

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Машинобудівний навчально-науковий інститут

Кафедра інженерної механіки та технології машинобудування

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри ІМ та ТМ

д-р техн. наук, професор М.Р. Ткач

« _____ »  2025 р.

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Розробка технології виготовлення та експериментальне дослідження вібраційних характеристик моделі валопроводу (4-160x295)»

Освітньо-професійна програма «Технології машинобудування»

Спеціальність 131 «Прикладна механіка»

Студент групи 6261М

Керівник



Костріков О.А.
(прізвище та ініціали)



Ткач М.Р.
(прізвище та ініціали)

Національний університет кораблебудування

імені адмірала Макарова

Інститут _____ Машинобудівний навчально-науковий _____
Кафедра _____ Інженерної механіки та технології машинобудування _____
Освітній рівень _____ Магістр _____
Спеціальність _____ 131 «Прикладна механіка» _____
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма _____ «Технології машинобудування» _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІМ та ТМ
д.т.н., професор М.Р.ТКАЧ

“ _____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Кострікова Олександра Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи „Розробка технології виготовлення та експериментальне дослідження вібраційних характеристик моделі валопроводу (4-160x295)

керівник роботи д.т.н., професор Ткач М.Р.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ _____ ” _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом роботи 1.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Робоче креслення деталі; нормативна література; держстандарт; довідники

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Загальний розділ: Призначення та аналіз технологічності деталі.

2) Науковий розділ – Аналіз та дослідження з наукової теми роботи.

3) Технологічний розділ: Аналіз заводського техпроцесу. Вибір заготовки. Розробка маршрутної та операційної технології. Розрахунок припусків та режимів різання на одну з поверхонь деталі. Технічне нормування. Вибір обладнання, ріжучого та вимірювального інструменту.

4) Конструкторський розділ: Розрахунок і проектування спеціальних конструкцій пристроїв для верстатів та спеціального металорізального інструменту.

5,6) Охорона праці та навколишнього середовища – Розробка заходів з охорони праці та навколишнього середовища на дільниці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення деталі, заготовки, спеціального пристрою до металорізального верстату, спеціального металорізального або вимірювального інструменту, налагодження до однієї з технологічних операцій, плакати до наукової частини

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5,6			
Нормоконт роль			

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Оформлення та затвердження технологічного процесу. Оформлення креслення деталі (роздруковка у форматі А3)	25.10.2025	
2	Оформлення загального та технологічного розділів (1, 3)	6.11.2025	
3	Оформлення конструкторського розділу (4)	11.11.2025	
4	Оформлення наукового розділу (2)	22.11.2025	
5	Оформлення розділу з охорони праці та навколишнього середовища (7,8)	25.11.2025	
6	Оформлення розділу з цивільного захисту (9)	29.11.2025	
7	Оформлення креслень	до 1.12.2025	
8	Нормоконтроль (креслення у форматі А3)	1-9.12.2025	
9	Затвердження МР на кафедральному перегляді (ПЗ, креслення у форматі А1)	6-13.12.2025	
10	Оформлення та передача електронного варіанту роботи(текстові та графічні матеріали у форматі PDF)	11-16.12.2025	
11	Затвердження МР зав.кафедрою (подання, анотація)	11-16.12.2025	
12	Рецензування	16-22.12.2025	

Студент
(підпис)

(прізвище та ініціали)

Костріков О.А.

Керівник роботи
(підпис)

(прізвище та ініціали)

Ткач М.Р.

« ____ » _____ 2025р.

АНОТАЦІЯ КВАЛІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Проведено дослідження вібраційних характеристик моделі валопроводу (4-160x295).

Методом дослідження є: спекл інтерферометрія, аналітичний розрахунок і комп'ютерна симуляція у CAD системі SolidWorks.

Розроблена технологія виготовлення моделі валопроводу (4-160x295).

Наведено аналіз технологічності конструкції деталі, визначення та обґрунтування типу виробництва, проектування заготовки, а також виконано розрахунки припусків і міжопераційних розмірів. Розроблено маршрутний технологічний процес обробки деталі та визначено режими різання для операцій механічної обробки. Крім того, проведено розрахунки спеціального пристосування, необхідного для забезпечення технологічної точності, надійності та продуктивності виготовлення деталі.

Ключові слова: технологічний процес, механічна обробка, оснащення, охорона праці, метод скінчених елементів, вібраційні характеристики, форми коливань, частоти коливань.

A study of the vibration characteristics of a shaft line model (4-160x295) was conducted.

The research methods used were speckle interferometry, analytical calculation, and computer simulation in the SolidWorks CAD system.

A technology for manufacturing a shaft line model (4-160x295) was developed.

An analysis of the manufacturability of the part design, determination and justification of the type of production, design of the blank, as well as calculations of allowances and inter-operational dimensions were performed. A route technological process for machining the part was developed and cutting modes for machining operations were determined. In addition, calculations were made for a special device necessary to ensure the technological accuracy, reliability, and productivity of the part manufacturing.

Keywords: technological process, mechanical processing, equipment, occupational safety, finite element method, vibration characteristics, vibration modes, vibration frequencies.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Загальна частина.....	10
1.1 Літературний огляд	10
1.2 Опис конструкції і службового призначення деталі.	17
1.3 Аналіз технологічності конструкції деталі	17
1.4 Характеристика матеріалу деталі.....	20
1.5 Визначення типу виробництва	22
2. Технологічний розділ.....	27
2.1. Вибір виду і методу виготовлення заготовки. Розрахунок припусків і міжопераційних розмірів деталі	27
2.2 Розрахунок припусків на фрезерування.	28
2.3 Розрахунок припусків на обробку отворів.	30
2.4 Вибір і обґрунтування технологічних баз	32
2.5. Розробка маршруту механічної обробки деталі, вибір обладнання і.....	33
технологічного оснащення верстатів.....	33
2.6 Розрахунок режимів різання.....	36
3 Конструкторський розділ.....	40
3.1 Проектування пристосування.....	40
4 Експериментальне та 3д розрахункове дослідження моделі валопроводу	46
4.1 Літературний огляд	46
4.2 Експеримент.....	50
4.3 Аналітичний розрахунок	61
4.5 Порівняння результатів досліджень	79
5 Охорона праці	82
5.1 Загальні положення.	82
5.2 Заходи з електробезпеки	83
5.5 Безпека при проведенні експерименту	88
Висновки	90
Література	91

Вступ

Машинобудування є однією з базових і стратегічно важливих галузей промисловості, що забезпечує технологічний розвиток інших секторів економіки – транспорту, енергетики, будівництва, аграрного комплексу та багатьох інших. Дана галузь охоплює проєктування, виготовлення та технічне обслуговування широкого спектра машин, механізмів і обладнання, які застосовуються в різних сферах людської діяльності. Машинобудівне виробництво поєднує різноманітні технології та процеси – від механічної обробки металів до створення високотехнологічних, прецизійних систем і складних машинних комплексів. Ефективне функціонування галузі вимагає впровадження новітніх наукових досягнень, інноваційних технологій і передових інженерних рішень, що гарантують високу якість, точність і надійність продукції.

Процеси проєктування та випробування деталей у машинобудуванні мають визначальне значення для створення ефективних і довговічних технічних систем. На стадії проєктування інженери розробляють концептуальні та детальні конструктивні рішення з використанням комп'ютерних систем автоматизованого проєктування (CAD), таких як SolidWorks. Ці програмні комплекси дають змогу створювати тривимірні моделі, досліджувати їхню поведінку під дією різних навантажень і виконувати конструктивну оптимізацію. Після розроблення моделі деталі піддаються серії випробувань, лабораторних і натурних, для перевірки міцності, зносостійкості, довговічності та відповідності встановленим технічним параметрам. Завдяки цьому забезпечується стабільна якість і надійність готової продукції, що є ключовою умовою конкурентоспроможності будь-якого машинобудівного підприємства.

Процес проєктування деталей охоплює послідовність етапів від формування початкової концепції до виконання детального інженерного аналізу. На початковому етапі визначаються функціональні вимоги до деталі, вибираються матеріали, встановлюються умови експлуатації та геометричні обмеження. Подальше моделювання проводиться у сучасних CAD-системах, таких як SolidWorks, що дає можливість візуалізувати конструкцію, оцінити її ергономічність і технологічність, а також перевірити відповідність технічним умовам.

Особлива увага приділяється аналізу міцності, жорсткості й стійкості деталей під впливом різних силових і температурних навантажень. Для цього застосовуються методи числового аналізу, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ), який забезпечує точне визначення розподілу напружень, деформацій та критичних зон конструкції. Важливою частиною є оптимізація конструкції з метою зменшення маси й матеріаломісткості, що сприяє підвищенню енергоефективності та зниженню виробничих витрат.

Після завершення стадії проєктування здійснюється комплекс випробувань для підтвердження експлуатаційної надійності та відповідності деталі технічним вимогам. До основних видів тестувань належать статичні й динамічні випробування, перевірки на втому матеріалу, корозійну стійкість, термостійкість та інші види впливів.

Особливе значення мають вібраційні випробування, оскільки саме вібраційні навантаження здатні суттєво скоротити ресурс деталі. Для аналізу вібраційних характеристик застосовуються числові методи моделювання, що дозволяють прогнозувати поведінку елементів конструкції під дією коливань і вдосконалювати конструктивні параметри для мінімізації їхнього негативного впливу.

Невід'ємною складовою проєктування та випробування деталей є забезпечення безпеки праці. Це охоплює розробку засобів захисту від потенційно небезпечних факторів (вібрацій, шуму, електромагнітного випромінювання), а також впровадження систем контролю якості на всіх

етапах виробничого циклу.

У межах дипломної роботи також розглядаються напрями оптимізації технологічних процесів на верстатах з ЧПК, що дають змогу підвищити продуктивність, стабільність обробки та знизити собівартість виготовлення деталей. Також методам закріплення заготовок у пристосуваннях, які забезпечують необхідну точність і жорсткість під час механічної обробки.

Таким чином, дана дипломна робота охоплює комплекс питань, пов'язаних із проєктуванням, випробуванням і вдосконаленням процесів механічної обробки деталей у машинобудуванні. Комплексний підхід, заснований на використанні сучасних методів числового моделювання та аналітичного аналізу, забезпечує підвищення якості, технологічної ефективності й відповідності продукції сучасним стандартам безпеки та надійності.

					6261М.03.КРМ.05.01.ПЗ						
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Загальна частина			Лім	Аркуш	Аркушів	
Розроб.	Костріков О. А.	Рко								9	17
Перевір.	Ткач М.Р.										
Н. Контр.											
Затверд.								НУК			

1 Загальна частина

1.1 Літературний огляд

Валопроводи є невід’ємними елементами більшості механічних систем, виконуючи функцію передачі крутного моменту та осьових сил між різними вузлами машинного агрегату. Вони застосовуються у широкому спектрі галузей – від класичного машинобудування та автомобілебудування до авіаційної техніки й енергетичного машинобудування – забезпечуючи стабільну, ефективну та безпечну роботу обладнання. Проектування та експлуатація валопроводів потребують глибокого аналізу фізико-механічних властивостей матеріалів, точних розрахунків міцності й динаміки, а також врахування вібраційних процесів, що істотно впливають на довговічність і експлуатаційні характеристики системи.

Види валопроводів

Валопроводи являють собою механічні вузли, призначені для передачі крутного моменту та силових навантажень між різними частинами машин і механізмів. Залежно від конструктивного виконання, умов експлуатації та функціонального призначення, валопроводи класифікують на кілька основних типів.

1. Прямі валопроводи

Прямі валопроводи застосовуються для передачі крутного моменту вздовж однієї осі, тобто по прямій лінії між двома вузлами. Вони є найпоширенішим типом, оскільки відзначаються простою конструкцією, високим коефіцієнтом корисної дії та надійністю. Такі валопроводи широко використовуються у двигунах внутрішнього згоряння, генераторних установках, промислових верстатах та інших видах обладнання, де передача потужності здійснюється без зміни напрямку руху.

2. Криволінійні валопроводи

Криволінійні валопроводи призначені для передачі крутного моменту за умови необхідності обходу перешкод або зміни напрямку осі обертання.

Вони застосовуються у складних кінематичних системах, зокрема в автомобільних трансмісіях, де забезпечують передачу обертового моменту від силового агрегату до ведучих коліс через компоновання з вигнутими або ламаними траєкторіями. Такі валопроводи можуть складатися з кількох секцій, з'єднаних шарнірами або гнучкими елементами, що дозволяє компенсувати просторові зміщення та кути між вузлами [13].

3. Телескопічні валопроводи

Телескопічні валопроводи використовуються у випадках, коли необхідна зміна їхньої довжини під час експлуатації. Така конструкція дозволяє компенсувати осьові переміщення між механізмами, що з'єднуються, зберігаючи при цьому надійність передачі моменту. Телескопічні системи широко застосовуються у сільськогосподарській техніці, транспортних засобах і приводах змінної геометрії, де можливе періодичне зміщення компонентів у процесі роботи [12].

4. Гнучкі валопроводи

Гнучкі валопроводи забезпечують передачу крутного моменту в умовах, коли конструкція вимагає мобільності або змінного положення вузлів. Вони використовуються у ручних електричних інструментах, медичному обладнанні, вимірювальних пристроях та інших системах, де традиційні жорсткі вали не можуть бути застосовані через конструкційні обмеження. Гнучкі валопроводи виготовляють із спеціальних високоміцних матеріалів – сталевих сплавів або композитів, що поєднують пружність і здатність до згинання без втрати передавальної здатності [14].

Галузі застосування

Валопроводи є невід'ємною складовою великої кількості промислових систем, де вони забезпечують ефективну та стабільну передачу крутного моменту й механічної енергії між вузлами. Їх використання охоплює широкий спектр галузей, серед яких – машинобудування, суднобудування, авіація, автомобільна промисловість і енергетика.

1. Машинобудування

У галузі машинобудування валопроводи застосовуються для передачі крутного моменту в різноманітних механізмах і пристроях, таких як двигуни внутрішнього згоряння, редуктори, промислові верстати, конвеєрні системи тощо. Вони є ключовими елементами кінематичних ланцюгів, від надійності та точності роботи яких залежить ефективність функціонування всього обладнання [14].

2. Суднобудування

У суднобудівній промисловості валопроводи використовуються в системах передачі обертового моменту від головного двигуна до гребного гвинта, забезпечуючи основний рух судна та його маневровість. Через роботу в умовах підвищеної вологості, солоності та змінних навантажень, валопроводи судових установок повинні характеризуватися високою корозійною стійкістю, міцністю та стійкістю до втомних напружень [11].

3. Авіація

В авіаційній техніці валопроводи застосовуються у системах передачі потужності між основними вузлами двигунів та допоміжними агрегатами. Вони забезпечують передачу моменту до генераторів, паливних насосів і систем охолодження. До авіаційних валопроводів висуваються особливо високі вимоги щодо малої маси, термостійкості, а також стабільності характеристик при вібраційних і теплових навантаженнях [13].

4. Автомобільна промисловість

В автомобілебудуванні валопроводи є основними елементами трансмісійних систем і приводів, що передають крутний момент від двигуна до ведучих коліс. Вони повинні забезпечувати високу точність балансування, міцність і надійність при динамічних навантаженнях, сприяючи підвищенню паливної економічності та зниженню шуму під час роботи транспортного засобу [14].

5. Енергетика

В енергетичній галузі валопроводи виконують функцію передачі механічної енергії від турбін до генераторів електричної енергії. В умовах високих температур, тиску та тривалих циклів навантаження до них висуваються вимоги підвищеної надійності, стійкості до деформацій і довговічності. Такі валопроводи повинні забезпечувати безперервність передачі потужності без втрати енергії та з мінімальними вібраційними коливаннями [15].

Матеріали виготовлення

Вибір матеріалів для виготовлення валопроводів визначається експлуатаційними умовами, рівнем навантажень, вимогами до міцності, жорсткості, маси та корозійної стійкості. Серед найбільш уживаних матеріалів – сталь, алюміній, титанові сплави та композитні матеріали.

1. Сталь

Сталь є основним матеріалом для виготовлення валопроводів завдяки своїм високим механічним показникам – міцності, твердості, опору кручення та деформації. Високоміцні леговані сталі забезпечують необхідну жорсткість при дії змінних навантажень, а термічна обробка (загартування, відпуск, цементация) дозволяє значно покращити експлуатаційні властивості та підвищити зносостійкість [13].

2. Алюміній

Алюмінієві сплави застосовуються переважно у транспортному машинобудуванні – авіації, автомобілебудуванні та суднобудуванні – де критичною є мінімальна маса конструкцій. Алюміній відзначається високою корозійною стійкістю, доброю оброблюваністю та прийнятною міцністю, однак поступається сталевим сплавам за показниками опору механічним навантаженням, що обмежує його застосування в умовах інтенсивних силових впливів [12].

3. Титанові сплави

Титанові сплави використовуються у високотехнологічних галузях, де важлива комбінація малої маси, високої міцності та корозійної стійкості. Завдяки цим властивостям титан знайшов широке застосування в авіабудуванні, суднобудуванні, військовій техніці та медичному обладнанні. Незважаючи на значні переваги, висока вартість виготовлення титанових виробів обмежує їх використання лише у критично навантажених вузлах та відповідальних системах [11].

4. Композитні матеріали

Композитні матеріали, зокрема вуглепластики та волокнисті полімери, забезпечують надзвичайно високу питому міцність при мінімальній вазі. Вони мають відмінну стійкість до втоми, корозії та агресивних середовищ, що робить їх придатними для застосування в авіаційно-космічній техніці, спортивному машинобудуванні та енергетичних установках. Недоліками є складність виготовлення, необхідність спеціального обладнання та висока собівартість, що обмежує масове впровадження таких матеріалів у серійному виробництві [14].

Розрахунки та перевірка валопроводів

Розрахунок і перевірка валопроводів здійснюються на основі комплексного інженерного аналізу, спрямованого на забезпечення їхньої надійності, безпеки та ефективності роботи. Основні методи включають статичний, динамічний і чисельний розрахунок.

1. Статичний розрахунок

Статичний розрахунок полягає у визначенні граничних напружень і деформацій, що виникають під впливом сталих навантажень, з метою перевірки здатності валопроводу витримувати прикладені сили без перевищення допустимих меж міцності. Для цього застосовуються положення механіки матеріалів і теорії пружності, а також аналітичні формули та нормативні таблиці, які дозволяють обчислювати напруження залежно від геометричних параметрів і властивостей матеріалу [13].

2. Динамічний розрахунок

Динамічний розрахунок охоплює аналіз поведінки валопроводу під дією змінних навантажень, таких як обертові сили, імпульси або вібрації. Його основна мета полягає у запобіганні виникненню резонансних явищ, що можуть призвести до руйнування конструкції. Для цього проводиться дослідження частотних характеристик системи, визначення власних частот і перевірка відповідності робочих режимів експлуатаційним умовам [14].

3. Чисельні методи

Чисельні методи, зокрема метод кінцевих елементів (МКЕ), використовуються для точного моделювання напружено-деформованого стану складних конструкцій валопроводів із врахуванням матеріальних, геометричних та граничних умов. Застосування МКЕ дає змогу отримати детальну картину розподілу напружень, виявити потенційно небезпечні зони та провести оптимізацію конструкції для підвищення міцності і довговічності [12].

Проблеми вібрацій валопроводів

Вібрації є однією з найбільш поширених і небезпечних проблем під час експлуатації валопроводів, оскільки вони спричиняють зростання зносу, пошкодження деталей і передчасний вихід систем з ладу. Основними причинами вібрацій є невідновженість компонентів, механічні дефекти та резонансні явища.

1. Невідновженість компонентів

Невідновженість компонентів є однією з ключових причин появи вібрацій. Навіть незначне порушення балансу може викликати істотні коливання при високих швидкостях обертання. Ця проблема часто виникає через нерівномірний розподіл маси, похибки виготовлення або знос. Для її усунення застосовується динамічне балансування, що дозволяє рівномірно розподілити масу і знизити рівень вібрацій [12].

2. Механічні дефекти

Механічні дефекти, такі як зношення підшипників, ослаблення з'єднань, тріщини або неправильний монтаж, також є джерелом підвищених вібрацій. Регулярне технічне обслуговування, контроль змащення і перевірка точності встановлення сприяють своєчасному виявленню дефектів і зменшенню ризику пошкодження системи [11].

3. Резонансні явища

Резонансні явища виникають у разі збігу частоти обертання валопроводу з його власною частотою коливань. Це може призвести до значного підвищення амплітуди вібрацій і подальшого руйнування конструкції. Щоб запобігти цьому, проводять аналіз власних частот валопроводу та вживають заходів для зміщення робочих частот за межі резонансної області. Застосування демпферів або зміна конструктивних параметрів дозволяє ефективно мінімізувати ризик резонансу [12].

Методи зниження вібрацій

Для зниження рівня вібрацій у валопроводах використовуються різні інженерні методи.

1. Динамічне балансування

Динамічне балансування забезпечує рівномірний розподіл маси компонентів шляхом додавання або видалення матеріалу у визначених місцях [13].

2. Гасителі вібрацій

Використання гасителів вібрацій – як пасивних (гумові чи пружинні демпфери), так і активних (електронні системи компенсації) – дозволяє суттєво зменшити амплітуду коливань [14].

3. Підвищення жорсткості конструкції

Додатково ефективним заходом є підвищення жорсткості конструкції шляхом використання більш міцних матеріалів або збільшення діаметра валу, що знижує гнучкість системи і мінімізує коливання [15].

Отже, валопроводи є ключовими елементами механічних систем, а точність їхнього розрахунку, вибір матеріалів і заходи щодо зниження вібрацій мають вирішальне значення для забезпечення стабільної, надійної та безпечної роботи промислового обладнання.

1.2 Опис конструкції і службового призначення деталі.

Оскільки валопровід є масивною та габаритною деталлю, для проведення експериментальних досліджень його характеристик доцільно застосовувати модель, яка зберігає основні фізико-механічні властивості оригіналу, але має значно менші розміри. Представлена деталь виконує функцію моделі валопроводу і використовується для експериментальних досліджень, спрямованих на визначення форм власних коливань. Конструктивно деталь оснащена чотирма парами “крил”, що забезпечують необхідну геометрію для дослідження динамічних характеристик.

Базування деталі на опорах експериментального стенду здійснюється через отвори (3,10) діаметром $\varnothing 1H8$ мм, які розташовані вздовж осі симетрії деталі. Габаритні розміри виготовлені відповідно до шостого квалітету точності, а шорсткість поверхонь по периметру становить $Ra = 1,6$ мкм. Крила деталі мають нахили (7,12) у співвідношенні 1:13, у кожному з них виконані отвори (5) діаметром $\varnothing 5H8$. Лицьові поверхні 1 і 2 мають шорсткість $Ra = 0,8$ мкм, що досягається шляхом піскоструминної обробки.

1.3 Аналіз технологічності конструкції деталі

Аналіз технологічності конструкції є одним із ключових етапів підготовки виробництва, що забезпечує відповідність виготовленої деталі технічним вимогам, нормативам точності та показникам якості. Цей процес передбачає комплексне дослідження геометричних параметрів, властивостей матеріалу, умов обробки та складання, а також оцінку можливостей виготовлення із застосуванням наявного обладнання. Ретельна оцінка технологічності дозволяє своєчасно виявити потенційні труднощі, пов'язані з виготовленням або обробкою поверхонь, мінімізувати кількість технологічних

переходів і запобігти появі дефектів на ранніх етапах виробничого циклу.

Правильне виконання даного етапу сприяє підвищенню стабільності технологічного процесу, забезпечує необхідну точність і довговічність виробу, а також оптимізує витрати часу та матеріальних ресурсів. У результаті підприємство отримує підвищену ефективність виробництва, зниження собівартості продукції та поліпшення конкурентоспроможності. Для спрощення аналізу технологічності конструкції складається ескіз із пронумерованими поверхнями деталі (рис. 1.1.), що дозволяє чітко ідентифікувати кожну поверхню під час подальшого аналізу та розроблення технологічного маршруту виготовлення.

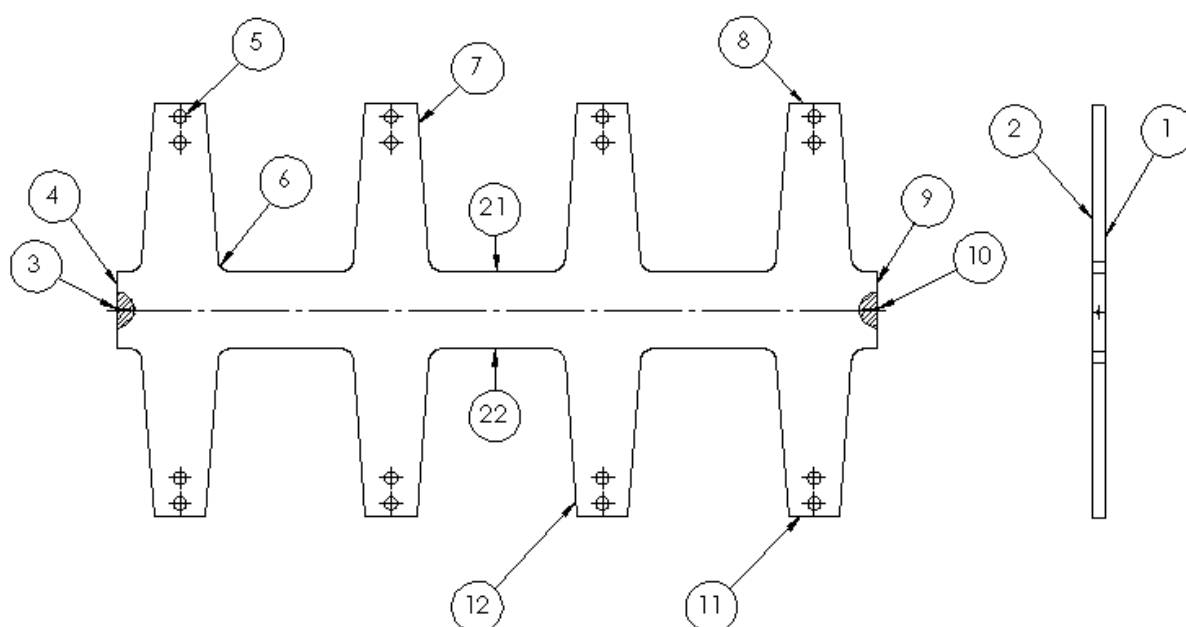


Рис.1.1. Пронумеровані поверхні деталі.

Таблиця 1.1. Точність та шорсткість поверхонь

Номер і найменування поверхонь	Квалітет точності	Відхилення, мм	Клас і параметр шорсткості, мкм
1,2			8 Ra0.8
3,10 – Ø1H8	H8	+0.014 0	6 Ra3.2
4,9 – l=30js8	js7	+0.0125 -0.0125	7 Ra1.6
5 – Ø5H8	H8	+0.018 0	6 Ra3.2
6 – l=r5js8	js7	+0.006 -0.006	7 Ra1.6
7,12 – нахил js8	js7	+0.015 -0.015	7 Ra1.6
8,11 – l=20js7	js7	+0.0105 -0.0105	7 Ra1.6

Оцінка конструкції деталі.

Найточніший квалітет шостий можливо отримати тонким фрезеруванням. Клас шорсткості по периметру деталі сьомий, також отримується тонким фрезеруванням. Найвищий клас шорсткості восьмий на поверхнях 1,2 отримується завдяки піскоструминної обробки.

Кількісна оцінка конструкції деталі:

Ця оцінка вимагає визначення 3 показників:

- Коефіцієнту уніфікації K_y ;
- Коефіцієнту точності K_m ;
- Коефіцієнту шорсткості $K_{ш}$;

За коефіцієнтом уніфікації:

$$K_y = \frac{Q_{ye}}{Q_e} \geq 0.6$$

де, Q_e - загальна кількість елементів; Q_{ue} - кількість уніфікованих елементів;

$$K_y = \frac{48}{64} = 0.75$$

Показник $K_y = 0.75 > 0.6$ тобто конструкція деталі технологічна.

За коефіцієнтом точності:

$$K_m = 1 - \frac{1}{A_{сер}} \geq 0.8$$

де, $A_{сер}$ - середній квалітет точності розміру;

$$A_{сер} = \frac{6 * 2 + 7 * 8 + 8 * 18 + 12 * 36}{64} = 10.06$$

$$K_m = 1 - \frac{1}{10.06} = 0.9$$

Оскільки $K_m = 0.9 > 0.8$ конструкція деталі за цим показником технологічна.

За коефіцієнтом шорсткості:

$$K_{ш} = \frac{1}{B_{сер}} \geq 0.16$$

де, $B_{сер}$ - середній квалітет шорсткості;

$$B_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i n_i}{n}$$

де, B_i – і-тий клас шорсткості; n_i - кількість елементів відповідно класу шорсткості; n - загальна кількість елементів;

$$B_{сер} = \frac{18 * 6 + 2 * 8 + 44 * 7}{64} = 6.75$$

$$K_{ш} = \frac{1}{6.75} = 0.15$$

Оскільки $K_{ш} = 0.15 < 0.16$ конструкція деталі за цим показником не технологічна.

1.4 Характеристика матеріалу деталі

Деталь виготовляється з алюміній-магнієвого сплаву АМГ6 ГОСТ 4784-94. Основа сплаву алюміній. Хімічний склад алюміній-магнієвого сплаву вказаний у таблиці 1.2.

					6261М.03.KPM.05.01.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		20

Таблиця 1.2 Хімічний склад АМГ6 ГОСТ 4784-94

Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cu	Be
магній	марганець	залізо	кремній	цинк	титан	мідь	берилій
5,8... 6,8	0,5... 0,8	до 0,4	до 0,4	до 0,2	0,02... 0,1	до 0,1	0,0002... 0,005

- Магній в комбінації з міддю призводить до того що корозійне руйнування сплаву не протікає по границям зерен.
- Марганець збільшує корозостійкість сплаву.
- Залізо підвищує жароміцність сплаву
- Кремній підвищує міцність сплаву
- Цинк зміцнює алюмінієві сплави після їх загартування та старіння, але зменшує їхню корозійну стійкість.
- Титан додають для отримання більш дрібнозернистої структури.
- Мідь утворює з'єднання з високою твердістю і хрупкістю
- Берилій утворює з алюмінієм евтектику.

Таблиця 1.3 Фізичні властивості сплаву АМГ6 ГОСТ 4784-92

Матеріал	E, ГПа	G, ГПа	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м*с	$\alpha 10^6$, 1/°C	C, Дж/кг°C
АМГ6 ГОСТ 4784-92	73.3	27	2650	122	24.7	922

Характеристики модулю пружності, коефіцієнти лінійного розширення, теплопровідність можуть змінюватись із зростанням температури.

Таблиця 1.4 Необхідні властивості матеріалу для експерименту.

Модуль пружності E, ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Щільність ρ , кг/м ³
73.3	0.33	2650

Таблиця 1.5. Механічні властивості АМГ6 ГОСТ 4784-92

Прокат	Е, ГПа	Г, ГПа	σ ₁ , ГПа	σ _в , (МПа)	σ _{0,2} , (МПа)	δ ₅ , (%)	ψ, %	σ _{сж} , МПа	КСУ, (кДж/м ²)	КСV, (кДж/м ²)
Лист плакований відпалений	73.3	27	100	340	170	20		180		
Лист плакований нагартований 20%				400	300	9		320		
Лист плакований нагартований 30%				420	320	10		330		
Плита нагартована 16%	73.3	27		400	310	7		320	0,2	0,09
Профіль гарячекатаний відпалений				345	170	20,5		170	0,2	0,17
Профіль гарячекатаний без термообробки				355	190	19,5		190		
Поковка відпалена				300	150	14				

1.5 Визначення типу виробництва

Визначення типу виробництва є одним із ключових елементів організації виробничої діяльності, оскільки воно безпосередньо впливає на структуру технологічного процесу, вибір устаткування, методів обробки та системи управління ресурсами. Тип виробництва визначає рівень спеціалізації підприємства, кількість одночасно виготовлюваних виробів, складність технологічних операцій і ступінь автоматизації процесів. Від правильного вибору типу виробництва залежить ефективність використання виробничих

потужностей, продуктивність праці та економічна доцільність виготовлення продукції.

Основними типами виробництва є одиничне, серійне та масове, кожне з яких має свої специфічні ознаки, переваги та обмеження. Одиничне виробництво характеризується виготовленням індивідуальних виробів або невеликих партій продукції, часто за індивідуальними замовленнями. Такий тип передбачає високу гнучкість, але потребує значних витрат часу на підготовку і налагодження обладнання. Серійне виробництво передбачає виготовлення продукції окремими партіями, що повторюються через певні проміжки часу, забезпечуючи баланс між гнучкістю та ефективністю. Масове виробництво характеризується безперервним випуском великої кількості однотипної продукції з високим рівнем стандартизації та автоматизації процесів.

Вибір оптимального типу виробництва визначається низкою факторів, серед яких обсяг і стабільність попиту, складність конструкції виробу, економічна доцільність, доступність матеріально-технічних ресурсів та виробничих потужностей. Рациональне визначення типу виробництва дозволяє підприємству забезпечити стабільну якість продукції, мінімізувати виробничі витрати, оптимізувати логістику та підвищити конкурентоспроможність на ринку. У подальшому розділі детально розглянуто основні типи виробництва, їх структурні особливості, технологічні принципи та критерії вибору для конкретних умов виробничої діяльності.

Маса деталі першої становить 286 г, а річна програма випуску дорівнює 4 одиниці, що відповідає типу виробництва – одиничному. Одиничне виробництво характеризується виготовленням продукції у вигляді окремих, індивідуальних виробів або невеликих замовлень, що не повторюються регулярно. Такий підхід застосовується при створенні унікальних або складних технічних об'єктів, зокрема дослідних зразків, спеціального обладнання, індивідуальних машин, нестандартних конструкцій та прототипів.

					6261M.03.KPM.05.01.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		23

Таблиця 1.5. Визначення типу виробництва(таб1.3 с9 [4])

Маса деталі, кг	Тип виробництва				
	Одиничне	Дрібно- серійне	Середньо- серійне	Крупносерійне	Масове
< 1,0	< 10	10 - 2000	1500 - 100000	75000 - 200000	200000
1,0 - 2,5	< 10	10 - 1000	1000 - 50000	50000 - 100000	100000
2,5 - 5,0	< 10	10 - 500	500 - 35000	35000 - 75000	75000
5,0 - 10	< 10	10 - 300	300 - 25000	25000 - 50000	50000
> 10	< 10	10 - 200	200 - 10000	10000 - 25000	25000

Маса деталі першої становить 286 г, а річна програма випуску дорівнює 4 одиниці, що відповідає типу виробництва – одиничному. Одиничне виробництво характеризується виготовленням продукції у вигляді окремих, індивідуальних виробів або невеликих замовлень, що не повторюються регулярно. Такий підхід застосовується при створенні унікальних або складних технічних об'єктів, зокрема дослідних зразків, спеціального обладнання, індивідуальних машин, нестандартних конструкцій та прототипів.

Основна особливість одиничного виробництва полягає в індивідуальному підході до кожного замовлення та значній варіативності технологічних процесів. Для реалізації цього типу виробництва застосовується переважно універсальне обладнання, здатне виконувати широкий спектр технологічних операцій, зокрема універсальні токарні, фрезерні, свердлильні та шліфувальні верстати, а також ручний інструмент. У багатьох випадках використовується обладнання з числовим програмним

керуванням (ЧПК), що забезпечує високу точність обробки унікальних деталей або невеликих партій продукції. Значну роль у виробничому процесі відіграють спеціальні пристосування та інструменти, виготовлені або налаштовані під конкретне замовлення, такі як індивідуальні затискні пристрої, шаблони чи контрольні інструменти, що гарантують точність і якість обробки навіть при одноразовому виготовленні виробу. Працівники, залучені до одиничного виробництва, повинні мати високий рівень кваліфікації та широкий спектр знань, включаючи читання технічної документації, самостійний підбір режимів обробки, налаштування обладнання та контроль якості продукції. Часто такі спеціалісти володіють універсальними навичками, здатні виконувати кілька видів робіт одночасно, включно з монтажем, налагодженням та випробуванням готових виробів.

Одиничне виробництво потребує високого рівня технічної культури, гнучкості та творчого підходу до вирішення виробничих завдань, що забезпечує адаптацію до унікальних вимог кожного замовлення та підтримання високої якості кінцевої продукції.

					6261М.03.КРМ.05.02.ПЗ											
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Технологічний розділ						Лім	Аркуш	Аркушів			
Розроб.	Костріков О. А.														26	13
Перевір.	Ткач М.Р.															
Н. Контр.																
Затверд.											НУК					

2. Технологічний розділ

2.1. Вибір виду і методу виготовлення заготовки. Розрахунок припусків і міжопераційних розмірів деталі

Вибір заготовки є одним із критично важливих етапів механічної обробки деталей, оскільки він визначає ефективність виробництва, економічність процесу та якість кінцевого виробу. Правильне визначення типу заготовки дозволяє оптимізувати технологічний процес, скоротити витрати матеріалів і зменшити виробничі витрати. Оптимальний вибір заготовки забезпечує економію матеріалів, оскільки мінімізує утворення відходів під час обробки. Наприклад, застосування заготовок, максимально наближених за формою та розмірами до кінцевої деталі, дозволяє істотно знизити обсяг оброблюваного матеріалу та відповідно зменшити витрати на матеріали й утилізацію відходів [16]. Крім того, правильний вибір заготовки знижує час механічної обробки, оскільки обробка таких заготовок потребує меншого обсягу операцій. Використання кованих або литих заготовок, що вже мають форму, близьку до кінцевої, значно скорочує тривалість обробки порівняно із заготовками з суцільного металу, одночасно зменшуючи знос інструментів і витрати на їх заміну [17]. Заготовка впливає також на механічні властивості та якість поверхні готової деталі. Литі або ковані заготовки забезпечують більш рівномірну структуру матеріалу, підвищену міцність і дозволяють уникнути дефектів, які можуть виникати при надмірній обробці або використанні невідповідних матеріалів [18]. Крім того, вибір заготовки оптимізує весь технологічний процес виготовлення, полегшуючи логістику, зберігання та підготовчі операції, що особливо важливо для серійного виробництва [19]. Використання відповідної заготовки також зменшує енергетичні та ресурсні витрати, оскільки скорочується обсяг матеріалу, що піддається обробці, знижується навантаження на обладнання і підвищується його довговічність [17]. Таким чином, ретельний аналіз і правильний вибір заготовки є ключовими для забезпечення економічності, ефективності та високої якості виготовлення деталей. Враховуючи габарити, форму та матеріал деталі, найдоцільнішим

способом отримання заготовки є використання листового прокату. Для цього застосовується лист розміром 350×500 мм і товщиною 5 мм, відповідно до ГОСТ 21631-76 (листи з алюмінію та алюмінієвих сплавів), що забезпечує необхідні розміри і фізико-механічні характеристики для подальшої обробки.

$$\text{КИМ } k = \frac{4 \cdot 286}{2290} = 0.5$$

В якості способу отримання розглядатиметься різання або фрезерування оскільки штамповка або вирубка є нерациональними у одиничному виробництві. Різання листового матеріалу може бути виконана завдяки лазерного або плазмового різача.

Таблиця 2.1 Методи отримання заготовки з листового прокату

Назва	Шорсткість, мкм	Ширина різу, мм	Точність, мм
Лазерне різання	Ra 35	0.2-0.375	+0.05
Фрезерування	Ra 12.5		+0.125
Плазмове різання	Rz 80	0.8-1.5	+0.5

Оскільки плазмове різання має значно меншу точність і шорсткість розглянемо заготовки отримані фрезеруванням і лазерним різанням.

2.2 Розрахунок припусків на фрезерування.

1. Аналіз вхідних даних

Деталь - моделлю валопроводу, матеріал – АМГ6 ГОСТ 4784-94. Маса деталі 286 г. Твердість 45-65 HRC. Тип виробництва одиничний. Габаритні розміри 295x160 мм товщиною 5 мм. Розмір 295js6

2. Вибір способу отримання заготовки.

Обираємо заготовку отриману лазерним різанням. Граничні відхилення і допуск на лазерному різачу: $es_0=0.1$ мм, $ei_0=-0.1$; $T_{заг}=0.2$ мм

Шорсткість периметру після різання $Ra_0=35$ мкм.

3. Складання маршруту механічної обробки поверхні.

Розраховуємо припуск на розмір $L_{дет}=295js6$, граничні відхилення $es_d=0.02$; $ei_d=-0.02$; допуск $T_d=0.04$ мм; шорсткість поверхні $Ra=16$ мкм

Знаходимо загальне уточнення

$$E_{заг} = \frac{T_{заг}}{T_d} = \frac{0.1}{0.04} = 2.5$$

Кількість переходів обробки

$$n = \frac{\lg 5}{0.46} = \frac{0.7}{0.46} = 0.87$$

Приймаємо $n=1$

Тонким фрезеруванням можливо отримати js6 і шорсткість $Ra\ 1.6\ \mu\text{м}$,
 $T_1=0.04\ \text{мм}$.

4. Визначення операційних допусків на всі операції

Таблиця 2.2 Послідовність обробки поверхні $l295js6$

№	Тех перех.	Квал, точ	Доп, мм	відхл	Шор
0	Лазер	10	0.1	+ -0.05	Ra35
1	тонкое	6	0.04	+ -0.02	Ra1.6

5. Визначення всіх переходів величин для Z_{imin}

Визначаємо просторові відхилення ρ .

Сумарні просторові відхилення заготовки з прокату при затисканні в
 лещатах

$$\rho_0 = \sqrt{\Delta_n^2}$$

де Δ_n – похибка точності лазера.

$$\rho_0 = \sqrt{100^2} = 100\ \mu\text{м}$$

Мінімальні значення припусків знаходимо для кожного переходу
 по чергово

$$Z_{nmin} = a(R_{zn-1} + F_{n-1} + \sqrt{\rho_{n-1}^2 + \varepsilon_n^2})$$

$$Z_{1min} = (140 + 5 + \sqrt{100^2 + 35^2}) = 251\ \mu\text{м}$$

Визначення для всіх операцій номінальних значень припусків Z_i за
 формулою:

$$Z_i = Z_{imin} + es_i - ei_{i-1}$$

$$Z_1 = 251 + 20 - (-50) = 321\ \mu\text{м}$$

Визначення номінальних розмірів L_i

$$L_{i-1} = L_i + Z_i$$

$$L_1 = L_{\text{дет}} = 295js6$$

$$L_0 = L_1 + Z_1 = 295 + 0.321 = 295.321 \pm 0.05 \approx 295.4 \pm 0.05$$

Визначення граничних розмірів на всі переходи:

$$L_{imax} = L_i + es_i, \quad L_{imin} = L_i + ei_i$$

$$L_{1max} = 295 + 0.02 = 295.02, \quad L_{1min} = 295 - 0.02 = 294.98$$

$$L_{0max} = 295.4 + 0.05 = 410.45, \quad L_{0min} = 295.4 - 0.05 = 295.35$$

Визначення максимальних припусків $Z_{i \max}$ за формулами

$$Z_{imax} = L_{(i-1)max} - L_{imin}$$

$$Z_{1max} = 295.45 - 294.98 = 0.47$$

Визначення загального припуску на розмір $Z_{\text{заг}}$ за формулою

$$Z_{\text{заг}} = L_0 - L_1$$

$$Z_{\text{заг}} = 295.4 - 295 = 0.4$$

2.3 Розрахунок припусків на обробку отворів.

1. Аналіз вхідних даних

Заготовка отриману лазерним різанням. Граничні відхилення і допуск на лазерному різачу: $es_0=0.1$ мм, $ei_0=-0.1$; $T_{\text{заг}}=0.2$ мм

Шорсткість периметру після різання $Ra_0=35$ мкм.

2. Складання маршруту механічної обробки поверхні.

Розраховуємо припуск на розмір $D_{\text{дет}}=5H8$, граничні відхилення $es_d=0.02$; $ei_d=-0.02$; допуск $T_d=0.04$ мм; шорсткість поверхні $Ra=16$ мкм

Знаходимо загальне уточнення

$$E_{\text{заг}} = \frac{T_{\text{заг}}}{T_d} = \frac{0.1}{0.018} = 0.74$$

Кількість переходів обробки

$$n = \frac{\lg 5}{0.46} = \frac{0.7}{0.46} = 1.62$$

Приймаємо $n=2$

Розсортуванням можливо отримати поверхню можливо отримати H8 Ra3.2

4. Визначення операційних допусків на всі операції

Таблиця 2.2 Послідовність обробки поверхні D5H8

№	Тех перех.	Квал, точ	Доп, мм	відхл	Шор
0	Лазер	10	0.1	+/-0.05	Ra35
1	Зенкерування	9	0.03	+0.03	Ra6.3
2	Розгортання	8	0.018	+0.018	Ra3.2

5. Визначення всіх переходів величин для Z_{imin}

Визначаємо просторові відхилення ρ .

Сумарні просторові відхилення заготовки з прокату при затисканні в лещатах

$$\rho_0 = \sqrt{\Delta_{\pi}^2}$$

де Δ_{π} – похибка точності лазера.

$$\rho_0 = \sqrt{100^2} = 100 \text{ мкм}$$

$$\rho_1 = \rho_0 * K_y = 100 * 0.06 = 6$$

Мінімальні значення припусків знаходимо для кожного переходу по чергово

$$Z_{nmin} = a(R_{zn-1} + F_{n-1} + \sqrt{\rho_{n-1}^2 + \varepsilon_n^2})$$

$$Z_{2min} = 2(25 + 0 + \sqrt{6^2 + 0^2}) = 61 \text{ мкм}$$

$$Z_{1min} = 2(140 + 5 + \sqrt{100^2 + 105^2}) = 580 \text{ мкм}$$

Визначення для всіх операцій номінальних значень припусків Z_i за формулою:

$$Z_i = Z_{imin} + es_i - ei_{i-1}$$

$$Z_1 = 580 + 30 = 610 \text{ мкм}$$

$$Z_2 = 61 + 18 = 79 \text{ мкм}$$

Визначення номінальних розмірів D_i

$$D_{i-1} = D_i + Z_i$$

$$D_2 = D_{\text{дет}} = 5H8$$

$$D_1 = D_2 + Z_2 = 5 - 0.08 = 4.92H9$$

$$D_0 = D_1 + Z_1 = 5.25 - 0.61 = 4.64 \pm 0.05$$

Визначення граничних розмірів на всі переходи:

$$D_{imax} = D_i - es_i, \quad D_{imin} = D_i - ei_i$$

$$D_{2max} = 5 - 0.018 = 4.982$$

$$D_{1max} = 4.92 - 0.03 = 4.89$$

$$D_{0max} = 4.64 - 0.05 = 4.59, \quad D_{0min} = 4.64 + 0.05 = 4.69$$

Визначення мінімальних припусків $Z_{i \min}$ за формулами

$$Z_{imin} = D_{(i-1)min} - D_{imax}$$

$$Z_{2min} = [4.89 - 4.982] = 0.092$$

$$Z_{1min} = [4.69 - 4.89] = 0.3$$

Визначення максимальних припусків $Z_{i \max}$ за формулами

$$Z_{imax} = D_{(i-1)max} - D_{imin}$$

$$Z_{2max} = [4.89 - 5] = 0.11$$

$$Z_{1max} = [4.59 - 4.92] = 0.33$$

Визначення загального припуску на розмір $Z_{\text{заг}}$ за формулою

$$Z_{\text{заг}} = [D_{\text{заг}} - D_{\text{дет}}] = \sum_{i=1}^n Z_i$$

$$Z_{\text{заг}} = [4.64 - 5] = 0.36$$

2.4 Вибір і обґрунтування технологічних баз

Вибір та обґрунтування технологічних баз є одним із ключових етапів у процесі проєктування та виготовлення деталей, оскільки вони визначають орієнтири для правильного розташування виробу на всіх стадіях обробки. Технологічні бази забезпечують точність геометричних параметрів деталі, її взаємозамінність та відповідність технічним вимогам. Раціональний вибір баз дозволяє мінімізувати похибки обробки, створити оптимальні умови для

виконання технологічних операцій та знизити виробничі витрати, одночасно підвищуючи ефективність використання обладнання та інструменту. Застосування правильних технологічних баз є необхідною умовою забезпечення високої якості, надійності та довговічності деталей, що виготовляються, особливо у сучасному машинобудуванні та суміжних галузях промисловості.

Таблиця 2.3

Номер і назва операції	Технологічна база
010 Свердлильна	Установча базою є поверхня 1, направляюча база 8 і опорна база 4.
015 Фрезерна з ЧПК	Деталь надягається на два пальці (звичайний і зрізаний палець), перший палець є подвійною направляючою базою, другий зрізаний палець і поверхня 1 є опорними базами
020 Свердлильна	Установча база 1, направляюча база 13.

2.5. Розробка маршруту механічної обробки деталі, вибір обладнання і

технологічного оснащення верстатів

Розробка маршруту механічної обробки деталі є критично важливим етапом у процесі її виготовлення, оскільки від правильності планування залежить точність, якість та ефективність виробництва. Цей процес передбачає визначення послідовності технологічних операцій, підбір відповідного обладнання та необхідного технологічного оснащення.

1. Аналіз креслень та вимог до деталі

Перший крок включає детальний аналіз креслень деталі, технічних умов та вимог до неї, що охоплює геометрію, матеріали, допуски, види поверхневої

обробки та механічні властивості. Такий аналіз дозволяє визначити ключові етапи обробки та необхідні ресурси для їх реалізації.

2. Вибір технологічних операцій

Наступним кроком є вибір технологічних операцій, які забезпечують формування кінцевих розмірів, геометрії та якості поверхонь деталі.

3. Вибір обладнання

Вибір обладнання здійснюється відповідно до типу операцій, з урахуванням точності та продуктивності наявних верстатів, щоб відповідати вимогам до виготовленого виробу.

4. Вибір інструментів і технологічного оснащення

Для кожної операції підбираються ріжучі інструменти, а також допоміжні пристосування, які забезпечують правильне закріплення та точне позиціонування деталі на верстаті.

5. Складання технологічного маршруту

Складання технологічного маршруту включає послідовний перелік усіх операцій із зазначенням

- типу верстата,
- ріжучого інструменту,
- режимів обробки (швидкість, подача, глибина різання),
- застосованого оснащення та пристосувань
- застосованого контрольних операцій для перевірки точності й якості.

6. Контроль якості

Контроль якості є невід'ємною складовою маршруту, визначаються контрольні точки та методи вимірювання для забезпечення відповідності виготовленої деталі технічним вимогам. Розробка маршруту є комплексним процесом, що потребує ретельного планування та координації технологічних операцій; правильний вибір обладнання, інструментів та оснащення, а також організація контролю якості є критично важливими для досягнення високої точності та надійності продукції. Враховуючи наведені принципи, складено

маршрутний технологічний процес:

005 – контроль матеріалу, розмірів, маркування та супровідної документації;

010 – свердлильна операція для попередньої обробки 12 отворів Ø5;

015 – свердлильна операція для остаточної обробки 12 отворів Ø5;

020 – фрезерна обробка на верстаті з ЧПК для остаточного формування поверхонь;

025 – свердлильна операція для остаточної обробки отворів Ø3 та Ø10;

030 – слюсарна операція зі створення фаски $F=0,3$ з обох сторін по периметру;

035 – контрольна операція; 040 – піскоструминна обробка поверхонь 1 та 2;

045 – контрольна операція відповідно до вимог робочого креслення.

Виготовлення деталі планується здійснювати як довантажувальне навантаження на верстати, що перебувають у простої, що дозволяє ефективно використовувати виробничі потужності та оптимізувати час обробки.

Для виготовлення деталі було обрано наступні верстати:

Фрезерний верстат з чпк Proxxon FF 500/70 CNC

- споживана потужність, Вт 500
- швидкість обертання шпинделя, об/хв 200-4500
- хід подачі, мм 30
- висота, мм 430
- робочий стіл ширина, мм 550
- робочий стіл довжина, мм 550
- регулювання по осі X, мм 310
- регулювання по осі Y, мм 100
- регулювання по осі Z, мм 180
- вага, кг 47

Свердильний верстат JET JDP-10L-M

- Потужність, кВт 0,45
- Напруга, 230
- Хід пінолі шпинделя, мм 60
- Виліт шпинделя, мм 126
- Число швидкостей 12
- Частота обертання шпинделя на холостому ході, об/хв
220-2450
- Кут нахилу робочого столу $\pm 0-45^\circ$
- Максимальний діаметр затиску для свердл, мм 16
- Конус шпинделя/посадка патрона МК2/ В16
- Максимальна відстань шпиндель-стіл, мм 400
- Відстань шпиндель основа, мм 520
- Розмір столу 200x195 мм
- Довжина, мм 530
- Ширина, мм 300
- Висота, мм 820
- Маса, кг 32,5

2.6 Розрахунок режимів різання.

Розрахуємо режими різання для фрезерування.

Розрахунок режимів різання є ключовим аспектом у процесі механічної обробки, що безпосередньо впливає на продуктивність, якість і економічність виробництва. Правильно визначені режими різання, які включають швидкість різання, подачу та глибину різання, дозволяють оптимізувати процес обробки, забезпечуючи високу точність і чистоту обробленої поверхні, а також мінімізуючи знос інструментів і витрати на виробництво. Вибір оптимальних режимів різання враховує характеристики матеріалу деталі, тип і стан ріжучого інструменту, а також можливості обладнання. Розуміння і застосування цих принципів є необхідними для підвищення продуктивності та

конкурентоспроможності виробництва.

Обробляти деталі будемо пакетами з 2х штук. Глибина фрезерування $t=0.4$ мм, ширина фрезерування $B=15$ мм. Число зубів $z=4$ Діаметр фрези $D=10$ мм. Подача фрези $s=0.2$ мм/об [3, таб.78]. Подача на зуб $s_z=s/z=0.2/4=0.05$ мм/об.

Визначаймо швидкість різання

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m t^x s^y B^u z^p} K_v$$

C_v і коефіцієнти [3, таб.81]. Приймаємо період стійкості різання $T=60$ хв.

$$K_v = K_{mv} K_{pv} K_{nv} = 1 * 0.9 * 1 = 0.9$$

Значення K_{mv}, K_{pv}, K_{nv} [3, таб. 4,5,6]

$$V = \frac{208 * 10^{0.45}}{60^{0.33} 0.4^{0.3} 0.2^{0.4} 15^{0.1} 4^{0.1}} 0.9 = 227 \text{ м/мин}$$

Частота обертання шпинделя

$$n = \frac{1000 * V}{\pi * D} = \frac{1000 * 227}{3.14 * 10} = 7240 \text{ хв}^{-1}$$

Приймаємо n_d за паспортними даними

Встановлюємо дійсну швидкість різання

$$V_d = \frac{\pi * D * n_d}{1000} = \frac{3.14 * 10 * 4500}{1000} = 141 \text{ хв}^{-1}$$

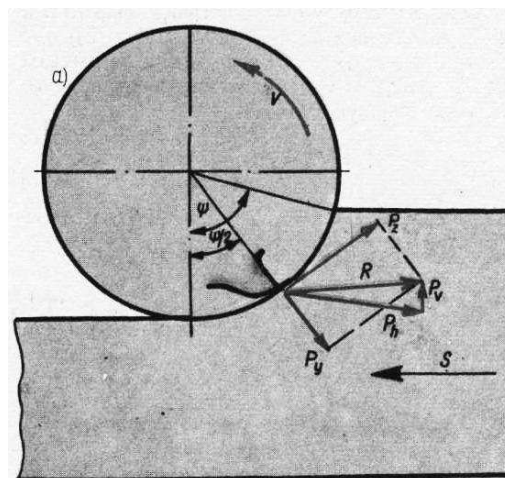


Рис. 2.1. Схема сил різання при зустрічному фрезеруванні.

Сила різання. K_{mp} [3, таб.10], $C_{p,w}$ [3, таб.83]

$$P_z = \frac{10 C_p t^x s_z^y B^u}{D^q n_d^w} K_{mp}$$

$$P_z = \frac{10 * 68.2^{0.86} * 0.05^{0.72} * 15^1 * 4}{10^{0.86} * 4500^0} 2.75 * 0.25 = 204 \text{ Н}$$

Значення інших сил [3, таб.84] при зустрічному фрезеруванні

Горизонтальна $P_h = 224 \text{ Н}$

Вертикальна $P_v = 51 \text{ Н}$

Радіальна $P_y = 102 \text{ Н}$

Осева $P_x = 61 \text{ Н}$

Крутний момент

$$M_{кр} = \frac{P_z D}{2 * 100} = \frac{249 * 10}{2 * 100} = 10.214 \text{ Н * м}$$

Схема сил різання зазначена на рис. 2.1.

Потужність різання

$$N_e = \frac{P_z V_d}{1020 * 60} = \frac{249 * 141}{1020 * 60} = 0.47 \text{ кВт}$$

Для інших операцій режими різання були знайдені табличним методом

№	Операція	Д или В	L	t	i	S
010	Свердлувальна з ЧПК	Ø4.92	10	0.3	1	0.6
015	Свердлувальна з ЧПК	Ø5	10	0.3	1	0.6
025	Свердлувальна	Ø1	5	0.3	1	0.02

					6261М.03.КРМ.05.03.ПЗ						
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Конструкторський розділ	Літ		Аркуш		Аркушів	
Розроб.		Костріков О. А.							39	6	
Перевір.		Ткач М.Р.				НУК					
Н. Контр.											
Затверд.											

3 Конструкторський розділ.

3.1 Проектування пристосування

У сучасному машинобудуванні особливе значення має підвищення продуктивності праці, точності обробки та зменшення часу на налагодження обладнання. Одним із ключових засобів досягнення цих цілей є використання спеціальних пристосувань, які дозволяють значно скоротити час на встановлення та зняття заготовок, забезпечують високоточне позиціонування і сприяють підвищенню якості виготовлених деталей.

Проектування таких пристосувань є важливим етапом технологічного процесу для деталей із підвищеними вимогами до точності. Пристосування розробляється з урахуванням специфіки технологічного процесу, геометрії заготовки та вимог до кінцевого виробу. Воно повинне бути простим у використанні, надійним та забезпечувати точне налаштування обладнання.

Основні вимоги до конструкції пристосування включають точність і надійність позиціонування: воно повинно забезпечувати фіксацію заготовки у заданому положенні з високою стабільністю та стійкістю до деформацій і вібрацій під час обробки; жорсткість: конструкція має бути достатньо міцною, щоб витримувати навантаження під час фрезерних і свердлильних операцій; ергономічність і безпека: пристосування повинно бути зручним і безпечним у користуванні; стійкість до зносу: матеріали та конструктивні рішення повинні забезпечувати тривалу експлуатацію без втрати функціональних характеристик; відповідність технологічним вимогам: пристосування має відповідати параметрам обробки, забезпечуючи необхідні режими роботи; економічність: конструкція повинна бути доцільною як у виробництві, так і в експлуатації, із використанням матеріалів і технологій, що оптимально поєднують ціну та якість. Дотримання цих вимог дозволяє створити ефективне та надійне пристосування, що сприяє підвищенню продуктивності та якості обробки. Для забезпечення можливості обробки деталі по контуру без повторного встановлення необхідно зафіксувати її так,

щоб не заважати ходу ріжучого інструмента. Базування деталі здійснюється по поверхні 1 та отворах Ø5H8 на два пальці звичайний і усічений. Схема базування деталі наведена на рис. 3.1.

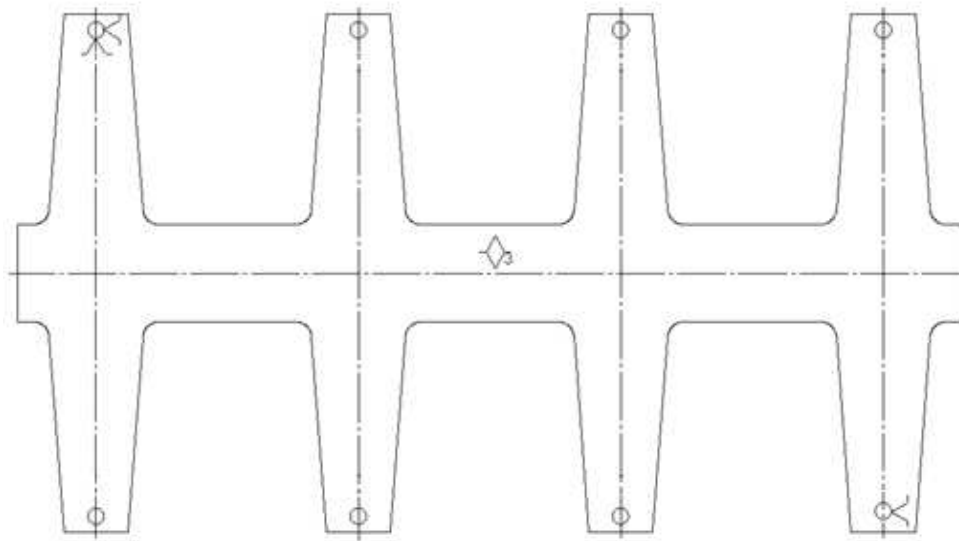


Рис.3.1. Схема базування.

1. Визначення сили різання

Першим етапом у закріпленні деталі є визначення сили різання (P_h) – основної сили, яка діє на деталь під час механічної обробки. Значення сили різання залежить від типу матеріалу деталі, режимів різання та характеристик застосованого інструмента.

2. Визначення необхідних сил затискання

Для забезпечення надійного утримання деталі слід розрахувати сили затискання з урахуванням коефіцієнта тертя (f) між контактуючими поверхнями деталі та пристосування. Коефіцієнт тертя визначається матеріалом контактуючих поверхонь та наявністю мастильних речовин.

3. Розрахунок сили затискання

Загальна сила затискання (Q) обчислюється за співвідношенням, яке враховує силу різання та коефіцієнт тертя. Розрахована величина повинна перевищувати діючу силу різання, забезпечуючи стабільне утримання деталі під час обробки.

4. Врахування додаткових факторів

Для забезпечення безпеки до розрахованої сили затискання додається коефіцієнт запасу, який враховує можливі коливання сили різання та інші непередбачувані фактори. Сили затискання повинні бути рівномірно розподілені по поверхні деталі, щоб уникнути її деформації або пошкодження.

5. Визначення точки застосування сил затискання

Важливо правильно вибрати точки прикладання сил затискання. Вони повинні знаходитися якомога далі від лінії дії сили різання, що дозволяє збільшити момент стійкості та забезпечити максимальну стабільність деталі під час обробки.

6. Практичне застосування і тестування

Після теоретичних розрахунків необхідно провести практичні випробування, які включають контрольні тести із поступовим збільшенням сили різання до розрахованих значень. Це дозволяє перевірити стабільність закріплення деталі та коректність налаштувань пристосування.

Таким чином, процес визначення сил для закріплення деталі в пристосуванні базується на розрахунках із урахуванням сили різання та коефіцієнта тертя, додаткових факторів безпеки, рівномірного розподілу затискальних сил та правильного вибору точок їх прикладання, що забезпечує надійне і стабільне утримання деталі під час обробки.

Розрахуємо похибку базування для осі симетрії деталі відносно отвору

$$\Delta_6 = 0.03 + \frac{0.04}{2} = 0.05 \text{ мкм}$$

Розрахуємо сили затиску деталі для фрезерування. Складемо рівняння балансу сил, скористуючись схемою 3.2.

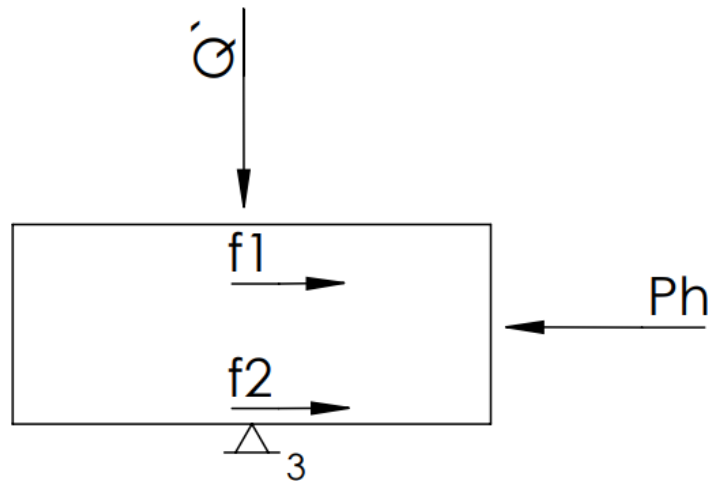


Рис. 3.2. Схема балансу сил

Знайдемо силу необхідну для протидії сил різання.

$$k * Ph = Q' f1 + Q' f2$$

$$Q' = \frac{k * Ph}{f1 + f2} = \frac{2.5 * 274}{0.5 + 0.5} = 562 \text{ Н}$$

Деталь затискається в отвори. Розрахуємо силу затиску одного болта.

Складемо рівняння користуючись схемою 3.3. Приймаємо що а сила $P=30 \text{ Н}$

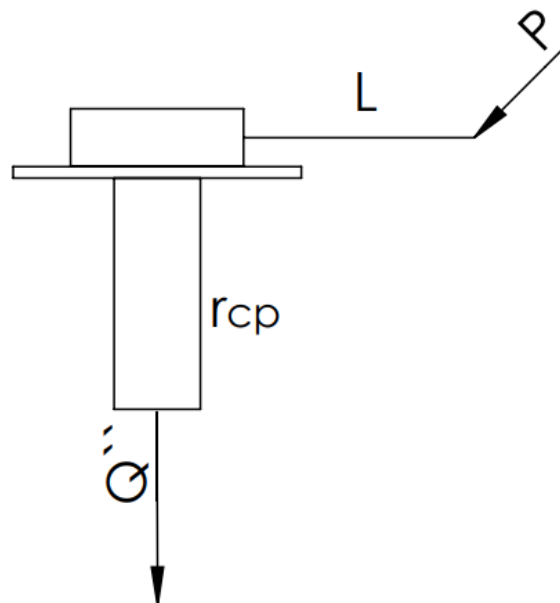


Рис. 3.3. Схема сил затиску болта.

$$PL = Q'' * tg(\alpha + \varphi) * r_{cp}$$

$$Q'' = \frac{P * L}{tg(\alpha + \varphi) * r_{cp}} = \frac{30 * 10}{0.2 * 2.5} = 111 \text{ Н}$$

$$Q' > Q''$$

Для забезпечення необхідної сили затиснення деталі потрібно 6 гайки. Однак для запобігання вібрацій від фрезерування для конфігурації з 4 парами крил будимо використовувати 8 болтів. По одному на кожне крило.

схеми розташування полів допусків калібрів

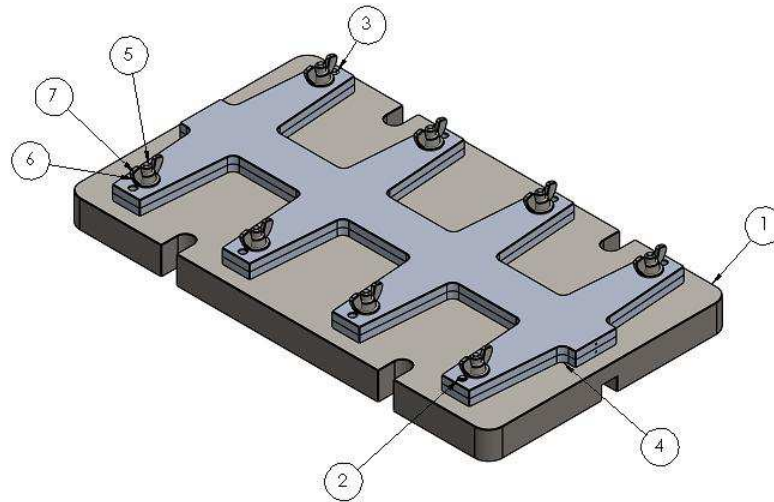


Рис. 3.4. Модель спеціального пристосування.

Принцип роботи пристосування

Пакет деталей, що обробляється, базується на звичайний палець (2) та зрізаний палець (3), а також на технологічну прокладку (4), яка забезпечує необхідний зазор між деталлю і основою (1).

Закріплення деталей

Деталі надійно затискаються за допомогою шпильок (5), шайб (6) та гайок-барашків (7), що забезпечує стабільне утримання під час обробки.

Транспортування пристосування

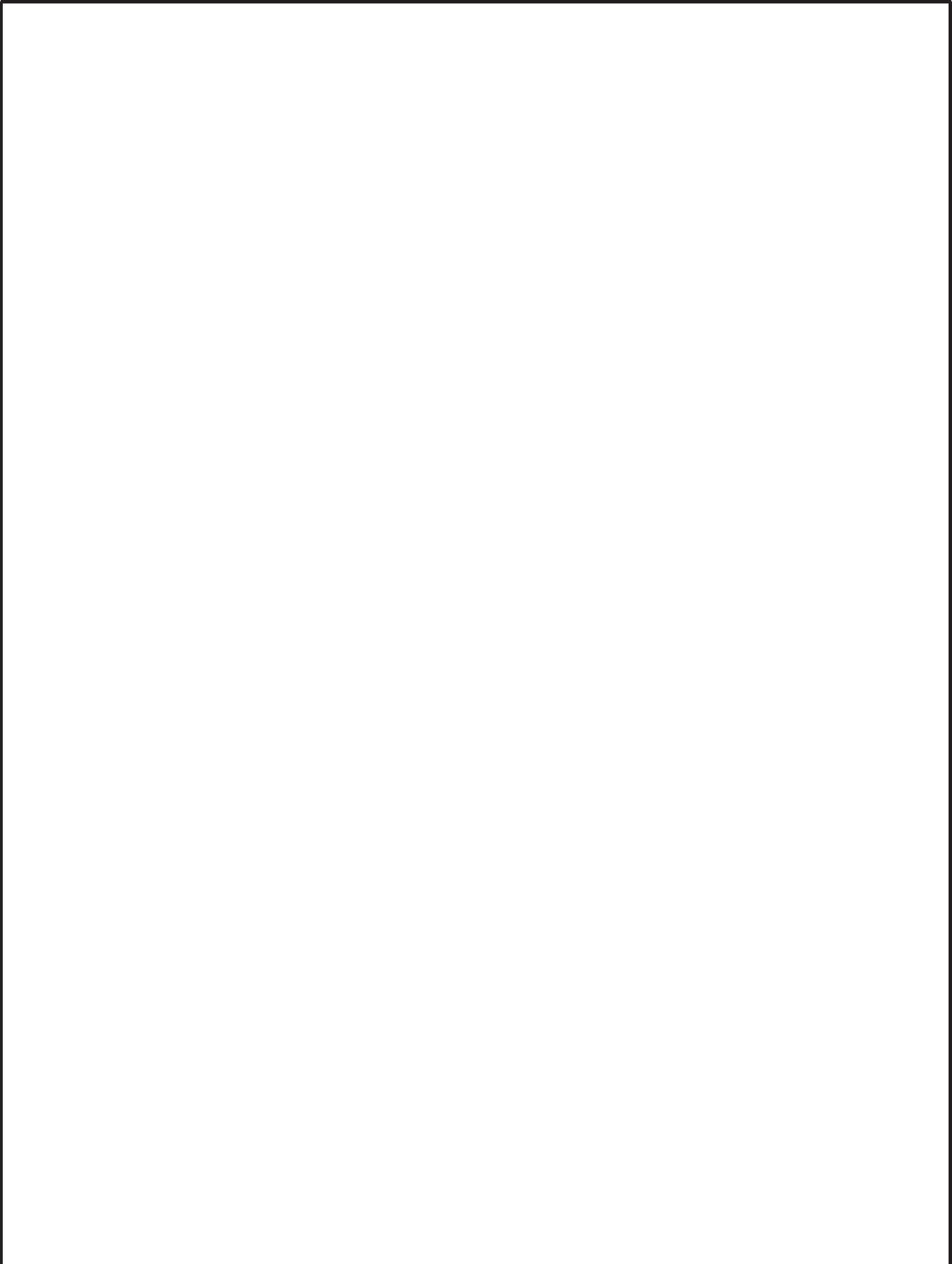
Маса пристосування становить 8,5 кг, тому для транспортування рим-болти не використовуються, спрощуючи переміщення та установку.

Фіксація на верстаті

Пристосування фіксується на поворотному столі за допомогою шпонки та болтів, що гарантує надійну стабільність під час обробки.

Переналадження на інший тип деталі

Конструкція пристосування дозволяє легко переналагоджувати його для обробки інших типів деталей, що підвищує універсальність і ефективність



					6261М.03.КРМ.05.04.ПЗ									
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Експериментальне та 3д розрахункове дослідження моделі валопроводу					Літ	Аркуш	Аркушів		
Розроб.		Костріков О. А.										45	36	
Перевір.		Ткач М.Р.								НУК				
Н. Контр.														
Затверд.														

4 Експериментальне та 3д розрахункове дослідження моделі валопроводу

4.1 Літературний огляд

Вібрації, форми коливань та резонанс належать до фундаментальних проблем машинобудування, оскільки вони суттєво впливають на експлуатаційні параметри, надійність і довговічність машин та механізмів. Джерела вібрацій можуть бути різноманітними: невідновленість роторів, наявність механічних зазорів, змінні динамічні навантаження, а також робота приводних двигунів чи допоміжних агрегатів. Виникнення надмірних вібрацій призводить до інтенсивного зносу елементів, втрат енергії, підвищеного шуму та, у критичних випадках, до руйнування конструкцій. Особливо небезпечним є втомне руйнування матеріалу, спричинене циклічними навантаженнями, що викликають утворення мікротріщин і передчасне виведення з експлуатації окремих вузлів і деталей [13].

Одним із найнебезпечніших проявів вібраційних процесів є резонанс, який виникає при збігу частоти зовнішнього збурення з власною частотою коливальної системи. У такому режимі амплітуда коливань різко зростає, що може призвести до катастрофічних наслідків – руйнування конструкцій, відмови компонентів або створення загрози безпеці персоналу. У високошвидкісних системах, таких як турбомашини й компресори, великі маси роторів та значні динамічні навантаження роблять явище резонансу особливо критичним, оскільки воно здатне спричинити серйозні аварійні ситуації [11].

Для запобігання деструктивним наслідкам вібрацій і резонансних явищ необхідно здійснювати комплексний аналіз і моделювання динамічної поведінки систем ще на етапі проектування. Такий підхід охоплює визначення власних частот і форм коливань, спектральний аналіз вібрацій та ідентифікацію потенційних зон резонансів. Використання сучасних числових методів, зокрема методу скінченних елементів (FEA), забезпечує високоточне моделювання динамічних характеристик складних конструкцій, що дозволяє

інженерам розробляти більш стабільні й безпечні технічні системи [16].

Для забезпечення ефективного моніторингу під час експлуатації машин застосовуються різноманітні сенсорні системи та контрольно-вимірювальні засоби – вібраційні датчики, лазерні доплерівські віброметри та інші пристрої, які дозволяють виявляти відхилення від номінальних режимів на ранніх етапах. Це дає змогу своєчасно запобігати пошкодженням і аваріям. Важливим елементом профілактики є планове технічне обслуговування і балансування роторів, що мінімізує ризик виникнення небезпечних вібраційних режимів і продовжує ресурс експлуатації обладнання [15].

Вібраційні явища мають міжгалузевий характер і проявляються у всіх секторах машинобудування – від аерокосмічного та автомобільного до суднобудування і цивільної інженерії. В аерокосмічній техніці взаємодія аеродинамічних сил із конструктивними елементами спричиняє коливання літальних апаратів, космічних модулів і гвинтокрилів, що впливають на їхню стабільність, безпеку та експлуатаційні характеристики. Втомні процеси, викликані вібраціями, скорочують термін служби матеріалів і можуть призвести до передчасних відмов, а резонансні ефекти в конструкціях здатні підсилювати руйнівні процеси, вимагаючи ретельного динамічного аналізу для забезпечення безпеки польотів [11].

В автомобільній галузі вібрації формуються внаслідок роботи двигуна, дорожньої нерівності та змінних навантажень, що впливають на динаміку руху, комфорт пасажирів і довговічність елементів транспортного засобу. Передача вібрацій від силового агрегату або коліс до кузова може спричиняти підвищений знос шин, підвіски та зменшення керованості автомобіля. Для зниження негативних впливів виробники застосовують складні методи комп'ютерного моделювання та експериментальної перевірки, що дозволяє оптимізувати конструкції з метою мінімізації вібрацій і покращення безпеки руху [16].

У суднобудуванні вібрації, які виникають від роботи силових установок, допоміжних механізмів і гідродинамічних взаємодій, впливають на стабільність, комфорт і експлуатаційну ефективність суден. Вони можуть спричиняти резонансні явища в елементах корпусу, знижувати його структурну цілісність і викликати додаткові навантаження на системи. Зменшення рівня вібрацій є необхідною умовою для збереження надійності та комфорту екіпажу і пасажирів, а також запобігання пошкодженням важливих технічних вузлів [15].

У цивільному будівництві вібраційні впливи становлять суттєву проблему під час проєктування будівель, мостів та інженерних споруд, оскільки зовнішні фактори або людська діяльність можуть викликати небезпечні резонансні коливання. Тому детальне розуміння динамічних характеристик конструкцій є обов'язковою умовою для підвищення їхньої надійності, довговічності й стійкості до коливальних навантажень [7][8].

У промислових умовах вібрації машин можуть знижувати ефективність виробництва, прискорювати знос обладнання та створювати потенційну небезпеку для персоналу. Аналіз і контроль вібраційних процесів мають ключове значення для підвищення точності технологічних операцій, подовження ресурсу інструментів і запобігання аваріям. Використання систем моніторингу вібрацій дозволяє оперативно ідентифікувати джерела відхилень, підвищуючи ефективність і безпеку виробничого процесу [13].

Отже, комплексне вивчення та усунення вібраційних явищ, форм коливань і резонансних ефектів є необхідною умовою для забезпечення надійної експлуатації машин та механізмів у різних галузях інженерії. Недостатній контроль коливальних процесів призводить до втрати працездатності обладнання, збільшення простоїв і зростання витрат на ремонт. Саме тому під час проєктування важливо формувати конструкції, стійкі до вібрацій, і впроваджувати ефективні системи діагностики та моніторингу їхнього стану [13][15].

Для отримання достовірних даних щодо динамічного стану деталей необхідно застосовувати різні методи фіксації та вимірювання вібраційних параметрів. Водночас фізичне розміщення сенсорів може обмежувати точність результатів, особливо у випадках складної геометрії чи важкодоступних зон.

Тому для підвищення інформативності досліджень доцільно використовувати сучасні безконтактні методи вимірювання, що забезпечують високу роздільну здатність і повне відображення коливальної поведінки поверхні.

Одним із найбільш точних є лазерний доплерівський віброметр, принцип роботи якого ґрунтується на вимірюванні мікроскопічних зміщень поверхні шляхом реєстрації зміни частоти відбитого лазерного променя. Такий метод забезпечує безконтактність, високу чутливість і можливість дослідження об'єктів у реальному часі незалежно від їхніх розмірів [6].

Ще одним високоефективним інструментом є спекл-інтерферометрія, що використовує інтерференційні ефекти лазерного випромінювання для формування тривимірних карт коливань. Цей метод дозволяє отримувати просторово детальні зображення поверхневих деформацій, що є особливо цінним при аналізі складних конструкцій із нерівномірними формами. Спекл-інтерферометрія забезпечує винятково високу точність та придатна для вивчення як локальних, так і глобальних режимів коливань [5].

Перспективним напрямом є також метод BLASMA (Broadband Laser Acoustic Sensor for Material Analysis), який використовує акустичні хвилі, збуджувані лазером, для діагностики матеріалів та виявлення дефектів. Висока чутливість цього методу дозволяє проводити безперервний контроль стану конструкцій у режимі реального часу, забезпечуючи своєчасне виявлення пошкоджень і деградацій матеріалів [22][7].

Отже, впровадження інноваційних методів аналізу та вимірювання вібрацій є критично важливим для підвищення надійності, безпеки й ефективності експлуатації сучасних машин і механізмів. Своєчасне виявлення

відхилень дозволяє запобігти розвитку дефектів і забезпечити стабільну роботу технічних систем упродовж усього життєвого циклу обладнання.

4.2 Експеримент

Інтерферометрія та метод електронної спекл-інтерферометрії

Інтерферометрія являє собою метод дослідження, що базується на явищі інтерференції хвиль, тобто їхньому когерентному складанні. Одним із сучасних різновидів цього методу є спекл-інтерферометрія, яка забезпечує безконтактне отримання інформації про вібраційний стан усієї поверхні досліджуваного об'єкта.

Суть спекл-інтерферометрії полягає в аналізі зернистої структури (спекл-структури) зображення об'єкта. При опроміненні поверхні лазерним випромінюванням і подальшому відображенні або проходженні через дзеркально-лінзову систему, монохроматичне світло з довжиною хвилі λ має гладку хвильову поверхню з поступовими змінами амплітуди та фази. Проте під час відбиття від шорсткої поверхні або проходження крізь розсіювальне середовище з мікронеоднорідностями випромінювання зазнає просторових флуктуацій. Унаслідок цього на екрані формується інтерференційна картина з безліччю випадково розташованих світлих і темних плям, які називаються спеклами [2][6].

Два основні й практично значущі випадки утворення спекл-полів схематично представлені на рис. 4.1. На поверхні дифузора Д, який може як відбивати, так і пропускати світло, виникають вторинні джерела когерентних сферичних хвиль. Нерівномірний рельєф дифузора зумовлює хаотичний, але стабільний у часі розподіл амплітуд і фазових зсувів цих хвиль. У кожній точці простору Р когерентні хвилі від усіх вторинних джерел підсумовуються з різними фазами, формуючи складну інтерференційну структуру.

Об'єктивна спекл-картина, що утворюється у вільному просторі таким чином, є першим важливим випадком практичної спекл-інтерферометрії.

Вона виникає при відбитті когерентного лазерного випромінювання від дифузної поверхні об'єкта або при розсіюванні світла дифузором,

що пропускає світло. Таке спекл-поле може бути зареєстроване фотоматеріалом, ПЗС-матрицею або візуалізоване на екрані у площині П.

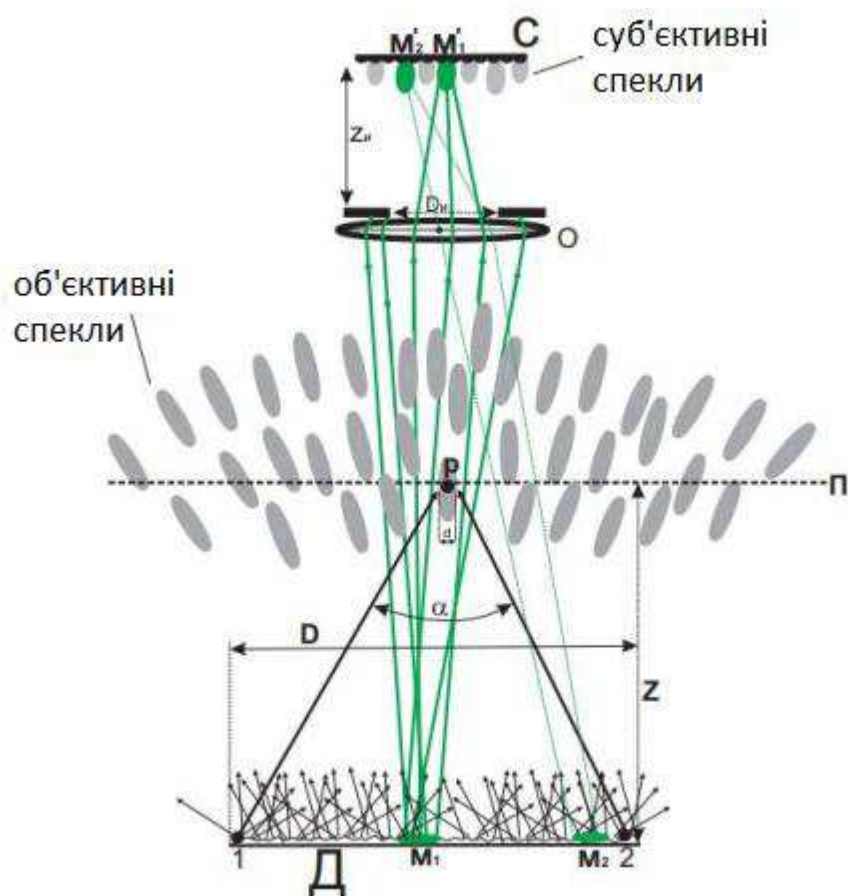


Рис. 4.1. Схема формування спекл-структур.

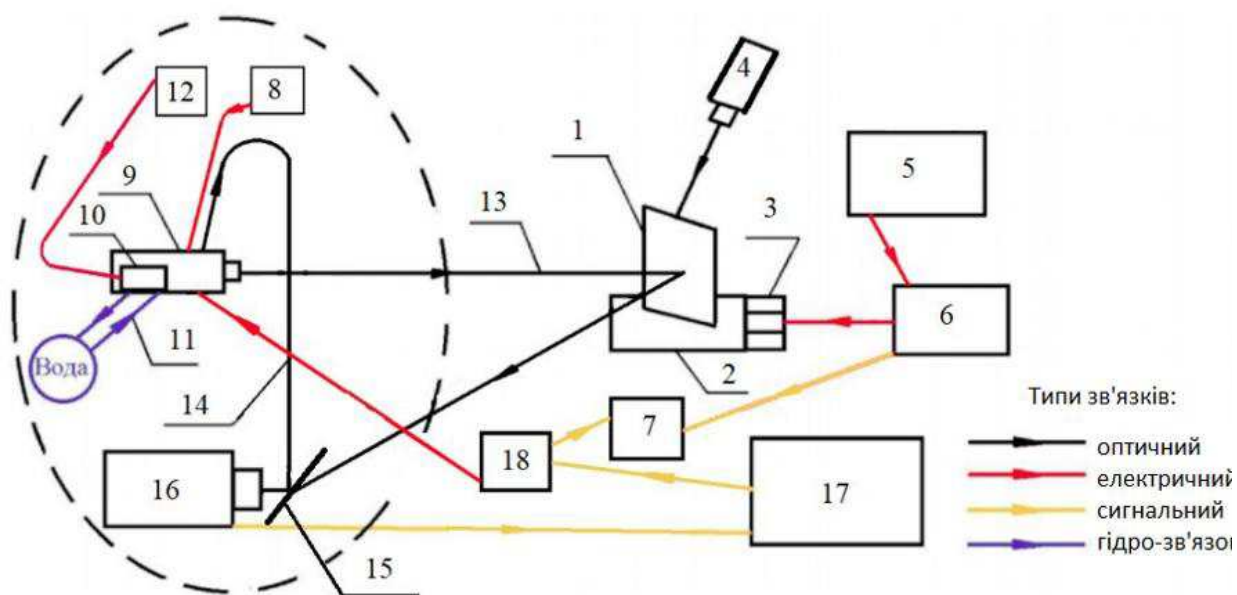


Рис. 4.2. Схема експериментального стенду

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261M.03.KPM.05.04.ПЗ

Лист

51

Другим суттєвим випадком є формування суб'єктивних спеклів. Вони виникають у ситуації, коли оптична система проєктує зображення дифузної поверхні в когерентному світлі. Як показано на рис. 4.1., об'єкт O формує на площині фотосенсора C дійсне зображення поверхні D . Якщо мікронерівності M_1 та M_2 не розрізняються оптичною системою, відповідні їм суб'єктивні спекли M'_1 , M'_2 утворюються внаслідок когерентного додавання хвиль від неоднорідностей, розташованих у межах області просторової роздільної здатності.

Метод електронної спекл-інтерферометрії

Електронна спекл-інтерферометрія (ESPI) є подальшим розвитком голографічної інтерферометрії (ГІ) та забезпечує оперативне визначення резонансних частот і візуалізацію форм коливань у режимі реального часу. Порівняно з класичною ГІ, метод ESPI не потребує фотохімічної обробки та дозволяє автоматизувати процес вимірювань, що робить його особливо ефективним для серійного контролю виробів і швидких експрес-аналізів [2].

Дослідження проводяться за допомогою експериментального стенду (рис. 4.2.). Для аналізу вібраційних характеристик об'єкта використовується електронна спекл-інтерферометрія, що забезпечує високу точність вимірювань навіть за спрощених умов віброізоляції.

Досліджувана деталь 1 закріплюється у вертикальному положенні на стенді 2 (рис. 4.5.). Збудження коливань здійснюється за допомогою п'єзодатчика віброзбудження 3, встановленого на одному з крил деталі. Частота коливань контролюється частотоміром 4, який фіксує резонансні стани. Сигнал на віброзбуджувач подається від генератора високих частот 5 і підсилюється підсилювачем 6. Контроль параметрів сигналу виконується за допомогою осцилографа 7.

Система лазерного випромінювання керується блоком управління 8, який регулює струм лазера 9. Для запобігання перегріву лазера застосовується система охолодження 10 на базі елемента Пельтьє, а також система подачі

води 11 з окремим блоком керування 12, що підтримує температуру в робочому діапазоні.

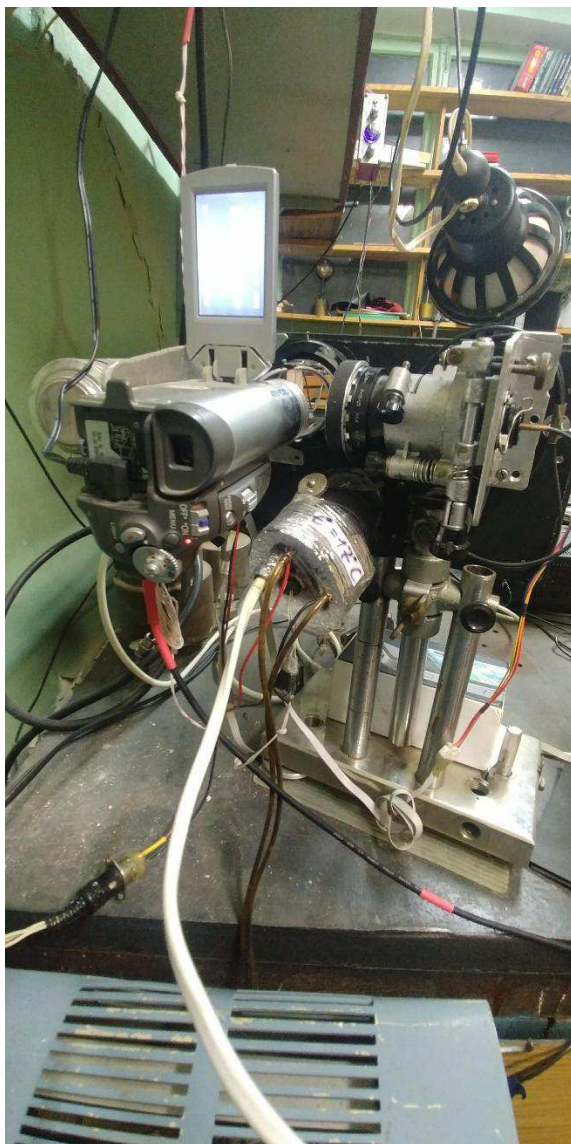


Рис. 4.3. Фотографії експериментального стенду

Лазерне випромінювання ділиться світлорозподільним склом на предметний 13 та опорний 14 пучки. Предметний пучок освітлює поверхню деталі, дифузно відбивається від неї, проходить через світлоподільвальне скло 15 та формує предметне спекл-поле на матриці камери 16. Опорний пучок відбивається від дзеркала з низькочастотним віброзбудженням, яке керується комп'ютером 17 через підсилювач низьких частот 18. У результаті інтерференції обох пучків на матриці формується інтерферограма, яка містить інформацію про резонансну форму коливань деталі. Отримане зображення аналізується комп'ютером, що виконує цифрове декодування спекл-картини.

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261M.03.KPM.05.04.ПЗ

Лист

53

Послідовність проведення експерименту

1. Перевірка справності всіх елементів експериментального стенду (рис. 4.3.).
2. Базування та закріплення досліджуваної деталі на стенді (рис. 4.8.).
3. Увімкнення установки, проведення первинного налаштування та стабілізації лазера.
4. Проведення експерименту із поступовим підвищенням частоти коливань і фіксацією отриманих інтерферограм форм коливань.

Регулювання частоти здійснюється за допомогою генератора високих частот 5 або програмного управління з комп'ютера 17. Спостереження за перебігом експерименту й візуалізація вібраційних процесів у реальному часі здійснюються програмним забезпеченням (рис. 4.4.).

У ході проведених досліджень для деталі з трьома парами крил було виявлено чотири крутильні форми коливань із частотами 260, 443, 2990 та 3225 Гц. Відповідні інтерферограми представлені на рис. 4.6.–4.12.

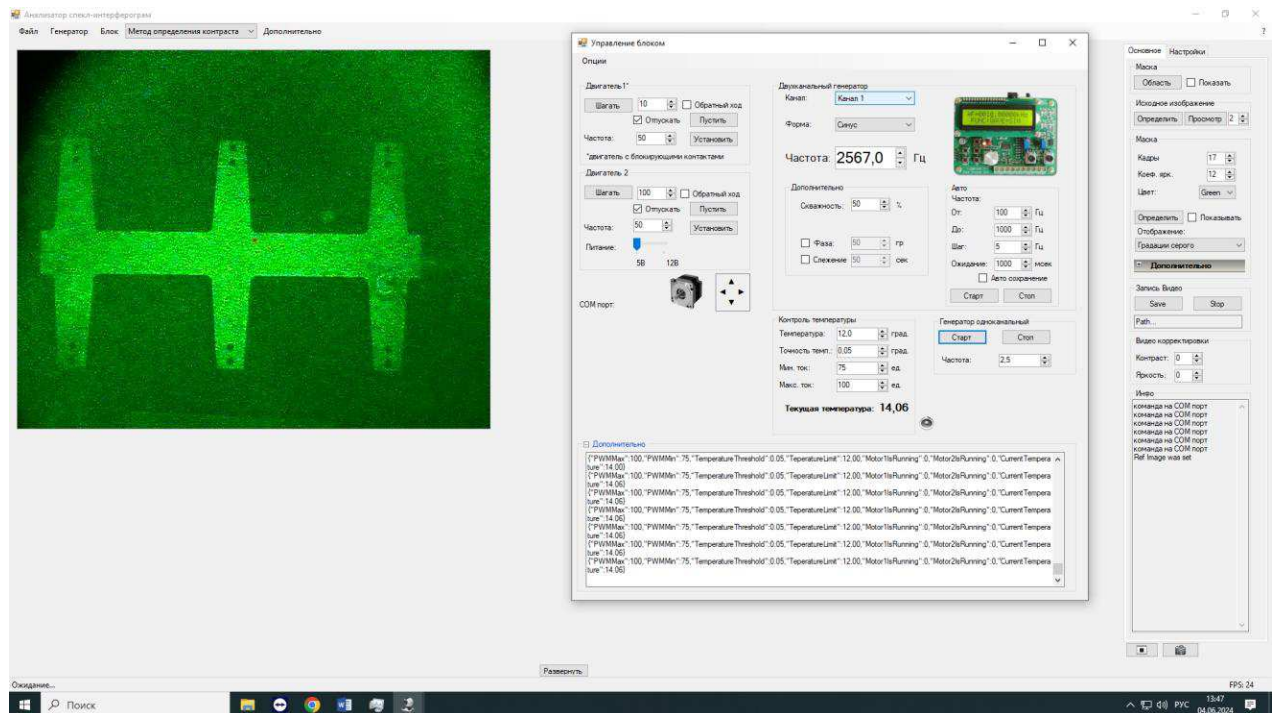


Рис. 4.4. Програма для проведення експерименту.

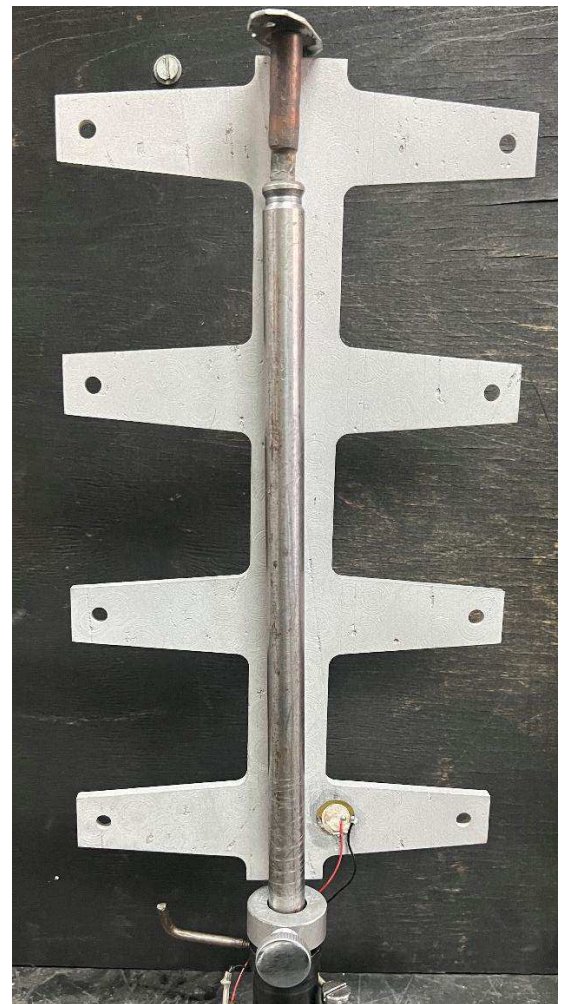
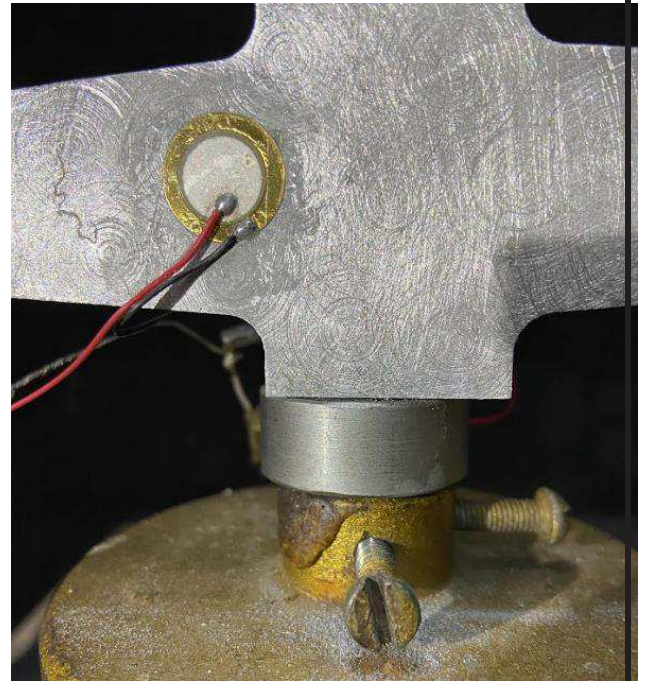


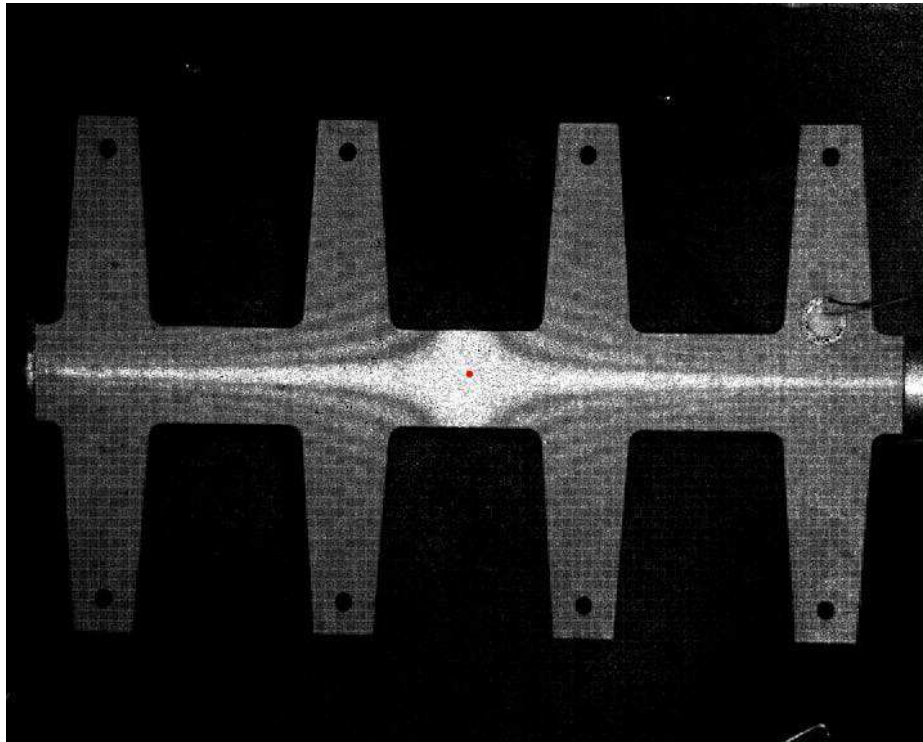
Рис. 4.5. Закріплена деталь на експериментальному стенді.

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261М.03.КРМ.05.04.ПЗ

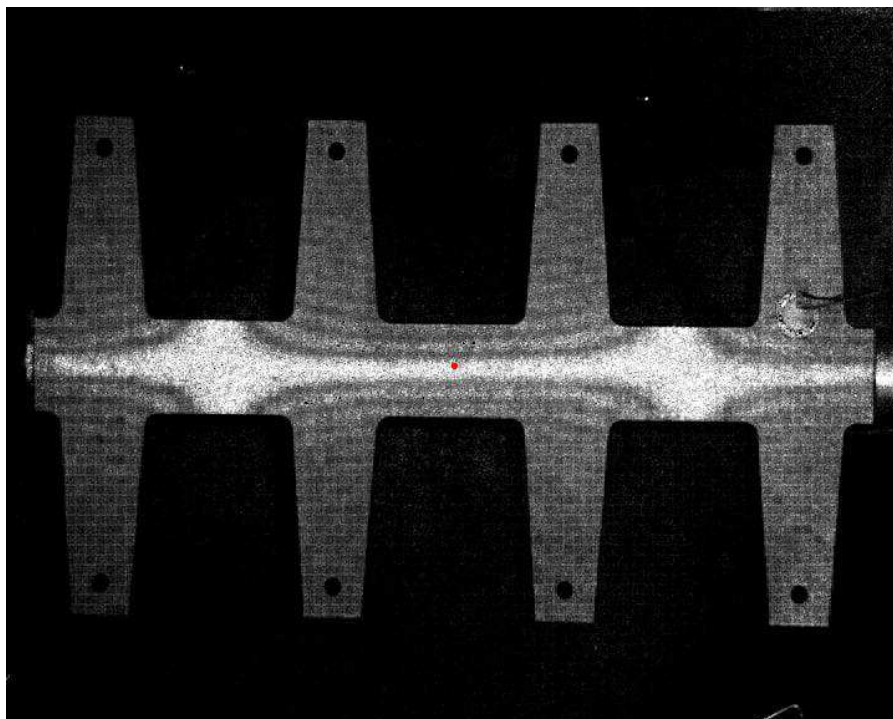
Лист

55



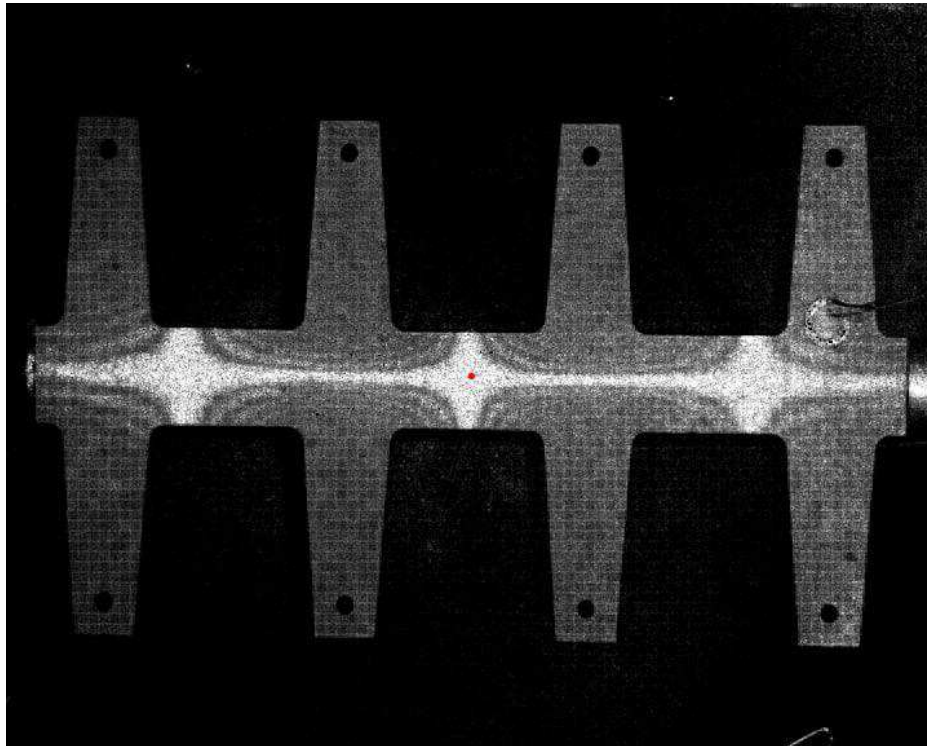
244 Гц

Рис. 4.6. Перша крутильна форма коливань з жорсткими інерційними елементами



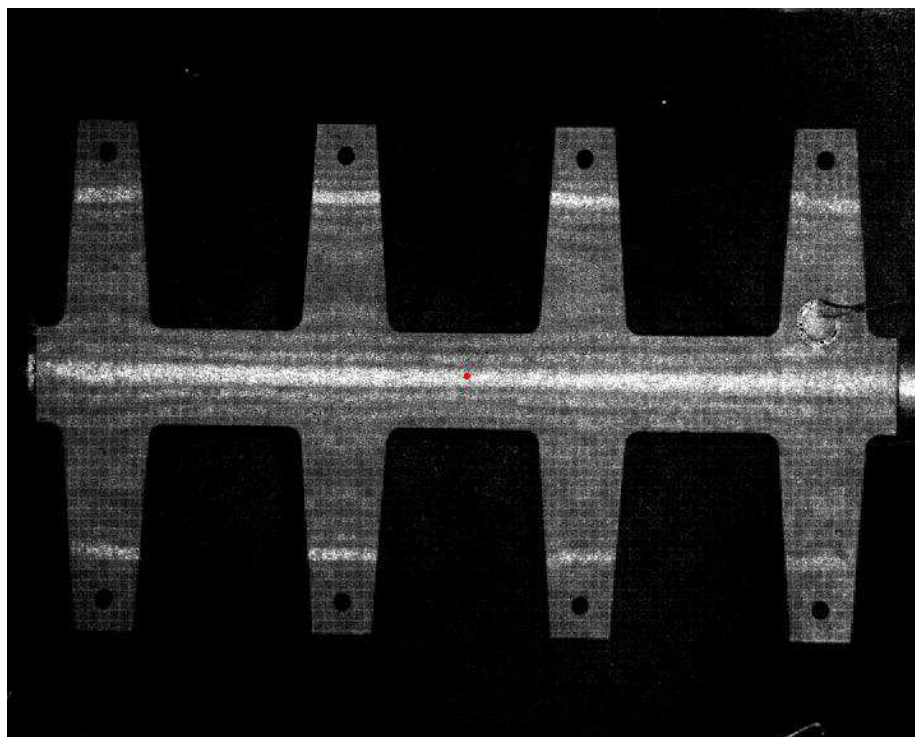
443 Гц

Рис. 4.7. Друга крутильна форма коливань з жорсткими інерційними елементами



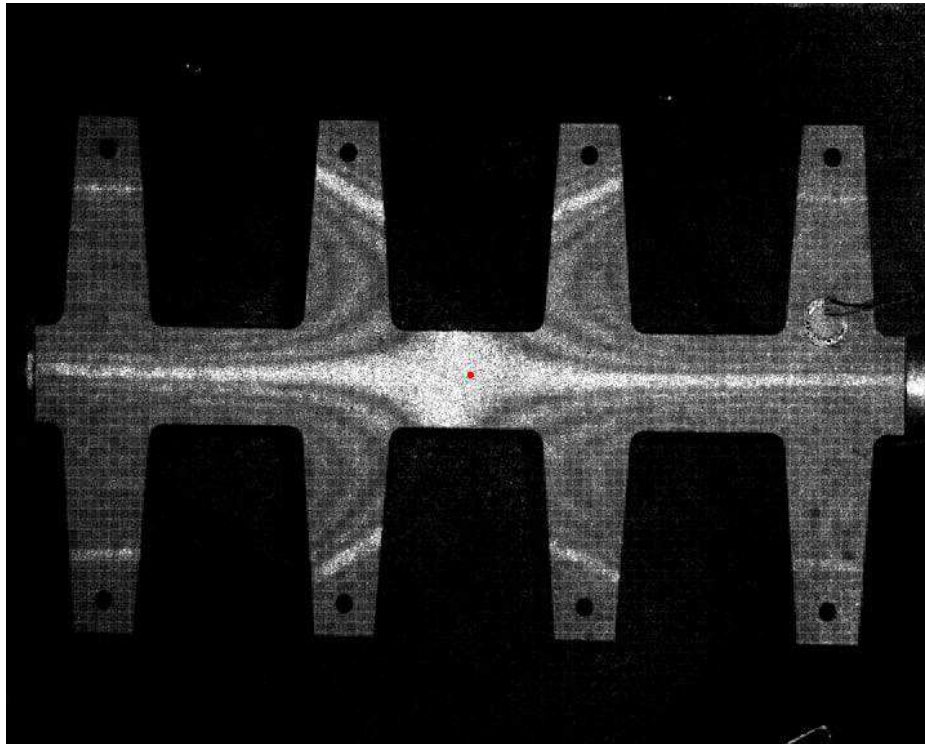
567 Гц

Рис. 4.8. Третя крутильна форма коливачь з жорсткими інерційними елементами



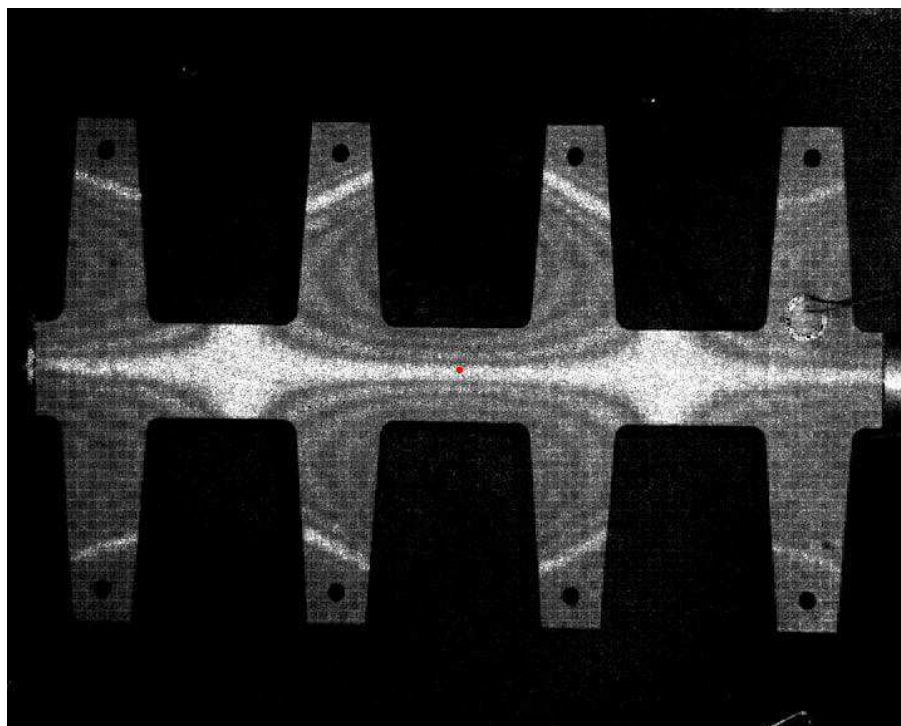
2922 Гц

Рис. 4.9. Перша згина форма коливачь з пружними інерційними елементами



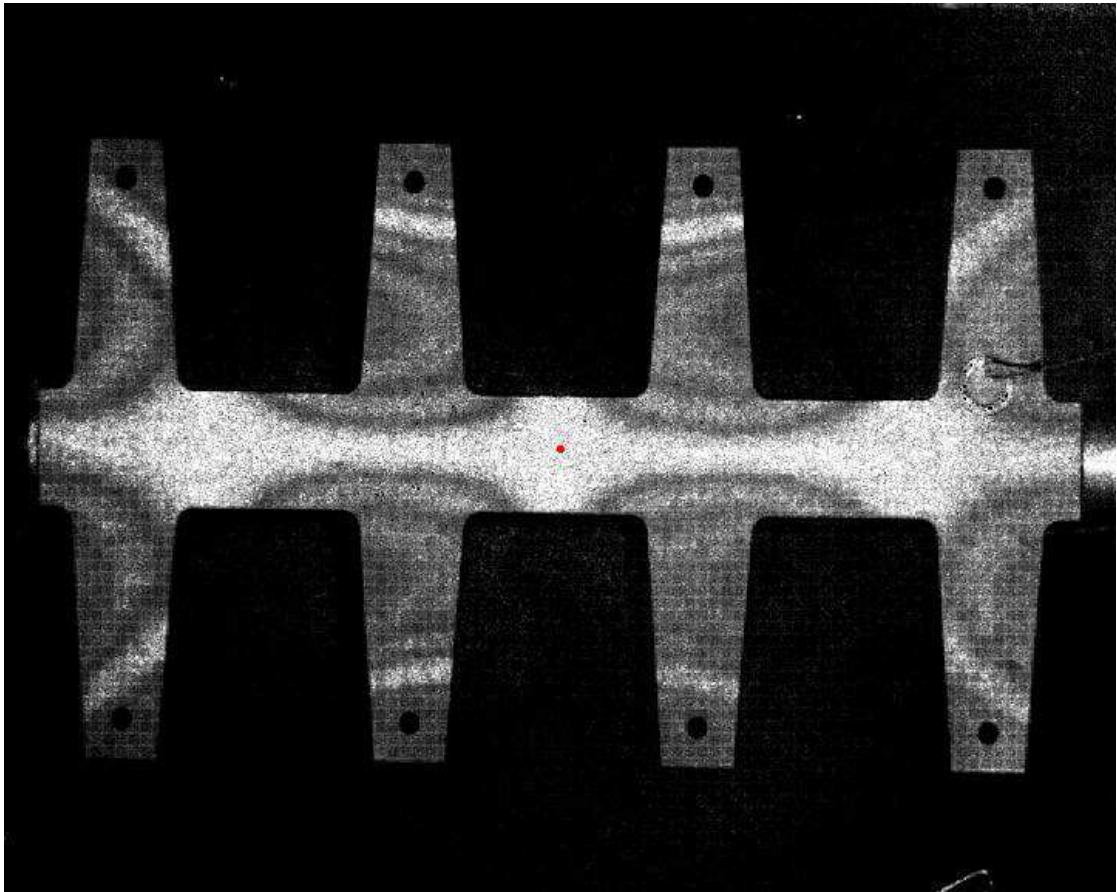
3010 Гц

Рис. 4.10. Перша крутильна форма коливань з пружними інерційними елементами



3193 Гц

Рис. 4.11. Друга крутильна форма коливань з пружними інерційними елементами



3428 Гц

Рис. 4.12. Третя крутильна форма коливаль з пружними інерційними елементами

Також була досліджена планка розмірами 290x50x5 мм і масою 194г виготовлена з матеріалу валопроводу. Було знайдено згині форми коливаль що дозволяє розрахувати модуль Юнга. Що дозволить отримати більш точні результати комп'ютерної симуляції.

Таб 4.1 Вимірювання планки

№	L мм	h мм	b мм
1	289.9	50.0	5.11
2	290.0	50.2	5.07
3	290.1	50.4	5.09
Ср	290	50.2	5.09

$$V = L \cdot h \cdot b = 290 \cdot 10^{-3} \cdot 50.2 \cdot 10^{-3} \cdot 5.09 \cdot 10^{-3} = 74.1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$\rho = m/V = 194 \cdot 10^{-3} / 74.1 \cdot 10^{-5} = 2618.0759 \text{ кг/м}^3$$

G – геометричні параметри пластини

Fr_i – резонансна частота

λ_i – коефіцієнт форми коливань

ρ – щільність матеріалу

E – значення модуля Юнга

$$G = \frac{b}{L^2 * \sqrt{12}} = \frac{0.00509}{0.290^2 * \sqrt{12}} = 0.017$$

$$Ei = \left(\frac{Fr_i}{G * \lambda_i} \right) * \frac{\rho}{10^9}$$

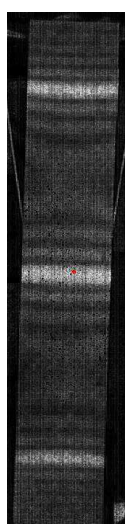
Таб 4.2 Данні для розрахунків

Частоти Fr	Корні дифф. ур. λ	Модуль Юнга E
322	3.561	70.125
886	9.815	69.887
1738	19.244	69.955
2872	31.808	69.92
4290	47.567	69.761

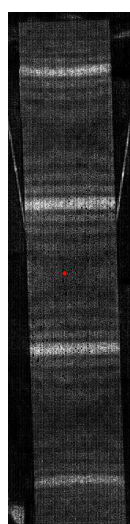
Середнє значення модуля Юнга $E = 69.93$ ГПа.



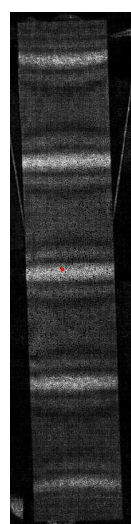
322 Гц



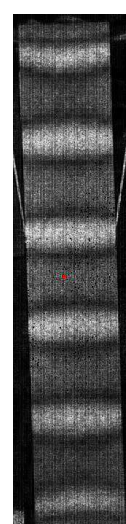
886 Гц



1738 Гц



2872 Гц



4290 Гц

Рис. 4.13. – Форми і частоти коливань планки.

4.3 Аналітичний розрахунок

У цьому розділі наведено аналітичний підхід до визначення частот і форм крутильних коливань валу, на якому розміщено чотири інерційних елементи (Рис.4.14.). Розрахунок базується на рівняннях динамічної рівноваги та враховує жорсткість окремих ділянок валу, моменти інерції елементів і характер їх взаємодії у процесі коливань.

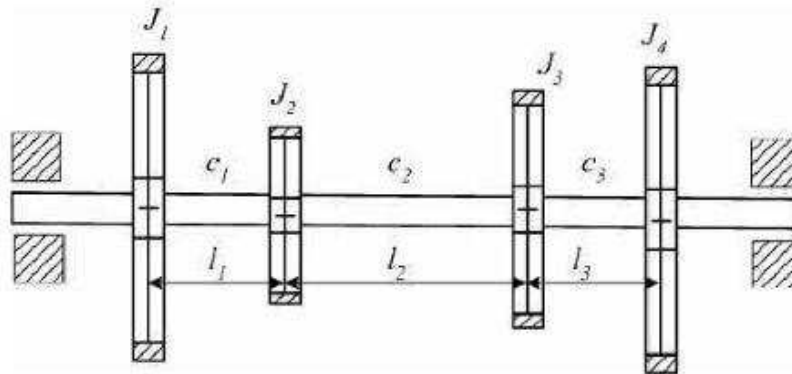


Рис. 4.14. Схема валу

Вхідні данні

Момент інерції $J = 101110 \cdot 10^{-9} \text{ кг/м}^2$, отриманий з SolidWorks (Рис. 4.15)

Крутильна жорсткість $c = 389.423 \text{ Н*м}$

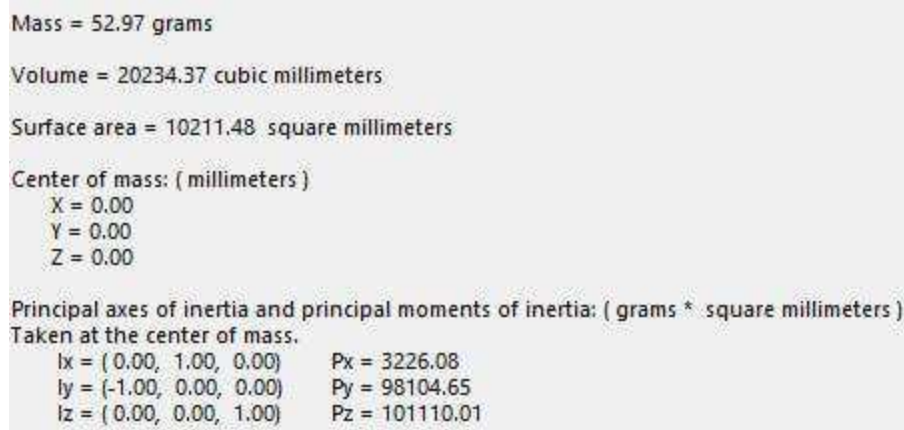


Рис. 4.15. Характеристика інерційного елемента з SolidWorks

Система диференціальних рівнянь крутильних коливань дисків

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 + C_1(\varphi_1 - \varphi_2) &= 0 \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 + C_1(\varphi_1 - \varphi_2) + C_2(\varphi_2 - \varphi_3) &= 0 \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 + C_1(\varphi_1 - \varphi_2) + C_2(\varphi_2 - \varphi_3) + C_3(\varphi_3 - \varphi_4) &= 0 \\ J_4 \ddot{\varphi}_4 + C_3(\varphi_4 - \varphi_3) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Для знаходження головних коливань валу приймаємо[5]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \alpha_1 \sin(kt + \beta) \\ \varphi_2 &= \alpha_2 \sin(kt + \beta) \\ \varphi_3 &= \alpha_3 \sin(kt + \beta) \\ \varphi_4 &= \alpha_4 \sin(kt + \beta) \end{aligned} \right\}$$

Підставивши ці значення кутів у диференціальне рівняння й скоротивши їх на $\sin(kt + \beta)$ отримуємо рівняння для знаходження $k, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$.

$$\left. \begin{aligned} (c_1 - k^2 J_1) \alpha_1 - c_1 \alpha_2 &= 0 \\ -c_1 \alpha_1 + (c_1 + c_2 - k^2 J_2) \alpha_2 - c_1 \alpha_3 &= 0 \\ -c_2 \alpha_2 + (c_2 + c_3 - k^2 J_3) \alpha_3 - c_3 \alpha_4 &= 0 \\ -c_3 \alpha_3 + (c_3 + c_4 - k^2 J_4) \alpha_4 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Ці рівняння можуть бути вирішені відносно $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ відрізними від нуля у випадку якщо визначник цієї системи дорівнює нулю

$$CC(k) := \begin{pmatrix} J1 & J2 & J3 & J4 \\ -c1 & c1 + c2 - k^2 \cdot J2 & -c2 & 0 \\ 0 & -c2 & c2 + c3 - k^2 \cdot J3 & -c3 \\ 0 & 0 & -c3 & c3 - k^2 \cdot J4 \end{pmatrix}$$

Прирівнюємо визначник цієї матриці до 0, розгорнувши отримаємо рівняння частот для валу з чотирма інерційними елементами[5]:

$$\begin{aligned} &k^6 - \left(\frac{J1 + J2}{J1 J2} c1 + \frac{J2 + J3}{J2 J3} c2 + \frac{J3 + J4}{J3 J4} c3 \right) k^4 + \\ &+ \left(\frac{J1 + J2 + J3}{J1 J2 J3} c1 c2 + \frac{J1 + J2}{J1 J2} * \frac{J3 + J4}{J3 J4} c1 c3 + \frac{J2 + J3 + J4}{J2 J3 J4} c2 c3 \right) k^2 \\ &- \frac{J1 + J2 + J3 + J4}{J1 J2 J3 J4} c1 c2 c3 = 0 \end{aligned}$$

Оскільки моменти інерції і крутильна жорсткість у всіх елементів однакові зростимо формулу:

$$k^6 - 6 \frac{C}{J} k^4 + 10 \frac{C^2}{J^2} k^2 - 4 \frac{C^3}{J^3} = 0$$

Підставивши значення моменти інерції і крутильна жорсткість отримуємо:

$$k^6 - 2.311 \cdot 10^7 k^4 + 1.483 \cdot 10^{14} - 2.285 \cdot 10^{20} = 0$$

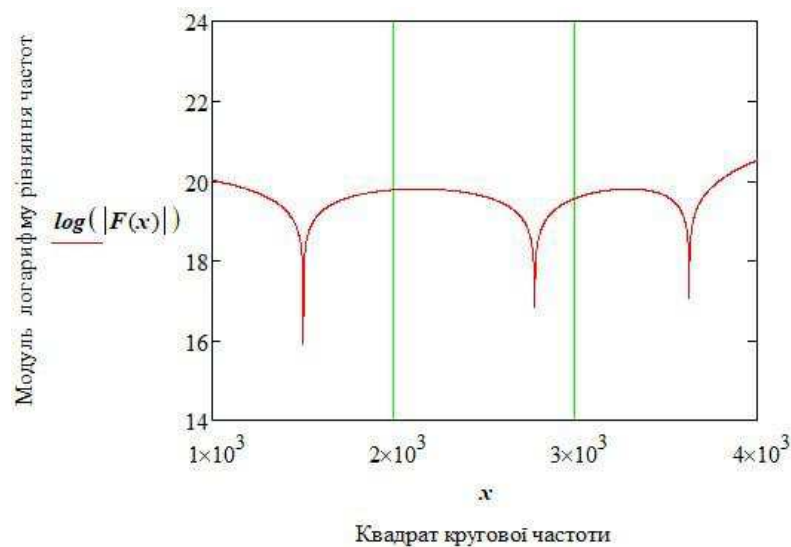


Рис. 4.16. Графічне рішення рівняння

За результатами рішення у Mathcad (Рис. 4.17.) яке можна надати графічно (Рис. 4.16.) отримуємо циклічні частоти:

Given

$$k^6 - 6 \cdot c_j \cdot k^4 + 10 \cdot c_j^2 \cdot k^2 - 4 \cdot c_j^3 = 0$$

$$\text{Find}(k) \rightarrow \left(\sqrt{2} \cdot \sqrt{c_j} \quad -\sqrt{2} \cdot \sqrt{c_j} \quad \sqrt{2 \cdot c_j + \sqrt{2} \cdot c_j} \quad -\sqrt{2 \cdot c_j + \sqrt{2} \cdot c_j} \quad \sqrt{2 \cdot c_j - \sqrt{2} \cdot c_j} \quad -\sqrt{2 \cdot c_j - \sqrt{2} \cdot c_j} \right)$$

$$FF := F(k) = 0 \text{ solve} \rightarrow \begin{pmatrix} -2775.4204540800063864 \\ 1502.0467260140860085 \\ -3626.2615772613099511 \\ -1502.0467260140860085 \\ 2775.4204540800063864 \\ 3626.2615772613099511 \end{pmatrix}$$

Рис. 4.17. Рішення Mathcad

Розділивши їх на 2π отримуємо власні частоти коливань.

Таб.4.3 Результати розрахунків

Експеримент	Розрахунок	Похибка
244	239,058	2,02%
443	441,722	0,29%
567	577,137	1,79%

4.4 Комп'ютерна симуляція.

Сучасні системи комп'ютерного проєктування надають можливість здійснювати теоретичний аналіз динамічних характеристик конструкцій, зокрема визначення власних частот коливань досліджуваних моделей. Такий підхід дозволяє забезпечити необхідний рівень надійності та оптимізувати параметри деталей ще на етапі проєктування.

Серед найбільш ефективних інструментів інженерного аналізу вирізняються системи, що реалізують метод скінченних елементів (Finite Element Analysis, FEA). Цей метод відкриває перед розробниками широкі можливості для дослідження складних фізичних процесів, пов'язаних із механікою, термодинамікою, гідродинамікою, електромагнетизмом та іншими галузями прикладної фізики. Особливої популярності набув програмний комплекс SolidWorks, який поєднує високу ефективність, точність і зручність застосування у процесі моделювання та розрахунків [1].

Основи методу скінченних елементів

Ідея методу.

Основна концепція МСЕ полягає у поділі складної просторової або плоскої конструкції на систему простіших підобластей – *скінченних елементів*.

Кожен елемент має елементарну геометричну форму (трикутник, квадрат, тетраедр, куб тощо) і описується окремим набором рівнянь, що дає змогу локально оцінювати напружено-деформований стан.

Дискретизація області.

Увесь об'єкт аналізу розбивається на сукупність взаємопов'язаних елементів, які утворюють *скінченну сітку*. Процес поділу називається *дискретизацією* і має вирішальне значення для точності подальших розрахунків.

Інтерполяційні функції.

Поля фізичних величин (зміщення, напруження, температура тощо) у межах кожного елемента описуються за допомогою інтерполяційних функцій, найчастіше поліноміального типу. Вузли, у яких елементи з'єднуються між собою, є основними точками обчислення шуканих параметрів.

Основні етапи застосування МСЕ

1. Підготовка моделі.

Створюється геометрична модель об'єкта у CAD-системі (наприклад, SolidWorks), визначаються властивості матеріалів, прикладаються граничні умови та навантаження.

2. Дискретизація (побудова сітки).

Модель поділяється на скінченні елементи. Якість і густина сітки впливають на точність розрахунків: дрібніші елементи підвищують точність, але збільшують обчислювальні витрати.

3. Визначення інтерполяційних функцій.

Для опису полів усередині елементів обираються функції апроксимації – найчастіше лінійні або квадратичні поліноми.

4. Побудова системи рівнянь.

На основі фізичних законів (закону Гука, закону Фур'є тощо) формулюються рівняння для кожного елемента, що зв'язують вузлові параметри.

5. Збірка глобальної системи рівнянь.

Локальні рівняння елементів об'єднуються в єдину матричну систему, яка описує поведінку всієї конструкції.

6. Розв'язання системи.

Виконується числове розв'язання отриманої системи рівнянь із застосуванням спеціалізованих алгоритмів. Цей етап є обчислювально найінтенсивнішим.

Аналіз результатів.

Інтерпретуються результати – напруження, деформації, температурні поля тощо. Виконується візуалізація у вигляді контурних карт, графіків та анімацій для оцінки поведінки об'єкта.

Переваги методу скінченних елементів

- Гнучкість застосування. МСЕ придатний для аналізу об'єктів будь-якої геометричної складності.

- Універсальність. Дає змогу досліджувати різноманітні фізичні процеси – механічні, теплові, електромагнітні, гідродинамічні тощо.
- Висока точність. Забезпечується завдяки можливості деталізованого поділу моделі, хоча це потребує значних обчислювальних ресурсів.

Застосування MCE в SolidWorks

Модуль SolidWorks Simulation реалізує повний комплекс інструментів для аналізу методом скінченних елементів, що охоплює:

- Статичний аналіз напружень – оцінку деформацій і напружень під дією постійних навантажень.
- Динамічний аналіз – дослідження реакції конструкцій на змінні або ударні навантаження, включно з вібраційними процесами.
- Тепловий аналіз – визначення розподілу температур і теплових потоків.
- Частотний аналіз – розрахунок власних частот і форм коливань конструкцій.

SolidWorks Simulation автоматизує процес побудови, розрахунку та оптимізації конструкцій, дозволяючи інженерам ефективно досліджувати взаємодію компонентів і підвищувати надійність систем.

Перевагою застосування SolidWorks є можливість проведення повного теоретичного аналізу без необхідності сторонніх програмних засобів.

Завдяки інтеграції з CAD-моделлю ористувач отримує змогу точно визначати власні частоти коливань, що є критично важливим для запобігання резонансним явищам та підвищення експлуатаційної надійності деталей.

SolidWorks підтримує широкий діапазон типів розрахунків – від лінійних статичних моделей окремих елементів до нелінійних аналізів складних збірок з урахуванням контактів, деформацій і матеріальних нелінійностей. Така універсальність робить програму ефективним

інструментом для розробки і вдосконалення конструкцій у всіх галузях машинобудування.

Таким чином, застосування SolidWorks у теоретичному аналізі становить ключовий етап проєктування механічних систем, що дає змогу ефективно досліджувати вібраційні властивості конструкцій, оптимізувати їхні параметри та забезпечити необхідний рівень надійності [1].

Побудова моделі та підготовка до розрахунку

Комп'ютерна модель деталі створювалася у системі тривимірного проєктування SolidWorks із подальшим використанням модуля Simulation для визначення форм коливань. Для проведення частотного аналізу необхідно задати фізико-механічні властивості матеріалу, наведені у таблиці 1.5 (Рис. 4.18.).

Оскільки розрахунки виконуються методом скінченних елементів, важливим етапом є побудова розрахункової сітки (Рис. 4.19.). Вибір розмірів комірок визначає баланс між точністю результатів і тривалістю обчислень: надмірне зменшення розміру елементів може незначно покращити точність, однак істотно збільшити час розрахунку.

Таблиця 4.4 Характеристика сітки

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Maximum element size	5,96887 mm
Minimum element size	0,298444 mm
Mesh Quality	High
Total Nodes	20331
Total Elements	11015
Maximum Aspect Ratio	7,9857
% of elements with Aspect Ratio < 3	97,3
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
Percentage of distorted elements	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:07

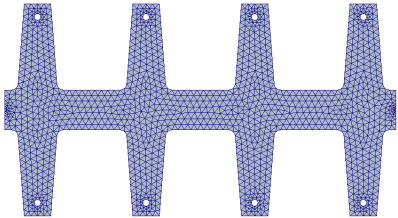
Model Reference	Properties	Components
	Name: АМГ6 Model type: Linear Elastic Isotropic Unknown Default failure criterion: 3e+07 N/m^2 Tensile strength: 2 650 kg/m^3 Mass density: 7,33e+10 N/m^2 Elastic modulus: 0,33 Poisson's ratio:	SolidBody 1(Cut-Revolve2)(Модель валопроводу)
Curve Data:N/A		

Рис. 4.18. Вікно характеристик матеріалу

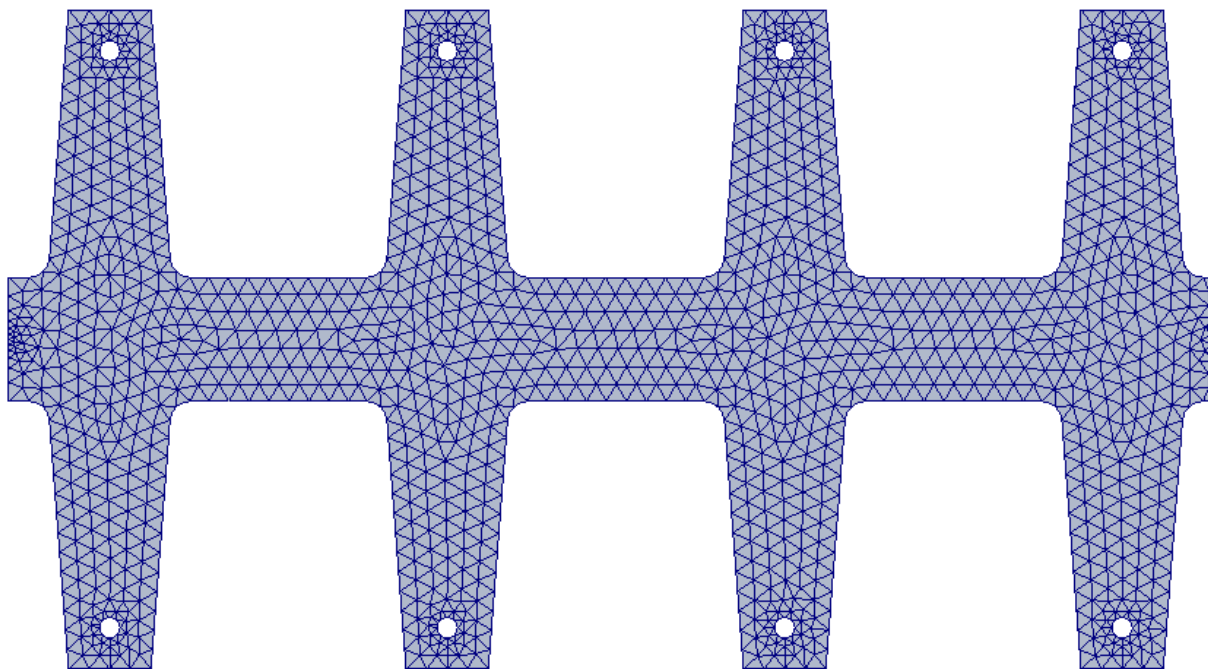


Рис. 4.19. Сітка для розрахунків.

Форми коливань розраховувались до частоти 3500 Гц (Рис. 4.20.). Розмір комірок сітки від 0.3 мм до 6 мм. Зафіксуємо деталь на осях у двох отворах Ø1 мм (Рис. 4.21.) лишивши їй 5 ступенів свободи лишивши можливість вільно обертатися навколо осі симетрії. Інші параметри симуляції лишаються такими як і першому варіанті. За результатами цієї симуляції було знайдено 20 форм коливань з яких 6 крутильних (Рис4.22 – 4.28).

Таблиця 4.5 Результати симуляції з закріплення

№	Частота, Гц
3	243
4	440
6	562
16	2848
17	2939
19	3126
20	3365

Frequency ✕

Options Flow/Thermal Effects Notification Remark

Options

☐ Number of frequencies 5 ▲▼

☐ Calculate frequencies closest to: (Frequency Shift) 0 Hertz

☒ Upper bound frequency: 3500 Hertz

Solver

Selection

☒ Automatic

☐ Manual

FFEPPlus ▼

☐ Use inplane effect

☐ Use soft spring to stabilize model

Save Results

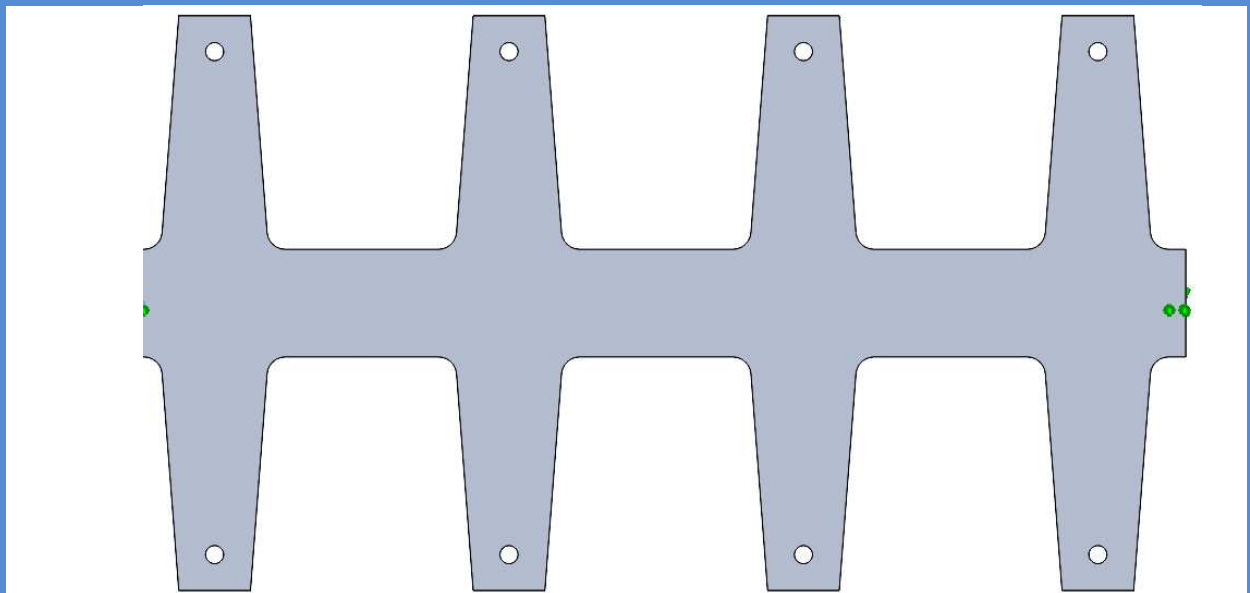
☒ Save results to SOLIDWORKS document folder

Results folder C:\Users\zefir\OneDrive\Рабочий стол\Д 📁🔄

☐ Average stresses at mid-nodes (high-quality solid mesh only)

OK
Отмена
Применить
Справка

Рис. 4.20. Налаштування параметрів проведення симуляції.



Model name: Модель валопроводу
Current Configuration: Default

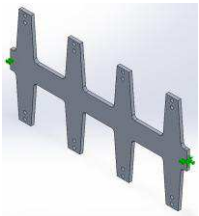
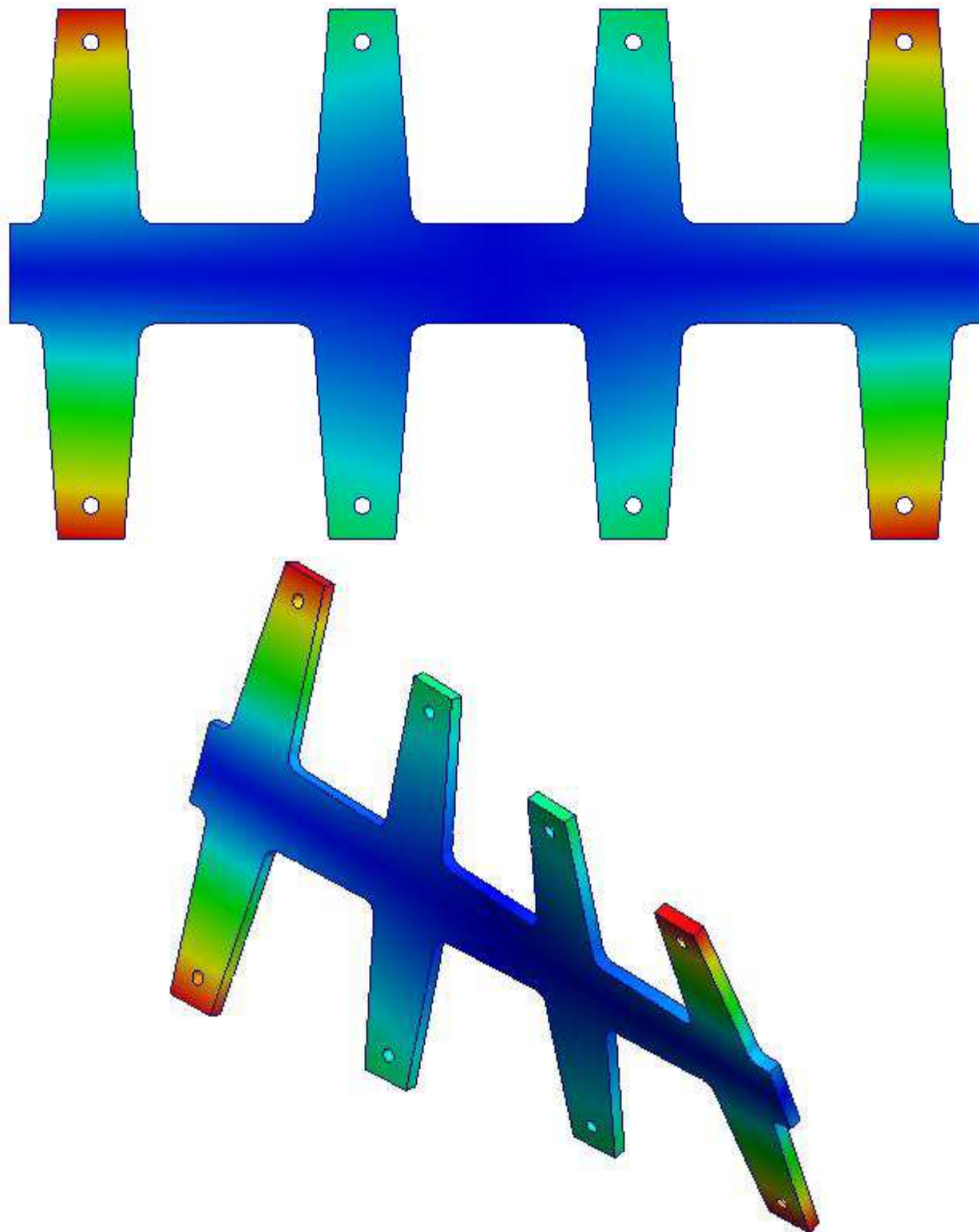
Solid Bodies				
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Modified	Path/Date
Cut-Revolve2 	Solid Body	Mass:0,242031 kg Volume:9,1332 4e-05 m^3 Density:2 650 kg/m^3 Weight:2,3719 N		May 26 22:23:40 2024

Рис. 4.21. Схема фіксації деталі в симуляції



243 Гц

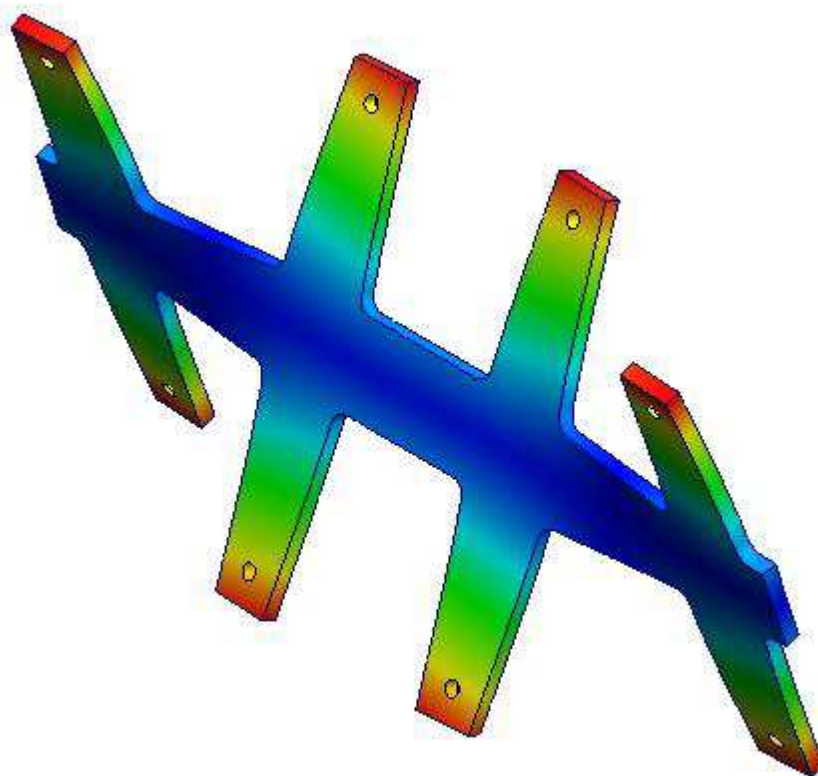
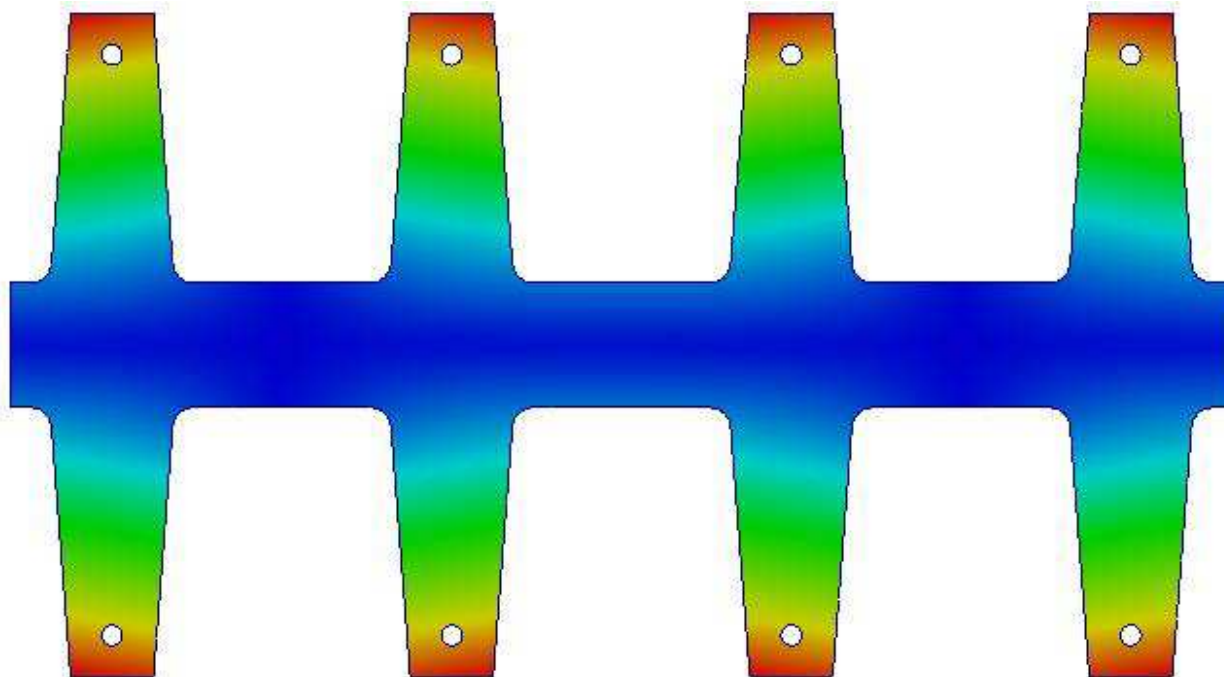
Рис. 4.22. Перша розрахункова крутильна форма коливань з жорсткими інерційними елементами

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261M.03.KPM.05.04.ПЗ

Лист

72



440 Гц

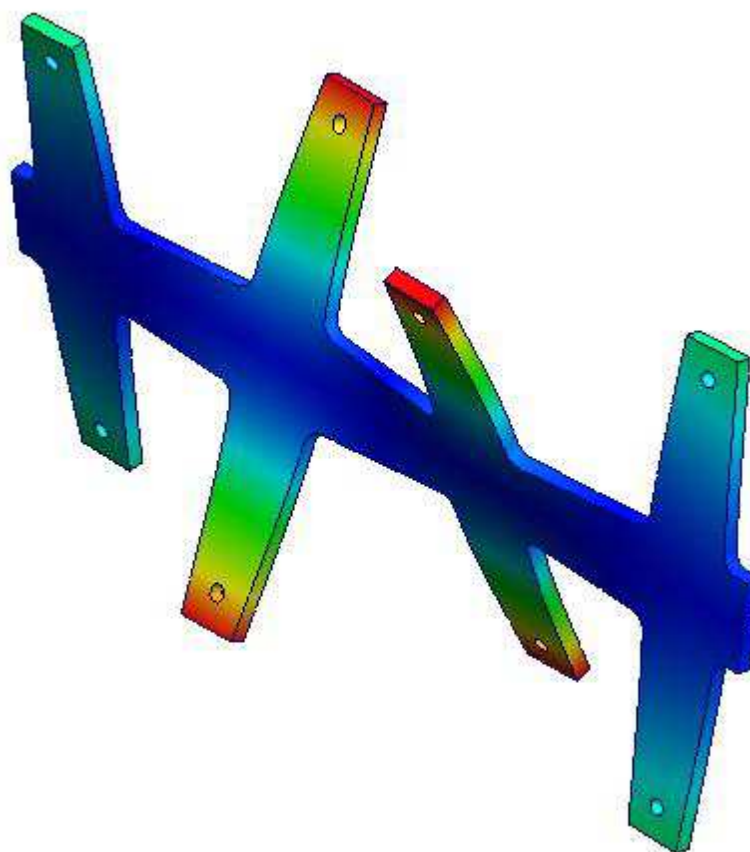
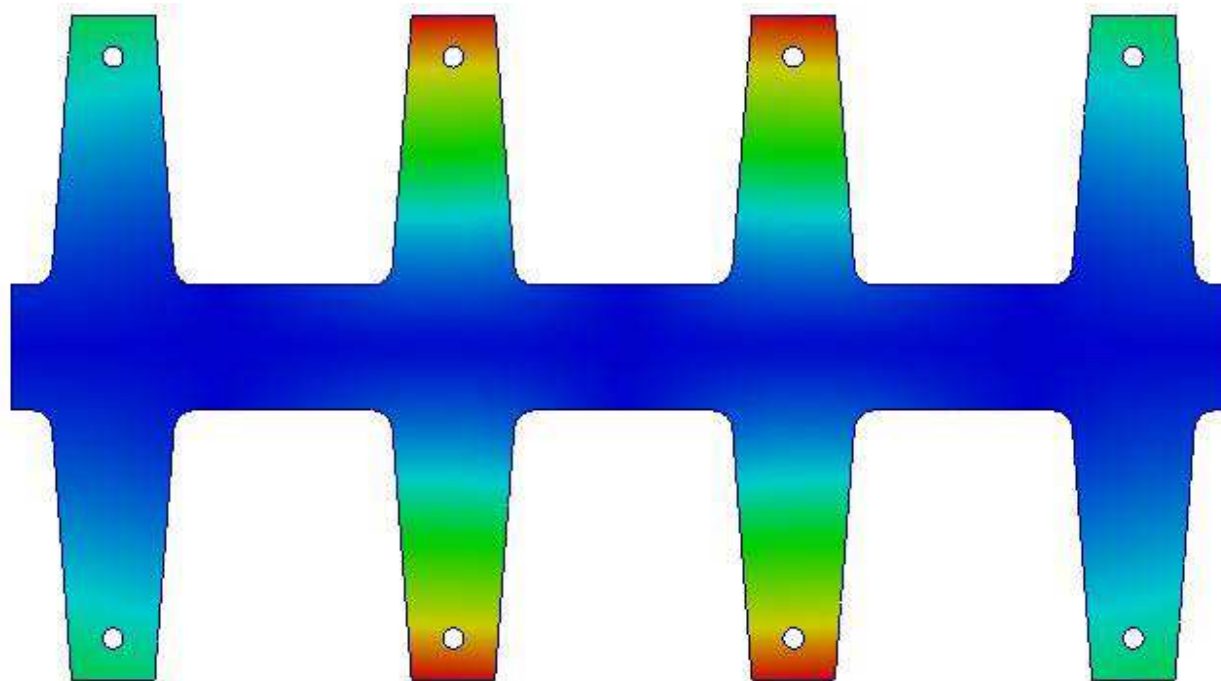
Рис. 4.23. Друга розрахункова крутильна форма коливань з жорсткими інерційними елементами

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261М.03.KPM.05.04.ПЗ

Лист

73



562 Гц

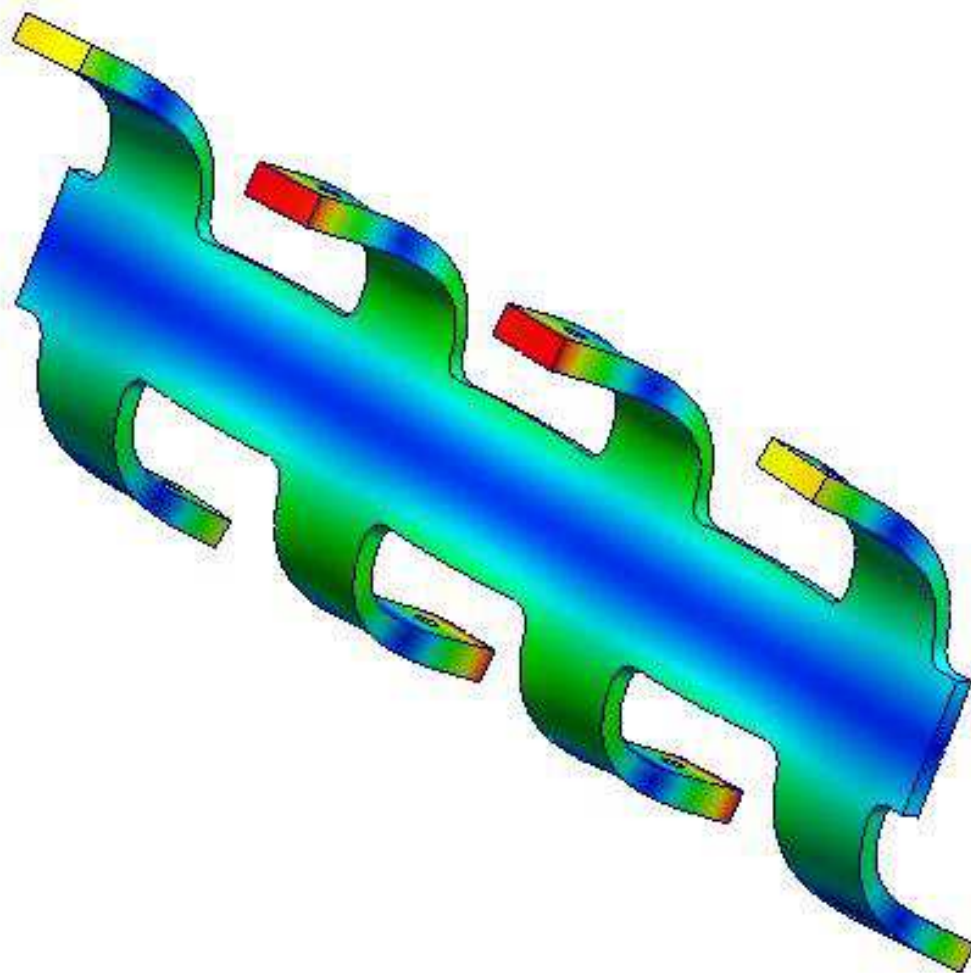
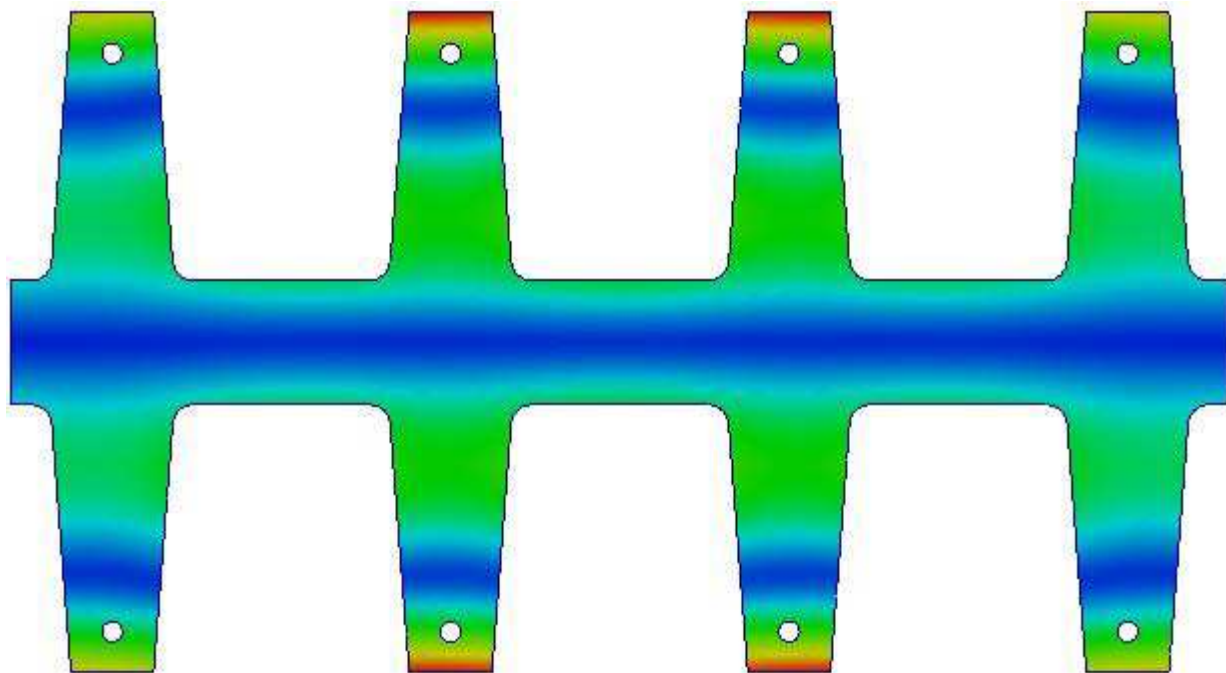
Рис. 4.24. Третя розрахункова крутильна форма коливань з жорсткими інерційними елементами

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261M.03.KPM.05.04.ПЗ

Лист

74



2848 Гц

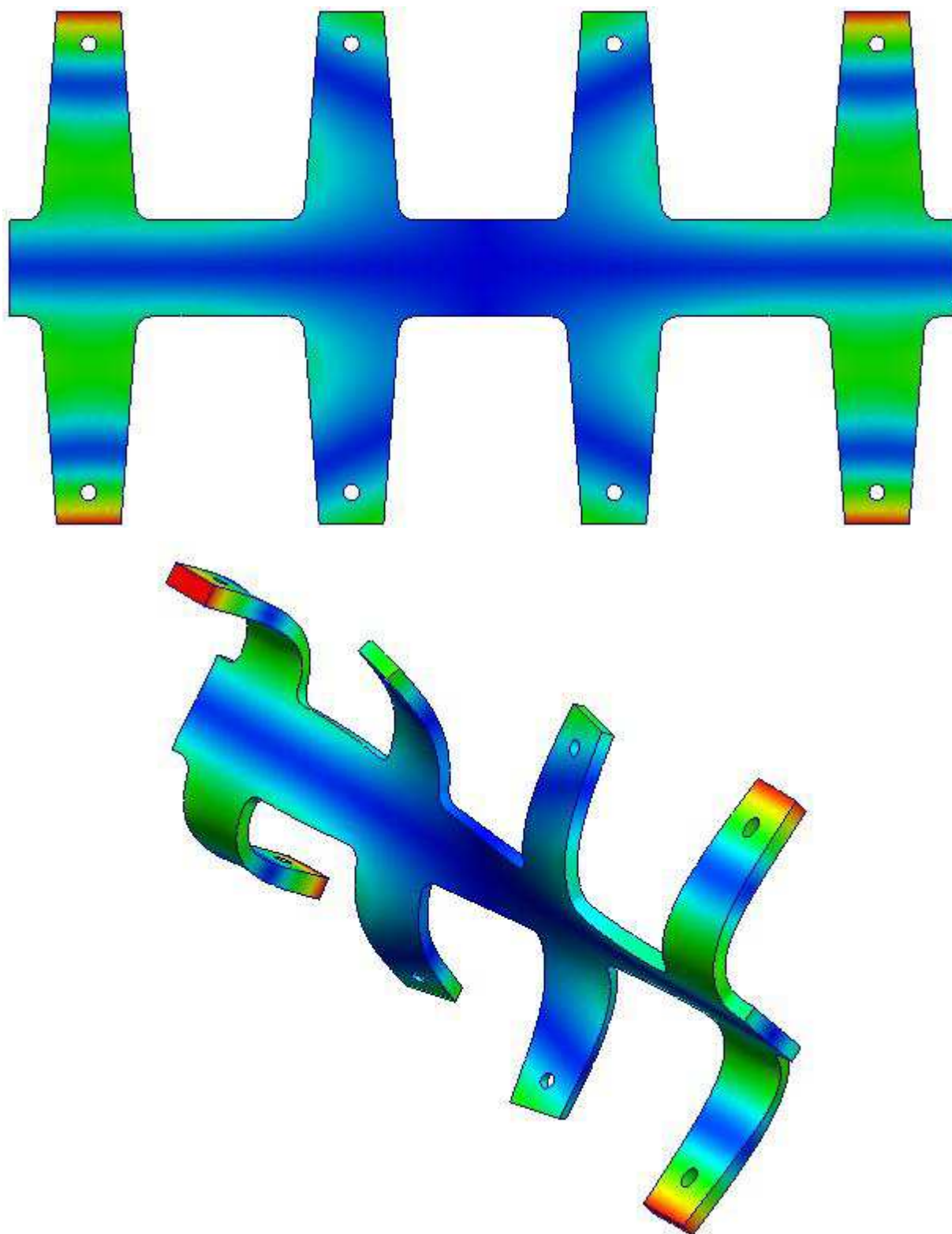
Рис. 4.25. Перша розрахункова згинна форма коливань з пружними інерційними елементами

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261M.03.KPM.05.04.ПЗ

Лист

75



2939 Гц

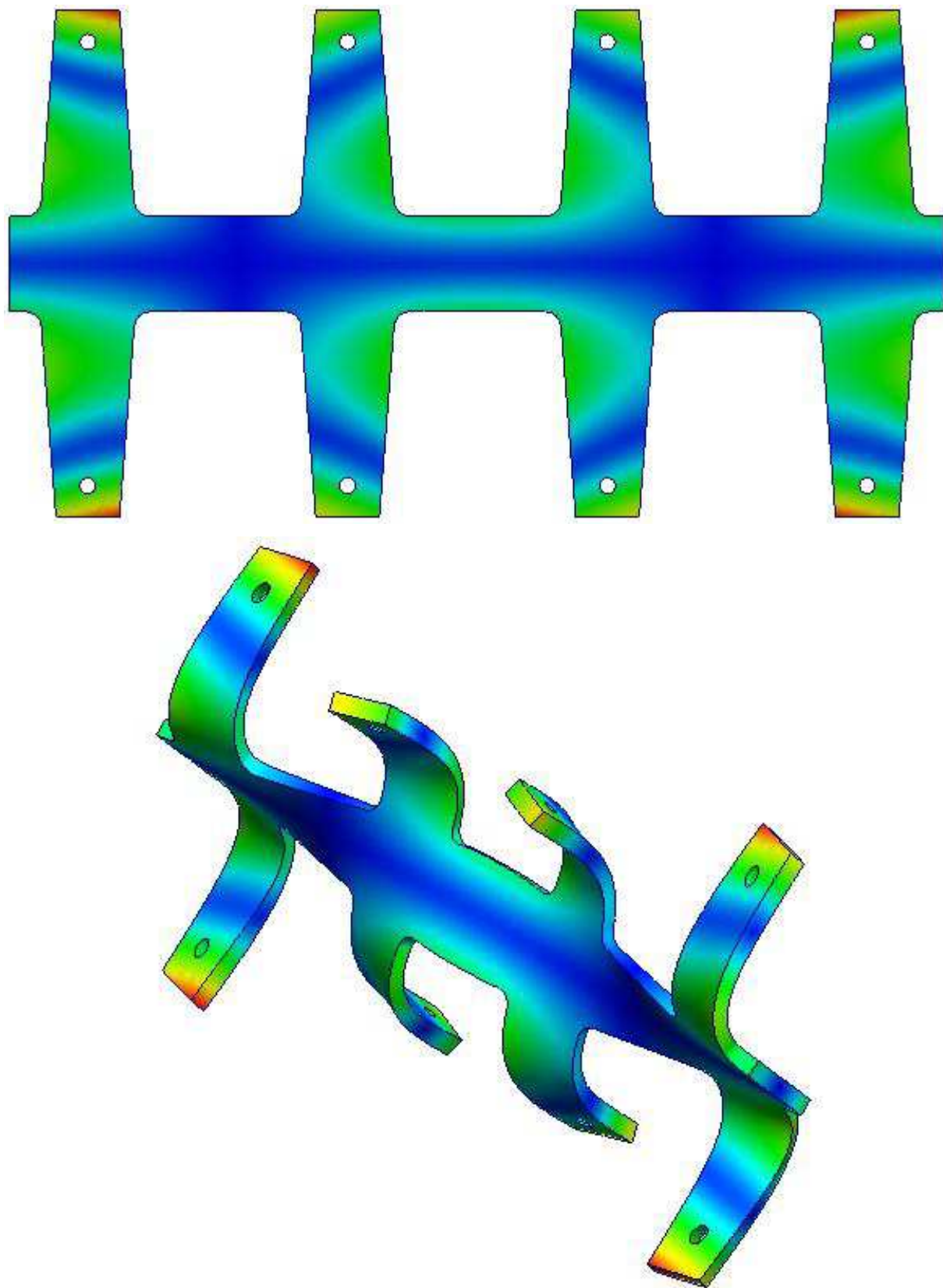
Рис. 4.26. Перша розрахункова крутильна форма коливань з пружними інерційними елементами

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261M.03.KPM.05.04.ПЗ

Лист

76



3126 Гц

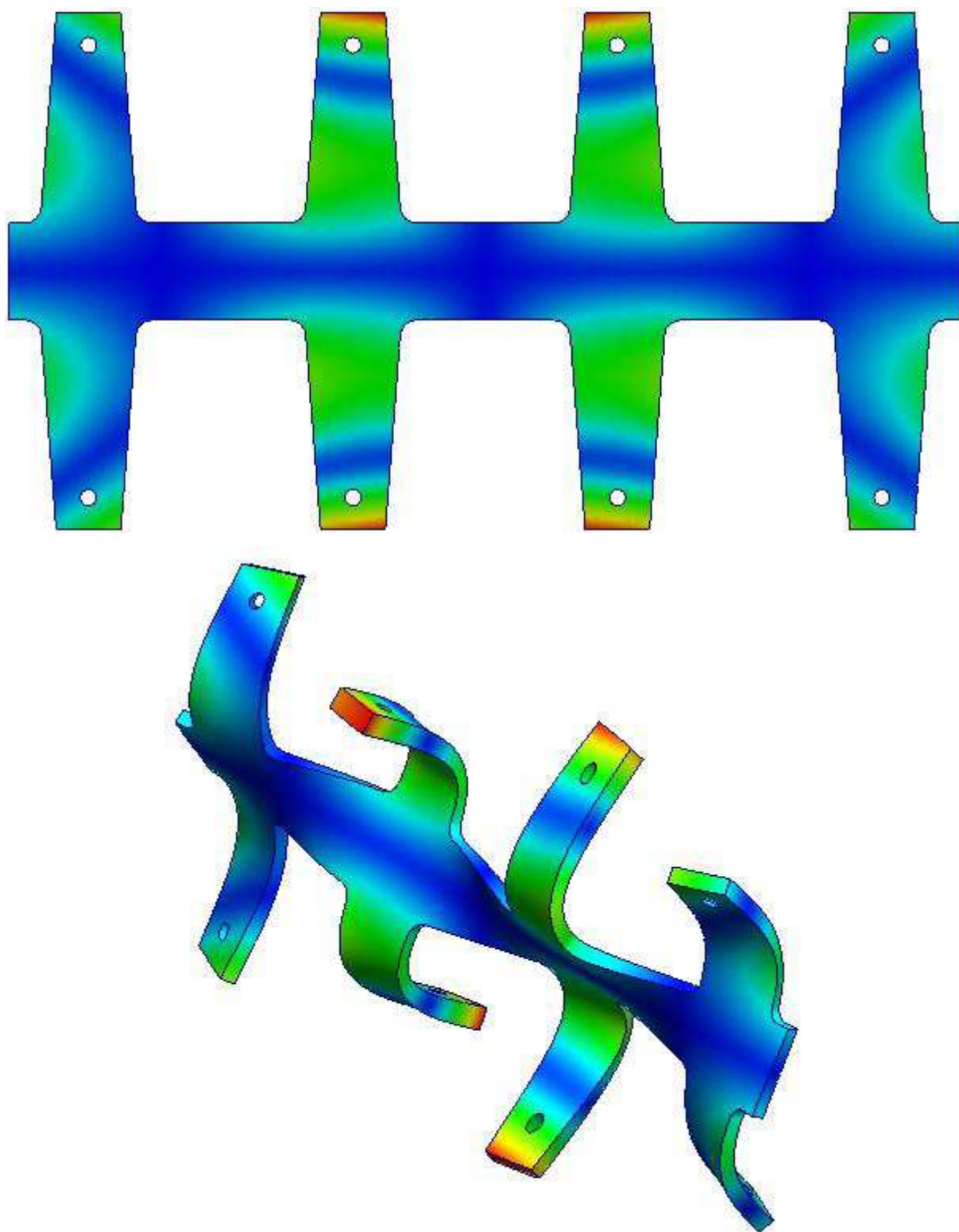
Рис. 4.27. Друга розрахункова крутильна форма коливачь з пружними інерційними елементами

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

6261M.03.KPM.05.04.ПЗ

Лист

77



3365 Гц

Рис. 4.28. Третя розрахункова крутильна форма коливань з пружними інерційними елементами

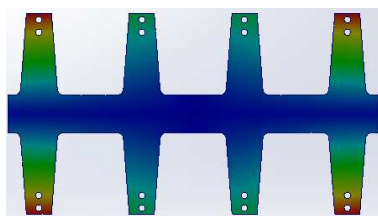
4.5 Порівняння результатів досліджень

За результатами досліджень було знайдено 6 форми коливань завдяки експерименту і 6 форм завдяки симуляції. Результати наведені у таблиці 4.6 і рис. 4.29.

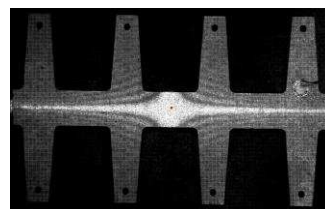
Таблиця 4.6 –Порівняння розрахункових та експериментальних частот.

Розрахунок	Експеримент
243	244
440	443
562	567
2939	3010
3126	3193
3365	3428

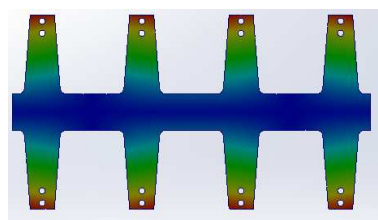
Квадратична помилка між експериментом і розрахунком складає 1.6%.



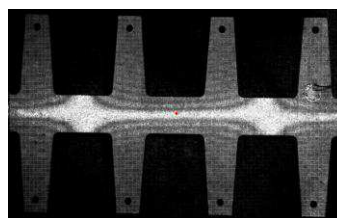
243 Гц



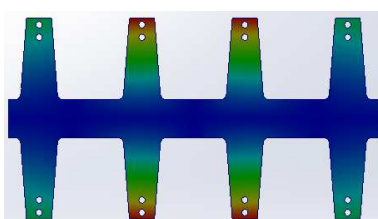
244 Гц



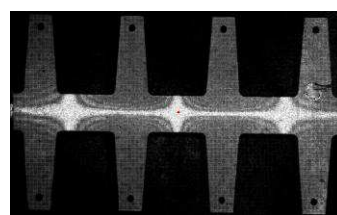
440 Гц



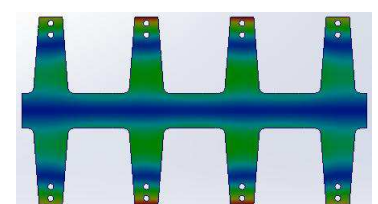
443 Гц



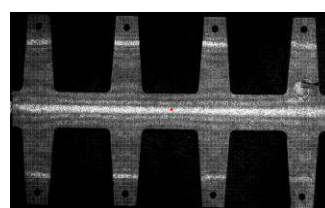
562 Гц



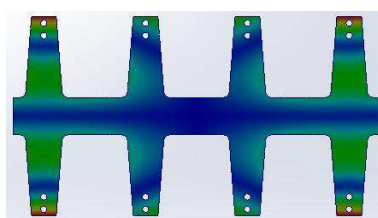
567 Гц



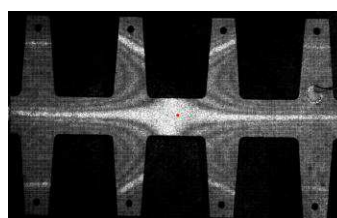
2848 Гц



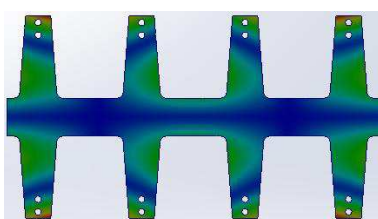
2922 Гц



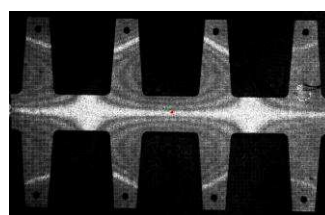
2939 Гц



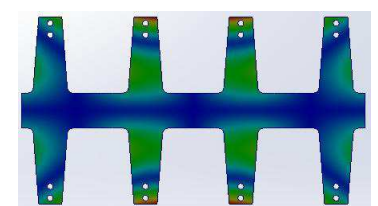
3010 Гц



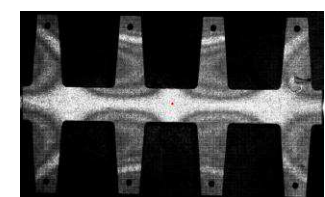
3126 Гц



3193 Гц

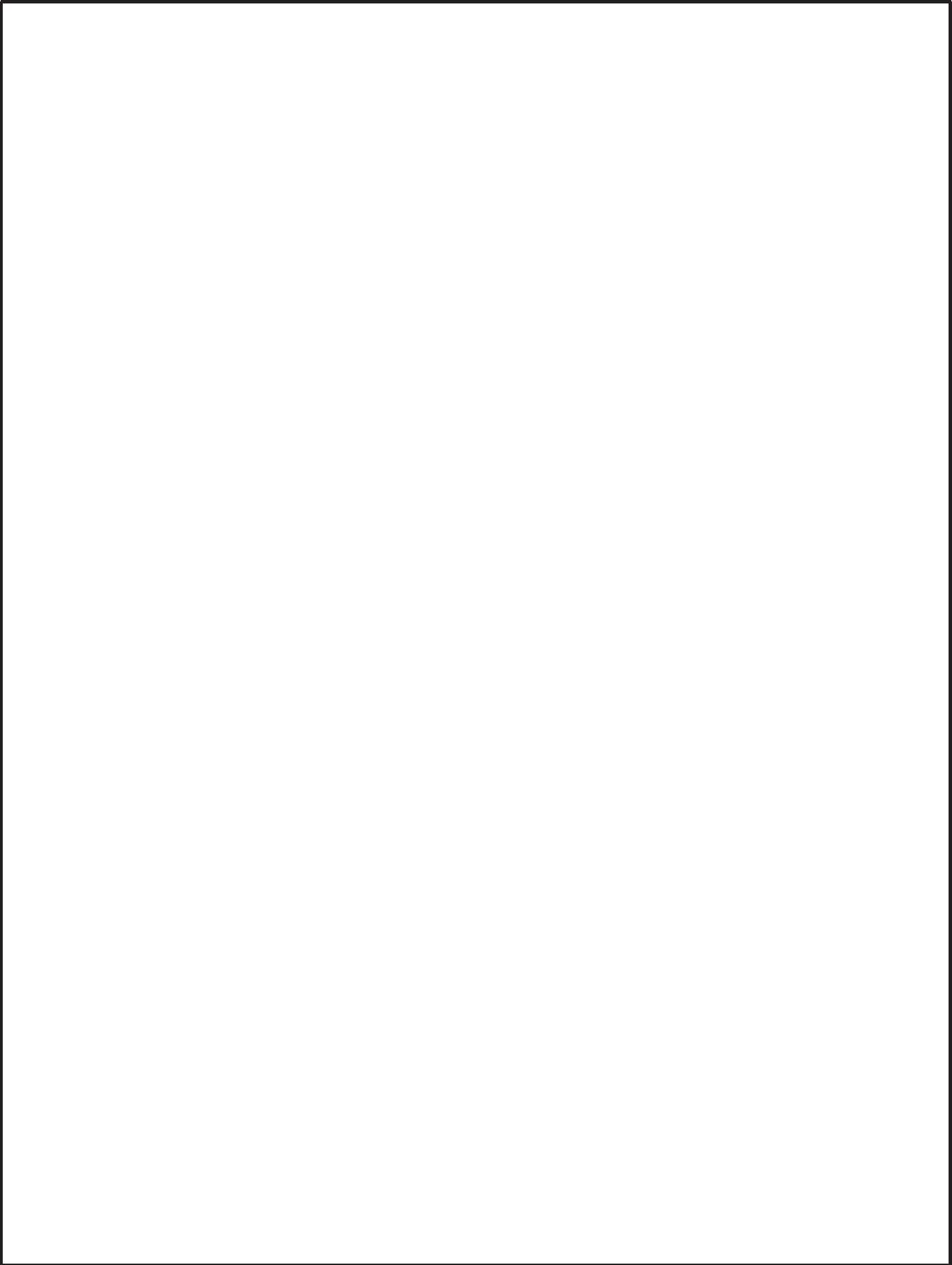


3365 Гц



3428 Гц

Рис. 4.29. Порівняння розрахункових та експериментальних форм коливань



					6261M.03.KPM.05.05.ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Охорона праці			
Розроб.	Костріков О. А.		Рос					
Перевір.	Ткач М.Р.							
Н. Контр.								
Затверд.					НУК			
					Лім	Аркуш	Аркушів	
							81	9

5 Охорона праці

5.1 Загальні положення.

Охорона праці – це сукупність правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на забезпечення збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі трудової діяльності. Усі промислові підприємства зобов'язані дотримуватися вимог ГОСТ 12.1.006-88, який встановлює основні норми безпеки праці в промисловості.

На механічній дільниці, де здійснюється механічна обробка деталей, впроваджено комплекс заходів, що гарантують безпечні умови праці та мінімізацію ризиків виробничого травматизму.

Під час експлуатації металорізальних верстатів існує небезпека виникнення нещасних випадків, пов'язаних із контактом працівників із рухомими частинами устаткування, робочими інструментами або столами верстатів. Додаткову загрозу становить стружка, яка може відлітати під час процесу різання та спричиняти механічні травми. З метою запобігання таким випадкам усі небезпечні зони повинні бути огорожені захисними пристроями. Внутрішні поверхні огорож, а також посадочні місця для їх кріплення мають бути пофарбовані в сигнальний яскраво-червоний колір, що попереджає про небезпеку.

Під час обробки різанням утворюються дрібні частинки металу та випари змащувально-охолоджувальних рідин (ЗОР), які містять потенційно шкідливі речовини, зокрема сульфрезол та різноманітні емульсії. Ці компоненти можуть викликати подразнення або отруєння, тому необхідно контролювати їх концентрацію в повітрі робочої зони. Відповідно до санітарних норм, гранично допустима концентрація зазначених речовин не повинна перевищувати 10 мг/м³.

Для підтримання безпечних умов повітряного середовища на дільниці передбачено систему загальної вентиляції, призначену для ефективного видалення шкідливих домішок і парів. Природна вентиляція здійснюється

через спеціальні вентиляційні отвори, розміщені в стінах цеху: на висоті близько 2 м у літній період та 4 м у зимовий.

З метою індивідуального захисту працівників рекомендовано застосовувати респіратори, які ефективно захищають органи дихання від пилу та аерозольних домішок, що утворюються під час механічної обробки металів.

5.2 Заходи з електробезпеки

Електричний струм становить небезпеку для людини лише у випадку, коли вона стає елементом замкнутого електричного кола, тобто коли струм проходить крізь тіло, досягаючи рівнів, що можуть спричинити патологічні зміни в організмі або навіть летальний наслідок.

Основні причини ураження електричним струмом:

1. Випадковий контакт із струмопровідними частинами, що перебувають під напругою.
2. Дотик до електрообладнання з пошкодженою ізоляцією.
3. Потрапляння під напругу під час ввімкнення живлення або при короткому замиканні.

Ураження електричним струмом, як правило, є наслідком порушення вимог техніки безпеки, недостатньої кваліфікації персоналу або аварійних ситуацій в електроустановках.

Одними з основних засобів захисту людини від впливу електричного струму під час експлуатації електроустановок є захисне заземлення та ізоляція струмоведучих елементів.

Захисне заземлення – це технічний захід, призначений для забезпечення безпечного відведення струму на землю у разі виникнення аварійної напруги. Його принцип полягає в тому, що небезпечний потенціал рівномірно розподіляється по ґрунту, забезпечуючи зниження напруги дотику до безпечного рівня. У результаті навіть за наявності струму в тілі людини його сила залишається нижчою за фізіологічно небезпечні межі.

Відповідно до вимог нормативно-технічної документації, захисне заземлення електроустановок повинно виконуватись у таких випадках:

- при напрузі 380 В і вище змінного струму, а також 440 В і вище постійного струму – у всіх виробничих умовах;
- при напрузі 42–380 В змінного та 110–440 В постійного струму – у разі експлуатації електроустановок, розташованих у приміщеннях з підвищеною або особливою небезпекою ураження електричним струмом;
- у вибухонебезпечних приміщеннях – незалежно від рівня та роду напруги (змінного чи постійного струму).

5.3 Інструкція з охорони праці на верстатах

Інструкція З Охорони Праці При Роботі На Фрезерних Верстатах

1. Загальні положення

1.1. До роботи на фрезерних верстатах допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання, інструктаж з охорони праці та перевірку знань.

1.2. Працівник повинен знати будову, принцип дії та правила експлуатації верстата, а також заходи безпеки при його обслуговуванні.

1.3. Під час роботи необхідно користуватися спецодягом: халатом або комбінезоном, головним убором, захисними окулярами.

1.4. Забороняється працювати при несправних огороженнях, електрообладнанні, гальмах, системах мастила та охолодження.

1.5. Робоче місце має бути чистим, без сторонніх предметів і мастильних плям.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Перевірити справність верстата, наявність і цілісність заземлення.

2.2. Оглянути інструмент (фрези, оправки) – не допускаються тріщини, деформації, тупі або погано закріплені леза.

2.3. Переконатися, що всі огороження та захисні екрани встановлені.

2.4. Налаштувати швидкість обертання і подачу відповідно до виду обробки.

2.5. Увімкнути верстат у холостому режимі для перевірки роботи.

3. Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Встановлювати і знімати заготовки лише при повній зупинці верстата.

3.2. Не допускається робота з руками поблизу обертових частин.

3.3. Забороняється торкатися фрези або вимірювати заготовку під час обертання інструмента.

3.4. Стружку видаляти спеціальними гачками або щітками, а не руками.

3.5. Не залишати верстат без нагляду під час роботи.

3.6. У разі появи сторонніх шумів, вібрацій або іскріння – негайно зупинити верстат і повідомити керівника.

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1. Відключити живлення верстата.

4.2. Зняти інструмент і заготовки, очистити робочу поверхню.

4.3. Протерти верстат від стружки та мастила, змастити деталі за потреби.

4.4. Зняти спецодяг і вимити руки.

4.5. Повідомити майстра про всі несправності, виявлені під час роботи.

Інструкція З Охорони Праці При Роботі На Свердлильних Верстатах

1. Загальні положення

1.1. До роботи допускаються особи, які пройшли медогляд, навчання та інструктаж з охорони праці.

1.2. Працівник повинен знати конструкцію верстата, принцип його роботи, правила безпечного свердління, розгортання, зенкування тощо.

1.3. Обов'язкове використання індивідуальних засобів захисту: окулярів, рукавиць, спецодягу.

1.4. Забороняється працювати на несправному верстаті або без захисного екрана.

1.5. Не допускається робота з довгим волоссям без головного убору або з вільно спущеними рукавами.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

					6261M.03.KPM.05.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		85

- 2.1. Оглянути верстат: перевірити кріплення шпинделя, патрона, столу, електропроводку, заземлення.
- 2.2. Переконавшись, що свердла гострі й правильно закріплені.
- 2.3. Надійно закріпити заготовку у лещатах або спеціальному пристрої.
- 2.4. Перевірити правильність вибору швидкості обертання та подачі.
- 2.5. Увімкнути верстат на холостому ході, впевнитись у відсутності биття свердла.

3. Вимоги безпеки під час роботи

- 3.1. Під час свердління утримувати руки на безпечній відстані від обертового інструмента.
- 3.2. Не вимірювати заготовку під час роботи шпинделя.
- 3.3. Застосовувати охолоджувальну рідину при обробці твердих матеріалів.
- 3.4. Стружку видаляти лише після повної зупинки інструмента.
- 3.5. У разі заклинювання свердла – негайно зупинити верстат.
- 3.6. Не натискати на рукоятку подачі надмірним зусиллям.

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

- 4.1. Вимкнути живлення верстата.
- 4.2. Зняти свердло, очистити його і верстат від стружки.
- 4.3. Протерти робочу поверхню та нанести мастило на направляючі.
- 4.4. Зняти спецодяг, помити руки.
- 4.5. Повідомити керівника про всі несправності.

5.4 Заходи для запобігання впливу вібрації

Вібрація та її вплив на організм людини

Вібрація визначається як коливальні рухи твердого тіла, що характеризуються абсолютними та відносними параметрами. До абсолютних параметрів належать вібропереміщення, тоді як до відносних відносять амплітуду коливань, віброшвидкість, віброприскорення та період коливань.

Типи вібрації

Розрізняють два основні види вібрації: загальну та локальну (місцеву).

- Загальна вібрація передається на тіло людини через опорні поверхні, наприклад сидіння або підлогу, що впливають на все тіло.
- Локальна вібрація діє переважно на руки та кисті працівника під час контакту з ручними механізованими інструментами або оброблюваними деталями.

Можливий одночасний вплив обох типів вібрації. Наприклад, під час роботи на дорожньо-будівельній техніці локальні коливання передаються через органи керування, а загальні – через сидіння на все тіло оператора.

Вплив вібрації на організм людини

Дія вібрації на організм може спричиняти порушення серцево-судинної та нервової систем, викликати спазми судин, а також негативно впливати на суглобові зчленування, обмежуючи їх рухомість.

- Короткочасна дія вібрації призводить до передчасної втоми працівника та зниження продуктивності праці.
- Тривалий вплив може стати причиною професійного захворювання – вібраційної хвороби, прояви якої включають оніміння, поколювання та біль у суглобах.

Заходи захисту від вібрації

Захист від шкідливого впливу вібрації здійснюється за допомогою колективних та індивідуальних заходів.

Колективний захист включає:

1. Зменшення різких прискорень у процесі роботи агрегатів та пристроїв.
2. Використання вібродемпферів, які перетворюють енергію коливань у теплову енергію.
3. Збільшення маси агрегату та підвищення жорсткості конструкційної системи.
4. Встановлення віброізоляційних пристроїв, що зменшують передачу коливальної енергії на робочі місця.

Індивідуальний захист включає:

1. Використання спеціальних рукавиць для захисту рук від локальної вібрації.
2. Носіння спеціального взуття та наколінників для зниження впливу загальної вібрації.
3. Використання нагрудників, поясів та спеціалізованих костюмів, що зменшують передавання коливань на тіло.

Загальні вимоги до засобів індивідуального захисту від шуму та вібрації регламентуються відповідними державними стандартами, що забезпечують ефективність та безпечність експлуатації механізованого обладнання.

5.5 Безпека при проведенні експерименту.

Експериментальна голографічна установка заснована на використанні пучка монохроматичного світла, що випромінюється оптичним квантовим генератором (лазером). Монохроматичне світло викликає подразнення слизової оболонки ока, а пряме потрапляння пучка світла в око може викликати тяжкі ураження, навіть втрату зору. Також необхідно враховувати фактор небезпеки - висока напруга 400 В в джерелі накачування ОКГ. Тому при роботі на голографічній установці необхідна акуратність і суворе дотримання правил безпеки.

1. До постійної роботи на голографічній установці допускаються особи:
 - які мають дозвіл спеціальної медичної комісії на роботу з оптичним квантовим генератором;
 - які мають допуск до роботи на електроустановках до 1000 В по IV групі; які пройшли інструктаж з техніки безпеки і вивчили технічний опис та інструкцію з експлуатації лазера.
2. Перед ввімкненням ОКГ необхідно перевірити справність заземлення блоку накачування.
3. При роботі з ввімкненим ОКГ слідкувати, щоб промінь світла не потрапив в незахищене око.
4. У випадку потрапляння пучка світла в очі необхідно негайно звернутися до лікаря.

5. При спостереженні голограм в розсіяному світлі лазера необхідно установлювати екран, що захищає очі від прямої дії опорного пучка.
6. Працювати на установці більше 4-х годин в день не рекомендується.
7. Співробітники, які постійно виконують роботи на установці, зобов'язані щорічно проходити медичний огляд.

Висновки

У кваліфікаційній роботі вирішено комплекс науково-технічних та виробничих задач, пов'язаних із розробкою технології виготовлення та дослідженням вібраційних характеристик моделі валопроводу (4–160x295).

Проведено аналіз конструкції деталі та її технологічності. Визначено тип виробництва як одиничний. Розроблено маршрутний та операційний технологічний процес виготовлення деталі. Спроектовано спеціальне пристосування для механічної обробки.

Були проведенні дослідження вібраційних характеристик деталі. За результатами досліджень було знайдено 6 форми коливань завдяки експерименту і 6 форм завдяки симуляції. Результати наведені у таблиці 4.6 і рис. 4.29. Квадратична помилка між експериментом і розрахунком складає 1.6%.

Література

1. Офіційний сайт SolidWorks URL:
<https://www.solidworks.com>
2. Mykhaylo Tkach, Yurii Halynkin, Arkadii Proskurin, Irina Zhuk, Volodymyr Kluchnyk, Igor Bobylev (2021) An experimental study of the vibrational characteristics of a diamond circular blade using electronic speckle-pattern interferometry & FEM.
3. Юрчишин І.І., Литвиняк Я.М., Грицай І.Є., Кукляк М.Л., Кусий Я.М, Ступницький В.В., Яцюк В.А., Кук А.М., Махоркін Є.М., Свізінський В.П. (2009) Технологія Машинобудування.
4. Соловйов С.М., Івахненко М.М., Шумілов О.П, Козленко О.О., Бобошко В.О. (2006) Практикум з дисципліни «Теоретичні основи технології виготовлення деталей машин»
5. Василенко М.В., Алексійчук О.М. Теорія коливань і стійкості руху. Підручник. - Київ: Вища школа, 2004. - 525 с.
6. Tkach M.R., Zolotiy Yu.G., Dovgan D.V., Guk I.Yu. (2012), Determination of the natural vibration forms of gas turbine engine elements in real time by electron speckle interferometry.
7. Ling Xiang , Shixi Yang, Chunbiao Gan (2012) Torsional vibration measurements on rotating shaft system using laser doppler vibrometer.
8. D. Heller, I.A. Sever, C.W. Schwingshackl (2020) A method for multi-harmonic vibration analysis of turbomachinery blades using Blade Tip-Timing and clearance sensor waveforms and optimization techniques.
9. Danfeng Zhou, Qing Yang, Lianchun Wang, Jie Li (2021) Stability and control of maglev vehicle–girder coupled system considering torsional vibration of the girder

10. Ali Safaeinejad, Mohsen Rahimi, Dao Zhou, Frede Blaabjerg (2024) A sensorless active control approach to mitigate fatigue loads arising from the torsional and blade edgewise vibrations in PMSG-based wind turbine system
11. Harris, S. L. (2020). Mechanical Vibrations. McGraw-Hill Education.
12. Norton, R. L. (2019). Machine Design: An Integrated Approach. Pearson.
13. Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2021). Shigley's Mechanical Engineering Design. McGraw-Hill Education.
14. Rao, S. S. (2017). Mechanical Vibrations. Pearson.
15. Norton, R. L. (2014). Cam Design and Manufacturing Handbook. Industrial Press.
16. Smith, S. (2018). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Pearson.
17. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2020). *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson.
18. Groover, M. P. (2015). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. Wiley.
19. Degarmo, E. P., Black, J. T., & Kohser, R. A. (2017). *Materials and Processes in Manufacturing*. Wiley.
20. Brusa, E., & Delprete, C. (2004). "Experimental Characterization of Gear Noise and Vibrations". *Journal of Vibration and Acoustics*, 126(3), 405-412.
21. Jones, R., & Wykes, C. (1983). *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge University Press.
22. Pavičić, I., Holst, J., Mueller, A., & Haueisen, J. (2012). "Advanced Analysis of Vibroacoustic Modulation Using BLASMA". *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31(3), 305-315.