(\gamma \alpha) + I_0(\gamma \alpha)J_1(\gamma \alpha)}. \quad (3.11)$$

Для тензорезисторів, розташованих радіально по дузі окружності радіусом r_0 , середня відносна деформація рівна ε_t , якщо у формулу (3.9) підставити $r = r_0$:

$$\varepsilon_t(r_0) = \frac{q_m h}{2\gamma^2 D} * \frac{I_1(\gamma \alpha)J_1(\gamma r_0) - J_1(\gamma \alpha)I_1(\gamma r_0)}{\gamma r_0 [J_0(\gamma \alpha)I_1(\gamma \alpha) + I_0(\gamma \alpha)J_1(\gamma \alpha)]}. \quad (3.12)$$

Формули (3.10) і (3.11) представляють собою функції перетворення пластинки по відношенню до тиску в динамічному режимі.

В статичному режимі при $\omega = 0$ функція прогину пластини має вид

$$\omega(r) = \frac{q}{64D} (\alpha^2 - r^2)^2,$$

Тиск q викликає в перерізах пластинки радіальну напругу

$$\sigma_r = \frac{3q}{8h^2} [\alpha^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)]$$

і тангенціальна напруга

$$\sigma_t = \frac{3q}{8h^2} [\alpha^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)].$$

Відносна деформація в радіальному і тангенціальному напрямленнях відповідно дорівнюють

$$\varepsilon_r = \frac{qh}{32D} (\alpha^2 - 3r^2) \quad \text{і} \quad \varepsilon_t = \frac{qh}{32D} (\alpha^2 - r^2).$$

В центрі пластинки при $r = 0$ деформації однакові:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \frac{q\alpha^2 h}{32D}.$$

При $r = \alpha$ тангенційній деформації дорівнює нулю, а радіальне змінює свій знак, досягаючи найбільшого по модулю значення

$$\varepsilon_{r \max} = -\frac{q\alpha^2 h}{16D}. \quad (3.3)$$

Звідси для підвищення чутливості датчика виявляється можливість розмістити тензорезистори на пластинці, щоб вони сприймали деформації обох знаків.

Зміна напруги близьке за своїм характером зміни відповідних деформацій. Найбільшої величини досягає радіальна напруга, що становиться при $r = \alpha$

$$\sigma_{r \max} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{q\alpha^2}{h^2}. \quad (3.14)$$

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середня відносна деформація для радіальних тензорезисторів визначається за формулою

$$(\varepsilon_r)_{\text{cp}} = \frac{qh}{32D} [\alpha^2 - (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)],$$

для тангенційних, розташованих по дузі радіусу r_0 розраховується за формулою

$$\varepsilon_{\text{cp}} = \varepsilon_t(r_0) = \frac{qh}{32D} (\alpha^2 - r_0^2).$$

Дві останніх формули являються функціями перетворення пластинки в статичному режимі.

Амплітудно-частотні характеристики пластинки при радіальному і тангенціальному розташуванні тензорезисторів відповідно мають вигляд

$$K_r(\omega) = \frac{|(\varepsilon_r)_{\text{cp}}|}{q_m} \quad (3.15)$$

і

$$K_t(\omega) = \frac{\varepsilon_t(r_0)}{q_m}, \quad (3.16)$$

де чисельниками являються вирази (3.10) і (3.11).

Якщо частота вимірювального тиску набагато менше основної частоти коливань пластинки, то беселеві функції можна представити у вигляді рядів по степеням аргументу. При цьому формули (3.14) і (3.15) спрощуються

$$K_r(\omega) \approx \frac{h}{32D} \cdot \frac{\alpha^2 - (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{1 - \frac{(\gamma a)^4}{96}},$$

$$K_t(\omega) \approx \frac{h}{32D} \cdot \frac{\alpha^2 - r_0^2}{1 - \frac{(\gamma a)^4}{96}},$$

звідки при $\omega = 0$ виходять статичні коефіцієнти передачі

$$(K_r)_0 = \frac{h}{32D} [\alpha^2 - (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)],$$

$$(K_t)_0 = \frac{h}{32D} (\alpha^2 - r_0^2).$$

Власні частоти коливань пластинки визначаються із трансцендентного рівняння $J_0(\gamma\alpha)I_1(\gamma\alpha) + I_0(\gamma\alpha)J_1(\gamma\alpha) = 0$, що має нескінченну кількість коренів.

Приближене значення власних частот коливань визначається по методу Релея-Рідса [3]

$$\omega_0 = \frac{10,21}{r^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} = 2,95 \frac{h}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}. \quad (3.17)$$

Візьмемо значення величин, що відповідатимуть значенням при проведенні експериментальної частини: радіус пружного елемента $r - 0,023$ м; модуль пружності $- 210$ ГПа; густина пружного елемента $\rho - 7810$ кг/м³; товщина пружного елемента $h - 0,02$ м; модуль Пуассона $- 0,3$.

Підставимо значення в формулу 3.16 та знайдемо значення власних частот датчика мембранного типу:

$$\omega_0 = 2,95 \cdot \frac{0,02}{0,023^2} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{7810(1 - 0,3^2)}} = 12125,22$$

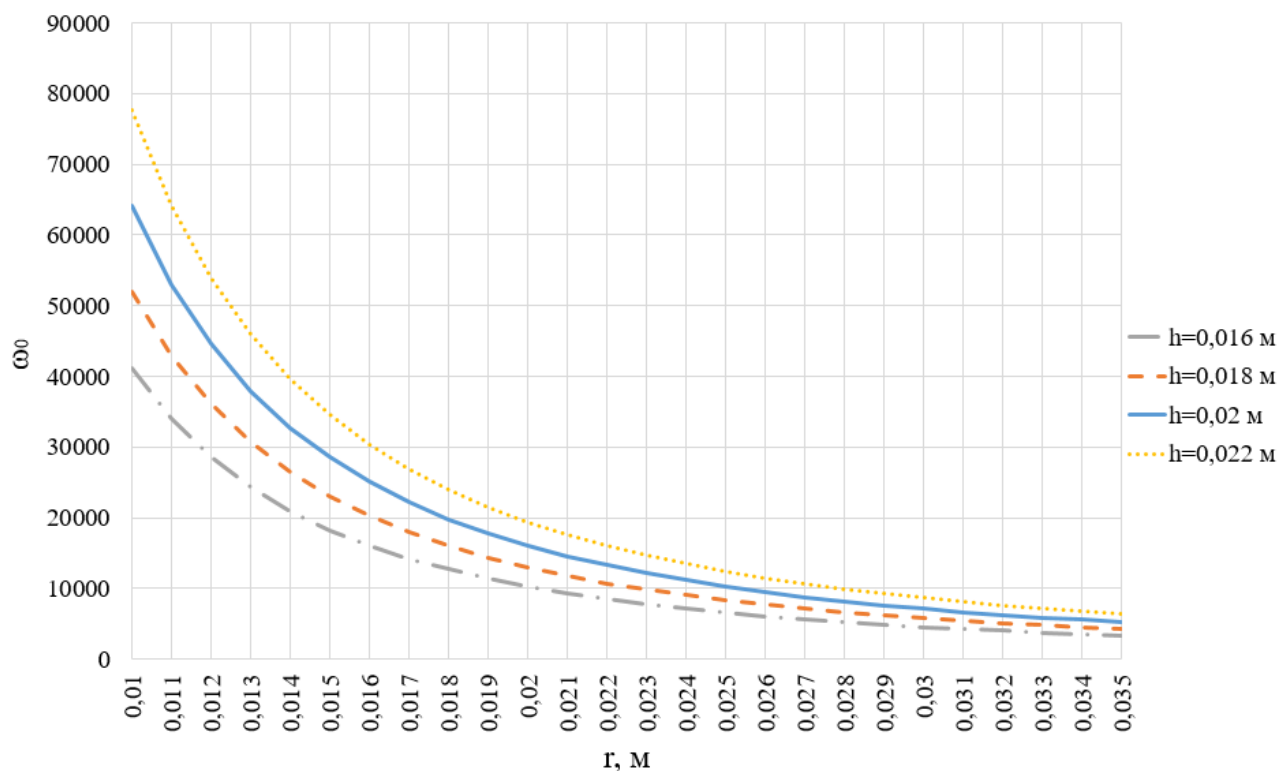


Рис. 2.1.3.2 Графік залежності власної частоти коливань при зміні радіусу мембрани $\omega_0(r)$ для різної висоти h

2.2 Висновки до розділу 2

В даному розділі було проведено теоретичний розрахунок тензорезисторних датчиків трьох різних типів на визначення власних частот. Було виведено математичну модель власних частот для кожного з датчиків. При проведенні обрахунків було визначено, що найвищі характеристики власних частот у стрижневому виді тензорезисторного датчика. Відповідно цього можемо зробити висновок, що силовий датчик стрижневого типу краще підходить для стенда для тестування на ударостійкість шоломів, так як з вищою точністю сприймає імпульсні навантаження.

Також були побудовані графіки залежності власних частот від фізичних змін параметрів датчиків для того щоб переконатись після експериментальної частини, що математична модель власних частот була розрахована вірно.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Експериментальне дослідження №1

Для початку було проведено лабораторний дослід з тензометричними датчиками сили для знаходженні власних частот коливань. Даний дослід проходив в три етапи. Для цього дослід було обрано три різних типи тензометричних датчиків сили: мембранний – RTN C3 2,2т, стержневий – C16 40т та балочний – HLC B1C3 1,1т (Рис.3.1.1.1). Детальніше про ці датчики та їх характеристики описано в розділі 1.



Рис.3.1.1.Тензометричні датчики сили, що використовувались у експерименті: 1 – мембранний (RTN C3 2,2т); 2 – стержневий (C16 40т), 3 – балочний (HLC B1C3 1,1т)

На першому етапі було виконане кидання металевої кулі по тензорезисторному датчику, що стояв на твердій поверхні, принцип проведення експерименту можна побачити на Рис.3.1.2.

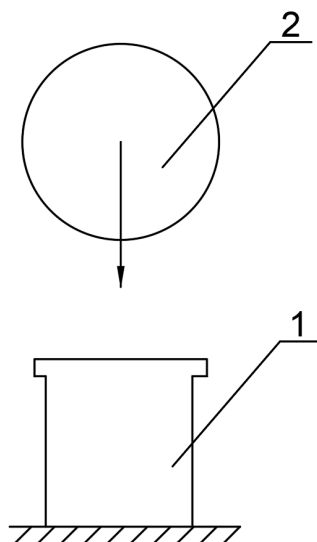


Рис.3.1.2.Принцип проведення експерименту

На першому етапі було здійснено по п'ять кидань кулі на три різні датчика. Для вимірювання, реєстрації та обробки сигналів датчикової апаратури було використано програмне забезпечення Perception. Основою вимірювальної системи є система серії Genesis HighSpeed GEN2tB – це 20-и каналний синхронізований аналого-цифровий перетворювач для перетворення тензосигналів датчиків підключених за четверть- та повномостовою схемами, напруги та п'єзосигналів з частотою вибірки 500 кГц та границею допустимих похибок 0,2 %.

На другому етапі дослідження було виконано кидання металевої кулі на датчик, що стояв на резиновій підшві, яка виконувала роль демпфера (Рис.3.1.3.)

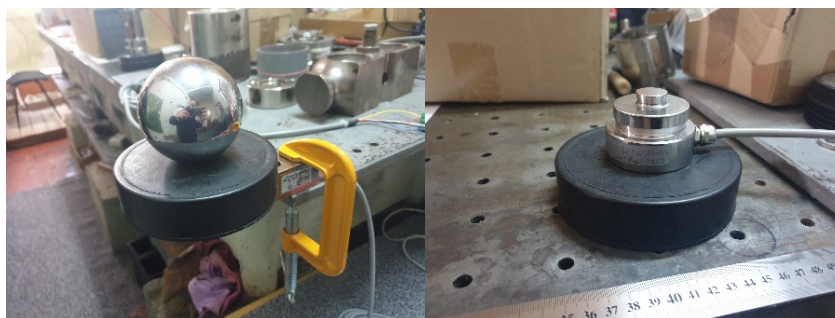


Рис.3.1.3. Другий етап

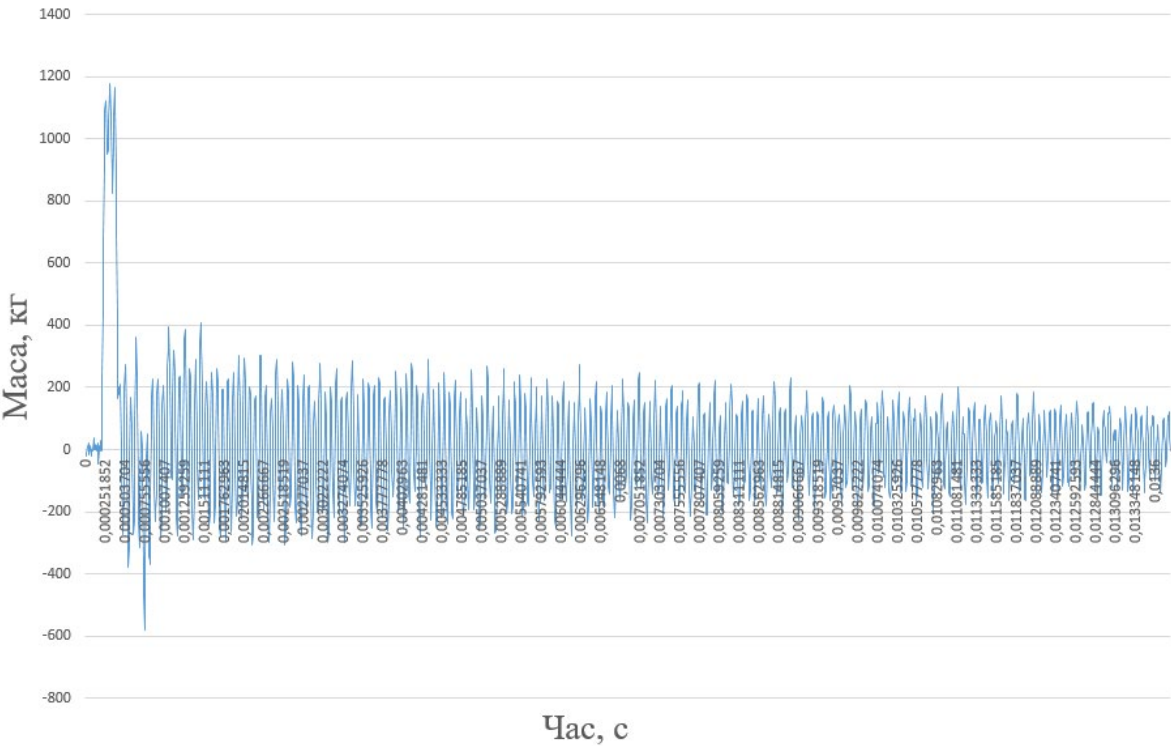
					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

На третьому етапі датчики розмістили на еластомері і також провели по п'ять кидань кулі на датчик (Рис. 3.1.4)

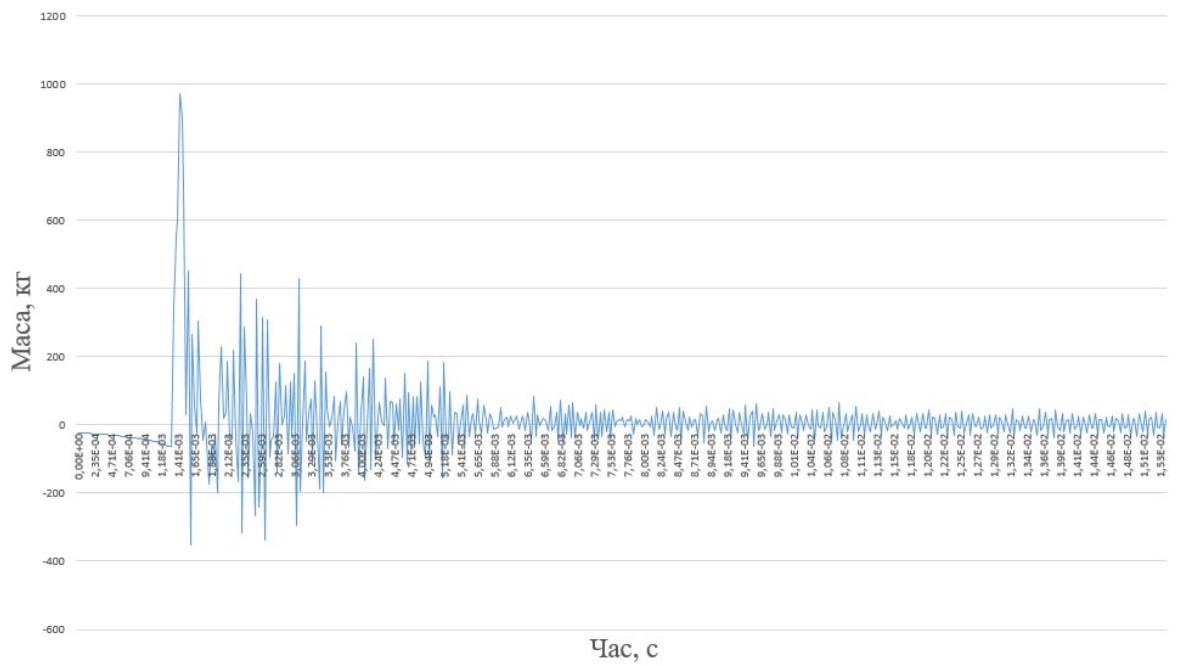


Рис. 3.1.4. Третій етап

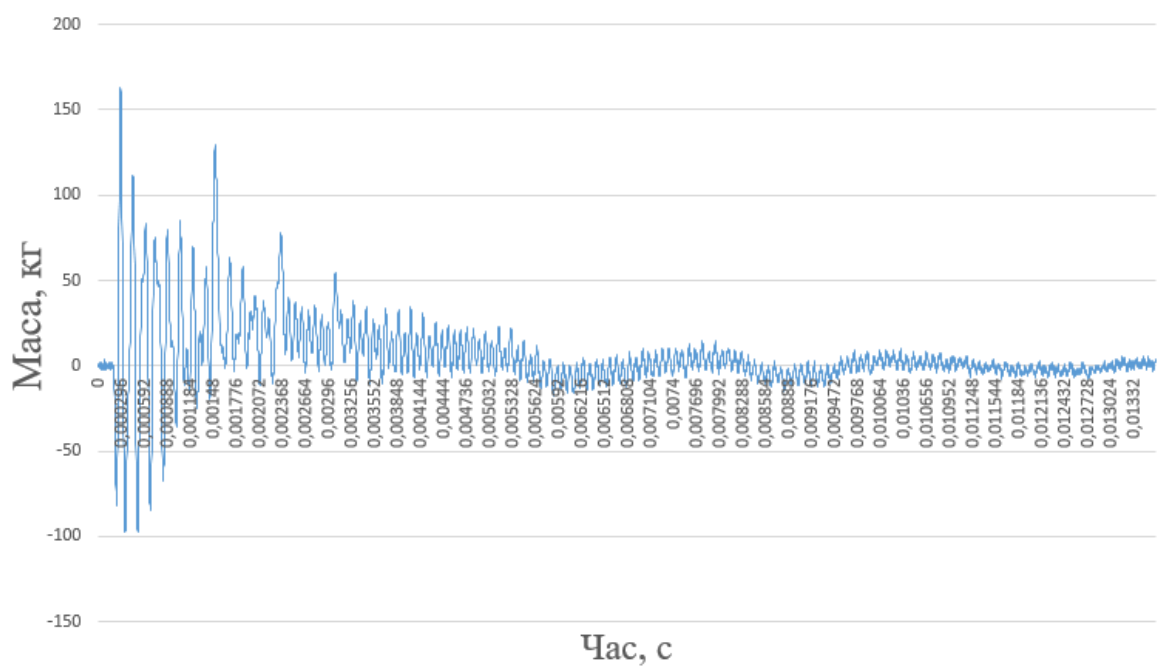
Після проведення експериментів виведемо графіки вихідної характеристики залежності m(s) (Рис. 3.1.5 – Рис. 3.1.7).



а)



б)



в)

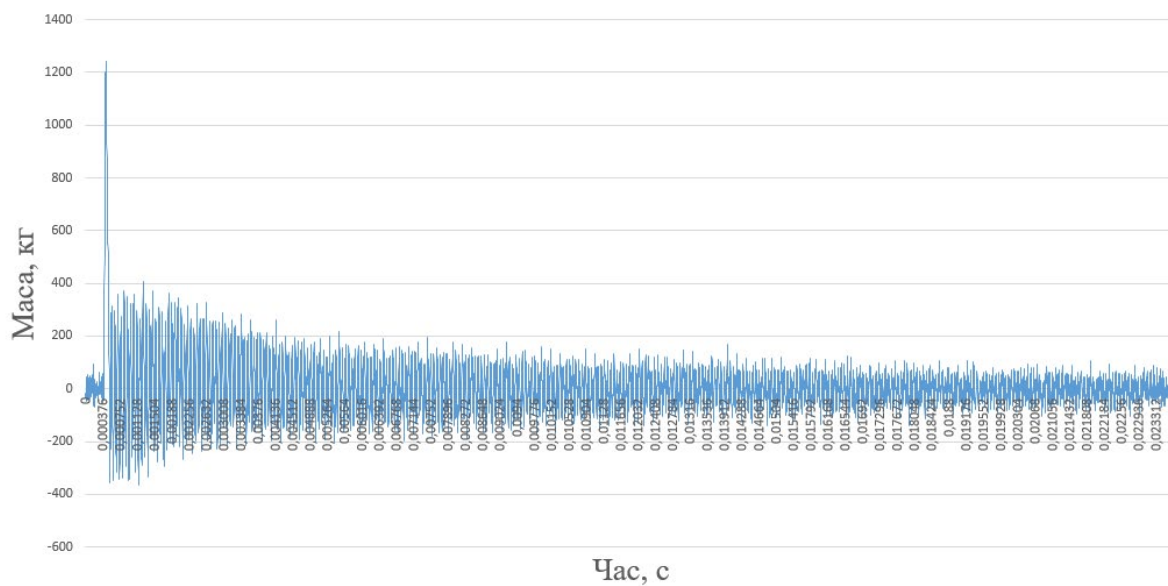
Рис.3.1.5. Графіки вихідної характеристики при встановленому датчику на жорсткій поверхні: а) стрижневий тензорезисторний датчик; б) мембранний тензорезисторний датчик; в) балочний тензорезисторний датчик.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

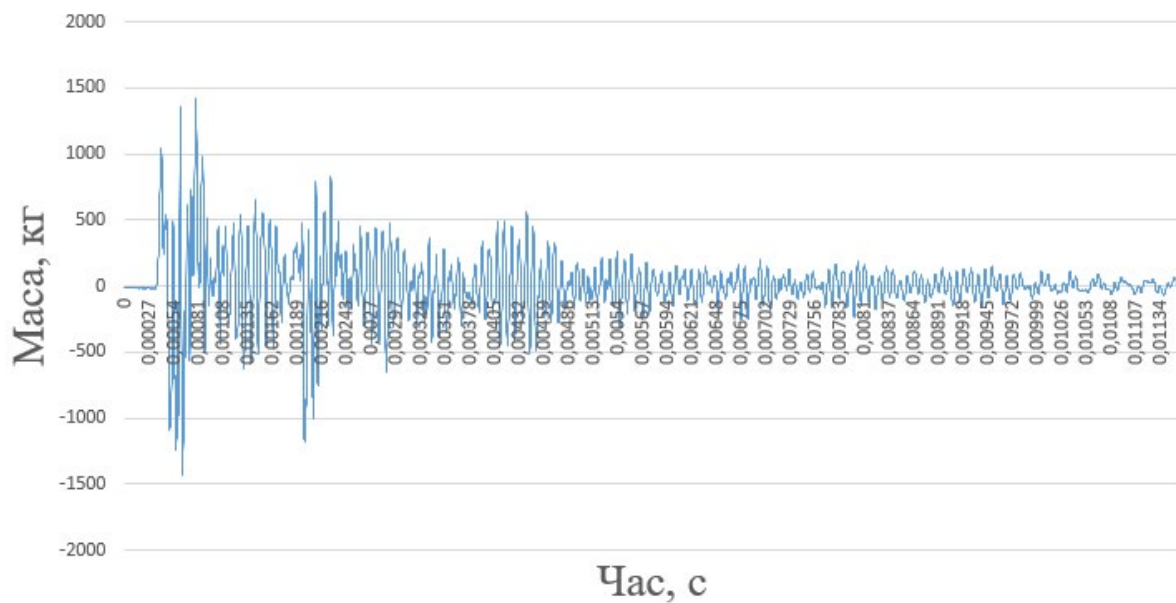
МД ПМ9101.000.00 ПЗ

Арк.

57

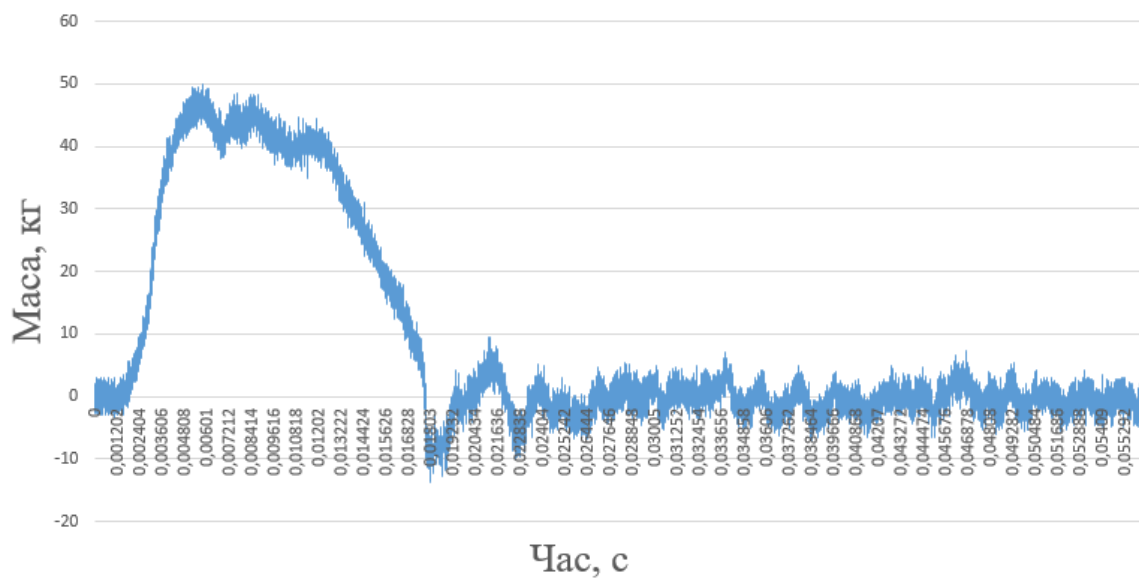


а)



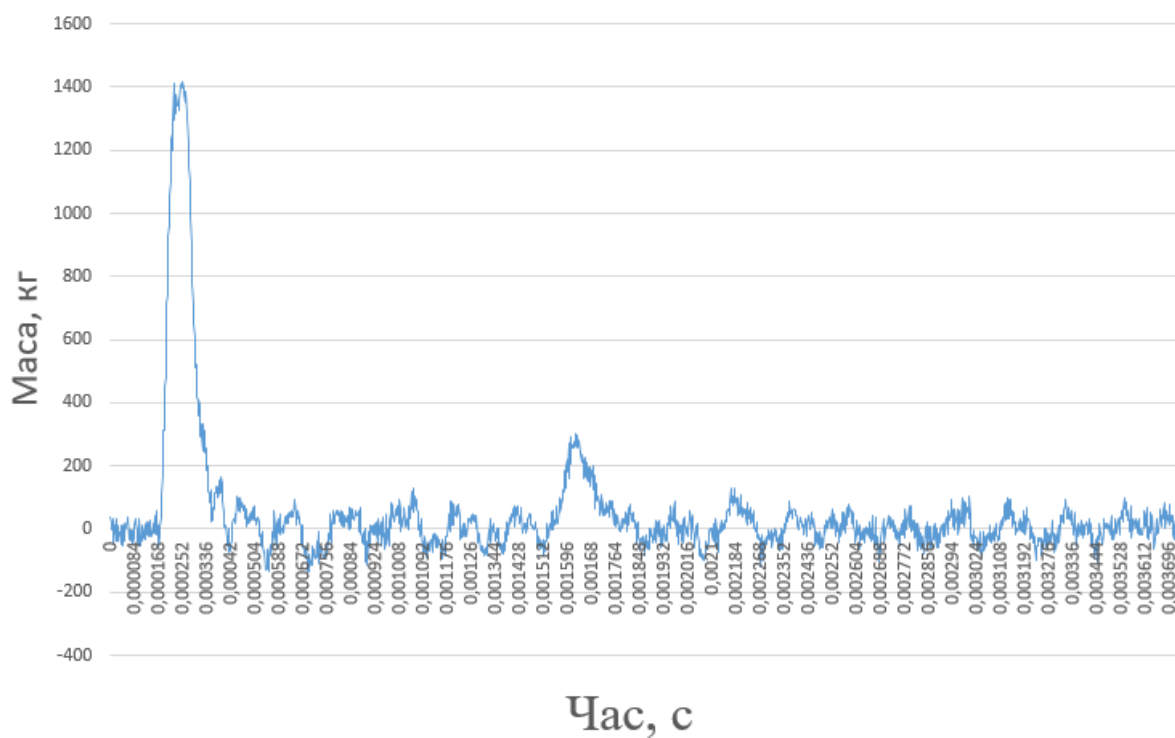
б)

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



в)

Рис. 3.1.6. Графіки вихідної характеристики при встановленому датчику на резині: а) стрижневий тензорезисторний датчик; б) мембранний тензорезисторний датчик; в) балочний тензорезисторний датчик.



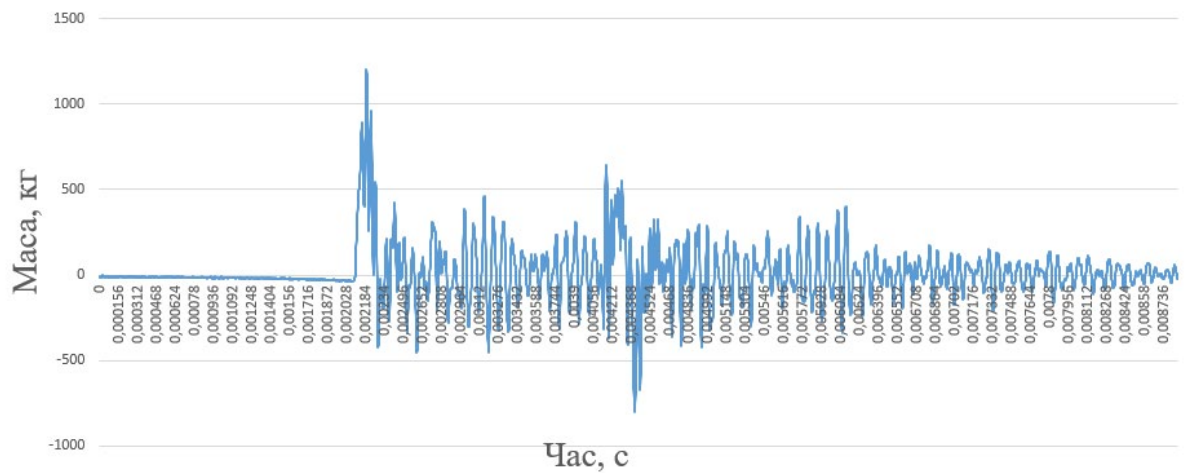
а)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МД ПМ9101.000.00 ПЗ

Арк.

59



б)

Рис. 3.1.7. Графіки вихідної характеристики при встановленому датчику на еластомері: а) стрижневий тензорезисторний датчик; б) мембранний тензорезисторний датчик.

Так як теоретичні розрахунки проведені для датчиків без демпферів тому з результатів експерименту без демпферів виведемо характеристику власних частот досліджуваних датчиків (Рис. 3.1.8. – Рис. 3.1.10.).

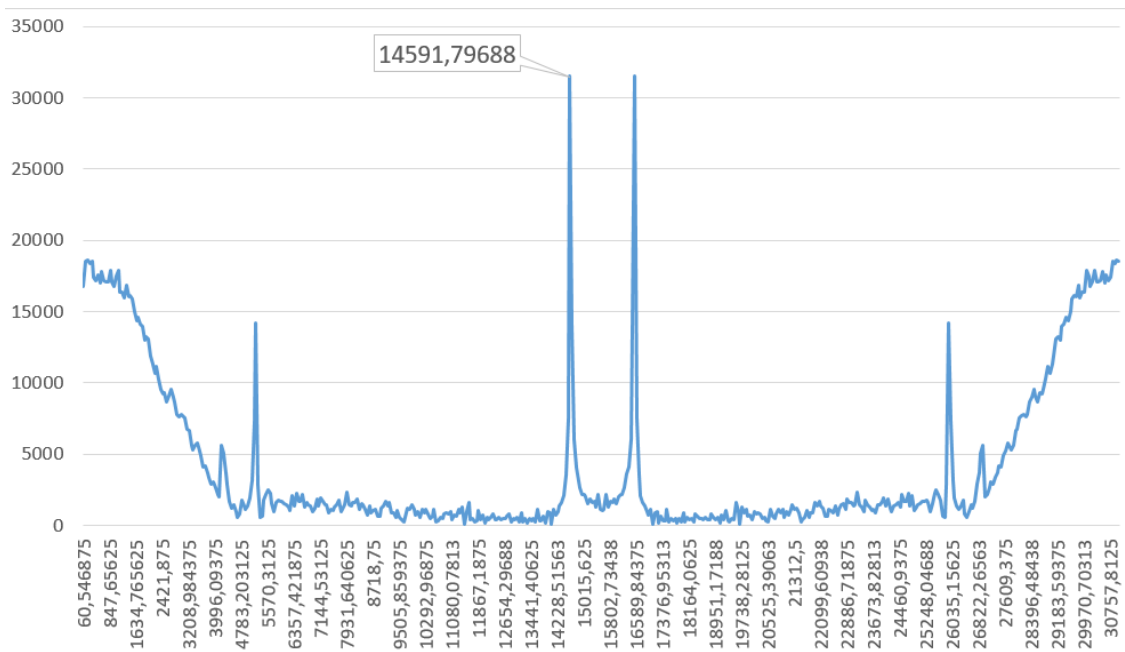


Рис. 3.1.8. Графік характеристики власної частоти датчика стрижневого типу

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МД ПМ9101.000.00 ПЗ

Арк.

60

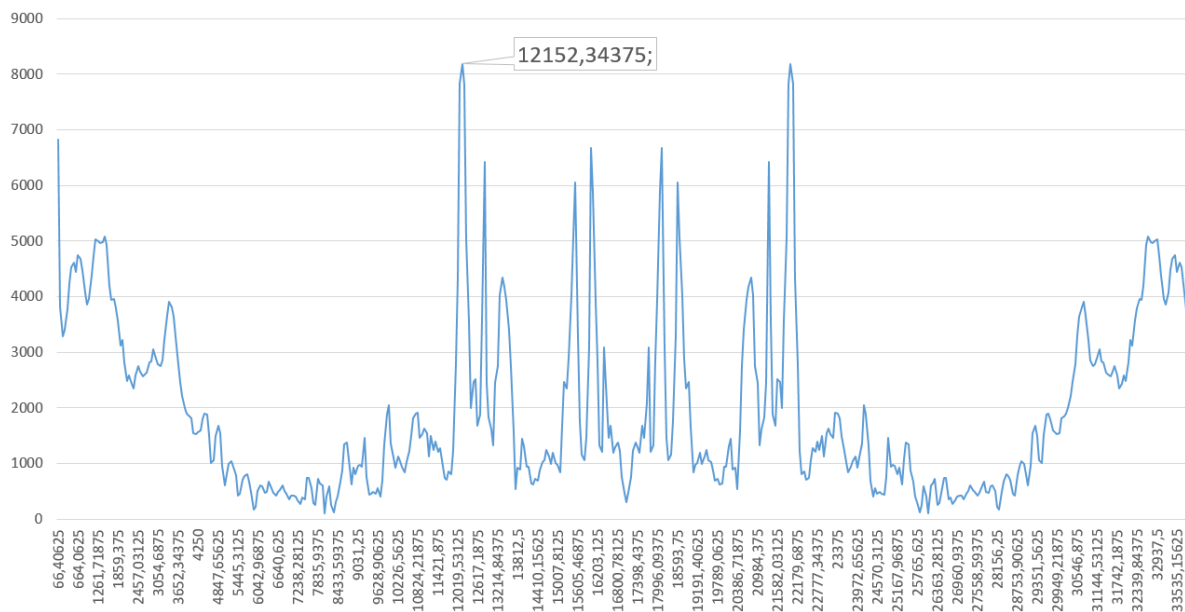


Рис. 3.1.9. Графік характеристики власної частоти датчика мембранного типу

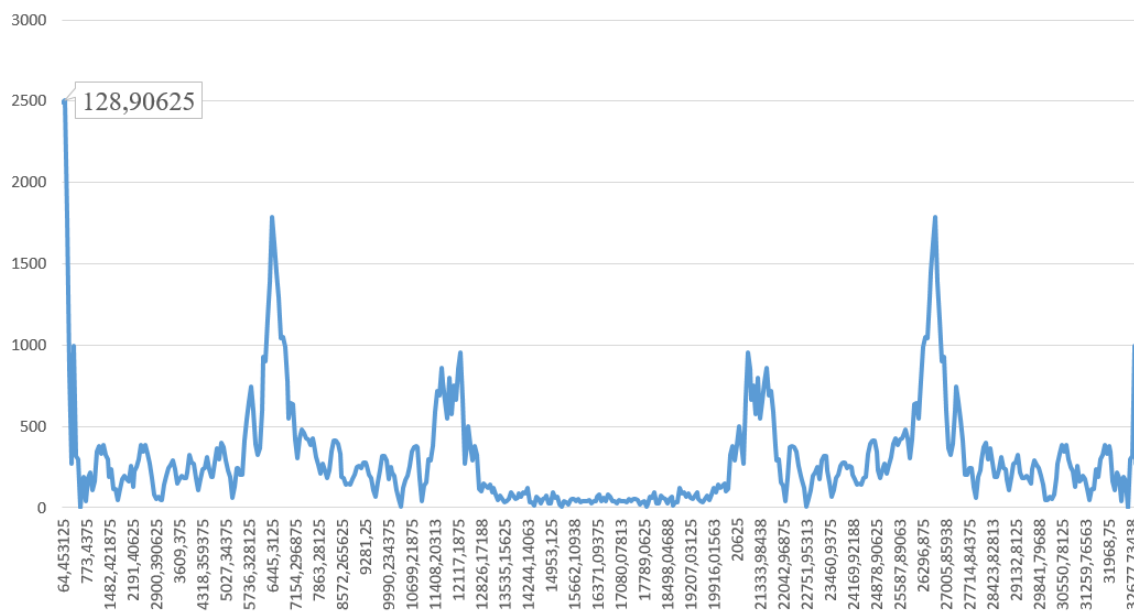


Рис. 3.1.10. Графік характеристики власної частоти датчика балочного типу

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МД ПМ9101.000.00 ПЗ

Арк.

61

В другій частині експерименту було проведено дослід на кидання металевої кульки на датчик при зміні точності вимірювання вимірювальної системи.

На цьому етапі було проведено вимірювання при 20, 200 та 500 тисяч вимірів в секунду (Рис. 3.1.11. – 3.1.13).

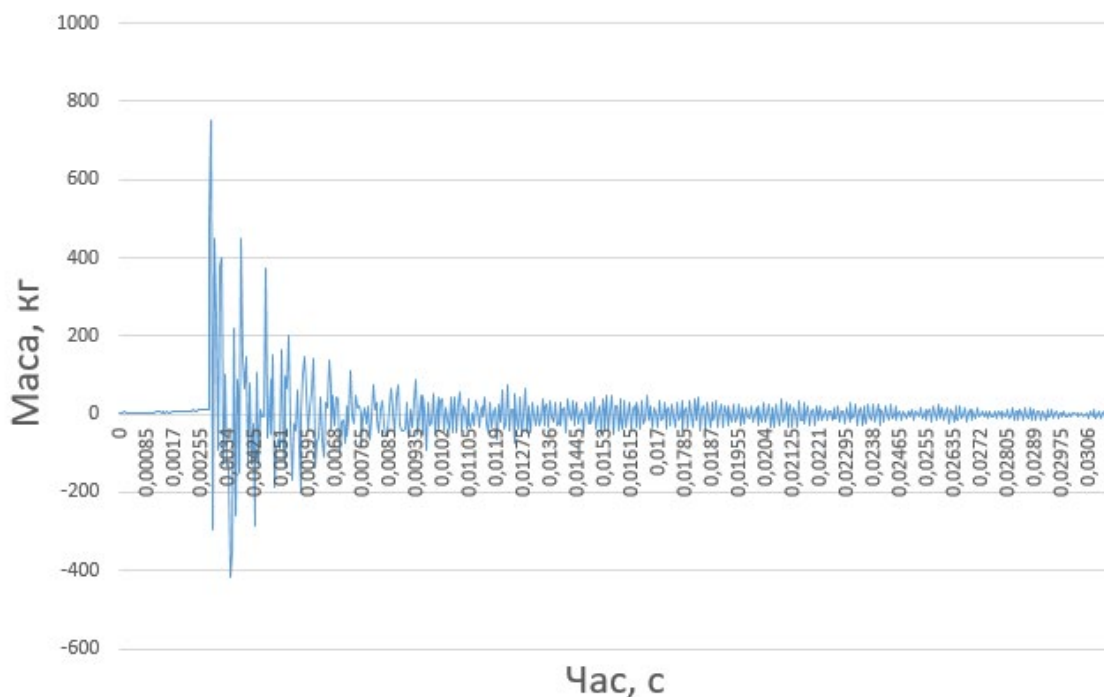


Рис. 3.1.11 Графік вихідної характеристики при 20 тисяч вимірювань в секунду

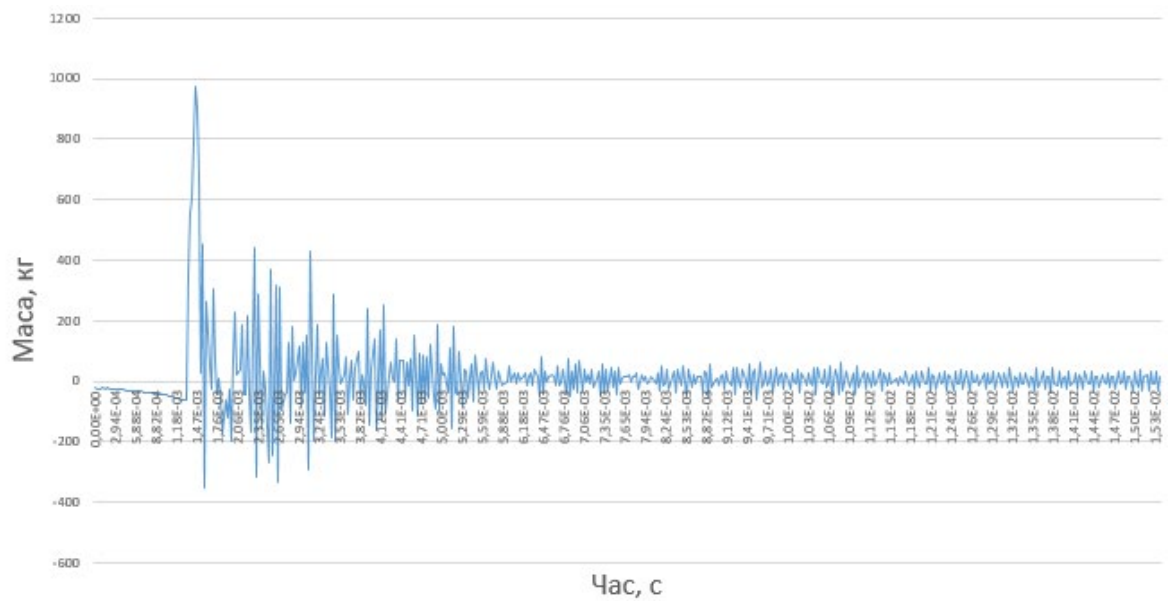


Рис. 3.1.12 Графік вихідної характеристики при 200 тисяч вимірювань в секунду

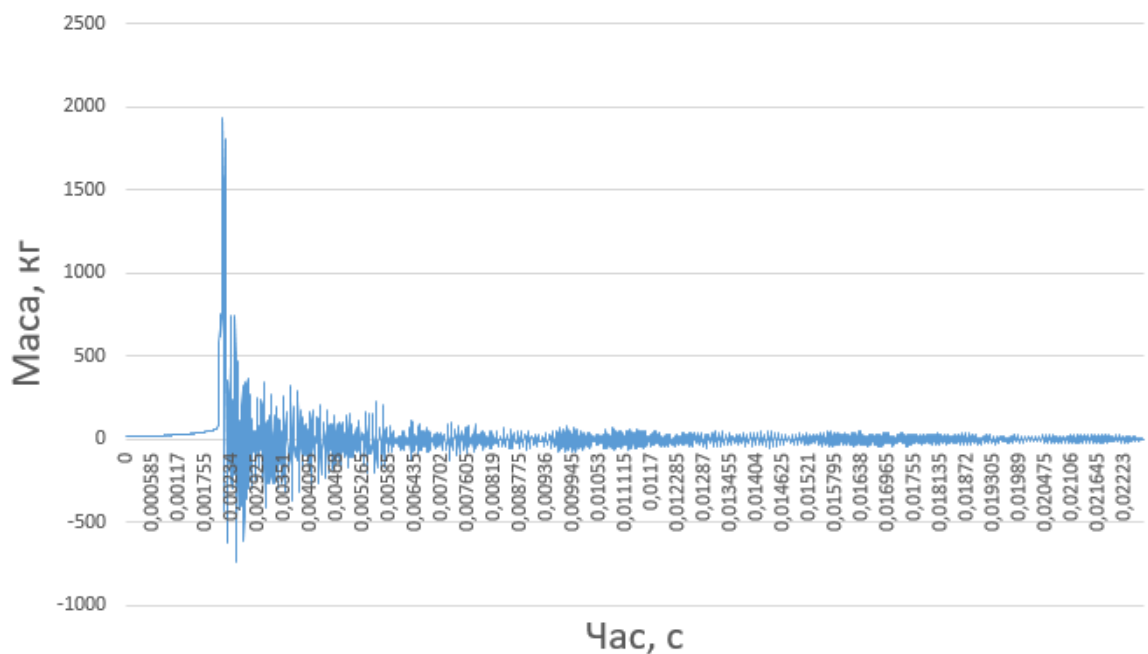


Рис. 3.1.13 Графік вихідної характеристики при 500 тисяч вимірювань в секунду

Згідно показників на Рис. 3.1.11. – 3.1.13 ми бачимо, що обчислювальна потужність вимірювальної системи дуже сильно впливає на показники.

3.2 Експериментальне дослідження №2

Суть експерименту полягає в тому, щоб провести тестування шолома на сертифікованому стенді з використанням високочастотної вимірювальної системи Genesis HighSpeed GEN2tB, для порівняння використовуваної системи з системою, що установлена на стенді відповідно до стандарту STANAG 2092 з обчислювальною можливістю в 10 тисяч вимірювань в секунду.

Даний дослід проводився на спеціальному сертифікованому стенді для дослідження шоломів на ударостійкість на підприємстві «Укрметртестстандар» (Рис. 3.2.1).



Рис. 3.2.1 Сертифікований стенд для дослідження шоломів на ударостійкість

Для впевненості точності показників в даному експерименті було проведено скидання ударника по п'ять разів з різних висот. Висоти з яких було проведено скидання: 1 м, 0,75 м, 0,5 м.

При обробці результатів експерименту виведемо графіки вихідної характеристики вимірювань.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

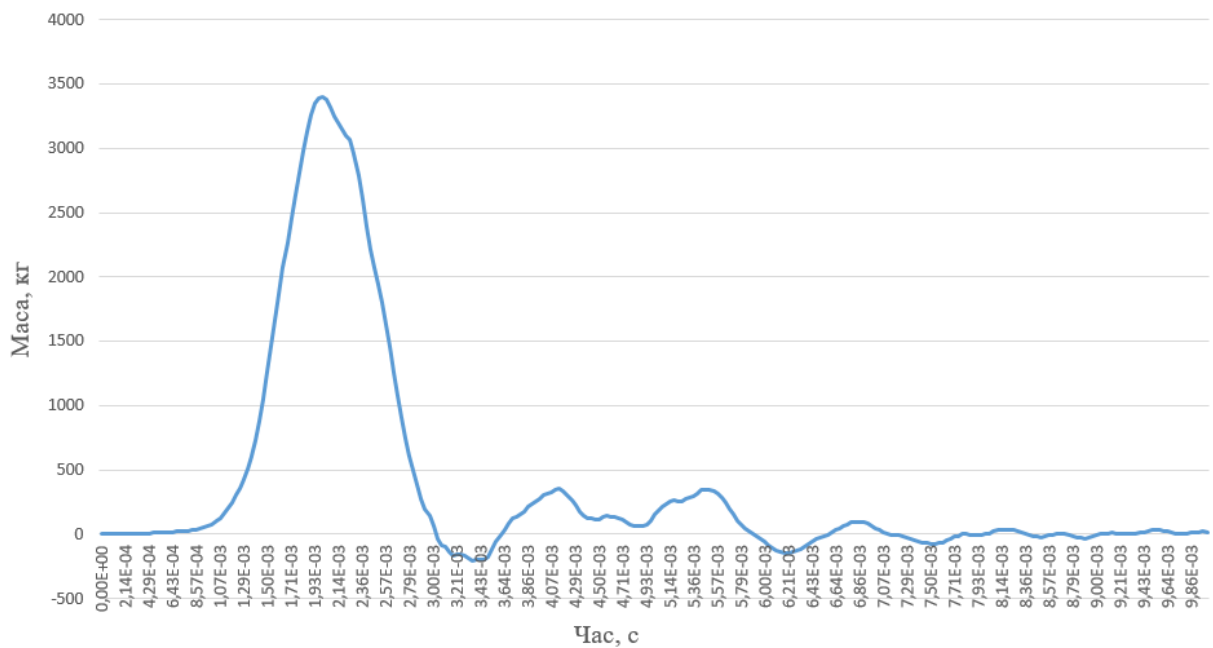


Рис. 3.2.2 Графік вихідної характеристики при скиданні ударника з висоти
1 метр

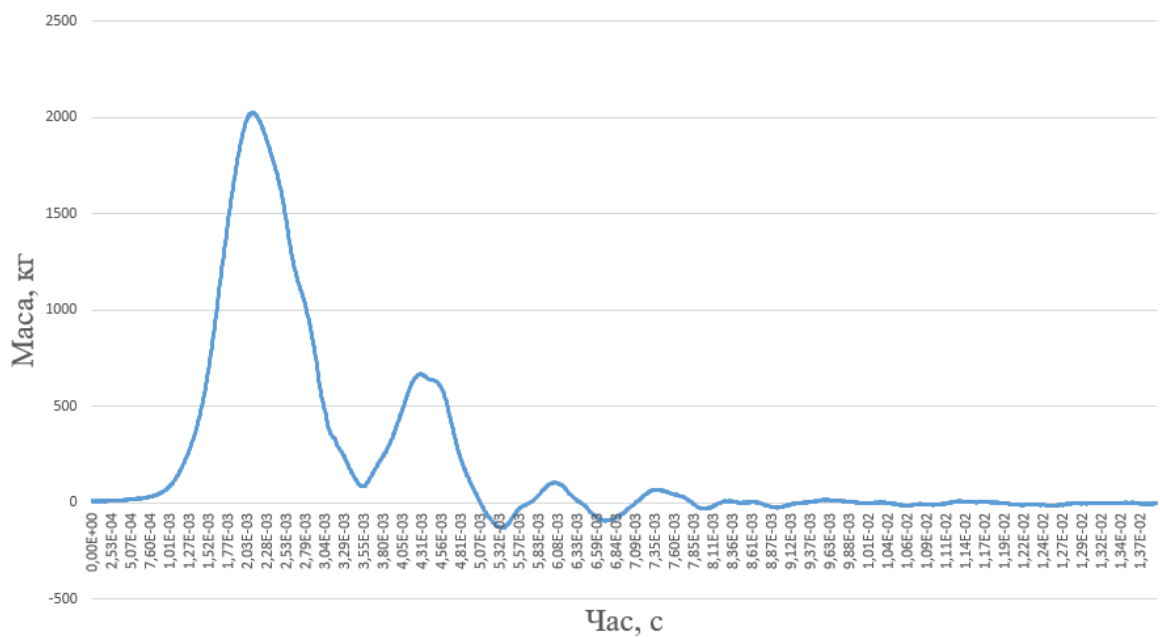


Рис. 3.2.3 Графік вихідної характеристики при скиданні ударника з висоти
0,75 метра

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МД ПМ9101.000.00 ПЗ

Арк.

65

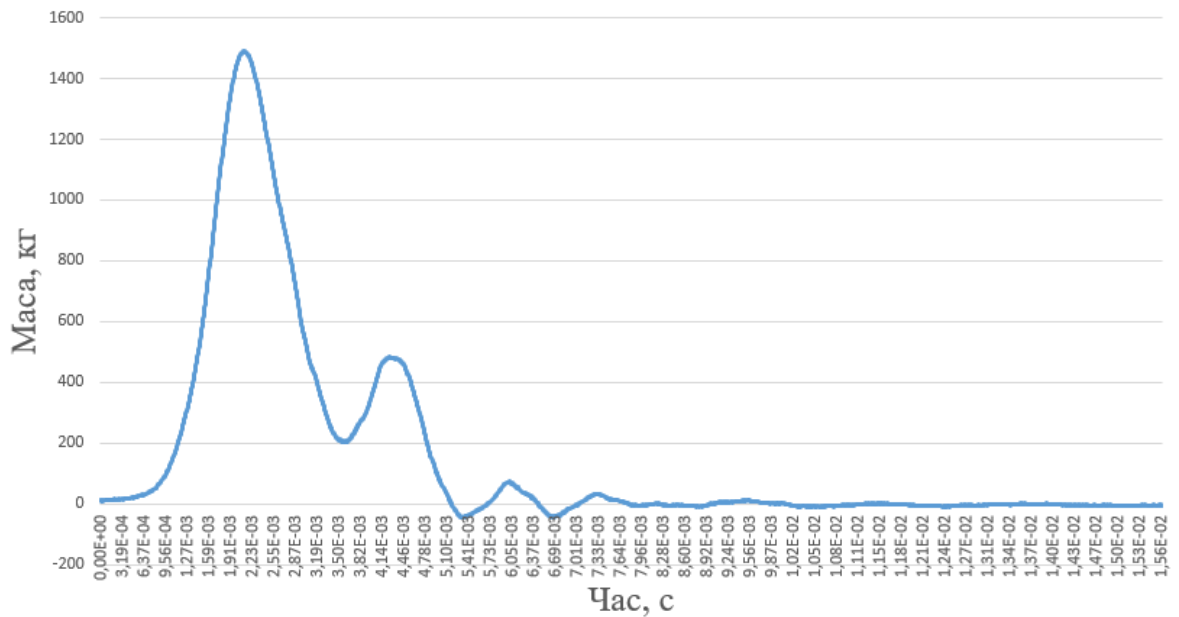


Рис. 3.2.4 Графік вихідної характеристики при скиданні ударника з висоти 0,5 метра

З рисунків 3.2.2 – 3.2.4 бачимо закономірність результатів вимірювань, що відрізняються з відповідною пропорційністю.

Далі взявши дані результатів вимірювання при проведенні експерименту скидання ударника з висоти 1 метр, побудуємо графік власних частот мембранного датчика, що установлений на сертифікованому стенді (рис. 3.2.5).

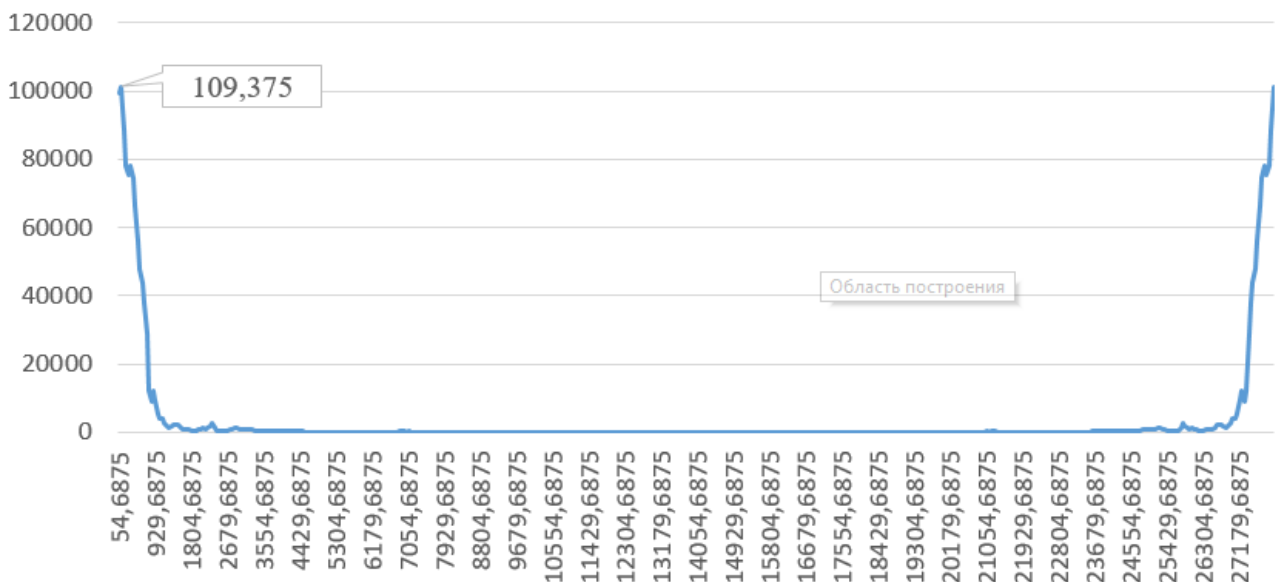


Рис. 3.2.5 Графік власних частот мембранного датчика на сертифікованому стенді

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МД ПМ9101.000.00 ПЗ

Арк.

66

$\omega_0=109.375$. Як бачимо власна частота менша за частоту датчика стрижневого типу. Що ще раз доказує, що датчик стрижневого типу володіє вищою імпульсною характеристикою аніж мембранний, тому більш раціональніше використовувати його у досліджуваній установці на ударостійкість шоломів.

3.3 Висновок до розділу 3

Провівши два експерименти в даній магістерській дисертації можна зробити наступні висновки.

Провівши перший експеримент і обробивши вхідні дані, я побудував графіки власних частот трьох видів датчиків: стрижневий, балочний та мембранний. Порівнявши ці датчики ми визначили, що стрижневий датчик має найвищу характеристику власних частот ніж у двох інших. Тобто він найкраще підходить для того щоб використовувати в нашій досліджуваній установці на визначення ударостійкості військового шолому.

Другий експеримент проводився уже на сертифікованій установці тільки з заміною вимірювально-обчислювальної системи на більш високо-частотну Genesis HighSpeed GEN2tB. При дослідженні було зрозуміло, що датчик на цьому стенді піддається перевантаженням при звичайних тестуваннях. Так як вимірювальна система, що установлена на установці не видавала результати в половину менші ніж на системі, за допомогою якої я проводив експерименти, можна підсумувати, що для установки для досліджування шоломів на ударостійкість потрібно застосовувати високо-частотну систему задля точних вимірювань.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «LoadHel»

4.1 Опис ідеї проекту «LoadHel»

В даному розділі здійснено короткий опис ідеї проекту, опис проблеми, яку він вирішує, напрямки його застосування. Визначення сильних , слабких і нейтральних сторін проекту та його конкурентів. Пред'явлені необхідні ресурси для створення стенду.

Інформаційна карта

Назва проекту – LoadHel.

Автори проекту – Криницький Олександр.

Коротка анотація –Створення стенду для дослідження шоломів на ударостійкість

Термін реалізації проекту – 18 місяців.

Необхідні ресурси – Металеві рейки, бетон , електронні компоненти, шнек, форма голови DOT, металевий ударник, програма для розробки моделі, програма керування , двигуни, гвинти, гайки, гроші.

Опис проблеми, яку вирішує проект – 1) Можливість проведення дослідів на ударостійкість шоломів 2) Можливість сертифікувати шоломи згідно стандартів України

Головні цілі та завдання проекту – 1) Вихід на ринок з високою конкуренто здатністю. 2) Створення робочих місць. 3) Створення якісного пристрою.

Очікувані результати – поява на ринку якісних захисних шоломів, змога Українських виробників вийти на міжнародний ринок , створення робочих місць.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В даному розділі було здійснено маркетинговий аналіз проекту магістерської дисертації для того щоб визначити конкурентно-здатність даної досліджуваної установки на ринку та можливих напрямів її реалізації. Даний аналіз було проведено за алгоритмом що викладений в [4].

В таблиці 4.1.1 представлено зміст ідеї, можливі напрямки застосування, основні переваги та чим відрізняється від аналогів, які може отримати споживач від даного проекту.

Таблиця 4.1.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка установки для дослідження шоломів на ударостійкість та здатність захистити від травм голови тупих ударів	Для підприємств, що виробляють військові шоломи	1. Висока точність вимірювання коефіцієнту демпфування 2. Економія ресурсів та коштів 3. Зручність в роботі з даними
	Для підприємства, що займаються стандартизацією шоломів	1. Висока точність вимірювання коефіцієнту демпфування 2. Економія ресурсів та коштів 3. Зручність в роботі з даними

Дана установка для дослідження військових шоломів дає можливість перевіряти міцність шолома та визначити значення з яким шолом поглинає силу, що виникає під час прикладання удару. Також система проводить виміри на великих частотах, що дає змогу якомога точніше визначити вихідні результати під час тестування шолому.

Аналіз потенційних техніко-економічних властивостей та характеристик стенда для дослідження шоломів, чим саме відрізняється від існуючих аналогів, порівняно із пропозиціями конкурентів (Табл. 4 .1.2).

Таблиця 4.1 .2. Характеристик стенда для дослідження шоломів

п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари/концепції конкурентів				W (слаб касто рон)	N (нейт ральн а сторо на)	S (силн а сторо на)
		Мій проект	НОТОТ ЕСН	ZONHO W	Unuo Instrume nts			
1	Точність	Висока	Середня	Середня	Середня			+
2	Простота процесу калібруван ня	Середн я	Середня	Середня	Середня		+	
3	Вартість використан ня	Середн я	Середня	Середня	Низька		+	

4	Система обробки даних	Висо ка	Середня	Середня	Середня			+
---	-----------------------------	------------	---------	---------	---------	--	--	---

Визначений перелік нейтральних, слабких та сильних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару бали зрозуміти, що стенд володіє значними перевагами в порівнянні з конкурентними компаніями.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту «LoadHel»

Проведемо аудит технології завдяки якій можна реалізувати ідею проекту . Аналіз складових здійсненності ідеї проекту представлений в (Табл . 4.2.1).

Таблиця 4 .2.1. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Створення стенду для досліджен ня шоломів	Самостійне виготовлення всіх комплектуючих.	Не всі деталі є можливість виготовити	Певні технології не доступні
2		Частково самостійне виготовлення всіх деталей .	На певний ряд деталей технологія наявна.	Ті деталі, які неможливо виготовити самостійно наявні на ринку за незначною ціною.
3		Замовлення повністю всіх	Наявна.	Технологія не доступна

		деталей з інших підприємств.		обумовлена високою ціною реалізації.
--	--	------------------------------	--	--------------------------------------

В таблиці 4.2.1 було виділено три основні можливі технології завдяки ким можна реалізовувати проект. Проаналізувавши всі технології реалізації, можна зробити висновок, що найкраще підходить технологія «частково-самостійне виготовлення всіх деталей». З точки економічної доцільності частина деталей виготовляється на власному устаткуванні, а складні електронні компоненти та системи замовляються на ринку.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап -проекту «LoadHel»

В таблиці 4. 3.1 проведено попередню характеристику потенційного ринку із заповненням таких пунктів як: кількість головних гравців, вимоги до сертифікацій, середня норма рентабельності, динаміка ринку (якісна оцінка), загальний обсяг продажів, наявність обмежень для виходу на ринок.

Таблиця 4.3.1 . Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн /ум.од	20 млн грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Фінансова складова. Наявність товарних знаків

5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20%

Як ми бачимо на ринку лише 2 головних гравців на даний момент. Також існують певні обмеження для входу на ринок. Не виявлено ніяких специфічних вимог для стандартизації та специфікації. Загальний обсяг продажів 20 млн грн. Середня норма рентабельності проекту в галузі складає 20%.

Визначимо характеристики потенційних груп клієнтів такі як : вимоги споживачів до товару, цільові сегменти ринку, потреби, що формують ринок, та відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів (Табл. 4.3.2).

Таблиця 4.3. 2. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба , що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінн ості у поведінці різних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Стенд для тестування шоломів на	Компанії , що виробляють шоломи	Технічн ий регламент, відкритість у співпраці,	Надійніс ть, довговічніст ь, ремонтно- пригодність, висока

	ударостійкість		сервісна підтримка.	продуктивність, легкість калібрування
2		Підприємства, що займаються сертифікацією шоломів	Чесність компанії, технічний регламент, сервісна підтримка.	Висока точність, довговічність, надійність, відповідність стандартам НАТО

На ринку існує потреба в стенді для тестування шоломів на ударостійкість. Ця пропозиція цікавить такі аудиторія, як компанії, що виготовляють шоломи для державних або міжнародних замовлень, так і для сертифікаційних компанії для перевірки продукту на відповідність до стандартів. Кожна група має свою поведінку та вимоги до обладнання.

Далі розглянемо фактори загрози, які можуть очікувати на ринку. Це дуже важливий етап в аналізі ринку, так як саме фактори загрози можуть завадити у виконанні планів на майбутнє (Табл. 4.3.3).

Таблиця 4.3.3. Фактори загрози

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Впізнаваність	Повільне розповсюдження бренду через слабку відомість.	Збільшення витрат на рекламну компанію, проведення виставок, та конференцій

2	Конкуренція	Поява на ринку подібного товару з схожими характеристиками але з привабливішими умовами.	Випуск оновлень для існуючого товару, створення нових технологій виробництва, в перспективі брендування.
3	Зміна переваг	Є можливість, що для клієнта будуть важливими інші характеристики ніж ті, що запропоновані.	Гнучкість у розробці нових приладів. Розширення товарної лінії.
4	Втрата конкурентних переваг	Конкуренти можуть ввести конкурентні переваги у конструкції приладу.	Заздалегідь заготовлена проривна технологія, яка в разі втрати конкурентної спроможності зможе реанімувати її знову.
5	Зниження купівельної спроможності	Через кризу у компаніях зменшиться купівельна спроможність.	Оптимізація виробничого процесу, використання більш дешевого матеріалу та зменшення технічних характеристик.

Було виділено п'ять найголовніших факторів загроз: зниження купівельної спроможності, втрата конкурентних переваг, впізнаваність, конкуренція та зміна переваг. На кожен із загроз було розроблено план реакції компанії для вирішення проблеми.

Наступним етапом є фактори можливостей. Потрібно проаналізувати ринок та на основі цього виявити певні можливості завдяки яким можна розробити конкурентноспроможний товар (Табл. 4.3 .4).

Таблиця 4.3.4 . Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Досконаліші технології	Нові систем керування, діагностики.	Збільшення гнучкості та простоти процесу тестування та калібрування за рахунок сучасних систем контролю
2	Ціна	Зменшення ціни продукту	Виготовлення дешевшого продукту за рахунок країни з привабливішими умовами
3	Надійність	Стабільна робота протягом довгого часу	Додатковий етап перевірки готового продукту перед продажом. Контроль якості на кожному етапі, та збільшений коефіцієнт запасу деталей
4	Нові споживачі	Поява на ринку клієнтів яких раніше не	Своєчасний моніторинг ринку для пошуку таких клієнтів та створення попиту

		цікавила дана пропозиція	задовго до появи конкурентів
5	Висока точність	Збільшення точності результатів тестування	Збільшення точності завдяки покращеним сенсорам та збільшення потужності вимірювання

В таблиці 4. 3.4 перелічено фактори можливостей, які допоможуть стати більш конкурентоспроможними, а значить збільшити клієнтську базу та оборот продукту на ринку.

В таблиці 4.3 .5 розглянемо особливості конкурентного середовища, також в чому проявляється його характеристика та вплив на діяльність підприємства у цій сфері.

Таблиця 4.3.5. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому прояв ля-ється дана характери- стика	Вплив на діяльність підприємства (можл иві дії компанії, щоб бути конкурентоспромож ною)
1 . Вказати тип конк уренції - монополія/ олігопо лія / монополістична/чист а	Невелика кількість виробників, яка виробляє той самий товар.	Виділення товару серед інших за рахунок якості, універсальності, і тд .

2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/ національний /...	Даний тип товару купують по всьому світі. Та вихід на національний масштаб є більш вигідним.	Створення більш гнучкої системи для відповідності до стандартів різних країн
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ Внутрішньогалузева	Товари даної категорії знаходяться в одній галузі	Більш рентабельне виробництво, отже, дешевша ціна. Якість краща.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	Товари даної категорії виконують одні функцій	Додаткові можливості перед товарами конкурентів.
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Має кращі характеристики	Покращення технологій. Впровадження нових методів.
6. За інтенсивністю - марочна /не марочна	має марочні знаки, авторське право	Дає змогу управляти рівнем доданої вартості.

Підсумовуючи, даний проект має олігопольний тип конкуренції, так як невелика кількість виробників . Даний бренд має нецінову перевагу, що вказує

на покращені технології. Також стенд має національну конкурентну боротьбу, по причині потреби його на ринку.

Проведемо аналіз конкуренції в галузі за Портером таблиця 4.3. 6 Під час даного аналізу ми можемо визначити вплив прямого конкурента, постачальників, потенційного конкурента, товарів замінників та клієнтів.

Таблиця 4.3.6. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замінники
	Hototech	Unuo Instruments	В нашому регіоні прямі постачальники відсутні	Інформаційно сильні, мають високу закупівельну силу та достатні прибутки	Серед замінників наявні дорогі готові продукти, які не вигідно купувати
Висновки:	З боку конкурентів боротьба буде слабкою по причинам незаповненості товарами.	Є велика можливість входу на ринок. Потенційні конкуренти також мають шанс	Постачальники ні як не впливають на роботу.	Клієнти можуть залишати відгуки на товар, а виконувати і побажання чи ні	Обмеження стосуються цінової політики, через що неможливо задавати

		війти на ринок.		справа виробника.	великі ціни на товар.
--	--	--------------------	--	----------------------	--------------------------

Проведений аналіз з таблиці 4.3.6 показує , що є один сильний конкурент та дефіцит подібного товару на ринку. Це дає змогу для входу на ринок . Також можна сказати, що постачальники та клієнти не диктують свої правила, лише товари замітники.

Проведемо аналіз факторів конкурентноспроможності для подальшого розуміння (Табл. 4 .3.7).

Таблиця 4.3 .7. Аналіз факторів конкурентноспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Ціна	Для багатьох покупців доволі важливим фактором є відношення ціна/якість. В нашому продукті цей фактор буде найкращим.
2	Точність	Багато конкурентних продуктів не оснащені системою для великого частоти запису навантаження
3	Простота	Для роботи з цим пристроєм немає потреб в необхідних навичках

Існує три основні фактори конкурентноспроможності. Перший фактор – ціна, для більшості покупців це дуже важливо. Другий фактор – точність. Третій фактор – простота, клієнти хочуть мати змогу проводити тестування без ускладнень і з малими затратами часу, та простим розумінням роботи системи.

Здійснимо порівняльний аналіз слабких та сильних сторін (Табл. 4.3.8).

Таблиця 4. 3.8. Аналіз слабких та сильних сторін

№	Фактор конкурентноспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Hohotech					
			3	2	1	і		
1	Ціна	18						
2	Універсальність	14	-					
3	Простота	11				-		

Згідно таблиці 4.3.8 робимо висновок, що конкуренти, по даним пунктах, програють найбільше в універсальності, трохи в ціновій політиці, і конкурують на одному рівні по простоті. Це вказує на непогані конкурентні переваги на старті продажу.

В таблиці 4.3.9 проведено SWOT аналіз проекту. Це табличка, у якій вказані сильні та слабкі сторони з загрозами та можливостями, та робиться аналіз.

Таблиця 4.3.9. Аналіз сильних та слабких сторін з загрозами та
можливостями

	Сильні сторони : 1. Універсальність 2. Відношення ціна-якість 3. Висока точність Ремонто-пригодність	Слабкі сторони 1. Не відомий бренд 2. Мала довіра до товару 3. Швидкість виготовлення
Можливості 1. Нові споживачі 2. Розвиток технологій 3. Зростання купівельної спроможності 4. Вихід конкурентів 5. Надійність 6. Висока точність 7. Ціна	Для нових споживачів дуже важливим фактором є низька ціна з високими можливостями . Також ремонт-пригодність заохочує покупців.	За рахунок нових споживачів можна заробити ім'я та стати конкурентами на ринку. За рахунок розвитку технологій підвищити швидкість виготовлення

Загрози 1. Зміна переваг. 2. Втрата конкурентних переваг 3. Зниження купівельної спроможності 4. Вхід конкурентів	Вхід конкурентів компенсується за рахунок універсальності та відношенню ціни до якості. Також універсальність пом'якшує зміну переваг.	Як найшвидше створити клієнтську базу з постійних клієнтів.
---	--	---

Для нових споживачів важливим фактором являється низька ціна з високими можливостями. Компенсувати вхід конкурентів можна за рахунок високої точності та відношення ціни та якості. Завдяки новим споживачам відкривається можливість швидко заробити ім'я та стати конкурентноспроможним на ринку.

В таблиці 4.3.10 зробимо перегляд альтернатив ринкового впровадження стартап-проекту.

Таблиця 4.3.10. Аналіз ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	За рахунок відношення ціна/можливості	Висока	Один рік
2	За рахунок створення бренду	Середня	Півтора роки

Існує дві альтернативи ринкового впровадження стартапу. Перша альтернатива – можливість за рахунок відношення ціни до можливості. Дана альтернатива дає високу ймовірність виконання швидкого строку реалізації та отримання ресурсів. Друга альтернатива – за рахунок створення бренду. Дана альтернатива дає середню ймовірність отримання ресурсів, а час реалізації займає півтора роки.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту «LoadHel»

Потрібно зробити вибір цільових груп та провести аналіз, для того щоб в подальшому орієнтуватись для розробки ринкової стратегії. Знайдемо готовність ринку прийняти продукт, інтенсивність конкуренції та орієнтовний попит в сегменті (Табл. 4.4 .1).

Таблиця 4.4.1. Аналіз цільових груп

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Наукова сфера	Висока	Висока	Низький	Проста
2	Сфера навчання	Середня	Низька	Низька	Середня
3	Сфера виробництва	Висока	Висока	Середня	Середня
4	Дизайн та архітектура	Нейтральна	Низька	Низька	Низька

5	Приватні особи	Нейтраль на	Низька	Низька	Низька
Які цільові групи обрано: Наукова та виробнича сфера.					

Виділено п'ять основних цільових груп потенціальних клієнтів. Найбільш прибутковою та перспективною являється виробнича сфера. А також наукова сфера. Також можлива сфера навчання. З перелічених груп не вигідно орієнтуватись на сфери дизайну і архітектури та приватні особи.

Визначимо базові стратегії розвитку, а також проведемо пошук ключових конкурентноспроможних позицій та стратегій охоплення ринку відповідно обраної альтернативи розвитку проекту (Табл. 4. 4.2).

Таблиця 4.4. 2. Аналіз стратегій ринку

№	Обрана альтернати ва розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспромо жні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Спеціалізо ва-ний маркетинг	Задоволення потреб вибраного цільового сегменту	Легкодоступність, висока точність, надійність	Стратегія спеціалізац ії
2	Диференці йо-ваного маркетингу	Створення продукту з найкращими	Висока точність, надійність, універсальність.	Стратегія диференціа ції.

		характеристиками.		
--	--	-------------------	--	--

В таблиці 4.4.2. наведені дві альтернативи розвитку проекту: спеціалізований маркетинг та диференційний маркетинг. Дві стратегії розвитку: стратегія диференціації або стратегія спеціалізації. Стратегія спеціалізації дає можливість далі розвиватись по двох можливих стратегіях: диференціації та лідерства по витратах. Тому стратегія спеціалізації найвигідніший варіант розвитку проекту.

Проведемо визначення базової стратегії конкурентної поведінки. Дізнаємось чи буде компанія копіювати опорні характеристики товару конкурента та стратегії конкурентної поведінки, чи є проект «першопроходцем» (Табл . 4.4.3).

Таблиця 4 .4.3. Аналіз базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які ?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Проект не є першопроходцем.	Компанія буде по більшій частині забирати існуючих	Певні характеристик и такі як основна структура	Стратегія заняття конкурентної ніші.

		клієнтів у конкурентів	стенду буде скопійована	
--	--	---------------------------	----------------------------	--

Компанія не являється першопроходьцем. Компанія буде орієнтуватись по більшій частині на забирання клієнтів у конкурентів. Стратегія компанії полягає в занятті конкурентної ніші.

Проведемо пошук вимог до товару цільової аудиторії, ключові конкурентноспроможні позиції власного стартап-проекту, базову стратегію розвитку та вибір асоціацій, що мають сформувати комплексну позицію власного проекту (Табл. 4.4.4).

Таблиця 4.4.4. Аналіз вимог до товару цільової аудиторії

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока точність, простота, дешевизна	Стратегія спеціалізації	Ціна, висока точність, надійність, універсальність	Ціна, висока точність, простота.

Вимоги, які потрібні для цільової аудиторії: висока точність, простота, дешевизна. Асоціації які мають з'явитись: висока точність, простота, ціна. Базова стратегія розвитку - спеціалізації. Щодо ключових конкурентоспроможних позицій власного стартапу: висока точність, універсальність, надійність, ціна .

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап- проекту «LoadHel»

Першим кроком в розробці маркетингової програми є формування маркетингової концепції товару, що отримує споживач . Для цього потрібно визначити потребу, ключові переваги перед конкурентами та вигоду, які пропонує товар (Табл. 4.5.1).

Таблиця 4. 5.1. Аналіз потреби та переваг запропонованого товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Точність	Проведення вимірів з частотою 250 кадрів/с	Більш точний тензодатчик та обчислювальна система в порівнянні з конкурентами
2	Експерименти	Можливість змінювати налаштування з цілю покращення характеристик.	Більш гнучкі з обчислювальною системою порівняно з конкурентами.

Потреби, що виникають – це можливість експериментувати та робити виміри з великою точністю. В кожній з потреб є свою вигоду, що пропонує спроектований стенд, а також він має перевагу над конкурентним аналогом .

В таблиці 4.5.2 опишемо три рівні моделі товару. Перший рівень – товар за задумом. Другий рівень – товар у реальному виконанні. Третій рівень – товар із підкріпленням.

Таблиця 4 .5.2. Рівні моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
Товар за задумом	Стенд для дослідження шоломів на ударостійкість вигідний для споживача , тим що його ціна в першу чергу нижча за аналоги. А особливою відмінністю являються висока точність вимірювання		
Товар у реальному виконанні.	Характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Швидкість роботи	М	Тх
	2. Точність	М	Тх
	3. Наявність сенсорного екрану.	М	Тх
	4. Гарантія	Нм	Ор
	5. Сервісне обслуговування	Нм	Ор
	Якість: повна перевірка всіх систем перед відправкою		

	Пакування у дерев'яний ящик з надійним закріпленням товару всередині, щоб зберегти цілісність товару
	Марка: LoadHel
Товар із підкріпленням	До продажу вас консультують, а також є можливість подивитись на демонстрацію товару власними очима.
Товар буде захищено від копіювання за рахунок патентування деяких вузлів, а також привабливою ціною, сервісному обслуговуванні, гарантії на товар.	

Товар за задумом – це стенд для дослідження шоломів на ударостійкість, який вигідний для споживача, така як його ціна нижча за аналоги, а також його точність вимірювання значно вища за аналоги.

В якості товару з підкріпленням виступає те, що до продажу вас проконсультують, а також можна подивитись на демонстрацію роботи стенду власними очима.

Також товар матиме захист від копіювання так як проведено патентування деяких вузлів, а також за рахунок привабливої ціни, гарантії на товар та сервісного обслуговування.

Проведемо визначення цінових меж, для того щоб правильно розуміти вірність встановлення ціни на товар (Табл. 4.5.3).

Таблиця 4.5.3. Аналіз цінових меж

№	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової	Верхня та нижня межа встановлення

			групи споживачів	ціни на товар .
1		Від 170 до 500 тисяч гривень за пристрій.	Середній. До 30 тисяч грн.	Верхня межа 150 тисяч грн. Нижня межа 200 тисяч грн.

Переглянувши рівень цін на товари-аналоги, можна зазначити, що рівень цін досить широкий від 170 до 500 тисяч гривень . Рівень доходів на яку потрібно орієнтуватись складає 30 тис грн. Виходячи з даних таблиці 4.5. з нижня межа складає 150 тис. грн, а верхня 200 тис.грн.

Сформуємо оптимальну систему збуту. Проведемо огляд функції збуту, які має виконувати постачальник товару, специфіки закупівельної поведінки цільових клієнтів, оптимальної системи збуту та глибини каналу збуту (Табл. 4.5.4).

Таблиця 4. 5.4. Аналіз системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів.	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару.	Глибина каналу збуту .	Опти мальна система збуту.
1	Разова покупка	Демонстрація товару та	Робота на всіх рівнях так як клієнтів	Неве ликими партиями.

		подальша консультація	в цій сфері достатньо .	
2	Покупка малою партією	Перед продажна консультація, демонстрація, після продажне супроводження	Робота як з малими так і з великими компаніями. Обґрунтовано великою прибутковіст ю в даному сегменті.	Пере важно великим и партіями.

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів наступна: разова покупка, покупка малою партією. Функції збуту, які має виконувати постачальник товару: демонстрація товару та подальша консультація, перед продажна консультація, демонстрація, після продажне супроводження. Глибина каналу збуту: робота на всіх рівнях так як клієнтів в цій сфері достатньо, робота як з малими так і з великими компаніями.

Концепція маркетингових комунікацій . Розглянемо специфіку поведінки цільових клієнтів, канали комунікації, ключові позиції, завдання рекламного повідомлення та концепція рекламного повідомлення (Табл. 4.5.5).

Таблиця 4.5.5. Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка іка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій , якими користую -ться	Ключові позиції , обрані для позиціону вання	Завдання рекламно - го повідомл ення	Концепція рекламного звернення

		цільові клієнти			
1	Орієнтовані на простоту, відомість бренду, та доступну ціну .	Соціальні мережи, сарафане радіо	Відношення ціна /якість та відомість бренду.	Товар відповідає всім стандартам за доступною ціною	Стильний новий бренд, який має найкращі характеристики за цю ціну.
2	Важливі такі якості як надійність, швидкість, рентабельність та подальша консультація.	Рекомендації від компаній користувачів, від експертів у даній сфері, інтернет реклама.	Орієнтованість на клієнта, технічна підтримка та надійність товару.	Що ми є надійною, інноваційною компанією.	Безпечність, швидкість, надійність, інноваційність

Є дві специфіка поведінки цільових клієнтів . Перша - орієнтовані на простоту, відомість бренду, та доступну ціну. Друга - важливі такі якості як надійність, швидкість, рентабельність та подальша консультація. Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти: соціальні мережи, сарафанне радіо, реклама на вулиці, рекомендації від компаній користувачів, від експертів у даній сфері, інтернет реклама.

4.6 Висновки до розділу 4

З проведеного аналізу можна зробити наступні висновки.

Є три напрямки застосування стенду для випробування шоломів. Такі напрямки як наукова сфера, сфера навчання, сфера виробництва.

Попит у даній сфері тільки набирає оберти через збільшення виробництва шоломів в Україні.

Наразі немає наявних конкурентів яких буде важко перегнати, тож зайняти свою нішу буде досить легкою задачею.

Створити майстерню по виготовленню стенда не займе багато місця а також не потребує дорогого обладнання.

Матеріали, які необхідні для виготовлення стенду можна не дорого купити або виготовити самостійно. Це означає , що собівартість виготовлення також відносно не велика.

Загрози, які можуть виникнути – це втрата конкурентної спроможності , втрата купівельної спроможності у клієнта та мала відомість бренду .

Можливість, яка може виникнути – це поява нових клієнтів там де раніше не було, адже на ринку досить багато запитів на наявність такого товару.

Можна сказати, що у майбутньому попит на цю категорію товарів буде великий, а враховуючі що будуть напрацьовані технології , рентабельність буде великою.

Наразі із всіх бар'єрів вихід на ринок досить потужного конкурента з напрацьованими нововведеннями.

Потреба, яку формують клієнти – це висока точність та швидкодія.

Через те, що деякі з складових товару можуть зноситись є можливість надання послуг по ремонту та додатковий продаж складових, які потрібно замінити.

Подальша імплементація товару є доцільним через ряд переваг над конкурентами та ростом ринку.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі проведеної роботи можна зробити такі висновки.

У сфері виробництва шоломів дуже важливою складовою відіграє тестування шоломів на ударостійкість. Слідуючи з цього важливою складовою в стендах на ударостійкість відіграє точність вимірювання імпульсних процесів при ударі ударника об шолом. Виконуючи дану роботу я дійшов висновку, що обчислювальна техніка та силовий датчик, що використовуюється в стендах на ударостійкість згідно світових стандартів не достатньо точні для якісної оцінки шоломів на ударостійкість.

Щоб вирішити дану проблему було виведено математичні моделі власних частот різних видів тензорезисторних датчиків, щоб виявити, який з типів датчика найкраще підходить для даної задачі. Проведені обрахунки показали, що показних власних частот тензорезисторного датчика сили стрижневого типу найвищий. Відповідно до цього він найкраще сприймає сприймає імпульсні навантаження, що в свою чергу підвищує точність вимірювання стенду.

Далі було проведено експерименти датчиків різних типів, що впевнитись, які з датчиків мають кращі характеристики при імпульсних навантаженнях в практиці. Відповідно до проведених експериментів я удостоверився, що тензорезисторний датчик стрижневого типу має вищі характеристики, ніж датчики інших типів, при імпульсних навантаженнях.

Порівнявши результати теоретичного та експериментального розділів, видно що показники власних частот датчиків відповідають одне одному, а значить обрахунки були вірні.

Також в даній роботі було проведено дослід показників вихідної характеристики, при зміні обчислювальної потужності вимірювальної системи від 20 до 500 тисяч вимірювань в секунду. Згідно результатів ми бачимо на скільки змінюються показники і з впевненістю можна сказати що відповідно

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до стандартів 50 тисяч вимірювання в секунду не достатньо для точного тестування шоломів на ударостійкість.

Провівши експеримент на сертифікованому стенді я ще раз переконався у недостатній точності вимірювання імпульсних процесів при 50 тисяч вимірів в секунду, так як використовуючи вимірювальну систему в 500 тисяч вимір в секунду, результати сильно відрізняються.

Розроблено аналіз стартап-проекту відповідно до якого реалізація даної продукції є комерційно привабливою. Було виявлено сильні та слабкі сторони конкурентів та розроблено маркетинговий план. Також визначився з цільовою аудиторією та наявністю попиту у різних категорія.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вигода Ю.А., Осадчий Еі.П., Тихонов О.І. Проектування вимірювальних елементів (датчиків) систем автоматики. Навчальний посібник. Пенза, Пензській політехнічний інститут, 1977.
2. Долинський Е.Ф. Обробка результатів вимірювань. - М.:Издвостандартов, 1989.
3. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Москва «физматгиз» 1959.
4. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
5. STANAG 2902, NON-BALLISTIC TEST METHODS AND EVALUATION CRITERIA FOR COMBAT HELMETS Edition 3 published by the NATO STANDARDIZATION OFFICE (NSO) 2019.
6. EN 1078:2015, Helmets for pedal cyclists and for users of skateboards and roller skates, published by CEN (European Committee for Standardization) 2015.
7. ECE R22.05, UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF PROTECTIVE HELMETS AND THEIR VISORS FOR DRIVERS AND PASSENGERS OF MOTOR CYCLES AND MOPEDS, published by UNITED NATIONS, 2002.

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

					МД ПМ9101.000.00 ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		