

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»

Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та
робототехніки

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

**Нова конструкція і дослідження стенда для експериментального
дослідження моментно-частотної характеристики асинхронного двигуна**

Пояснювальна записка

до дипломного проекту

ГММ.601-ММв.012-00.00.000 ПЗ

Виконав: студент VI курсу, групи 601-ММв
напряму підготовки (спеціальності)

133 Галузеве машинобудування

Р.І. Левченко

Керівник Крот О.Ю.

Рецензент Бляшко В.В., к.т.н., доцент

*Завідувач кафедри Автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій*

*Харківського національного університету
міського господарства імені О.М. Бекетова*

Полтава – 2024 рік

Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка”

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та
робототехніки

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

**Нова конструкція і дослідження стенда для
експериментального дослідження
моментно-частотної характеристики
асинхронного двигуна**

Виконав: студент VI курсу, групи 601-ММв

напряму підготовки (спеціальності)

133 Галузеве машинобудування

Р.І. Левченко

Керівник **Крот О.Ю.**

Рецензент **Блажко В.В.**, к.т.н., доцент

Завідувач кафедри Автоматизації та

комп'ютерно-інтегрованих технологій

Харківського національного університету

міського господарства імені О.М. Бекетова

Полтава – 2024 рік

№ строки	Формат	Обозначение	Наименование	Кол. листов	№ экз.	Примечание
1						
2			Документація загальна			
3						
4			Вперше розроблена			
5						
6	A4	ГММ.601-ММВ.012-00.00.000 ТЗ	Завдання	1		
7	A4	ГММ.601-ММВ.012-00.00.000 А	Анотація	2		
8	A4	ГММ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	57		
9						
10			Документація наукова			
11						
12			Вперше розроблена			
13						
14	A4	ГММ.601-ММВ.012-00.00.000 ПМ	Розробка та дослідження			
15			поршневого кривошипно-кулісного			
16			преса для виробництва			
17			будівельної кераміки			
18						
19			Презентаційні матеріали	39		
20						
21						
22						
23						
24						

ГММ.601-ММВ.012-00.00.000 ВР

Взм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Левченко Р.І.	<i>[Signature]</i>	09.07.24
Проб.		Орисяк О.В.	<i>[Signature]</i>	19.08
Керівник		Крат О.Ю.	<i>[Signature]</i>	19.08
Н.контр.		Васильєв О.С.	<i>[Signature]</i>	23.08
Утв.		Орисяк О.В.	<i>[Signature]</i>	12.08

Нова конструкція і дослідження
стенда для експериментального дослідження
моментно-частотної характеристики
асинхронного двигуна

Лист	Лист	Листов
Н	1	1

Національний університет
імені Юрія Кондратюка,
ННІТР, 2024 р

Копіював

Формат А4

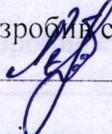
**Нова конструкція і дослідження стенда для
експериментального дослідження моментно-частотної
характеристики асинхронного двигуна**

Магістерська робота

Лист затвердження

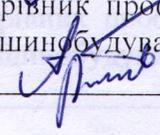
ГММ.601-ММв.012-00.00.000 МР - ЛЗ

Розробив студент групи 601-ММв

 Р.І. Левченко

„23” 08 2024 р.

Керівник професор кафедри галузевого
машинобудування та мехатроніки, д.т.н., доц.

 О.Ю. Крот

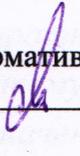
„23” 08 2024 р.

Технологічний контроль к.т.н., доц.

 О.С. Васильєв

„23” 08 2024 р.

Нормативний контроль к.т.н., доц.

 О.С. Васильєв

„23” 08 2024 р.

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
галузевого машинобудування та мехатроніки
кандидат техн. наук, доцент

 О.В. Орісенко

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра Галузевого машинобудування та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри галузевого
машинобудування та мехатроніки

 О.В. Орисенко

«20» 03 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Леквенко Роману Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) *Нова конструкція і дослідження стенда для експериментального дослідження моментно-частотної характеристики асинхронного двигуна*

керівник проекту (роботи) **Крот Олександр Юлійович, д.т.н., доцент,**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від . .2024 року № -ф.а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) “20” травня 2024 року.

3. Вихідні дані до проекту (роботи): *Розробити (відновити на базі сучасних апаратних елементів і виготовленого власноруч програмного забезпечення) систему визначення поточного крутного моменту двигуна. Розробити систему визначення та запису частоти обертання з застосуванням тахогенератором постійного струму.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *1. Технологія виробництва керамічних будівельних виробів.*

2. Огляд існуючого пресового обладнання та способів визначення реологічних характеристик. 3. Дослідження об'єкта. 4. Практичне значення застосування результатів дослідження і моделювання. Висновки. Список літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація для наочного представлення результатів досліджень

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів, що стосуються їх

Розділ	Консультант	дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Формулювання проблеми та постановка задач дослідження	Крот О.Ю.		
Огляд існуючих технологій виробництва керамічних будівельних виробів	Крот О.Ю.		
Дослідження об'єкта	Крот О.Ю.		
Практичне значення застосування результатів дослідження	Крот О.Ю.		

7. Дата видачі завдання 20.03.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання проблеми та постановка задач дослідження	05.03.2023 р.	
2	Формулювання проблеми та постановка задач дослідження	20.03.2023 р.	
3	Огляд існуючих технологій виробництва керамічних будівельних виробів	05.04.2023 р.	
4	Дослідження об'єкта	20.04.2023 р.	
5	Практичне значення застосування результатів дослідження і моделювання	05.05.2023 р.	
6	Виконання презентації	20.05.2024 р.	
7	Оформлення магістерської роботи	01.06.2024 р.	
8	Представлення готового проекту на кафедрі	05.06.2024 р.	

Здобувач ступеня магістр

Левченко Р.І

Керівник кваліфікаційної роботи

проф. Крот О.Ю



Анотація

Р.І. Левченко. Нова конструкція і дослідження стенда для експериментального дослідження моментно-частотної характеристики асинхронного двигуна.

Магістерська дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр" зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" напрямку освіти 13 "Механічна інженерія", Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2024.

Магістерська дипломна робота присвячена розробці нової конструкції і дослідженню стенда для експериментального дослідження моментно-частотної характеристики асинхронних двигунів. Запропоновано для побудови механічної характеристики електричного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначати крутний момент, застосовуючи стенд з тензобалкою, закріпленою на рамі стенда. Запропоновано для побудови механічної характеристики електричного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначати поточну частоту обертання двигуна, застосовуючи тахогенератор постійного струму. Розроблено та реалізовано на лабораторному обладнанні кафедри стенд для експериментальної побудови механічної характеристики двигуна. Проведені дослідження на двигуні з відомими характеристиками підтверджують можливість застосування створеного стенда. Використаний принцип визначення крутного моменту може бути застосовано у інших дослідженнях механічного обладнання.

Ключові слова: асинхронний двигун, механічна характеристика, діаграма, тензорезистор, тензодатчик, тензопідсилювач, аналогово-цифровий перетворювач, тахогенератор постійного струму.

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 А

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			
Розроб.		Левченко Р.І.	<i>[Signature]</i>	09.08.24	Анотація		
Перев.		Орисяк О.В.	<i>[Signature]</i>	23.08			
Керівн.		Крот О.Ю.	<i>[Signature]</i>	23.08			
Н. контр.		ВАСИЛЬЄВ О.С.	<i>[Signature]</i>	23.08			
Затв.		ОРИСЕНКО О.В.	<i>[Signature]</i>	23.08			
					Лім.	Лист	Листів
					Н	1	2
					Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІТР, 2024 р		

Зміст

Вступ	3
1. Технологічні і конструктивні особливості асинхронних двигунів у трифазному і однофазному режимах	5
2. Огляд існуючого обладнання і постановка задачі дослідженні	10
2.1. Формулювання проблеми	10
2.2. Огляд існуючого обладнання для визначення крутного моменту, формулювання мети і задачі досліджень	11
3. Дослідження об'єкта	20
3.1. Методика та обладнання	20
3.2. Результати досліджень	24
4. Практичне значення застосування результатів дослідження	28
4.1. Складання механічної характеристики двигуна за залежністю Клосса	28
4.2. Варіант застосування результатів дослідження для технологічного обладнання	31
4.3. Розрахунок елементів привода	48
Висновки	54
Список літератури	55
Додаток 1. Копія диплому переможця Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт	57

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ										
Эк.	Лист	№ докум.	Дата	Зміст						
Розроб.		Левченко Р.І.	09.08.24							
Перев.		Орсева О.С.	13.08							
Керівник		Крот О.Ю.	13.08							
Н.контр.		Васильєв О.С.	23.08							
Затв.		Орищенко О.В.	23.08							
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center;">Лім.</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Лист</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Листів</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Н</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: right; margin-top: 5px;"> Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІІТР, 2024 р. 2 </p>					Лім.	Лист	Листів	Н	1	
Лім.	Лист	Листів								
Н	1									

Вступ

Переважає кількість машин і обладнання технологічних процесів застосовують електричний привід. Навіть якщо виконавчі органи обладнання приводяться до руху пневматичними чи гідравлічними системами, все одно насоси та компресори цих систем приводяться від електричного двигуна. Переважає більшість електричних двигунів у технологічних процесах – двигуни асинхронні. Їх переваги – висока надійність, дешевизна, простота конструкції, простота системи пуску, можливість працювати певний час з значним перевантаженням та ін.

Термін асинхронні ці машини мають через те, що частота обертання ротора не дорівнює частоті обертання магнітного поля на статорі. В режимі двигуна частота обертання ротора відстає від частоти магнітного поля статора. В обмотці ротора електричний струм індуктується обертовим магнітним полем на статорі. Через це інша назва асинхронних двигунів – індукційні двигуни. Частота обертання вала двигуна залежить від частоти живлячого струму і від кількості пар полюсів. Наприклад, для двигуна з однією парою полюсів при частоті перемінного струму 50Гц частота обертання складає 3000 об/хв (60об/с); для двигунів з трьома парами полюсів – 1000 об/хв. Але це так звані синхронні частоти обертання, і в дійсності частота обертання буде залежати ще й від фактично діючого крутного моменту на валу двигуна. Цю залежність називають механічною характеристикою двигуна або його моментно-частотною характеристикою. Для стандартних двигунів ця характеристика є відомою з технічної характеристики. Але у деяких випадках її необхідно визначати експериментально за допомогою електричної навантажувальної системи, яка є доволі коштовною і габаритною. Тому актуальною є задача розробки простої і дешевої механічної системи (стенда) для отримання даних для побудови механічної характеристики асинхронних двигунів.

ГММ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ				
Эк. Лист	№ докум.	Підп.	Дата	
Розроб.2	Левченко Р.І.	<i>Левченко</i>	09.08.24	
Перев.	Орхесерниця	<i>Орхесерниця</i>	23.08	
Керівник.	Крот О.Ю.	<i>Крот</i>	23.08	
Н. контр.	ВАСИЛЬВЬ О.С.	<i>ВАСИЛЬВЬ</i>	23.08	
Затв.	ОРИСЬКО О.В.	<i>ОРИСЬКО</i>	23.08	
Вступ				
Літ.	Лист	Листів		
Н	1	2		
Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІТР, 2024 р				

Предмет та об'єкт дослідження – стенд для механічного навантаження асинхронного двигуна та процес зняття експериментальної залежності між крутним моментом двигуна та його частотою обертання. У можливості застосування подібного стенда у будь-якій майстерні, у малій вартості цього обладнання полягає **практична значимість**. **Методи досліджень** – експериментальні з самостійною розробкою тензовиміральної системи та системи вимірювання частоти обертання з тахогенератором. Автори за темою даної роботи мають публікацію [2]. На даний момент впровадження результатів реалізовано в навчальному процесі як елемент курсу лекцій з навчальної дисципліни «Експериментальні методи досліджень в інженерній механіці» [9].

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

№ докум.№	Підп.Підп.	Дата	Лист/
№ докум.№	Підп.Підп.	Дата	4

1. Технологічні і конструктивні особливості асинхронних двигунів у трифазному і однофазному режимах

У сучасній промисловості електродвигуни займають особливе місце серед приводів технологічного обладнання. Серед них до 70-80% це електродвигуни асинхронні. Застосовуються як двигуни обертового руху, так і лінійні асинхронні двигуни, що забезпечують перетворення електричної енергії у поступальний рух.

Асинхронні двигуни мають ряд переваг у порівнянні з іншими. Вони є найбільш простими конструктивно, найбільш дешевими у виготовленні, є найбільш надійними серед всіх електродвигунів, найбільш дешевими в експлуатації, не мають ковзних зношуваних елементів у вигляді щіткових елементів і струмознімальних колекторів. Ці двигуни мають невисокі експлуатаційні витрати і можуть вмикатися в електричну мережу без додаткових зовнішніх пристроїв (якщо немає необхідності в регулюванні частоти).

У асинхронних двигунів є і певні недоліки, зокрема: відносно невеликий пусковий струм (хоча величина у два номінальних моменти зазвичай є цілком достатньою), відносно великий пусковий струм (може у шестеро перевищувати номінальний струм), неможливість регулювання частоти обертання (без додаткових пристроїв), обмеження частоти обертання, що впливає з конструкції двигуна (так, для частоти живлячого струму 50Гц максимальна частота обертання не може перевищувати 3000 об/хв), велика залежність (квадратична залежність) крутного моменту від величини електричної напруги (при зміні напруги вдвічі крутний момент змінюється в чотири рази), відносно низький коефіцієнт потужності (в номінальному режимі досягає лише 0,87, а в недовантаженому режимі може бути значно меншим) – це вимагає підбирати двигун під конкретне обладнання за потужністю.

					ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Технологія виробництва		
Разроб.	Левченко Р.І.		<i>[Signature]</i>	09.07.24			
Перев.	<i>Орещенко</i>		<i>[Signature]</i>	23.08			
Керівн.	Крот О.Ю.		<i>[Signature]</i>	23.08			
Н. контр.	Васильєва О.С.		<i>[Signature]</i>	28.08			
Затв.	Орещенко О.В.		<i>[Signature]</i>	23.08	Літ.	Лист	Листів
					Н	5	18
					Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІТР, 2024 р. 5		

В залежності від фазності живлячого струму асинхронні двигуни бувають трифазні і однофазні. Трифазні двигуни широко розповсюджені у виробництві та у багатьох інших галузях економіки. Однофазні знайшли застосування у багатьох побутових машинах – насосах, пральних машинах, кухонному обладнанні, електричному ручному інструменті та ін.

Принцип роботи асинхронного двигуна був закладений в дослідях Фарадея і французького дослідника академіка Араго, який в 1824 році запропонував і створив «прилад» (рис. 1.1), який містив магніт 1 і мідний диск 2. При обертанні магніту 1 мідний диск 2 починав також обертатися навколо своєї осі. Сам Араго сприймав цей ефект як «загадкове» явище, оскільки мідний диск (очевидно) не мав магнітних властивостей. Він назвав це явище «магнетизмом обертання».

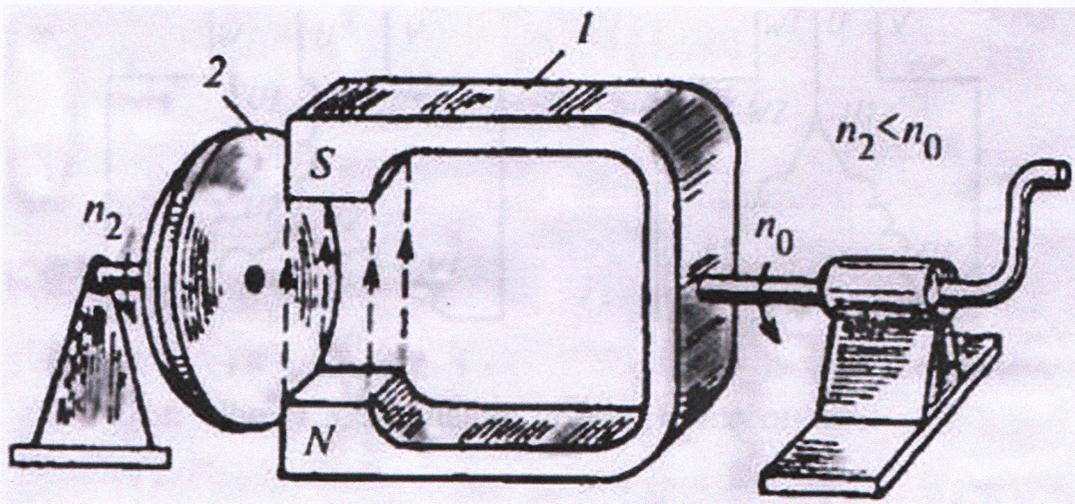


Рис. 1.1. «Прилад» академіка Араго

Фарадей, спираючись на відкрите ним явище електромагнітної індукції, пояснив це явище і указав на можливе практичне застосування досліду Араго.

Основні елементи асинхронного двигуна – ротор і статор. Статор містить корпус та електромагнітне ядро. Ядро має магнітопровід (рис. 1.2), складений із пластин магнітом'якої сталі та фазові обмотки. В магнітопровід укладаються і закріплюються в ньому обмотки статора. Обмотки складаються з фазових

котушок, які зсунуті на $(2/3)\pi$ одна відносно одної. З'єднуються між собою вони зіркою або трикутником (рис. 1.3).



Рис. 1.2. Магнітопровід

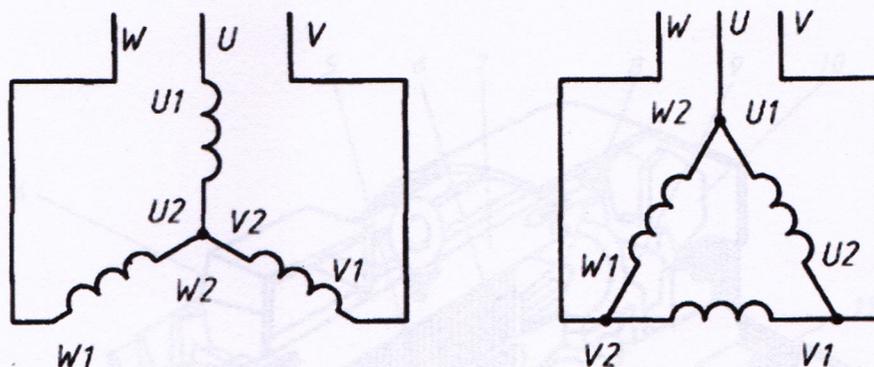


Рис. 1.3. З'єднання зіркою і трикутником

Ротор також може містити магнітопровід і обмотки. В залежності від того, підводиться живлення до ротора чи ні, обмотки бувають фазні чи короткозамкнені. Найбільш розповсюдженими і дешевими є двигуни з короткозамкненими обмотками (жаргонно такі двигуни називають двигунами з короткозамкненим ротором). Варіанти короткозамкненого ротора – на рис. 1.3. Короткозамкнений ротор може мати осердя, а може бути виконаний у вигляді так званого «білячого колеса» – клітки з мідних або алюмінієвих стержнів, які вставляються в пази замикаючих (торцевих) кілець (рис. 1.4). На торцевих

кільцях можуть встановлюватися лопаті вентилятора, які забезпечують охолодження двигуна в процесі його роботи.

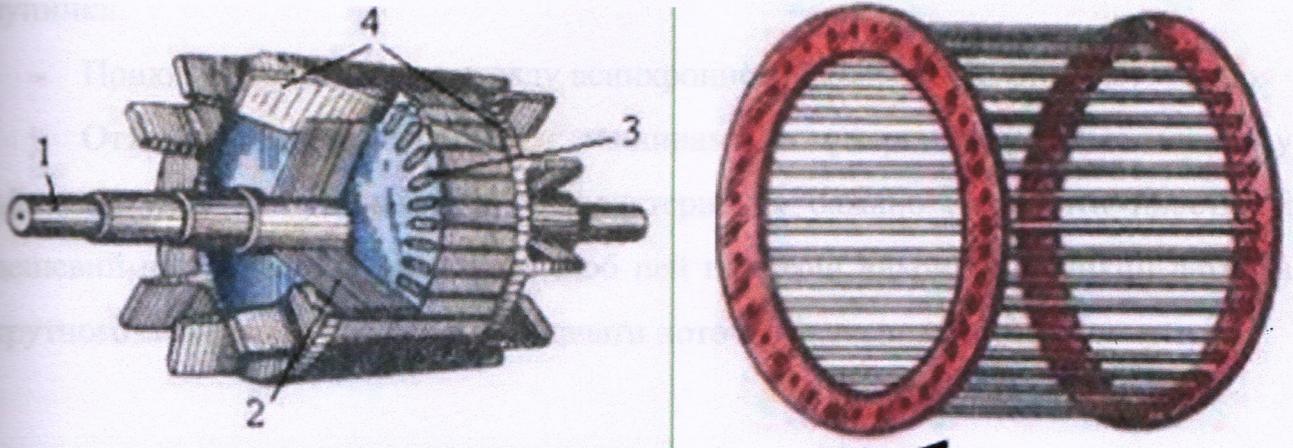


Рис. 1.4. Варіанти конструкції ротора: з осердям; у вигляді «білячого колеса»

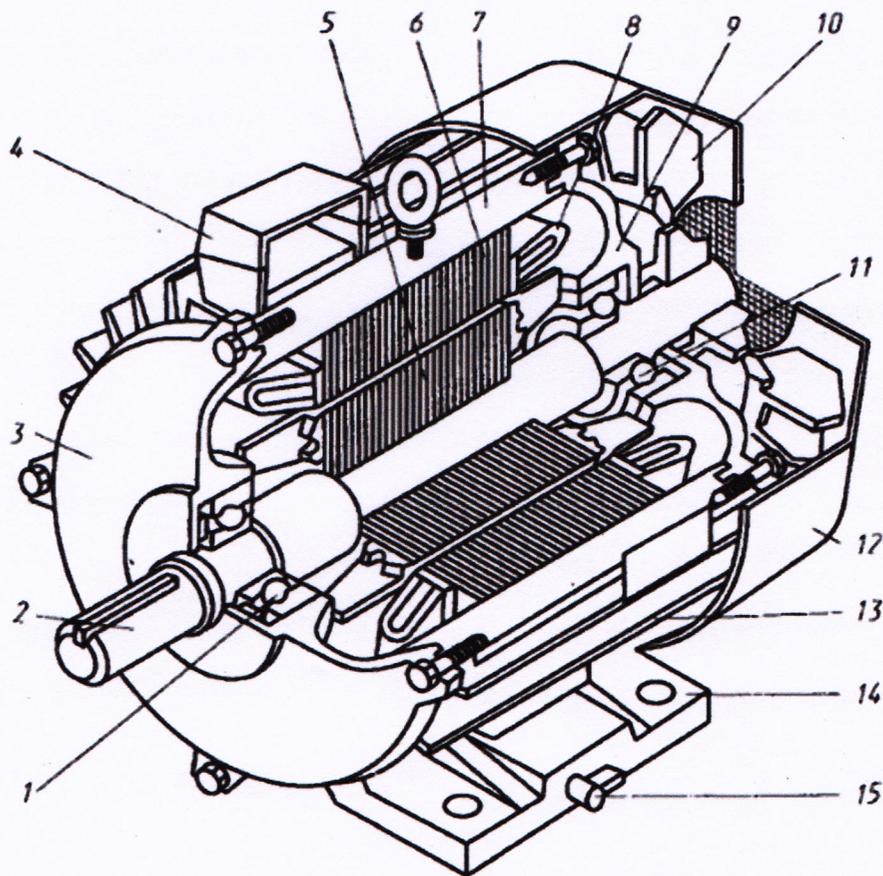


Рис. 1.5. Асинхронний двигун серії 4А

Кожний варіантів виконання ротора (рис. 1.3) має свої переваги і недоліки. Наприклад, ротор «біляче колесо» має дуже маленький момент інерції, що важливо для малої тривалості часу розгону (виходу на номінальний режим) та зупинки.

Приклад зовнішнього вигляду асинхронного двигуна – на рис. 1.5.

Отже, асинхронні двигуни є машинами популярними у технологічному обладнанні, а для визначення їх характеристик бажано розробити простий і дешевий пристрій. Бажано також, щоб цей пристрій виконував функції датчика крутного моменту, дозволяв би визначати поточне значення крутного моменту.

зв'язності частоти) ця залежність в формою кривої є досить складною. Ця залежність називається механічною характеристикою двигуна або його моментно-частотною характеристикою. Мати графічний опис цієї залежності дуже важливо для правильного вибору двигуна, вибору його режимів роботи, підбору механізму, тощо. Для двигунів, що серійно випускаються, механічну характеристику можна отримати з технічної документації на заводі-виробнику. Якщо ж у двигуні було внесено конструктивні зміни (переміщення обмоток, проточування ротора, тощо), або двигун є настільки старим, що не збереглася технічна документація, або двигун не вдається ідентифікувати, то ви немає необхідності експериментальної побудови механічної характеристики. Звичайно для цього застосовують так званий індуктажувальний спелд (індуктажувальну машину), що містить у собі двигун постійного струму з'єднаний з досліджуваним асинхронним двигуном через муфту чи трансмісію з валом муфтаж (рис. 2.1). Система жила і виглядає просто, але вимагає застосування перетворювача постійного струму і електричного двигуна постійного струму, які є досить коштуваними.

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

					ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ	Лист
№	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		9

2. Огляд існуючого обладнання і постановка задачі дослідженні

2.1. Формулювання проблеми

Асинхронні двигуни, що є найбільш популярними на будь-якій технологічній лінії, мають певну залежність між частотою обертання і фактичним крутним моментом на валу двигуна. Чим більше крутний момент, тим менша частота обертання. У певному невеликому інтервалі ця залежність є майже лінійною. Але на всьому інтервалі частот обертання двигуна (від 0 до синхронної частоти) ця залежність за формою кривої є досить складною. Цю залежність називають механічною характеристикою двигуна або його моментно-частотною характеристикою. Мати графічний опис цієї залежності дуже важливо для правильного вибору двигуна, вибору його режимів роботи, підбору маховика, тощо. Для двигунів, що серійно випускаються, механічну характеристику можна отримати з технічної документації на заводі-виробнику. Якщо ж у двигун було внесено конструктивні зміни (перемотка обмоток, проточування ротора, тощо), або двигун є настільки старим, що не збереглася технічна документація, або двигун не вдається ідентифікувати, то ви никає необхідність експериментальної побудови механічної характеристики. Звичайно для цього застосовують так званий навантажувальний стенд (навантажувальну машину), що містить у собі двигун постійного струму з'єднаний з досліджуванним асинхронним двигуном через муфту чи трансмісійний вал з двома муфтами (рис. 2.1). Система хоча і виглядає простою, але вимагає застосування перетворювача постійного струму і електричного двигуна постійного струму, які є досить коштовними.

				ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ			
Эк.	Лист	№ докум.	Дата	Технологія виробництва	Літ.	Лист	Листів
Розроб.	Левченко Р.І.	<i>[підпис]</i>	09.07.20			5	16
Перев.	Орисяченко	<i>[підпис]</i>	23.08				
Керівн.	Крот О.Ю.	<i>[підпис]</i>	23.08				
н. контр.	Васильєв О.С.	<i>[підпис]</i>	28.08				
Затв.	Орисяченко	<i>[підпис]</i>	18.08				
					Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІТР, 2024 р		

передача сигналу. Оскільки вал обертається, треба організувати передачу сигналу або через провід, що буде намотуватись на вал, або через ковзний контакт (рис. 2.4) [4], або за допомогою радіосигналу.

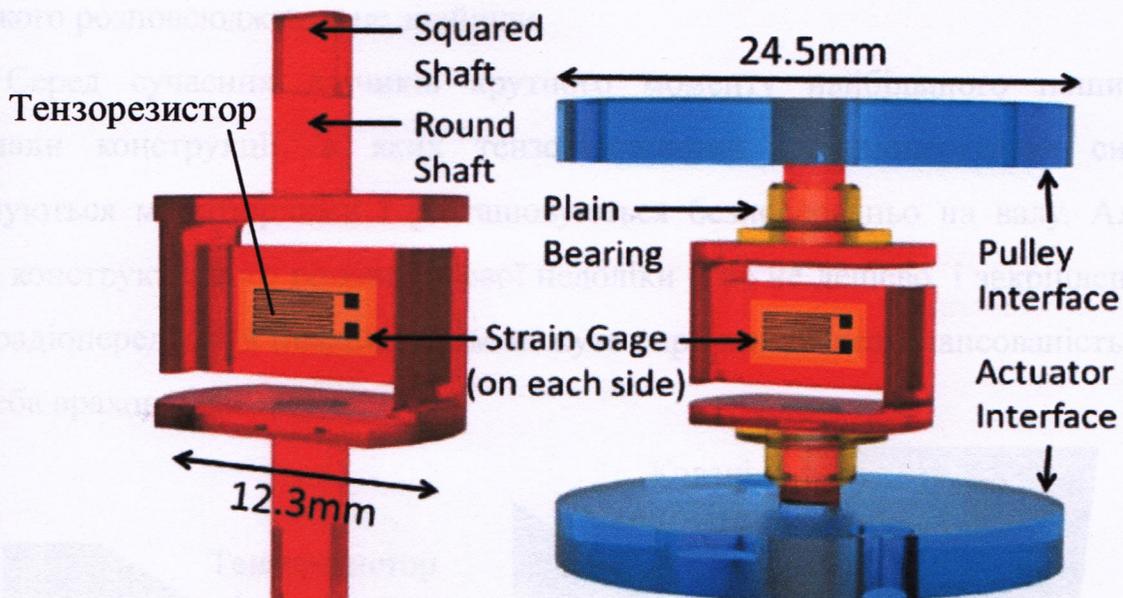


Рис. 2.2. Датчик моменту з плоскою поверхнею для тензорезисторів [3]

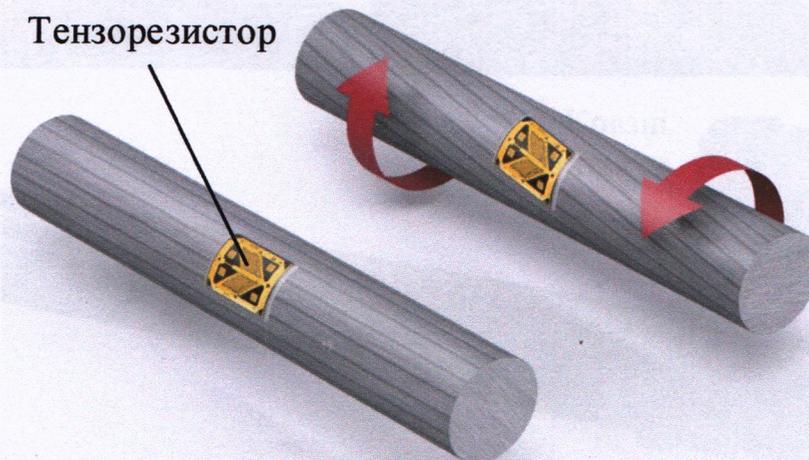


Рис. 2.3. Датчик крутного моменту з тензорезистором, наклеєним на поверхню вала [4]

Намотування кабелю в більшості випадків неможна реалізувати. Ковзні контакти, схематично зображені на рис. 2.4, при зовнішній простоті реалізації, мають купу обмежень і недоліків. Нестабільність опору, що виникає у ковзних контактах, може бути дуже суттєвою. Опір внаслідок запилення контактної групи

може виявитись значно більшим, ніж величина зміни опору тензорезистора при його деформації. З метою стабілізації і зменшення опору контактних пар струмозійомники іноді виконували з застосуванням ртутної амальгами (чи ртуті). Зрозуміло, що конструктивно складні і небезпечні ртутні струмозійомники широкого розповсюдження не знайшли.

Серед сучасних датчиків крутного моменту найбільшого поширення отримали конструкції, в яких тензопідсилювач і радіопередавач сигналу виконуються мініатюрними і розташовуються безпосередньо на валу. Але і в цього конструктивного рішення є свої недоліки – це не дешево, і закріплений на валу радіопередавач з підсилювачем можуть спричинити незбалансованість валу; це треба враховувати.

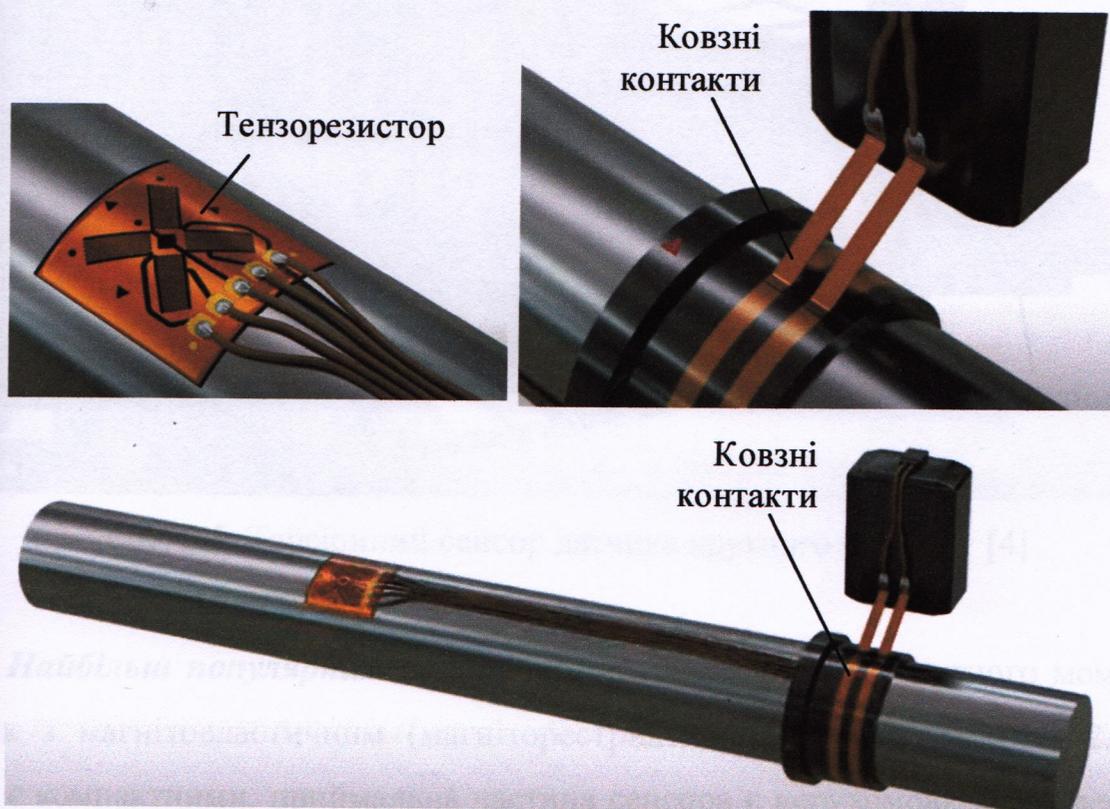


Рис. 2.4. Датчик крутного моменту з тензорезистором, наклеєним на поверхню вала і ковзними контактами [4]

Ще одним відомим сенсором датчика крутного моменту є торсіонний (рис. 2.5) [4]. Конструктивно він складається з двох дисків, у кожному з яких виконано прорізи (вікна). Диски є співвісними, з'єднані між собою торс іоном, і кожний з

Лист	№ докум.	Підп.	Дата	

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

Лист

13

них з'єднаний зі своїм напіввалом – приводним і веденим. У фіксованому місці в зоні вікон напроти один одного встановлені джерело світла та фотодіод таким чином, що пара «вікно на приводному диску – вікно на веденому диску» опиняються між джерелом світла та фотодіодом. Інформація з фотодіода передається на контролер (чи комп'ютер), який аналізує послідовності «світлих» і «темних» проміжків. Взаємне положення вікон дещо змінюється внаслідок скручування торсіона, що фіксується контролером (чи комп'ютером).

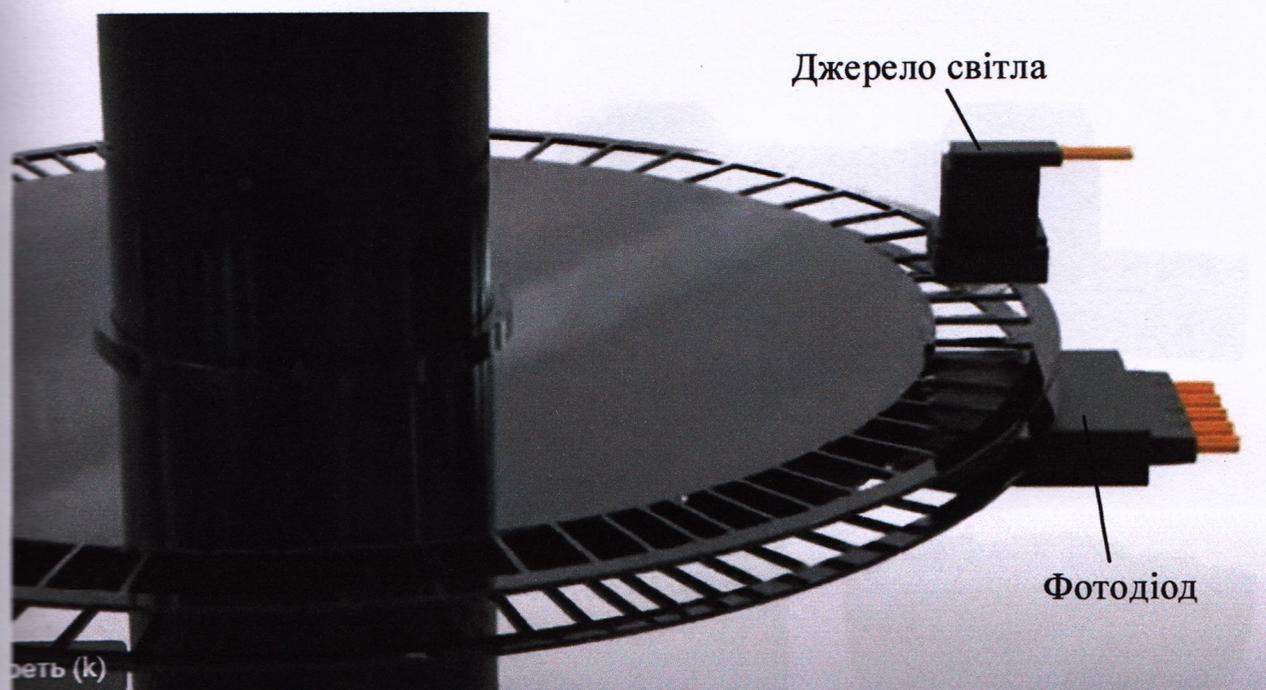


Рис. 2.5. Торсіонний сенсор датчика крутного моменту [4]

Найбільш популярним на теперішній час датчиком крутного моменту є датчик з магнітоеластичним (магніторестриктивним) сенсором (рис. 2.6) [4]. Вони є компактними, приймальна частина сенсора є нерухомою, що полегшує її сполучення з контролером. Слід зазначити, що ціна промислових зразків таких датчиків є досить великою.

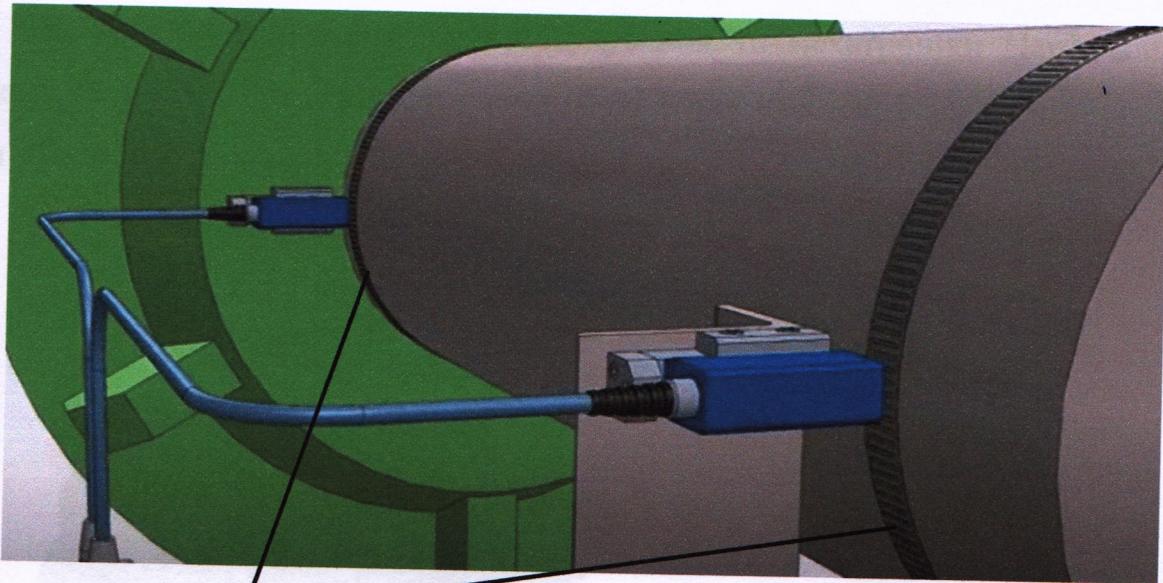
Ще одна система вимірювання крутного моменту та потужності від Horvath Research [5] за принципом схожа на датчик з торсіонним датчиком. Тут на кінцях валу розташовані зубчасті кільця (гребінки) – їх конструктивне виконання схоже на зубчасті кільця системи АБС автомобіля. До кожного з них притискається (з

зазором) індуктивні датчики. Сигнали з цих двох датчиків надходять до контролера (комп'ютера), де аналізується їх синхронність, на основі чого автоматично розраховується крутний момент.

Серед перспективних і дуже компактних, на наш погляд, можна виділити безконтактний датчик крутного моменту від лідера з виробництва підшипників NSK. Сенсор для визначення моменту використовує магнітні поля, вимірюючи везначне скручування приводного валу [6].



Рис. 2.6. Магнітоеластичний (магніторестриктивний) сенсор [4]



Зубчасті кільця (гребінка)

Рис. 2.7. Система вимірювання крутного моменту та потужності від Horvath Research [5]

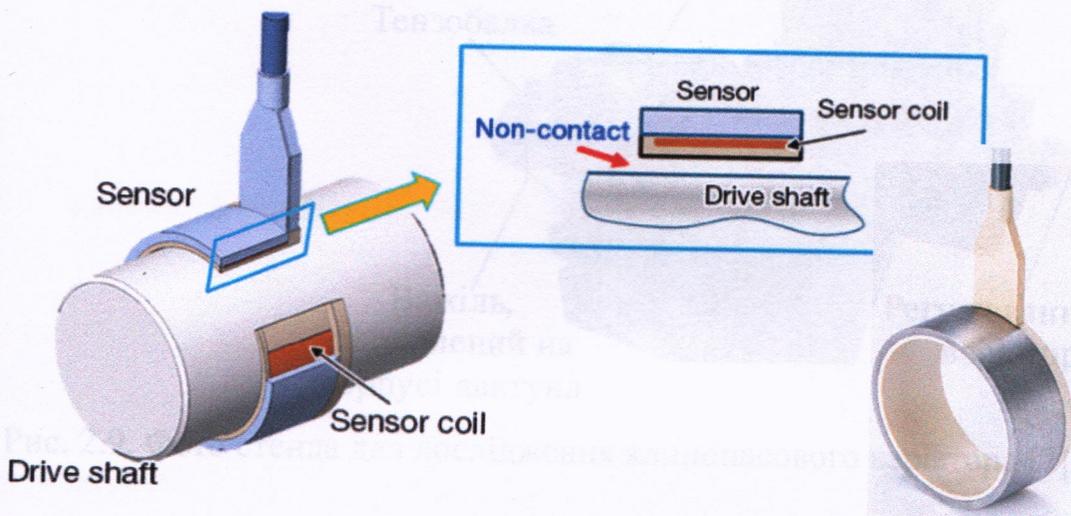


Рис. 2.8. Безконтактний датчик крутного моменту від NSK (для визначення моменту використовує магнітні поля, вимірюючи незначне скручування приводного валу) [6]

Найбільш простою, дешевою і надійною у виконанні була б вимірювальна система, в якій корпус двигуна не закріплюється жорстко на рамі, а може вільно обертатися навколо валу. Фіксувати ж його від обертання повинен тензодатчик у вигляді пружної пластини з наклеєними на ній лінійними тензорезисторами. При збільшенні крутного моменту на валу двигуна тензобалка згинається більше.

					ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ	Лист
№	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		16

На кафедрі галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» є установка для дослідження клинопасового варіатора (рис. 2.9 та рис. 2.10).



Рис. 2.9. Фото стенда для дослідження клинопасового варіатора [7]

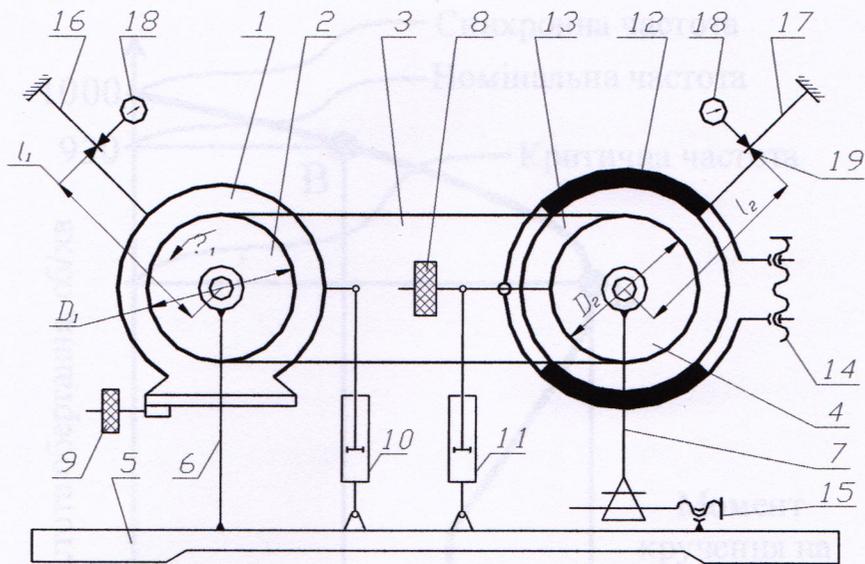


Рис. 2.10. Схема стенда для випробування клинопасового варіатора [1]:

1 – корпус двигуна; 2 – шків приводний; 3 – клинопасова передача; 4 – шків; 5 – рама; 6 – підшипникові опори ведучого вала; 7 – рухомий кронштейн; 8, 9 – тягарці; 10, 11 – гідравлічні амортизатори спрощеної конструкції; 12 – гальмівні колодки; 13 – барабан; 14 – гвинт ручної затяжки гальм; 15 – натяг клинопасової передачі; 16, 17 – тензобалки; 18 – годинникові індикатори; 19 – призма

Тут асинхронний двигун АОЛ2-22-6 з короткозамкненим ротором має двобічний вихідний вал. Двигун, таким чином, встановлений лише на підшипникових опорах вихідних валів двигуна. Потужність двигуна 1,1кВт, частота обертання 930об/хв. Крутний момент визначається таким чином [7]:

$$M_{ном} = \frac{N, Вт}{\omega, рад/с} = \frac{1100}{930 \cdot \frac{\pi}{30}} \approx 11,3 Н \cdot м.$$

Якщо нам відомий типорозмір двигуна, то з технічної документації легко знайти відношення моментів (максимального, мінімального, пускового) до номінального моменту двигуна. Знаючи значення цих моментів, можна побудувати моментно-частотну характеристику цього двигуна (рис. 2.11).

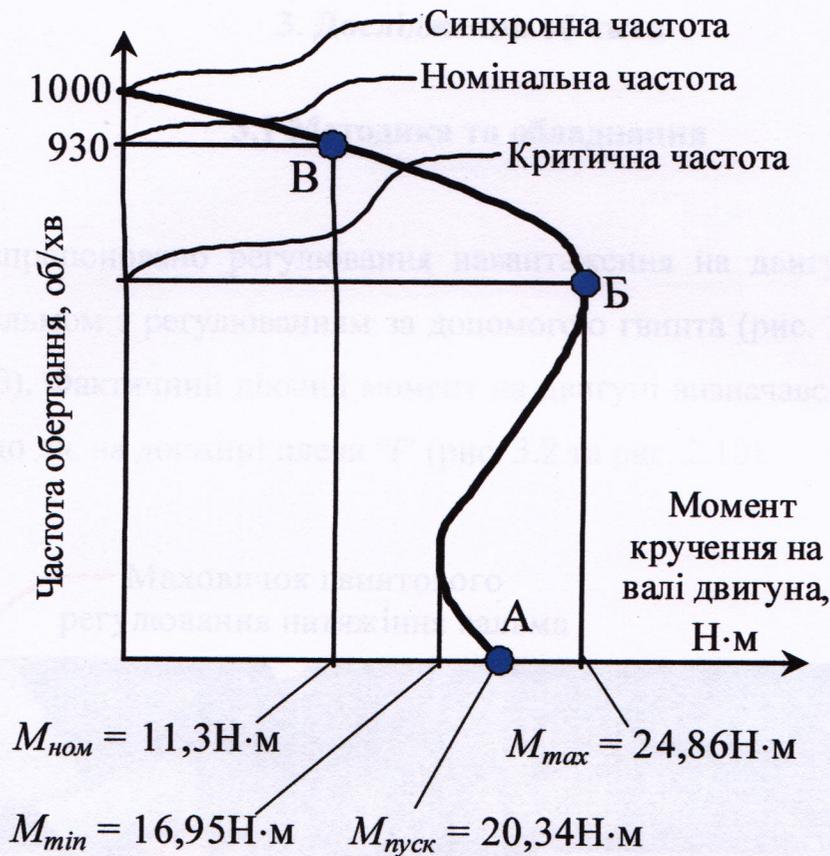


Рис. 2.11 – Моментно-частотна характеристика двигуна АОЛ2-22-6, побудована за технічними характеристиками двигуна

Мета дослідження:

Якщо ж нам не відомий типорозмір двигуна, то побудувати найбільш важливу для конструктора та експлуатаційника обладнання частину цієї кривої (механічної характеристики двигуна) можна на основі експериментальних даних. Для цього бажано розробити просту механічну систему визначення залежності частоти обертання двигуна від діючого крутного моменту.

Задачі досліджень:

Розробити (відновити на базі сучасних апаратних елементів і виготовленого власноруч програмного забезпечення) систему визначення поточного крутного моменту двигуна. Розробити систему визначення та запису частоти обертання з застосуванням тахогенератором постійного струму.

3. Дослідження об'єкта

3.1 Методика та обладнання

Нами запропоновано регулювання навантаження на двигун здійснювати колодковим гальмом з регулюванням за допомогою гвинта (рис. 3.1) (та позиція 14 на рис. 2.10). Фактичний діючий момент на двигуні визначався за величиною зусилля "F", що діє на довжині плеча "r" (рис. 3.2 та рис. 2.10).

Маховичок гвинтового регулювання натяжіння гальма

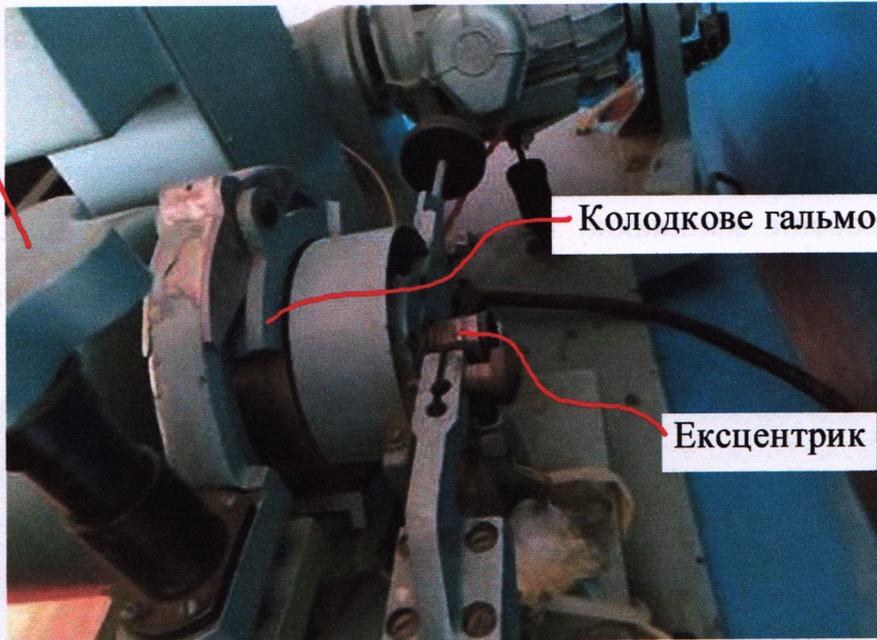


Рис. 3.1. Гальмо з різьбовим регулюванням натягу

Використано одноканальний виготовлений власноруч тензопідсилювач на інтегральній мікросхемі (поз. 1 на рис. 3.4), аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) на базі мікросхеми TLC 549 IP (8-розрядної) (поз. 2 на рис. 3.4) та ЕОМ з СОМ-портом (поз. 1 на рис. 3.4). АЦП у даній комплектації виконує 1050 замірів за секунду; цього цілком достатньо для поставленої задачі.

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

№	Лист	№ докум.	Дата				
Розроб.		Левченко Р.І.	09.08.24	Дослідження об'єкта	Лім.	Лист	Листів
Перев.		Орисяченко	23.08			1	12
Керівн.		Крот О.Ю.	23.08		Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІТР, 2024 р		
Висл. на комп.		Васильєв О.С.	23.08		20		
Зам.		Орисяченко О.В.	23.08				

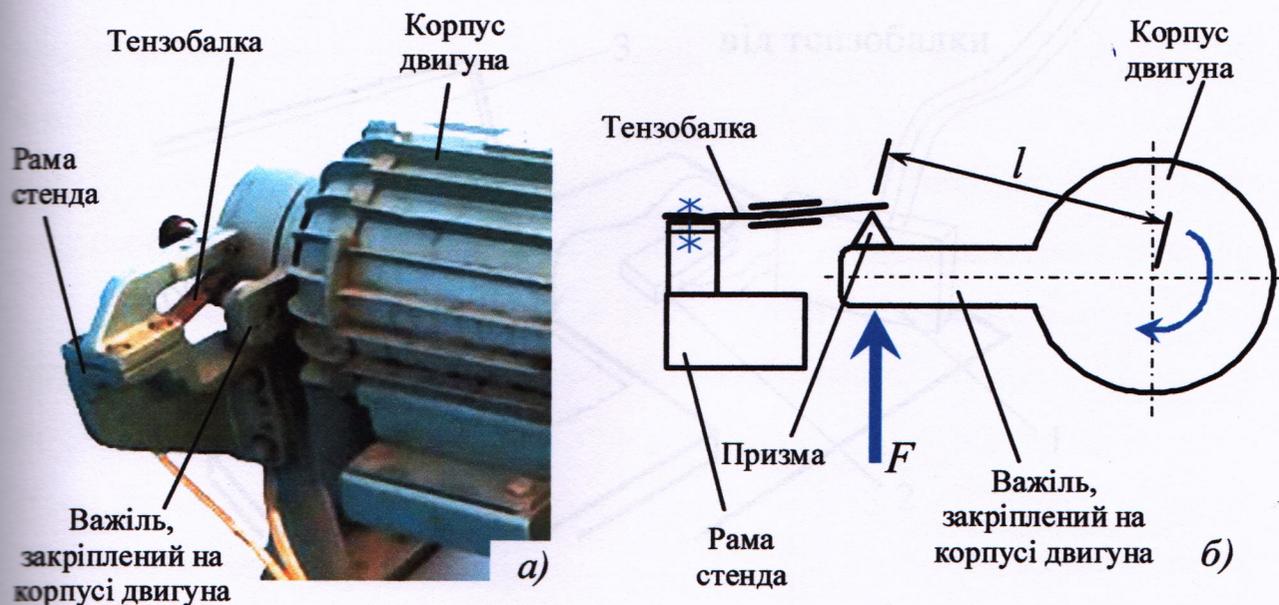


Рис. 3.2. Пристрій для визначення фактичного поточного крутного моменту на валу двигуна: *а* – фото; *б* – схема

Оригінальні тензобалки (рис. 3.2, 3.3,*а*) виявилися зіпсованими (сталь виявилася не пружною, зігнулися, а клей тензорезисторів пересох).

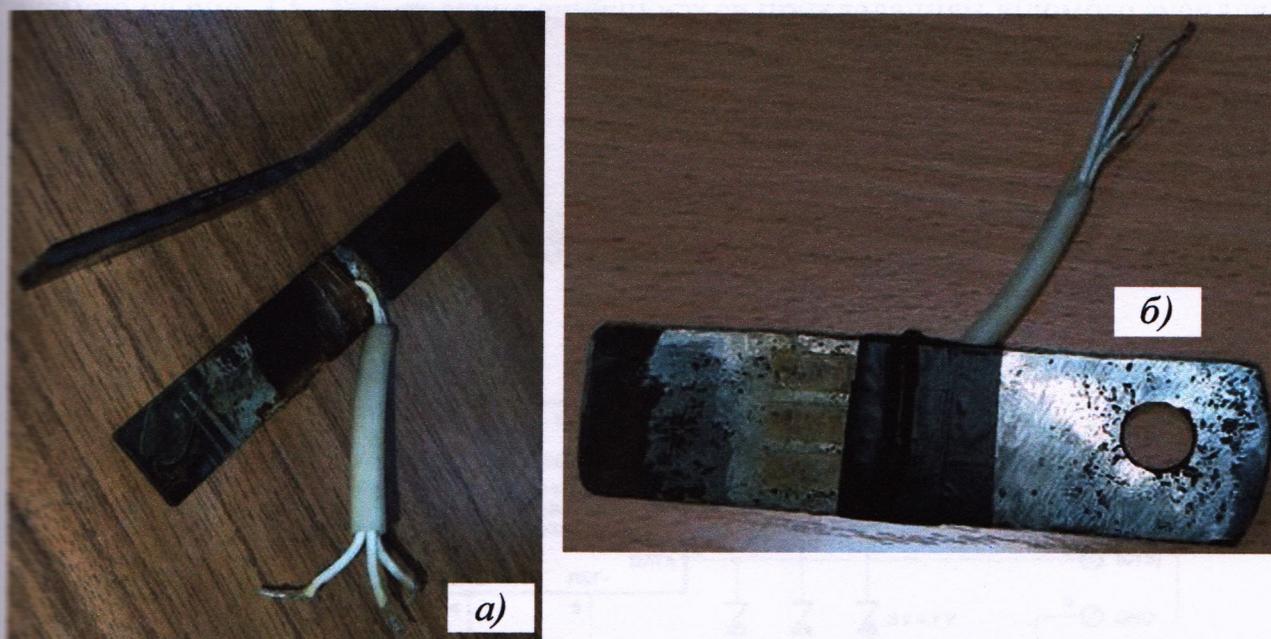


Рис. 3.3. Фото тензобалок: *а* – старої; *б* – нової

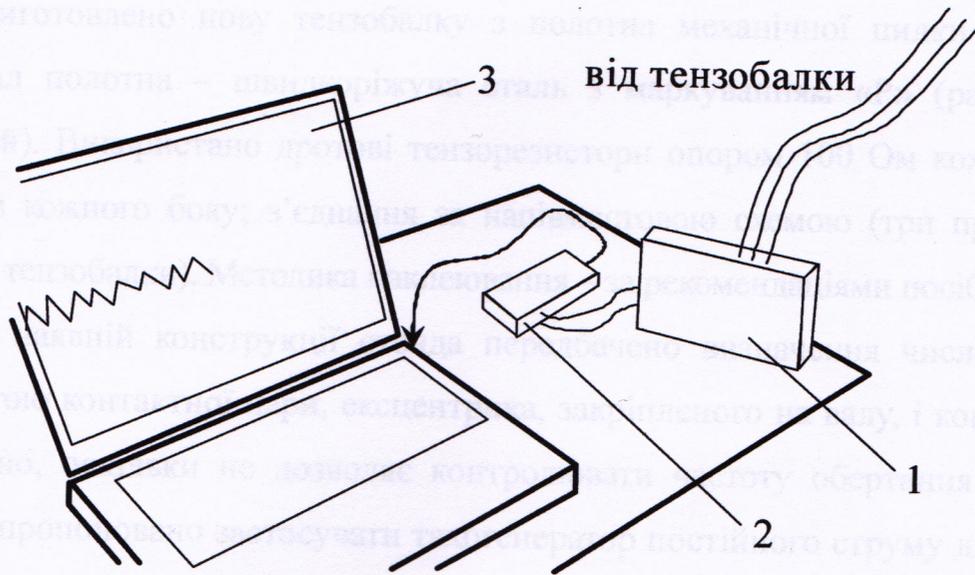


Рис. 3.4. Система запису тензосигналу на ЕОМ

Програмне забезпечення написано авторами посібника [8]. Зв'язок з ЕОМ через СОМ-порт позбавляє нас необхідності писати програму-драйвер для пристрою, і, імовірно, суттєво підвищує потенціальну швидкість передачі даних.

АЦП виготовлено за рекомендаціями посібника [8] за принциповою схемою на рис. 3.5. Тарирування здійснюється прикладанням відомого зусилля.

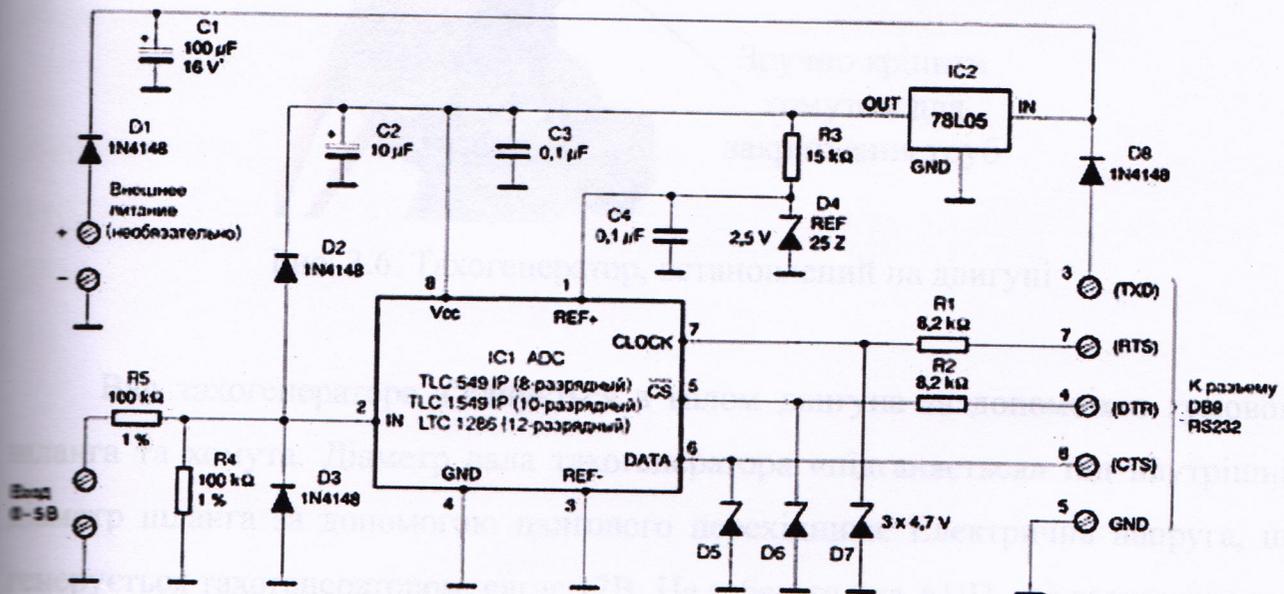


Рис. 3.5. Принципова схема АЦП на TLC 549 IP [8]

Виготовлено нову тензобалку з полотна механічної пилки (рис. 3.3,б). Матеріал полотна – швидкоріжуча сталь з маркуванням «Р» (rapid; Rapid - швидкий). Використано дровові тензорезистори опором 100 Ом кожний, по три штуки з кожного боку; з'єднання за напівмостовою схемою (три провідники на виході з тензобалки). Методика наклеювання – за рекомендаціями посібника [8].

У наявній конструкції стенда передбачено визначення числа обертів за допомогою контактної пари, ексцентрика, закріпленого на валу, і контролера. Це не зручно, оскільки не дозволяє контролювати частоту обертання в динаміці. Нами запропоновано застосувати тахогенератор постійного струму для контролю частоти обертання [2] (рис. 3.6).

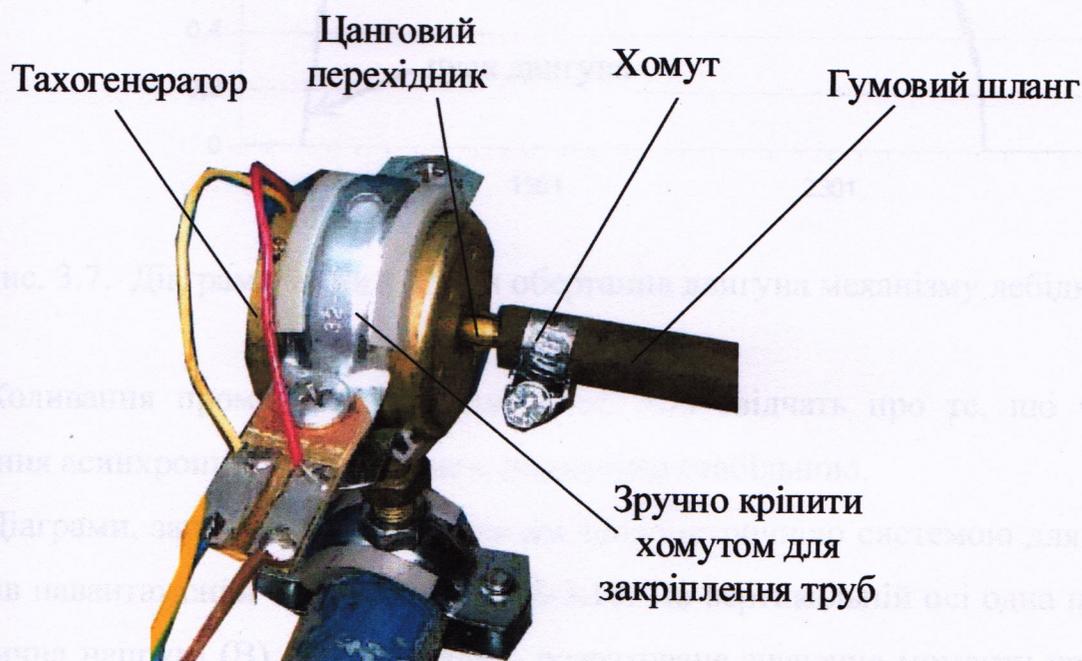


Рис. 3.6. Тахогенератор, встановлений на двигуні

Вал тахогенератора з'єднується з валом двигуна за допомогою гумового шланга та хомута. Діаметр вала тахогенератора «підганяється» під внутрішній діаметр шланга за допомогою цангового перехідника. Електрична напруга, що генерується тахогенератором, сягає 12В. Це забагато для АЦП, що застосовується (рис. 3.5). Для корегування (зниження) електричної напруги застосовано потенціометр налаштований таким чином, щоб електрична напруга у колі «тахогенератор-АЦП» у режимі підймання не перевищувала 2,5 В.

№	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

Лист

23

3.2 Результати досліджень

Приклад записної тахогенератором (рис. 3.6) діаграми напруги (як функції частоти обертання) – на рис. 3.7. Швидкість вала прямо пропорційна значенню записаної електричної напруги.

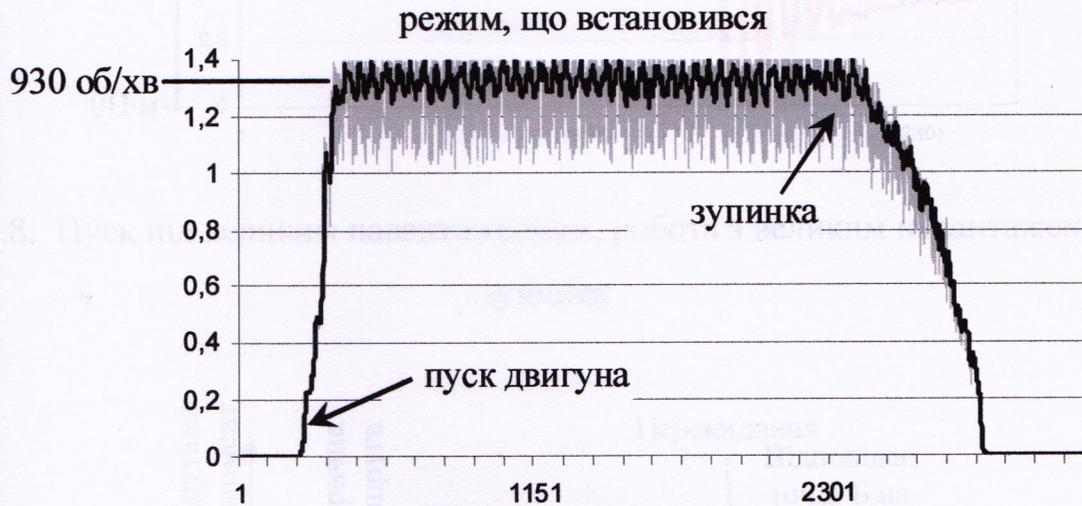


Рис. 3.7. Діаграма зміни частоти обертання двигуна механізму лебідки

Коливання променя на діаграмі (рис. 3.7) свідчать про те, що частота обертання асинхронного двигуна не є абсолютно стабільною.

Діаграми, записані з використанням тензOMETричною системою для різних режимів навантаження – на рисунках 3.8-3.10. По вертикальній осі одна шкала – електрична напруга (В), друга шкала – розраховане значення моменту кручення (Н·м).



Рис. 3.10. Робота під навантаженням близько номінального при частоті близько 930 об/хв

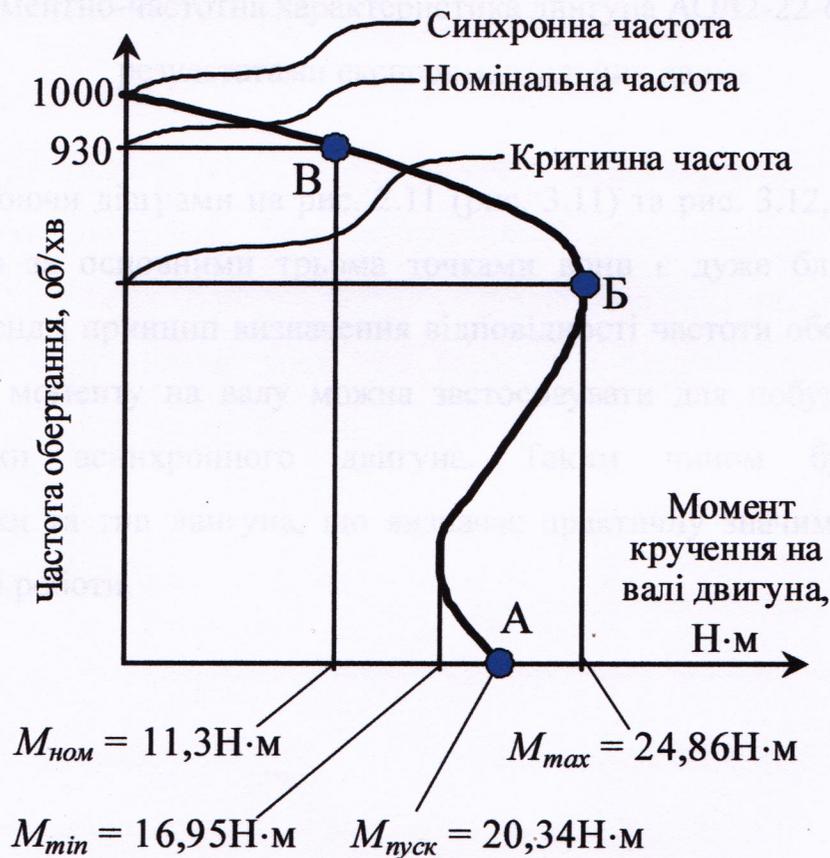


Рис. 3.11. Моментно-частотна характеристика двигуна АОЛ2-22-6, побудована за технічними характеристиками двигуна (дубль рисунка 2.11)

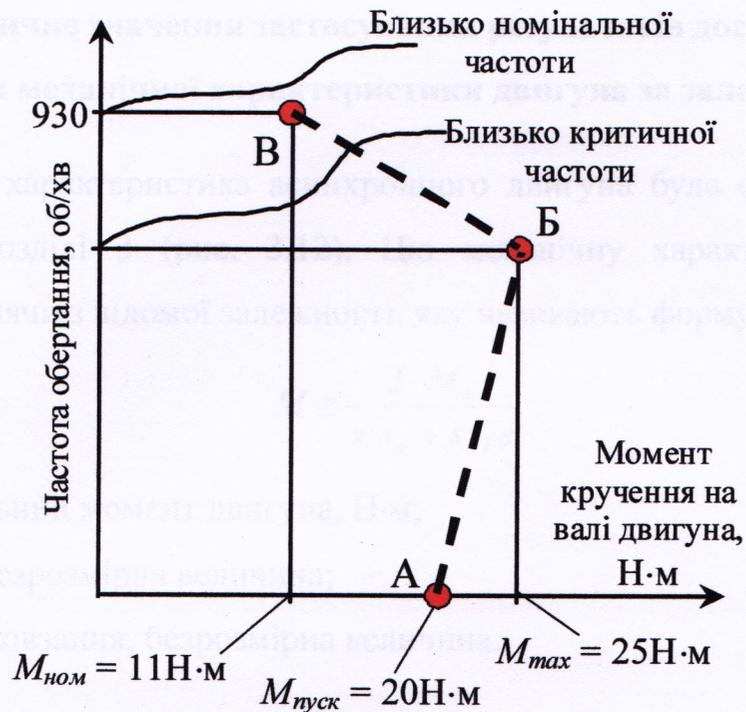


Рис. 3.12. Моментно-частотна характеристика двигуна АОЛ2-22-6, побудована за результатами експериментальних даних

Порівнюючи діаграми на рис. 2.11 (рис. 3.11) та рис. 3.12, можна зробити висновок, що за основними трьома точками вони є дуже близькими. Отже, створений стенд і принцип визначення відповідності частоти обертання двигуна від крутного моменту на валу можна застосовувати для побудови механічної характеристики асинхронного двигуна. Таким чином було визначено характеристики та тип двигуна, що визначає практичну значимість проведеної дослідницької роботи.

№	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

4. Практичне значення застосування результатів дослідження

4.1. Складання механічної характеристики двигуна за залежністю Клосса

Механічна характеристика асинхронного двигуна була експериментально побудована у розділі 3 (рис. 3.12). Цю механічну характеристику можна побудувати виходячи з відомої залежності, яку називають формулою Клосса:

$$M \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s}$$

M_k – максимальний момент двигуна, Н·м;

S – ковзання, безрозмірна величина;

S_k – критичне ковзання, безрозмірна величина.

Критичне ковзання S_k може бути визначено так:

$$s_k = \pm s_n \cdot (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1})$$

Тут «+» – для випадку, коли режим двигуна;

s_n – номінальне ковзання. Якщо марка двигуна є відомою, то визначається з паспорта двигуна; якщо ж марка двигуна є невідомою (як у нашому прикладі), то критичне ковзання можна прийняти 0,05...0,07. Для старих (виготовлених більше, ніж 60 років тому) більше значення; для сучасних двигунів – менше значення.

$k_m = \frac{M_k}{M_n}$ – кратність максимального моменту.

$M_n = \frac{N_n}{\omega_n} = 9,55 \cdot \frac{N_n}{n_n}$ – номінальний момент, Н·м;

ω_n – номінальна кутова швидкість обертання двигуна, рад/с; $\omega_n = \frac{2\pi}{60} \cdot n_n$;

N_n – номінальна потужність, кВт; (для нашого прикладу 1,1кВт);

					ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.		Дата	Практичне значення застосування результатів дослідження	Літ.	Лист	Листів
Розроб.	Левченко Р.І.		<i>[підпис]</i>	23.08			1	26
Перев.	Орисяк О.С.		<i>[підпис]</i>	23.08		Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІТР, 2024 р. 28		
Керівн.	Крот О.Ю.		<i>[підпис]</i>	23.08				
Н. контр.	Васильов О.С.		<i>[підпис]</i>	23.08				
Замб.	Орисяк О.С.		<i>[підпис]</i>	23.08				

$n_n = n_1 \cdot (1 - s_n)$ – номінальна частота двигуна; (для нашого прикладу 1000об/хв);

n_1 – синхронна частота; (для нашого прикладу 1000об/хв).

Для нашого прикладу (якщо це двигун АОЛ2-22-6):

$$n_n = n_1 \cdot (1 - s_n) = 1000 \cdot (1 - 0,07) = 930 \text{ об/хв (це двигун старий, отже } s_n = 0,07).$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{60} \cdot 930 = 97,389 \text{ рад/с; } M_n = \frac{1100}{97,389} = 11,295 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$k_m = \frac{M_k}{M_n} = \frac{25}{11,295} = 2,213; \quad s_k = 0,07 \cdot (2,213 + \sqrt{2,213^2 - 1}) = 0,293; \quad s_k = 29,3\%$$

Розглядаємо різні значення ковзання в широкому діапазоні за залежністю

Клосса ($s = 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,9$), $M \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s}$.

$$M_{0,1} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,1/0,293 + 0,293/0,1} = 15,284 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,2} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,2/0,293 + 0,293/0,2} = 23,282 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,3} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,3/0,293 + 0,293/0,3} = 24,993 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,4} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,4/0,293 + 0,293/0,4} = 23,836 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,5} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,5/0,293 + 0,293/0,5} = 21,81 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,6} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,6/0,293 + 0,293/0,6} = 19,715 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,7} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,7/0,293 + 0,293/0,7} = 17,808 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,8} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,8/0,293 + 0,293/0,8} = 16,147 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,9} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{0,9/0,293 + 0,293/0,9} = 14,718 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{0,9} \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2 \cdot 25}{1/0,293 + 0,293/1} = 13,492 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Визначаємо для цих значень ковзання значення моменту. Розраховуємо частоту обертання за залежністю $n = n_1 \cdot (1 - s)$ та заносимо значення до таблиці 4.1. За таблицею будемо характеристику (рис. 4.1).

Таблиця 4.1. Залежність $M(s)$

s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$n_n = n_1 \cdot (1 - s_n)$	900	800	700	600	500	400	300	200	100	0
$M \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s}$	15,28	23,28	24,99	23,84	21,81	19,71	17,8	16,15	14,72	13,49

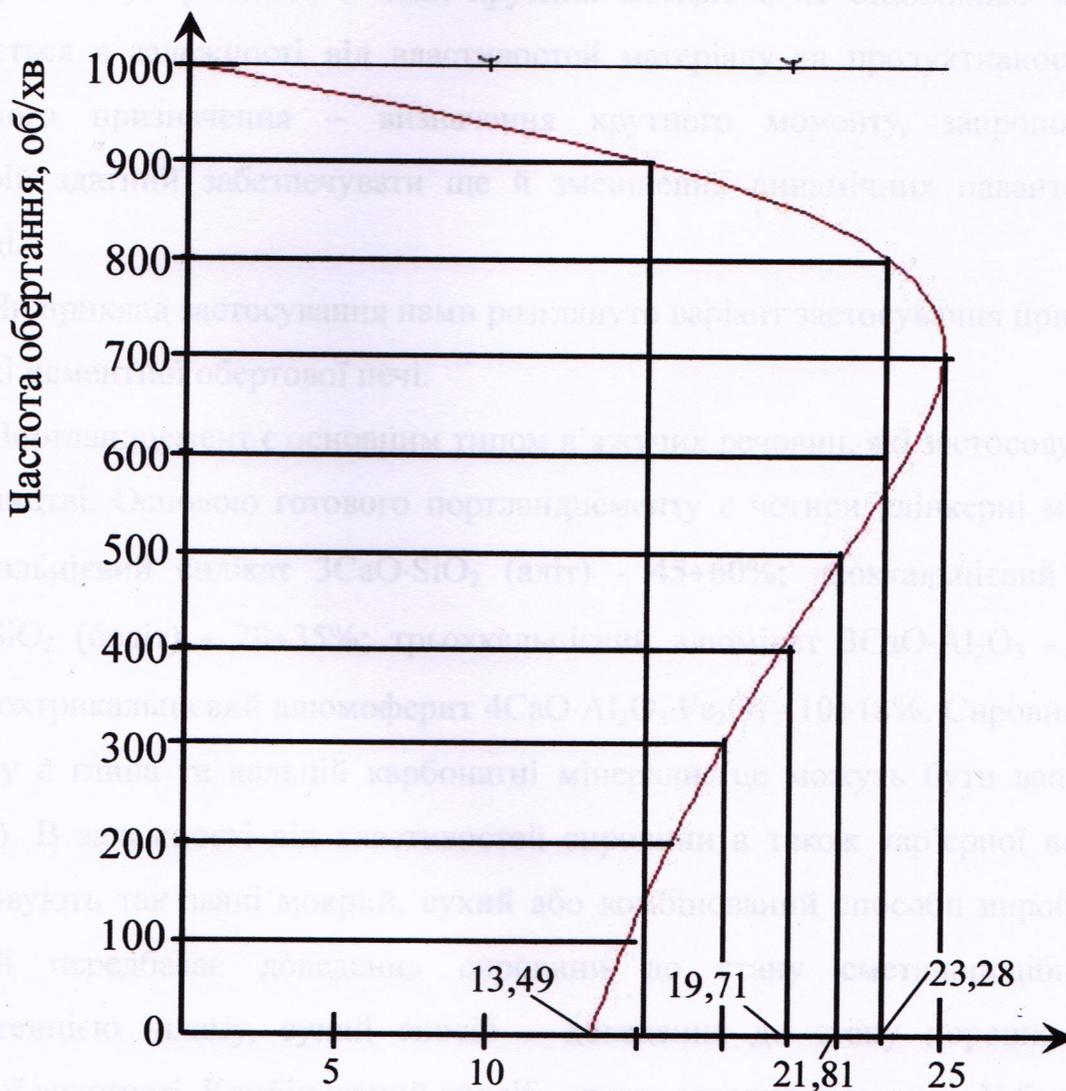


Рис. 4.1. Механічна (моментно-частотна) характеристика, побудована за формулою Клосса

Форма кривої (за основними точками) майже ідеально збігається з формою кривої, яка повністю визначена експериментально (рис. 3.12).

4.2. Варіант застосування результатів дослідження для технологічного обладнання

У магістерському дослідженні розглядається пристрій для визначення моменту кручення в механічних приводах. Цей пристрій фактично являє собою простий і надійний датчик крутного моменту. Пристрій може бути застосований майже у будь-якому технологічному обладнанні. Особливо актуально його застосування у приводах, в яких крутний момент є не стабільним за часом, змінюється в залежності від властивостей матеріалу та продуктивності. Крім основного призначення – визначення крутного моменту, запропонований пристрій здатний забезпечувати ще й зменшення динамічних навантажень у приводі.

Як приклад застосування нами розглянуто варіант застосування пристрою у приводі цементної обертової печі.

Портландцемент є основним типом в'язучих речовин, які застосовуються у виробництві. Основою готового портландцементу є чотири клінкерні мінерали: трьохкальцієвий силікат $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (аліт) - $45\div 60\%$; двохкальцієвий силікат $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (беліт) - $20\div 35\%$; трьохкальцієвий алюмінат $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ - $4\div 12\%$; чотирьохтрикальцієвий алюмоферит $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $10\div 18\%$. Сировиною для цементу є глина та кальцій карбонатні мінерали (це можуть бути вапняк або крейда). В залежності від властивостей сировини а також кар'єрної вологості застосовують так звані мокрий, сухий або комбінований способи виробництва. Мокрий передбачає доведення сировини до стану сметаноподібного за консистенцією шламу, сухий спосіб – доведення до стану порошку майже нульової вологості. Комбінований спосіб – дещо середнє між ними. У будь-якому способі виробництва підготована таким чином сировина направляється до печі, в якій відбувається випаровування води та нагрів до температури, при якій відбувається клінкероутворення. Це температура близько 1600°C .

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

Лист

31

№	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

Ці процеси повинні відбуватися у рухомому шарі речовини, що обумовлює застосування печі у вигляді довгого металевго барабану, який футерований зсередини вогнетривкими матеріалами та обертається з невеликою частотою (0,5-2 об/хв) за допомогою спеціального привода. На рис. 4.2 наведено фото макету Криворізького цементного заводу з цементною піччю з чотирма опорами.



Рис. 4.2. Фото макету Криворізького цементного заводу з цементною піччю з чотирма опорами

Корпус печі може мати довжину від 80 до 185 метрів і діаметр (внутрішній) 4-5 метрів (в залежності від способу виробництва – сухий чи мокрий, та від продуктивності).

Конструкція обертової цементної печі.

Типорозміри 4×150м; 4,5×170м; 5×185м ($\Pi = 1800$ т/добу чи 75т/год); 7×230м ($\Pi = 3000$ т/добу чи 125 т/год, встановлена в Балаклеї).

Розглянемо типову піч 5×185м. Корпус монтується на заводі з обичайок (кілець), кожна з яких має довжину 2м. Корпус має сім опор (рис. 4.3).

Бандаж 3 призначений для обпирання корпуса печі на опорні ролики 2. Корпус піддається більшим температурним напруженням, чим бандаж. Для

				ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ		Лист
№	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		
					32	

компенсації деформацій, що виникають при цьому, бандаж 2 установлюється на підбандажну обичайку 2 із зазором $\Delta=2\div 6\text{мм}$ (більші зазори - для гарячого кінця печі).

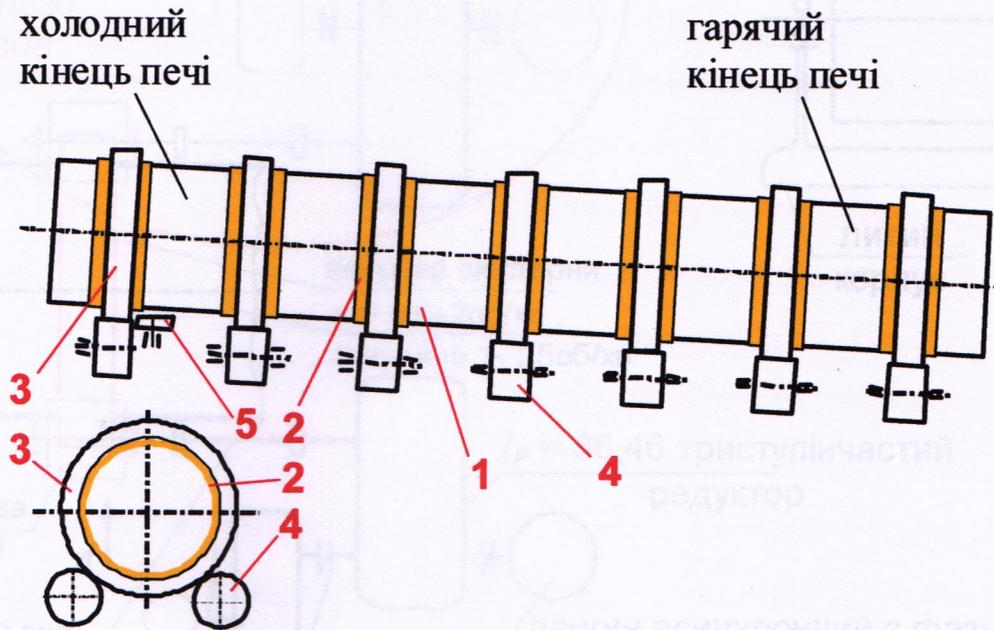


Рис. 4.3. Схема корпусу печі 5×185. 1 – міжпрольотна обичайка, 3 – бандаж, 2 – підбандажна обичайка, 4 – опорний ролик, 5 – упорний ролик

Привод печі

Показана схема привода **обертової** печі (вид зверху).

Венцева шестерня (рис. 4.4, 4.5), що охоплює корпус печі, приводиться до обертання підвенцевою шестернею, якій обертання надає двигун через циліндричний триступінчастий редуктор і проміжний вал. Це основний привод. Проміжний вал забезпечує можливість зсуву підвенцевої шестерні без зсуву привода (це необхідно, оскільки повинна відбуватися вивірка осі печі).

Двобічний привод (рис. 4.4) встановлюють на піч у випадку, **коли потрібна потужність більше, ніж 400кВт**. Наприклад, у печі 5×185м застосовується двобічний привод.

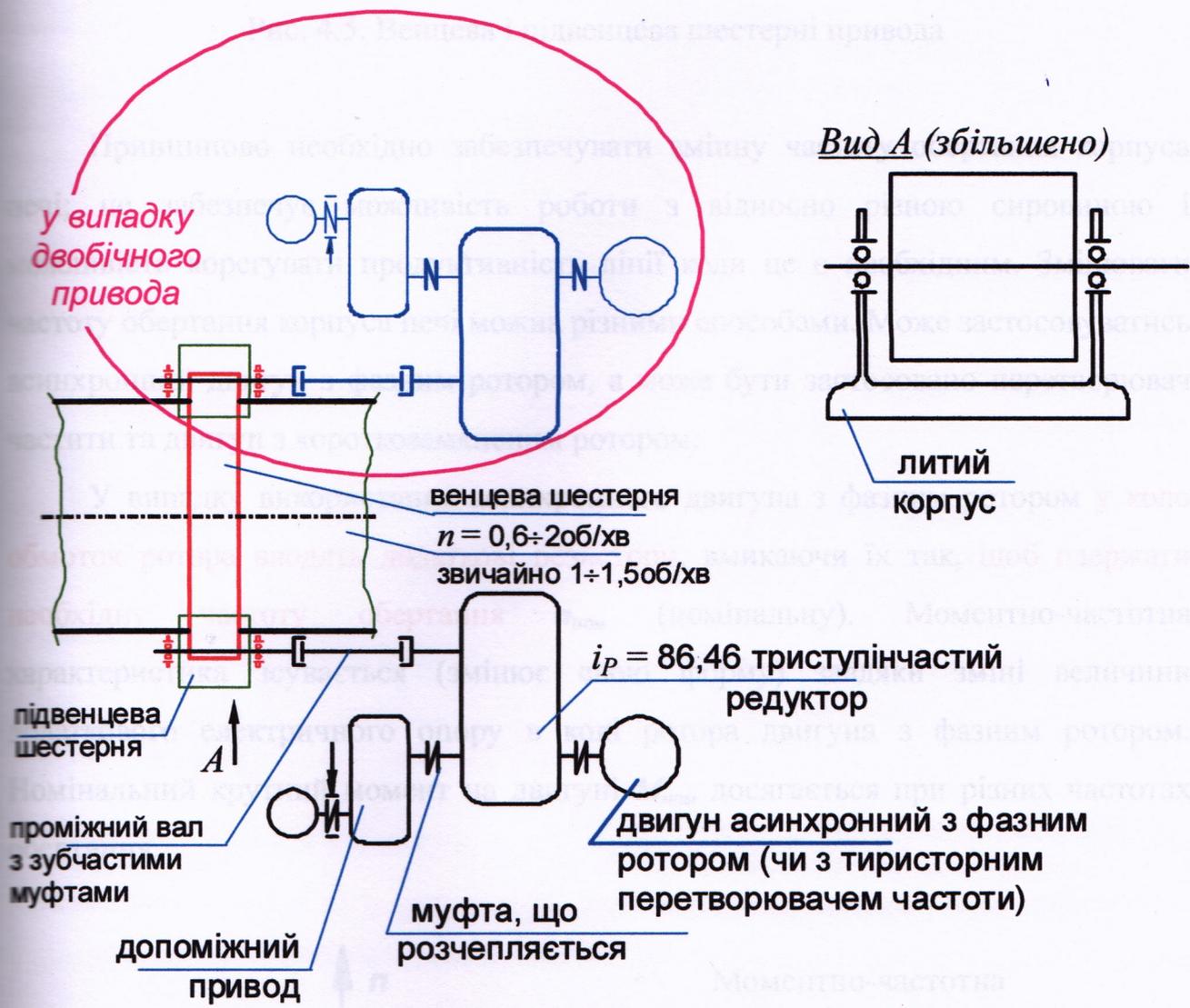


Рис. 4.4. Привод печі

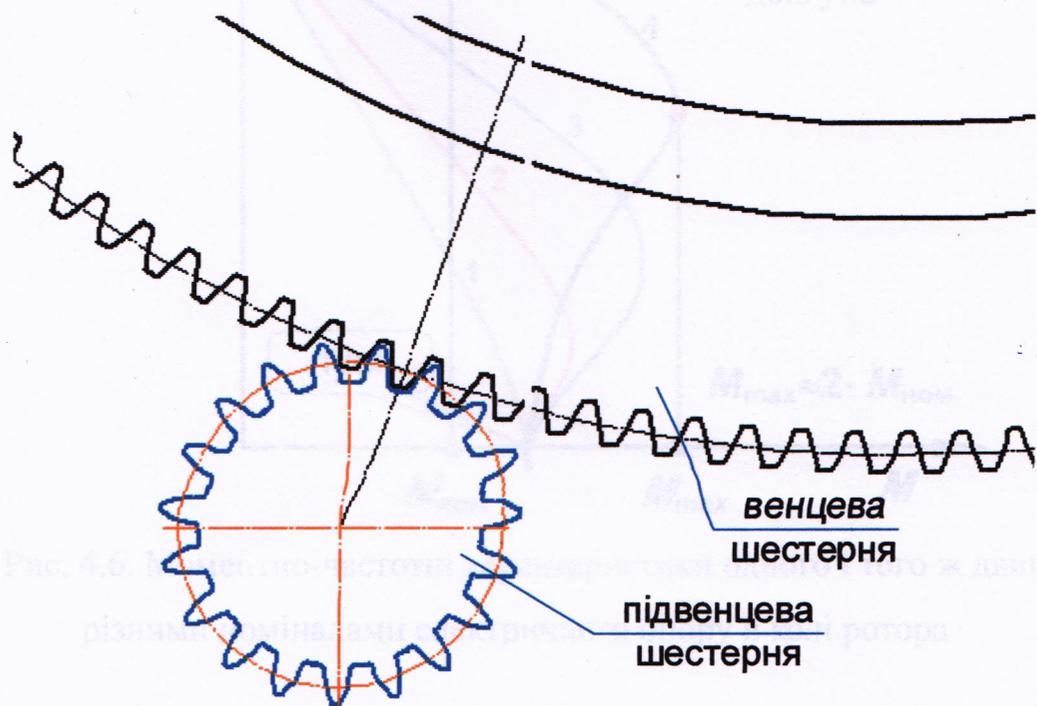


Рис. 4.5. Венцева і підвенцева шестерні привода

Принципово необхідно забезпечувати змінну частоту обертання корпусу печі; це забезпечує можливість роботи з відносно різною сировиною і можливість корегувати продуктивність лінії коли це є необхідним. Змінювати частоту обертання корпусу печі можна різними способами. Може застосовуватись асинхронний двигун з фазним ротором, а може бути застосовано перетворювач частоти та двигун з короткозамкненим ротором.

У випадку використання асинхронного двигуна з фазним ротором у коло обмоток ротора вводять додаткові резистори, вмикаючи їх так, щоб одержати необхідну частоту обертання $n_{ном}$ (номіальну). Моментно-частотна характеристика зсувається (змінює свою форму) завдяки зміні величини додаткового електричного опору в колі ротора двигуна з фазним ротором. Номінальний крутний момент на двигуні $M_{ном}$ досягається при різних частотах обертання.

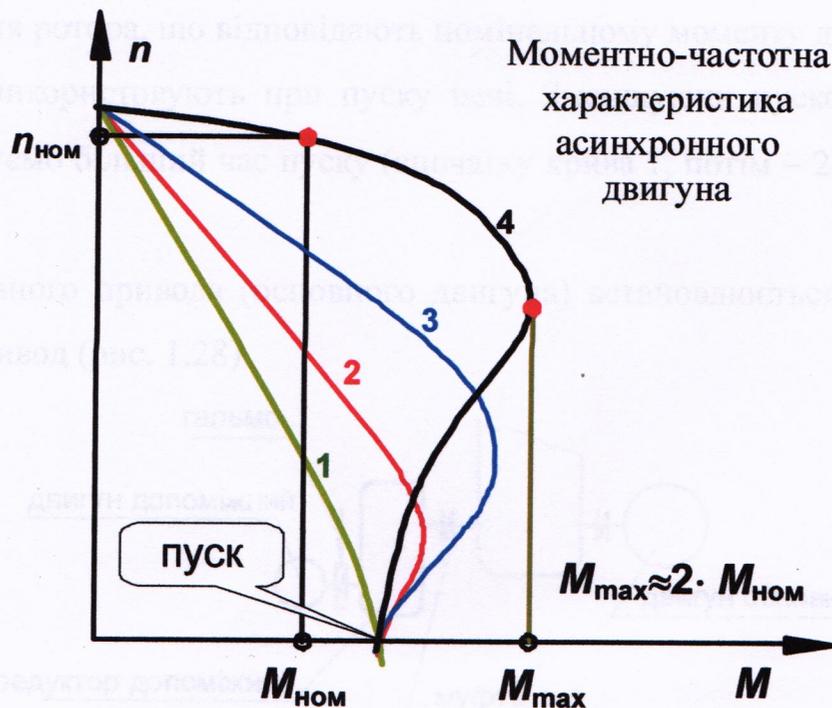


Рис. 4.6. Моментно-частотні характеристики одного і того ж двигуна з різними номіналами електричного опору в колі ротора

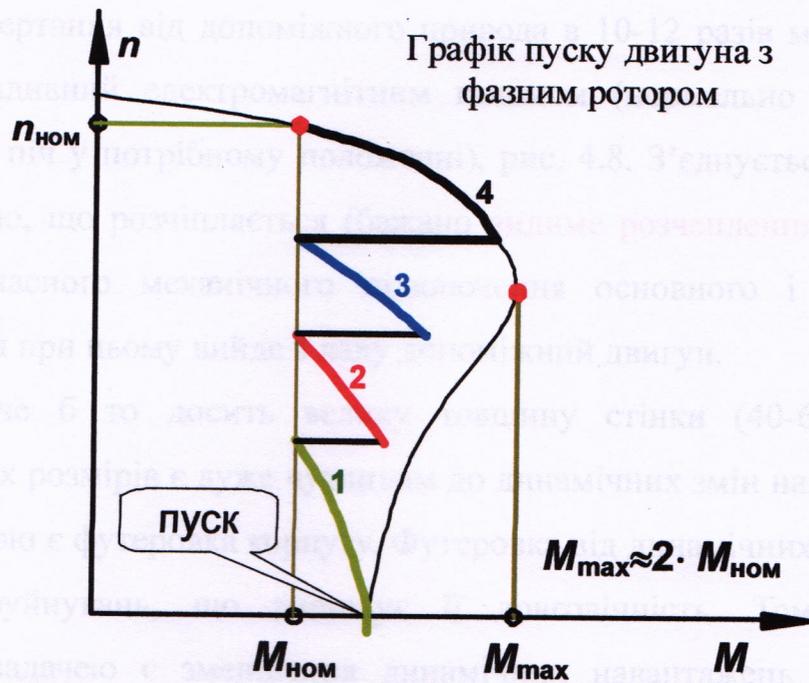


Рис. 4.7. Послідовність виходу двигуна з фазним ротором на номінальний режим

На рисунку 4.6 криві 1, 2, 3, 4 - характеристики одного двигуна з різними електричними опорами у колі ротора. Різні опори дозволяють одержувати різні частоти обертання ротора, що відповідають номінальному моменту двигуна. Крім того, ці опори використовують при пуску печі. Зменшуючи пусковий момент (M_{max}) ми одержуємо більший час пуску (спочатку крива 1, потім - 2, 3 і 4) - рис. 1.27.

Крім основного привода (основного двигуна) встановлюється додатковий (допоміжний) привод (рис. 1.28).

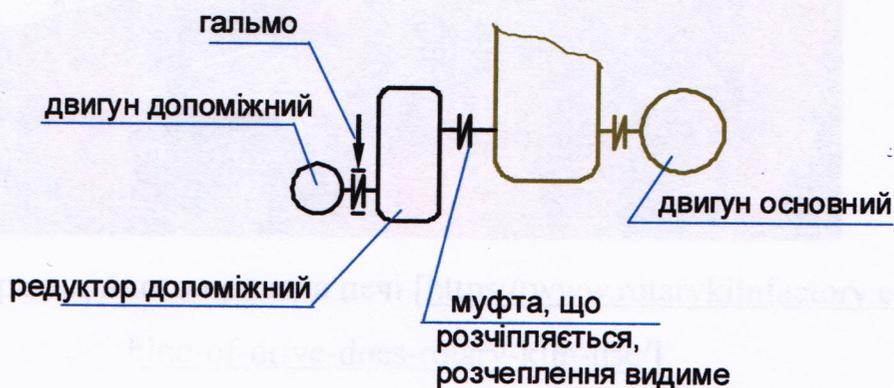


Рис. 4.8. Допоміжний привід печі

Частота обертання від допоміжного привода в 10-12 разів менше, ніж від основного. Обладнаний електромагнітним гальмом (нормально розімкненим; щоб зафіксувати піч у потрібному положенні), рис. 4.8. З'єднується з основним приводом муфтою, що розчіпляється (бажано **видиме розчеплення**). Не можна допускати одночасного механічного підключення основного і допоміжного двигуна, оскільки при цьому вийде з ладу допоміжний двигун.

Маючи наче б то досить велику товщину стінки (40-60мм) корпус внаслідок великих розмірів є дуже чутливим до динамічних змін навантаження, а ще більш чутливою є футеровка корпусу. Футеровка від динамічних навантажень потерпає мікроруйнувань, що зменшує її довговічність. Тому важливою перспективною задачею є зменшення динамічних навантажень від привода. Відомі способи згладжування коливань привода, зокрема застосування гідравлічного привода замість традиційного механічного з електроприводом [<https://www.rotarykilnfactory.com/what-kind-of-drive-does-rotary-kiln-use/>] (рис. 4.9 та рис. 4.10).

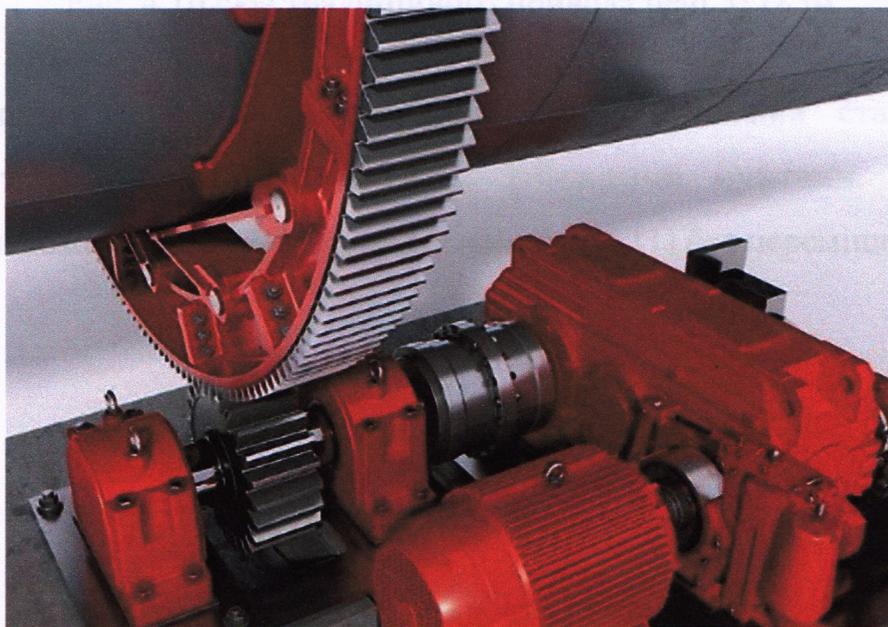


Рис. 4.9 Фото традиційного привода печі [<https://www.rotarykilnfactory.com/what-kind-of-drive-does-rotary-kiln-use/>]

Рис. 4.11. Приклад зубчастої муфти [<https://rotaryproducts.com/product/rotary-d-gear-coupling/>]

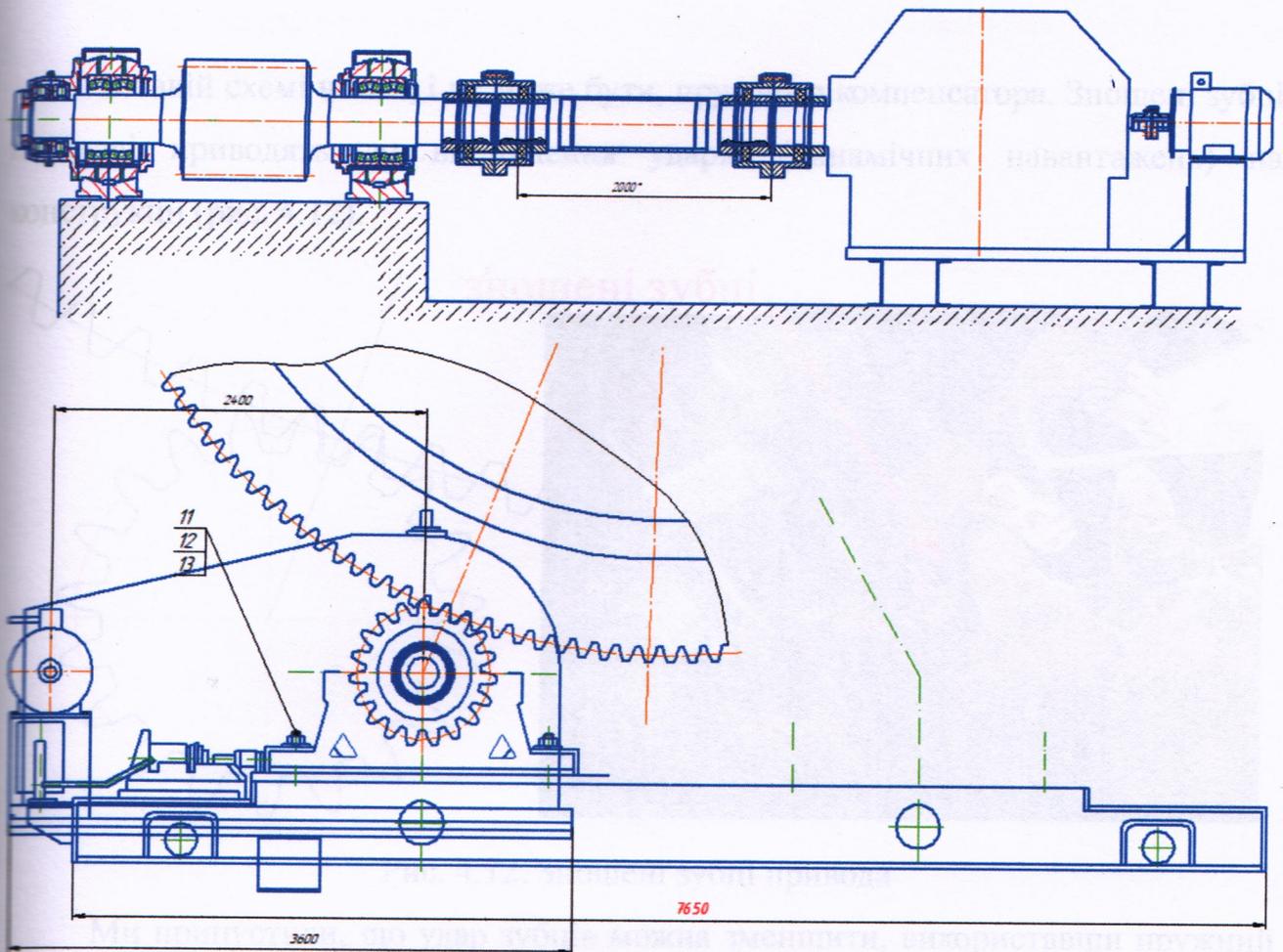


Рис. 4.10.скіз традиційного привода печі 5*185м

Традиційна схема привода – редуктор, закріплений стаціонарно, та проміжний трансмісійний вал з двома зубчастими муфтами. Це дозволяє коригувати положення підвенцевої шестерні (рис. 4.11) без переміщення привода.



Рис. 4.11. Приклад зубчастої муфти [<https://rotatorproducts.com/product/rexnord-gear-coupling>]

					ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата			38

В такій схемі немає, і не може бути, пружного компенсатора. Зношені зубці передачі приводять до виникнення ударів (динамічних навантажень) на конструкції (рис. 4.12).

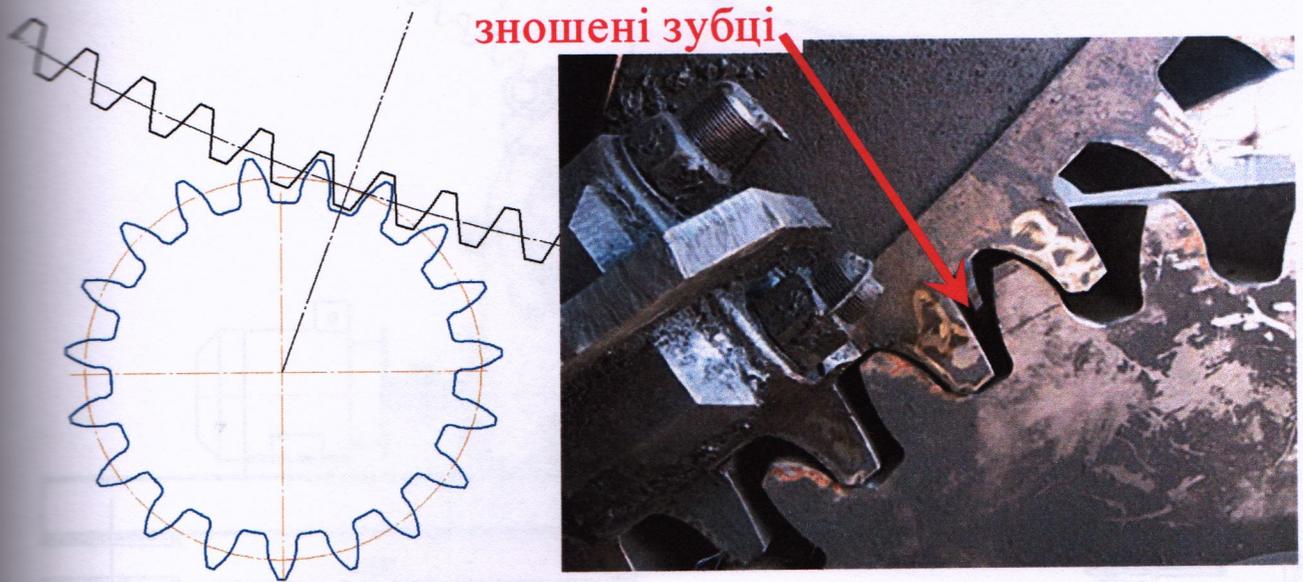
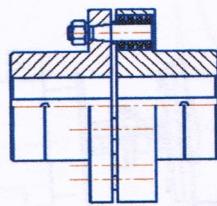


Рис. 4.12. Зношені зубці привода

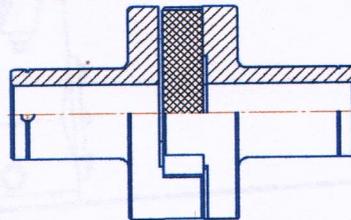
Ми припустили, що удар зубців можна зменшити, використавши пружний компенсатор (муфту) (рис. 4.13). Але існуючі пружні компенсаційні муфти не забезпечують потрібного крутного моменту. До того ж кут компенсації зовсім маленький.

Пружні муфти

Втулочно-пальцева



З гумовою зіркою



З тароподібною гумовою оболонкою

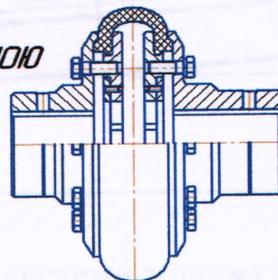


Рис. 4.13. Існуючі (відомі) конструкції пружних муфт

Нами запропоновано систему згладжування динамічних навантажень привода у вигляді рами, закріпленої на параболоїдних пружинах (рис. 4.14 – 4.16).

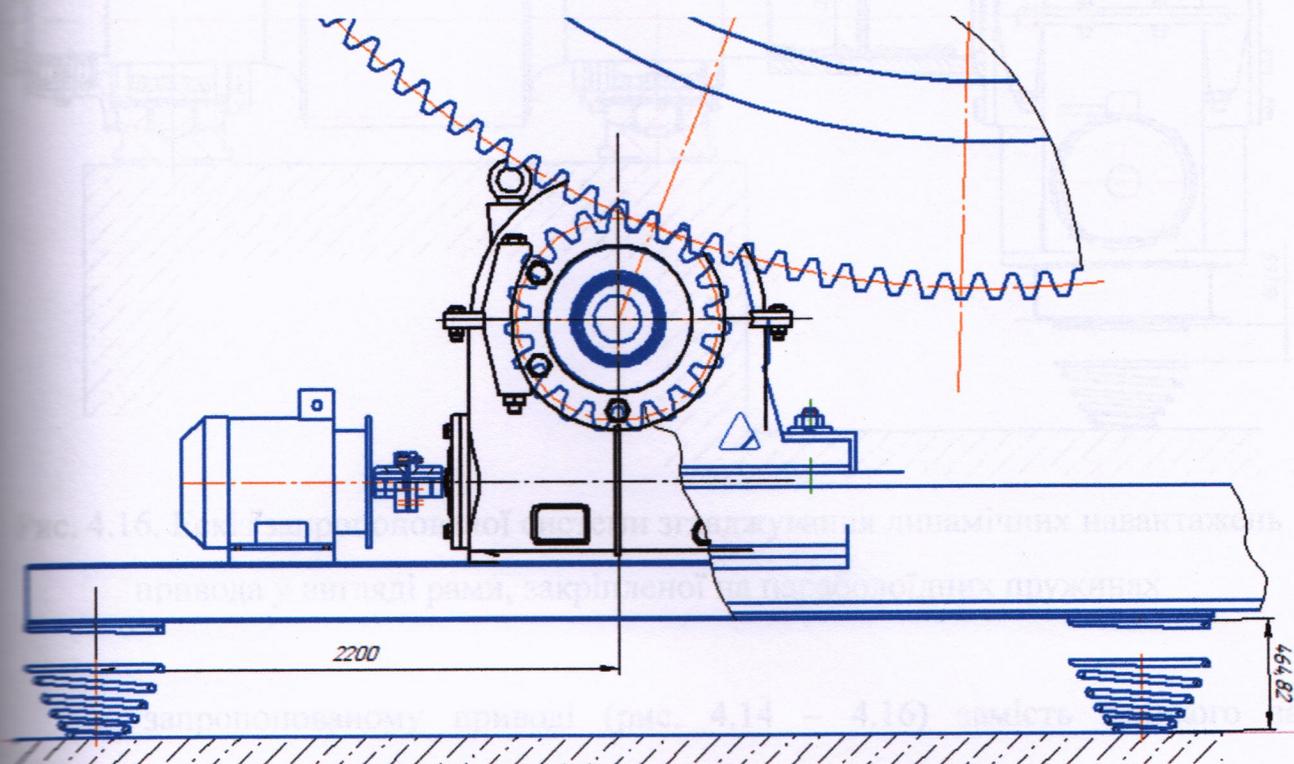


Рис. 4.14. Ескіз запропонованої системи згладжування динамічних навантажень привода у вигляді рами, закріпленої на параболоїдних пружинах

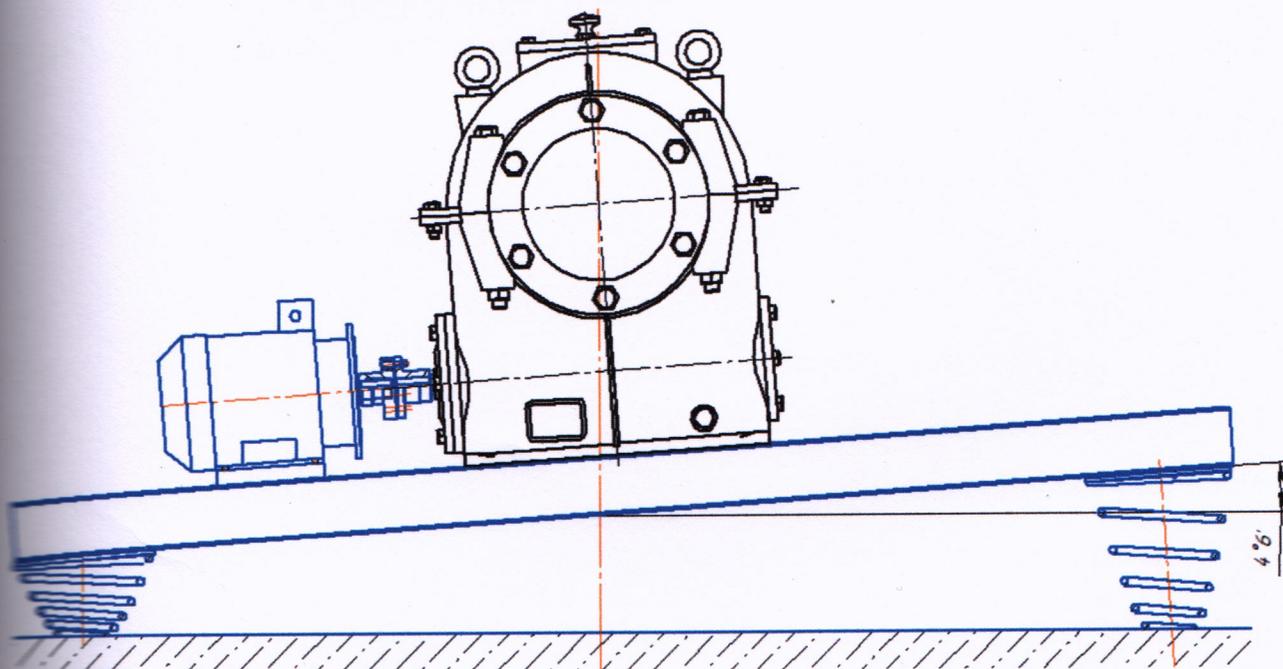


Рис. 4.15. Ескіз запропонованої системи згладжування динамічних навантажень привода у вигляді рами, закріпленої на параболоїдних пружинах

				ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата		40

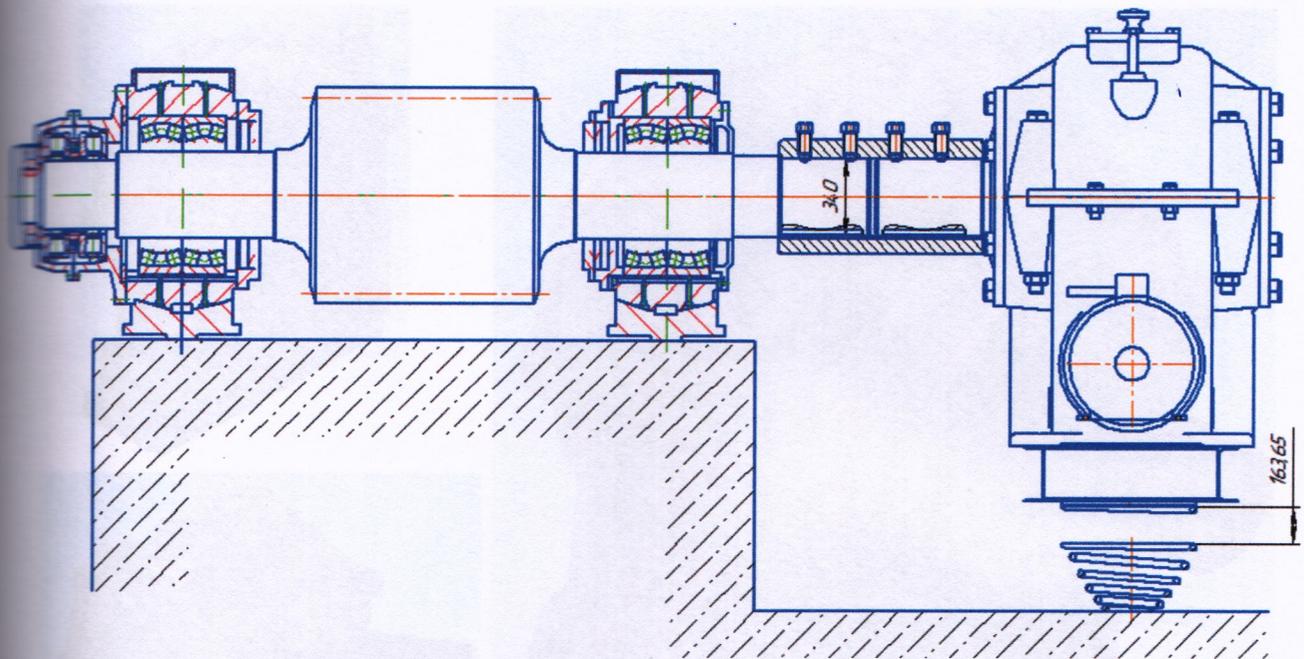


Рис. 4.16. Ескіз запропонованої системи згладжування динамічних навантажень привода у вигляді рами, закріпленої на параболоїдних пружинах

У запропонованому приводі (рис. 4.14 – 4.16) замість великого за габаритами і важкого циліндричного редуктора застосовано черв'ячний редуктор на той же крутний момент і передаточне число (рис. 4.17).

Додатковою перевагою застосування черв'ячного редуктора є те, що не потрібно додаткового приводу з гальмом

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

Лист

41

Лист	№ докум.	Підп.	Дата



Рис. 4.17. Застосований черв'ячний редуктор

Додатковою перевагою застосування черв'ячного редуктора є те, що не потрібно додаткового привода з гальмом.

Підвісцева шестерня (як і в старому приводі) встановлена в опорах на фундаменті (рис. 4.18). На кінцевому валу підвісцевій шестерні консольно і жорстко закріщено розроблений нами черв'ячний редуктор, зв'язаний з двигуном. Редуктор і двигун закріплені на рамі-важелі. З обох сторін важеля (рама) встановлені пружини, жорсткість яких відповідають вимозі компенсації динамічних навантажень. До важеля (рама) прикріплено тензодатку (рис. 4.18), яка призначена для визначення нахилу рами, а, отже, для визначення крутного моменту на тихохідному валу редуктора.

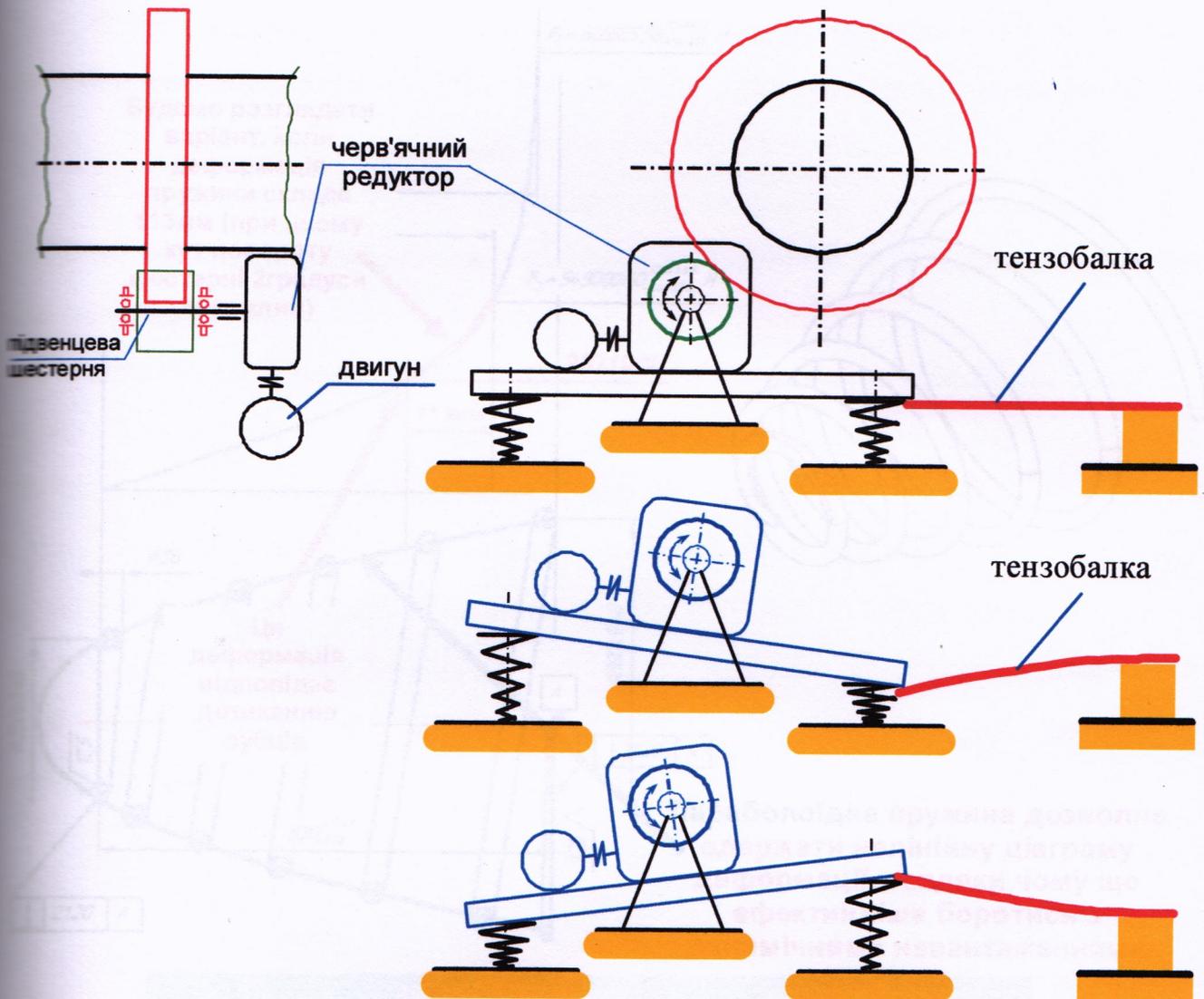


Рис. 4.18. Схема запропонованого привода (з компенсатором; д встановленою тензобалкою

Підвенецева шестерня (як і в старому приводі) встановлена в опорах на фундаменті (рис. 4.18). На кінцевіку валу підвенецевої шестерні консольно і жорстко закріплено розроблений нами черв'ячний редуктор, зв'язаний з двигуном. Редуктор і двигун закріплені на рамі-важелі. З обох сторін важеля (рамі) встановлені пружини, жорсткість яких відповідають вимозі компенсації динамічних навантажень. До важеля (рамі) прикріплено тензобалку (рис. 4.18), яка призначена для визначення нахилу рами, а, отже, для визначення крутного моменту на тихохідному валу редуктора.

Рис. 4.19. Параболічна пружина

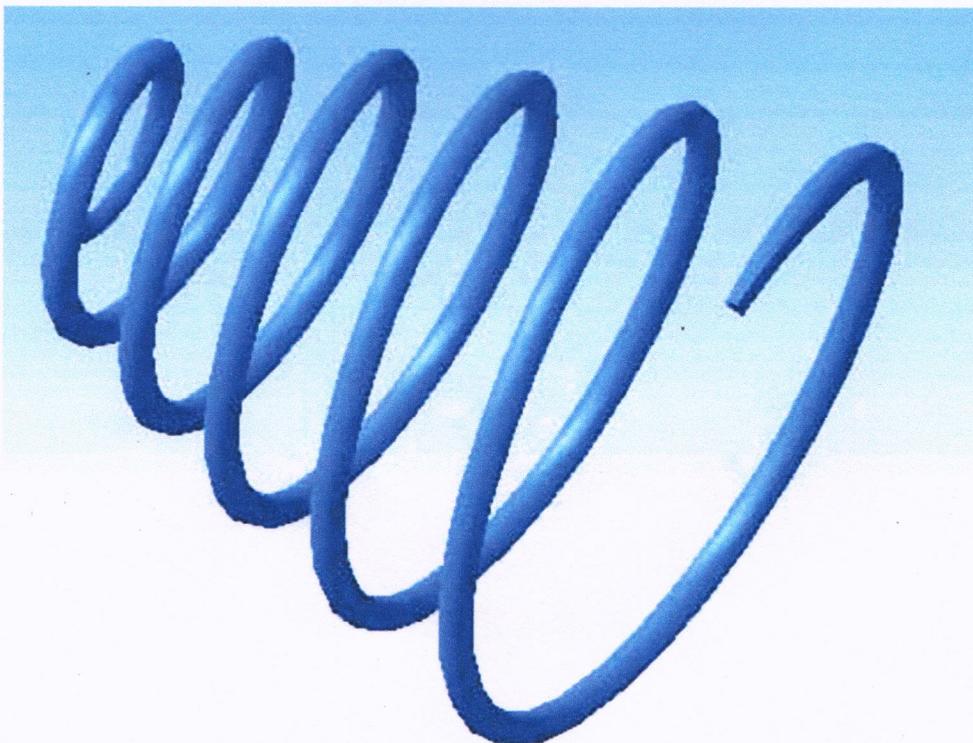
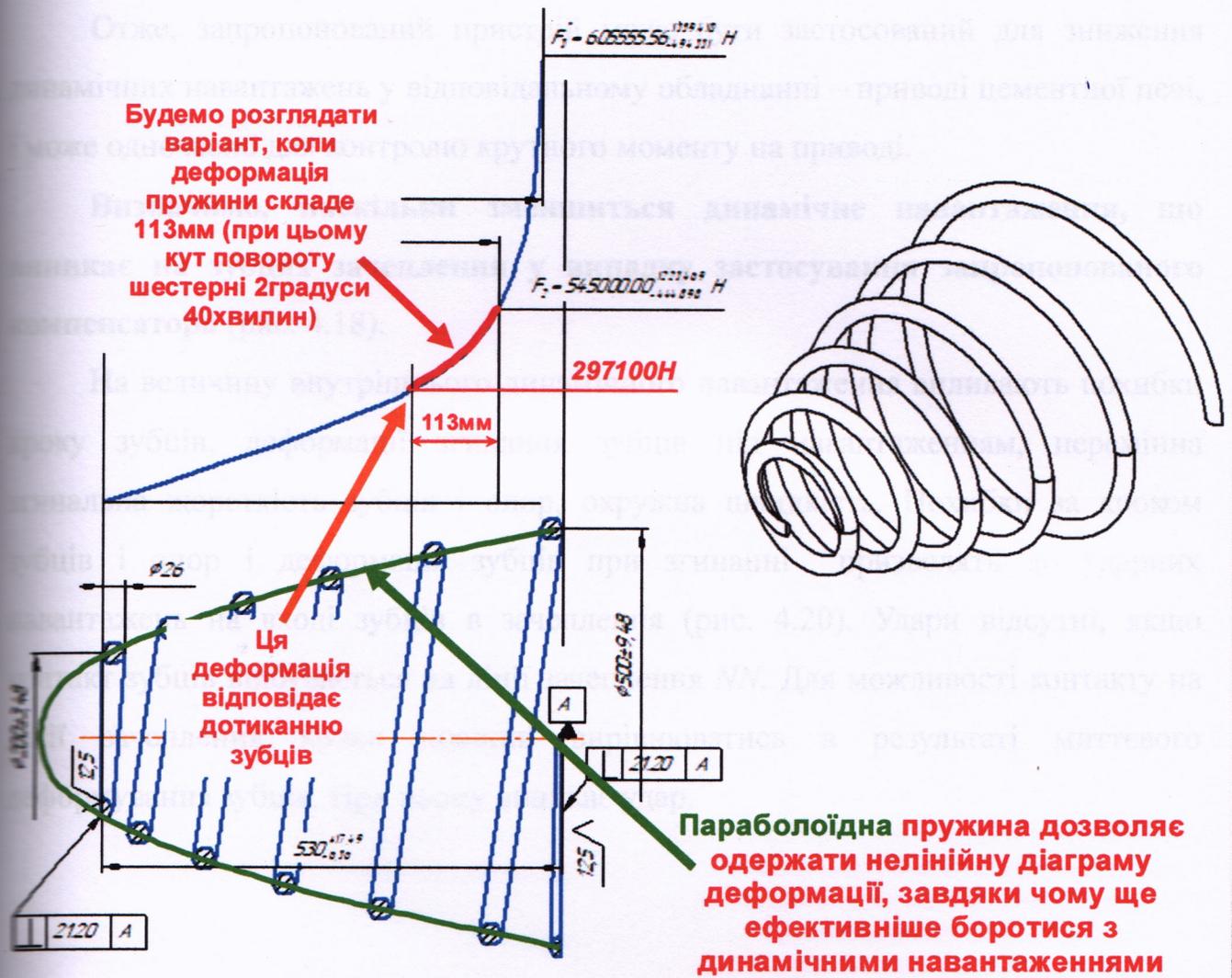


Рис. 4.19. Параболоїдна пружина

Лист	№ докум.	Підп.	Дата
------	----------	-------	------

Отже, запропонований пристрій може бути застосований для зниження динамічних навантажень у відповідальному обладнанні – приводі цементної печі, і може одночасно для контролю крутного моменту на приводі.

Визначимо, наскільки зменшиться динамічне навантаження, що виникає на зубцях зачеплення у випадку застосування запропонованого компенсатора (рис. 4.18).

На величину внутрішнього динамічного навантаження впливають похибки кроку зубців, деформації згинання зубців під навантаженням, перемінна згинальна жорсткість зубців і опор, окружна швидкість. Похибки за кроком зубців і опор і деформація зубців при згинанні призводять до ударних навантажень на вході зубців в зачеплення (рис. 4.20). Удари відсутні, якщо контакт зубців відбувається на лінії зачеплення NN . Для можливості контакту на лінії зачеплення кроки повинні вирівнюватись в результаті миттєвого деформування зубців. При цьому виникає удар.

Рис. 4.20. Ілюстрація ударного навантаження у зачепленні зубчастих коліс

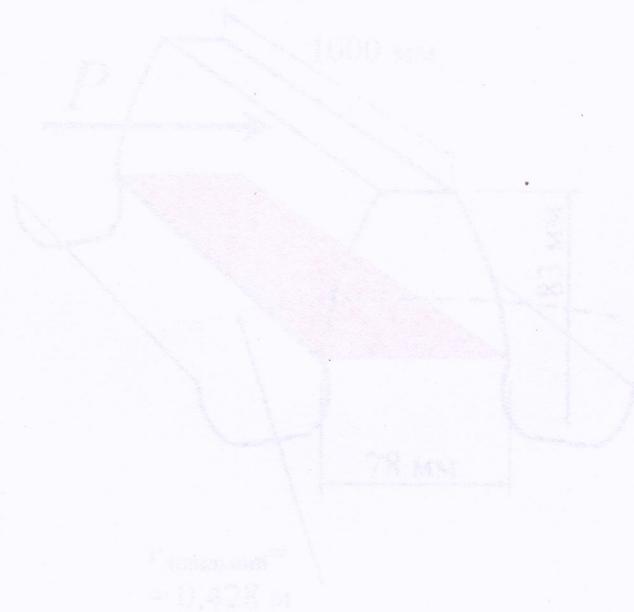


Рис. 4.21. Ілюстрація зачеплення (P – стиснутий сила в зачепленні)

Лист	№ докум.	Підп.	Дата

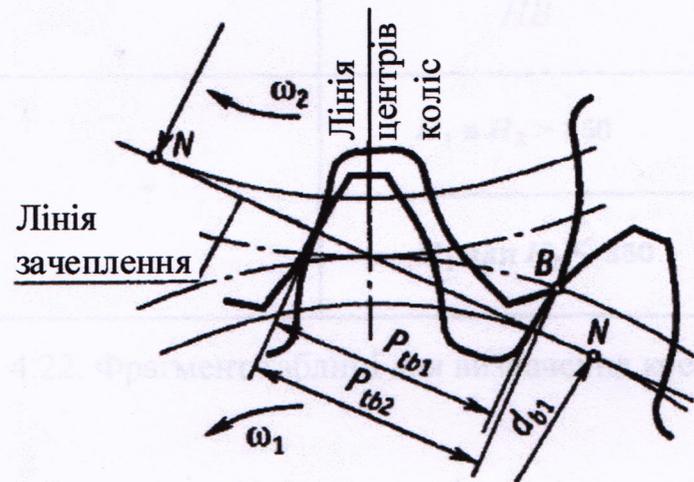
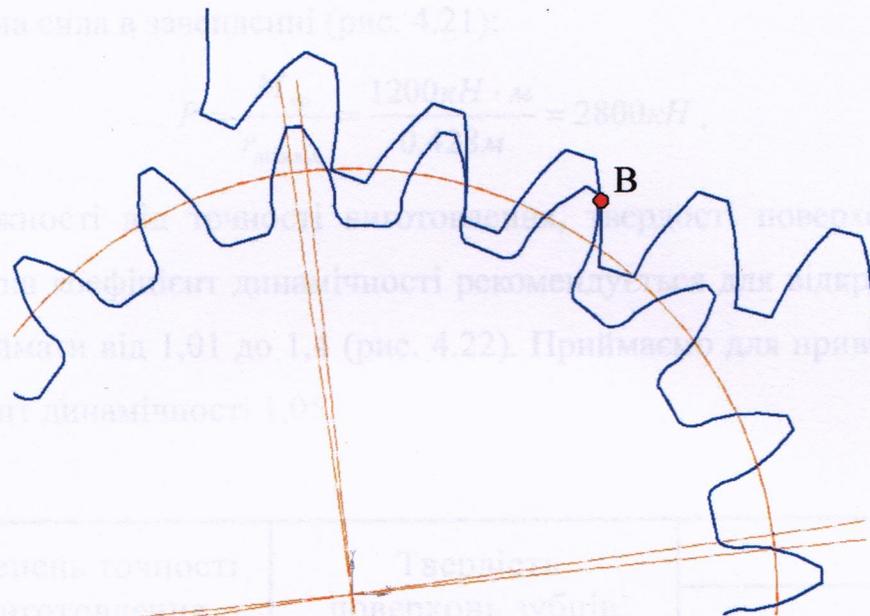


Рис. 4.20. Ілюстрація ударного навантаження у зачепленні зубчастих коліс

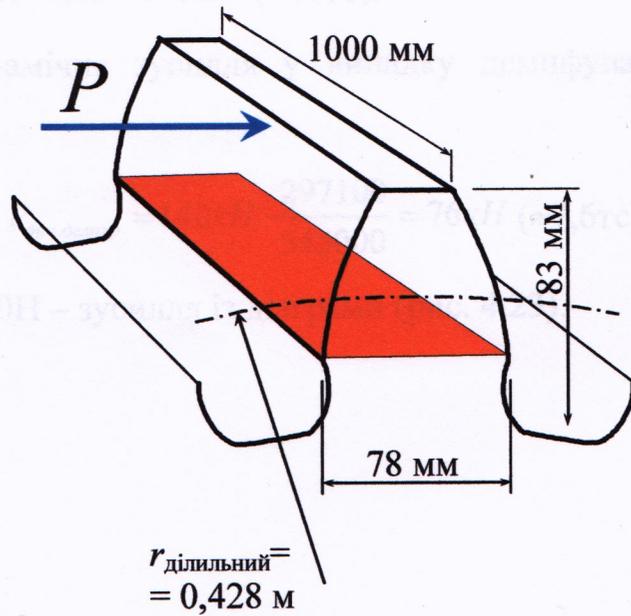


Рис. 4.21. Ілюстрація зачеплення (P – статична сила в зачепленні)

Лист	№ докум.	Підп.	Дата
------	----------	-------	------

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

Статична сила в зачепленні (рис. 4.21):

$$P = \frac{M_{кр}}{r_{ділильн}} = \frac{1200кН \cdot м}{0,428м} = 2800кН.$$

В залежності від точності виготовлення, твердості поверхонь зубців та інших факторів коефіцієнт динамічності рекомендується для відкритої зубчастої передачі приймати від 1,01 до 1,4 (рис. 4.22). Приймаємо для привода цементної печі коефіцієнт динамічності 1,05.

Степень точності виготовлення	Твердість поверхонь зубців, HB	K _{Hα}		
		1	5	10
7	H ₁ и H ₂ > 350	1,02	1,12	1,25
		1,01	1,05	1,10
	H ₁ или H ₂ ≤ 350	1,04	1,20	1,40
		1,02	1,08	1,16

Рис. 4.22. Фрагмент таблиці для визначення коефіцієнта динамічності

Вважаючи, що коефіцієнт динамічності складає 1,05, розрахуємо динамічне зусилля: $P_{дин} = 2800кН \cdot 0,05 = 140кН$ ($\approx 14тс$).

Знайдемо динамічне зусилля у випадку демпфування запропонованим пристроєм:

$$P_{дин.демф} = 140кН \cdot \frac{297100}{545000} = 76кН (\approx 7,6тс),$$

тут 297100Н і 545000Н – зусилля із діаграми (рис. 4.23).

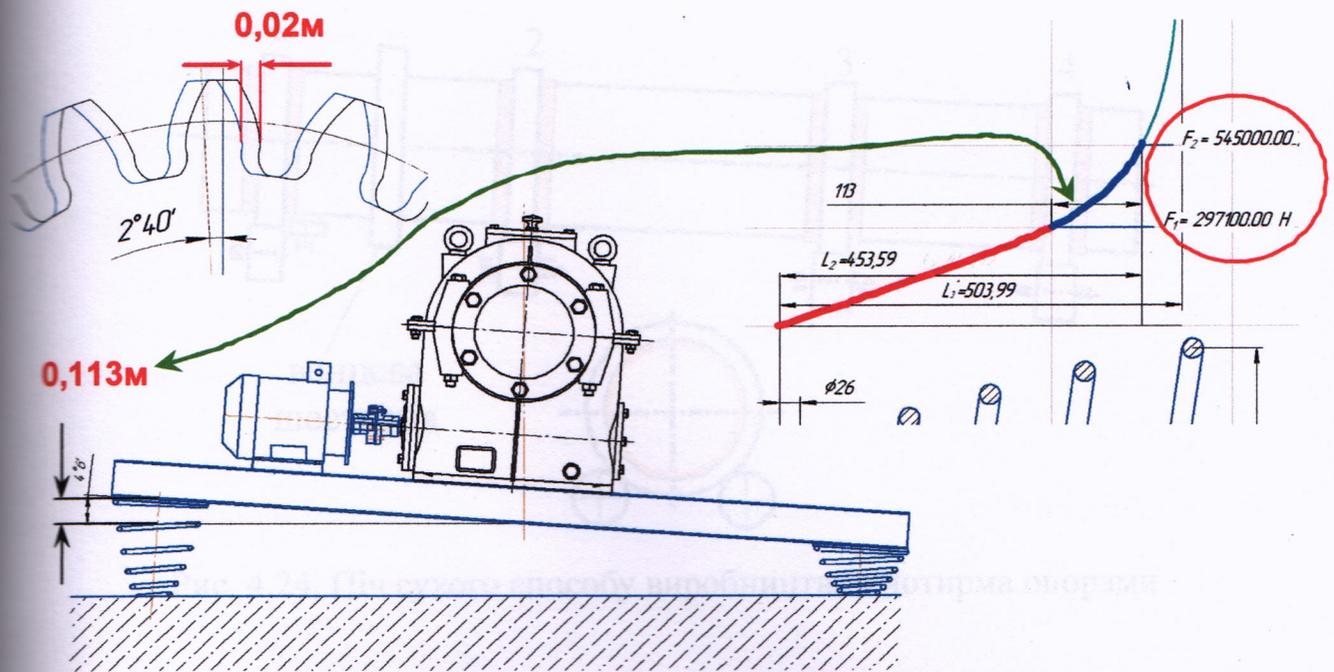


Рис. 4.23. Діаграма зусиль

Отже, динамічне зусилля зменшується майже вдвічі (і це не залежить від обраного з таблиці коефіцієнта динамічності).

4.3. Розрахунок елементів привода

Вихідні дані: піч сухого способу виробництва (рис. 4.2).

Діаметри:

- печі $D_n = 6,4$ м;
- бандажа $D_b = 7,75$ м;
- опорного ролика $D_{рол} = 2,2$ м;
- цапфи осі ролика $D_{ц} = 0,75$ м;

довжина печі $L = 95$ м;

частота обертання $n = 1,3$ об/хв;

ухил печі $i = 3,5\%$ (0,035);

кількість опор – 4.

Навантаження на опори: 1 – 6900 кН; 2 – 10500 кН; 3 – 10800 кН; 4 – 6800кН.

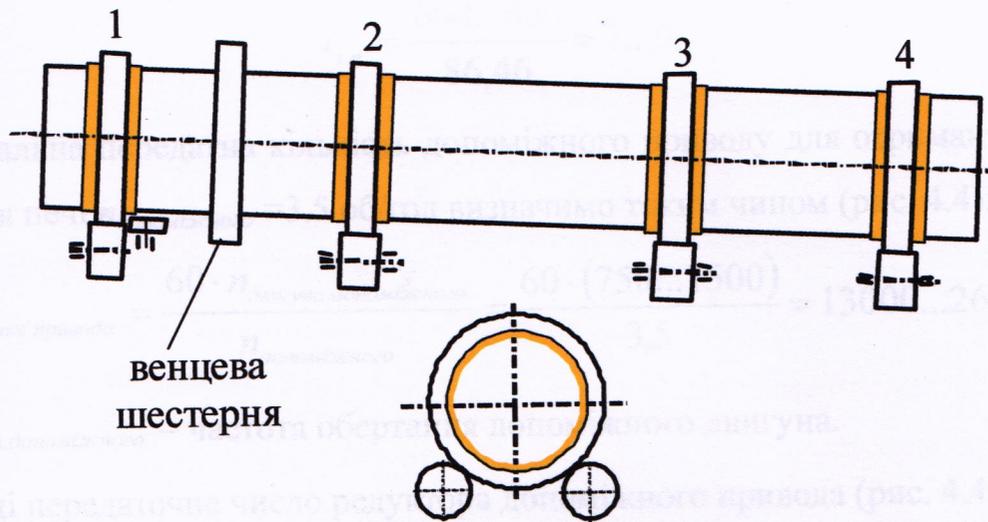


Рис. 4.24. Піч сухого способу виробництва з чотирма опорами

Вага:

- загальна вага частин печі, що обертаються $G_{об} - 35000$ кН,

- бандажа $G_b - 1220$ кН,

- опорного ролика $G_p - 400$ кН.

Товщина футеровки $\delta = 200 \dots 300$ мм.

Для отримання рекомендованих швидкостей обертання печі знаходимо необхідну загальну передаточне число головного приводу.

$$i_{зл.пр} = n_{дв} / n_p,$$

де $n_{дв}$ – частота обертання головного електродвигуна, об/хв, $n_{дв} = 740 \dots 980$;

n_p – найбільша робоча частота обертання печі.

Орієнтовний інтервал передавальних чисел головного приводу цементних печей, що обертаються:

$$i_{зл.пр} = \frac{740 \dots 980}{1,25} \approx 600 \dots 800.$$

Типовий редуктор, що застосовується для більшості печей, має передаточне число $i_p = 86,46$ (рис. 4.4).

Тоді передаточне число відкритої зубчастої передачі:

					ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ	Лист
Лист	№ докум.	Підп.	Дата			49

$$\sigma_F = y_F \cdot k_\beta \cdot k_v \frac{2 \cdot 10^3 \cdot M_1}{m^2 \cdot z_1 \cdot b} \leq [\sigma_F]$$

$$\sigma_F = 1 \cdot 1 \cdot 1,05 \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 53,9}{4^2 \cdot 120 \cdot 0,12} = 409,5 \text{ МПа.}$$

де y_F – коефіцієнт форми зуба вибирається в залежності від кількості зубів шестерні або колеса при нульовому коефіцієнті зміщення;

k_β – коефіцієнт нерівномірності розподілу навантаження по ширині вінця зубчастого колеса, визначається залежно від твердості поверхонь шестерні та колеса та коефіцієнта ширини шестерні (рис. 4.22).

$$\psi_d = b_w / d_w = 0,12 / 0,48 = 0,25,$$

де d_w – початковий діаметр шестерні,

$$d_w = m \cdot z_1 = 4 \cdot 0,12 = 0,48 \text{ м;}$$

$k_v = 1,05$ – коефіцієнт динамічного навантаження, визначається в залежності від ступеня точності передачі, твердості поверхонь зубів та окружної швидкості

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60};$$

n_w – частота обертання шестерні, об/хв;

M_1 – крутний момент на шестерні.

$$M_1 = 9600 \frac{N_{z1} \cdot i_p \cdot \eta_{z1}}{n_{дв.з1}} = 9600 \frac{156 \cdot 40 \cdot 0,9}{1000} = 53,9 \text{ кН} \cdot \text{м;}$$

$[\sigma_F]$ – припустиме напруження зубців на згин,

$$[\sigma_F] = \frac{\sigma_{lim} \cdot k_L \cdot k_c}{S} = \frac{1250 \cdot 1 \cdot 1}{3} = 416,7 \text{ МПа.}$$

тут σ_{lim} – межа (граніця) витривалості зубів при згинанні, що відповідає базовому числу циклів напруг,

$$\sigma_{lim} = 1,35 \text{ HB} + 150 = 1,35 \cdot 850 + 100 = 1250 \text{ МПа;}$$

k_L – коефіцієнт довговічності, $k_L = \sqrt[m_0]{N_0 / N_E}$,

де N_0 , N_E – базове і еквівалентне число циклів напружень;

m_0 – показник кореня, $m_0 = 6$; при розрахунку тихохідної зубчастої пари можна приймати $k_L = 1$;

				ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ		Лист
№	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		
					51	

k_0 – коефіцієнт, що враховує вплив двостороннього застосування навантаження на зуби; при односторонній дії $k_0 = 1$;

S – коефіцієнт безпеки; зазвичай приймають $S = 1,7 \dots 2,2$, але враховуючи важкі умови роботи, можна приймати у цьому розрахунку $S = 3$.

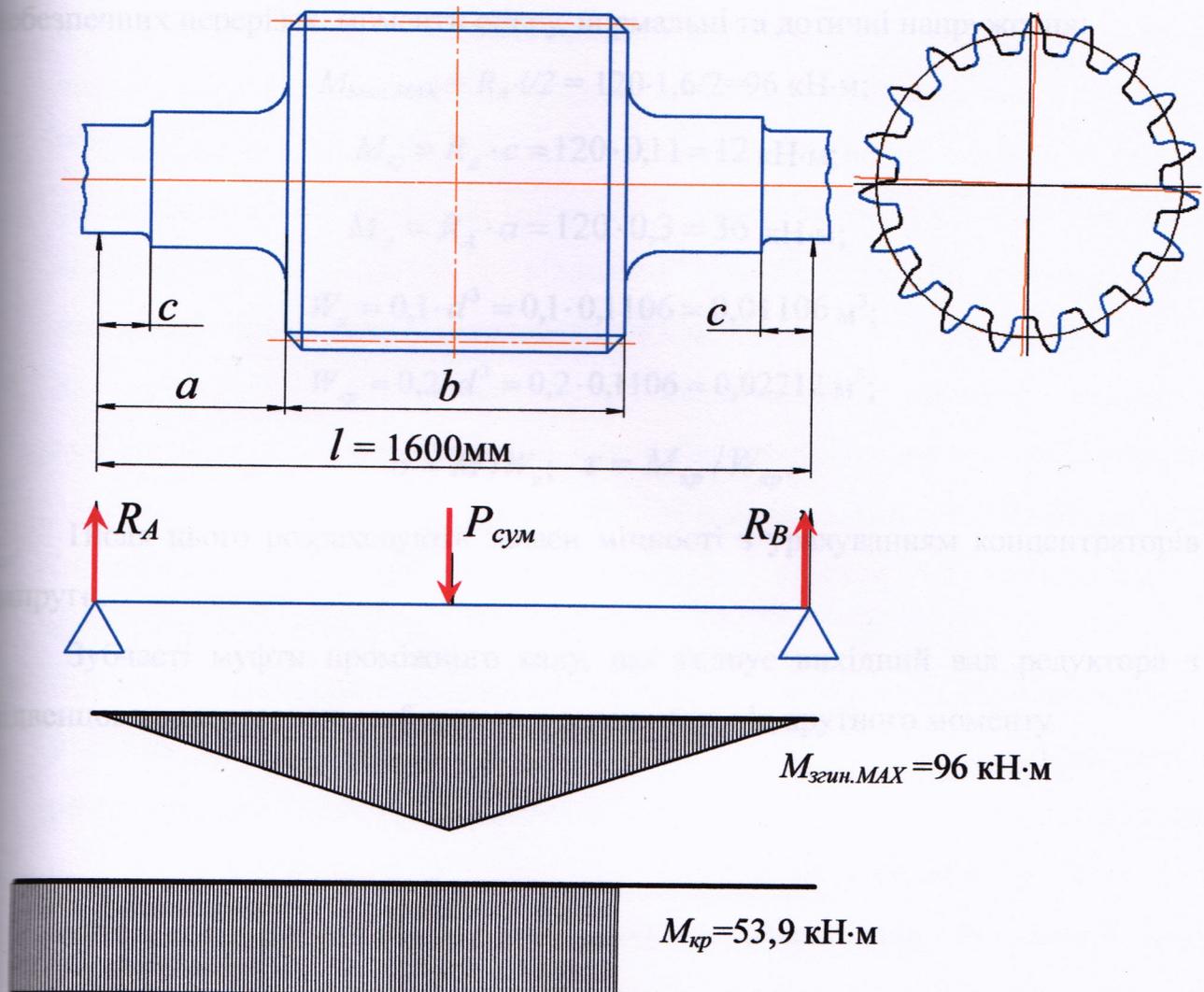


Рис. 4.24. Розрахункова схема підвеневої вала-шестерні

На рис. 4.24 представлена розрахункова схема підвеневої шестерні, що виготовляється зазвичай як одне ціле з валом. Для визначення згинальних навантажень, що діють на вал-шестірню, визначається окружне зусилля.

$$P_0 = \frac{2M_1}{d_{ш}} = \frac{2 \cdot 53,9}{0,48} = 224,6 \text{ кН.}$$

Розпірне зусилля:

$$T = P_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha = 224,6 \cdot 0,36 = 89,03 \text{ кН},$$

де α – кут зачеплення, $\alpha = 20^\circ$. Сумарна згинальна сила, що діє на вал (рис. 4.24):

$$P_{\text{сум}} = \sqrt{P_0^2 + T^2} = \sqrt{89,03^2 + 224,6^2} = 241,6 \text{ кН}.$$

Визначивши реакцію опор, можна отримати згинальні моменти в небезпечних перерізах, моменти опору, нормальні та дотичні напруження:

$$M_{\text{згин. MAX}} = R_A \cdot l/2 = 120 \cdot 1,6/2 = 96 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_C = R_A \cdot c = 120 \cdot 0,11 = 12 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_a = R_A \cdot a = 120 \cdot 0,3 = 36 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$W_u = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,1106 = 0,01106 \text{ м}^3;$$

$$W_{\text{кр}} = 0,2 \cdot d^3 = 0,2 \cdot 0,1106 = 0,02212 \text{ м}^3;$$

$$\sigma = M/W_u; \quad \tau = M_{\text{кр}}/W_{\text{кр}}.$$

Після цього розраховують запаси міцності з урахуванням концентраторів напруги.

Зубчасті муфти проміжного валу, що з'єднує вихідний вал редуктора з підвенцовою шестернею, вибирають в залежності від крутного моменту.

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

Лист

53

Висновки

1. Запропоновано для побудови механічної характеристики електричного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначати крутний момент, застосовуючи стенд з тензобалкою, закріпленою на рамі стенда.
2. Запропоновано для побудови механічної характеристики електричного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначати поточну частоту обертання двигуна, застосовуючи тахогенератор постійного струму.
3. Розроблено та реалізовано на лабораторному обладнанні кафедри стенд для експериментальної побудови механічної характеристики двигуна. Проведені дослідження на двигуні з відомими характеристиками підтверджують можливість застосування створеного стенда.
4. За визначеним експериментально максимальним крутним моментом побудовано механічну (моментно-частотну) характеристику асинхронного двигуна за формулою Клосса. Моментно-частотні характеристики (побудована виключно експериментальним шляхом та побудована за формулою Клосса) майже ідентичні.
5. Використаний принцип визначення крутного моменту може бути застосовано у інших дослідженнях механічного обладнання. Як приклад застосування розглянуто оригінальний (запропонований нами) привод обертової цементної печі з пружним компенсатором. Запропонований компенсатор забезпечує суттєве зменшення динамічних (ударних) навантажень на корпус печі. Конструкція компенсатора дозволяє застосовувати тензометричну апаратуру для визначення і поточного контролю крутного моменту, що передається на корпус печі.
6. Виконано приклад розрахунку привода обертової цементної печі і вала-шестерні відкритої зубчастої передачі.

				ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ		
№	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		
Роб.		Левченко Р.І.	<i>[Signature]</i>	23.08.		
Перев.		Орещак	<i>[Signature]</i>	23.08	Літ.	
Перізн.		Крот О.Ю.	<i>[Signature]</i>	23.08	Н	
контр.		Волоцький О.С.	<i>[Signature]</i>	23.08	Висновки Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІТР, 2024 р 54	
Залв.		Орешак	<i>[Signature]</i>			
					1	1

Список літератури

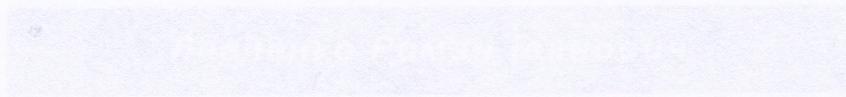
1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу “Деталі машин” для студентів механічних спеціальностей МБ, МА, МН, МТ/ А.В. Васильєв – Полтава: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2003. – 40 с.
2. О.Ю. Крот, С.В. Загорулько, Р.І. Левченко. Розробка обладнання для визначення часу пуску електричного двигуна технологічного обладнання. Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (11 травня 2023 року, м. Полтава) / ред.: М.М. Нестеренко – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – С. 25-27.
<https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2023/vi-vntk-seratbt/tezy.pdf>
3. Adam J. Spiers, Harry J. Thompson, and Anthony G. Pipe “Investigating Remote Sensor Placement for Practical Haptic Sensing with Endo Wrist Surgical Tools”, *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC) Northwestern University* June 22–26, 2015. Evanston, IL, USA, pp/ 152-157.
4. <https://www.youtube.com/watch?v=GSFRO7-Ip8U>. Comparison of Torque Sensor Technologies. <https://www.transense.com/>
5. <https://www.youtube.com/watch?v=J3vstKdGheY>. Torque and Power Measurement System (TPMS) Horvath Research.
www.HorvathResearch.com/TPMS.
6. Press Release. *NSK Develops World's First Non-Contact Torque Sensor for Drive Shafts in Motor Vehicles*. July 7, 2020. NSK Ltd. CSR Division Headquarters. Public Relations Department.
7. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков. Розробка стенда для експериментального дослідження механічної характеристики асинхронного двигуна. Тези 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Том 1. (Полтава, 02

Роб.				ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ	Лист
Пере.					
Лист	№ докум.	Підпис	Дата		55

травня – 25 травня 2023 року) – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2023. – С. 262-263.

<https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2023/75conf/zbirnyk1.pdf>.

8. Крот О.Ю., Коробко Б.О., Крот О.П., Вірченко В.В. Експериментальні методи досліджень: навчальний посібник. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – 192 с.; іл.
9. Крот О.Ю. Конспект лекцій з дисципліни «Експериментальні методи досліджень в інженерній механіці» Укладач професор кафедри будівельних машин і обладнання. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023.



студент
Національного університету
«Полтавська політехніка»
переможець II етапу
Всеукраїнського творчого конкурсу
наукових робіт
«Процеси та обладнання машинобудівних
виробництв»
2023 року
131 «Полтавська політехніка»

Голова журі конкурсного комітету
доктор технічних наук
кандидат інженерних наук
з науково-методичної роботи
Центральноукраїнського національного
університету

Андрій
КИРИЧЕНКО

18 травня 2023

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

№ з/б	№ докум.	Підпис	Дата	Лист
Резб				Лист
Перв				
Лист	№ докум.	Підпис	Дата	56

ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ

**Додаток 1. Копія диплому переможця Всеукраїнського конкурсу
студентських наукових робіт**



ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ



ДИПЛОМ II СТУПЕНЯ

нагороджується

Левченко Роман Іванович

студент
Національного університету
«Полтавська політехніка»

переможець II етапу
Всеукраїнського творчого конкурсу
наукових робіт
«Процеси та обладнання машинобудівних
виробництв»
за спеціальністю
131 «Прикладна механіка»

Голова галузевої конкурсної комісії,
доктор технічних наук,
професор, проректор
з науково-педагогічної роботи
Центральноукраїнського національного
технічного університету



**Андрій
КИРИЧЕНКО**

14 грудня 2023

					ГМ.601-ММВ.012-00.00.000 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Додаток 1	Літ.	Лист	Листів
Розроб.		Левченко Р.І.	<i>[Signature]</i>	08.08		Н	1	1
Перев.		<i>Срісочинко</i>	<i>[Signature]</i>	23.08				
Керівн.		Крот О.Ю.	<i>[Signature]</i>	23.08				
Н. контр.		Васильов В.С.	<i>[Signature]</i>	23.08				
Залв.		Оришук О.В.	<i>[Signature]</i>	23.08				
						Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІТР, 2024 р 57		

**Нова конструкція і дослідження стенда для
експериментального дослідження моментно-частотної
характеристики асинхронного двигуна**

Презентаційні матеріали

ГММ.601-ММв.012-00.00.000 ПМ



НОВА КОНСТРУКЦІЯ

2

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТЕНДА ДЛЯ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ДОСЛІДЖЕННЯ МОМЕНТНО-
ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

**Автор – студент Левченко Роман
Іванович**

**Керівник – проф. Крот Олександр
Юлійович**

**Національний університет «Полтавська
політехніка імені Юрія Кондратюка»**

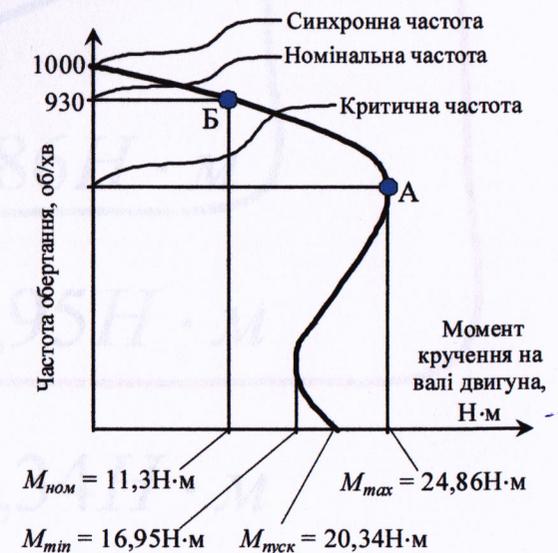
переважна більшість машин і обладнання технологічних процесів застосовують електричний привід з асинхронним двигуном. В них частота обертання ротора відстає від частоти обертання магнітного поля на статорі.

Їх переваги – висока надійність, дешевизна, простота конструкції, простота системи пуску, можливість працювати певний час з значним перевантаженням та ін.



Частота обертання вала
двигуна залежить від частоти
живлячого струму і від кількості
пар полюсів. Наприклад, для
двигуна з однією парою полюсів
при частоті перемінного струму
50Гц частота обертання складає
3000 об/хв (60об/с); для двигунів з
трьома парами полюсів – 1000
об/хв.

Але це так звані синхронні частоти
обертання. Дійсна ж частота
обертання буде залежати ще й від
фактично діючого крутного
моменту на валу двигуна. Цю
залежність називають **механічною**
характеристикою двигуна
або його **моментно-
частотною**
характеристикою.



Для стандартних двигунів ця характеристика є відомою з технічної характеристики. Наприклад, для АОЛ2-22-6:

6

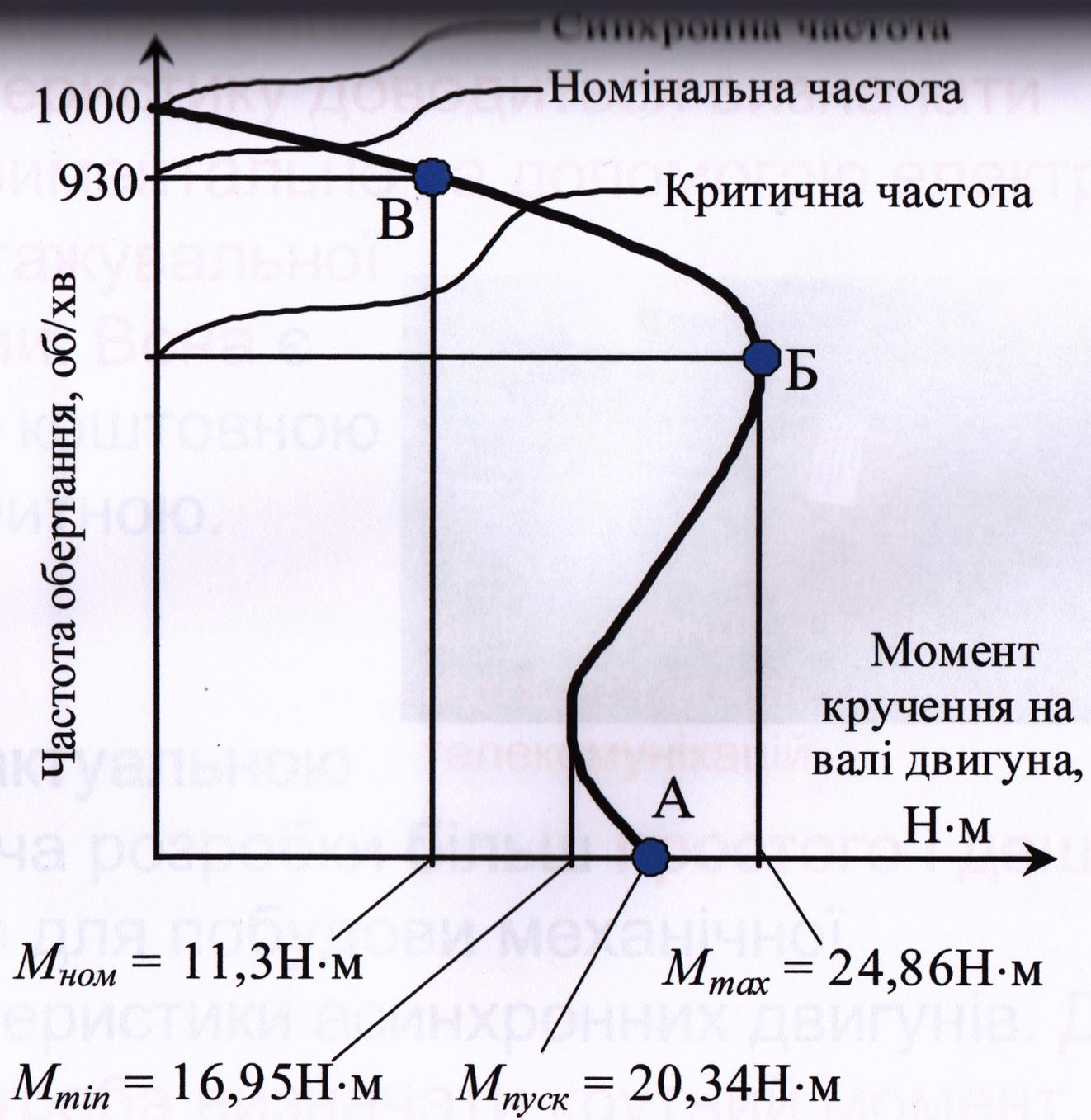
Типорозмір двигуна	Потужн., кВт	Ковзання ном., %	КПД, %	cos φ	Ммакс/Мном	Ммин/Мном	Мп/Мном	Іп/Іном
АОЛ2-22-6 уз	1,1	7,00	76,0	0,73	2,20	1,5	1,80	6,5

$$M_{\text{ном}} = \frac{N, \text{Вт}}{\omega, \text{рад/с}} = \frac{1100}{930 \cdot \frac{\pi}{30}} \approx 11,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{max}} = 2,2 \cdot M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 11,3 \text{ Н} \cdot \text{м} = 24,86 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{min}} = 1,5 \cdot M_{\text{ном}} = 1,5 \cdot 11,3 \text{ Н} \cdot \text{м} = 16,95 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{пуск}} = 1,8 \cdot M_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 11,3 \text{ Н} \cdot \text{м} = 20,34 \text{ Н} \cdot \text{м}$$



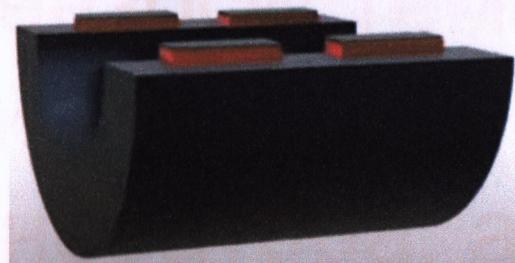
Але у деяких випадках механічну характеристику доводиться визначати експериментально за допомогою електричної навантажувальної системи. Вона є доволі кошовною і габаритною.



Зразок стенда на кафедрі автоматики, електроніки та телекомунікацій

Тому актуальною є задача розробки більш простого і дешевого стенда для побудови механічної характеристики асинхронних двигунів. Для цього треба визначати крутний момент.

Фрагменти магнітного
напилювання на
поверхні валу



Котушки індуктивності

Найбільш популярним на теперішній час датчиком крутного моменту є датчик з магнітоеластичним (магніторестриктивним) сенсором. Вони є компактними, приймальна частина сенсора є нерухомою, що полегшує її сполучення з контролером. Але ціна промислових зразків таких датчиків є досить великою !!!

Нами було запропоновано для побудови механічної характеристики двигуна контролювати крутний момент за допомогою тензосистеми, частоту обертання визначати з використанням тахогенератора, а двигун навантажувати колодковим гальмом з гвинтовим притисканням

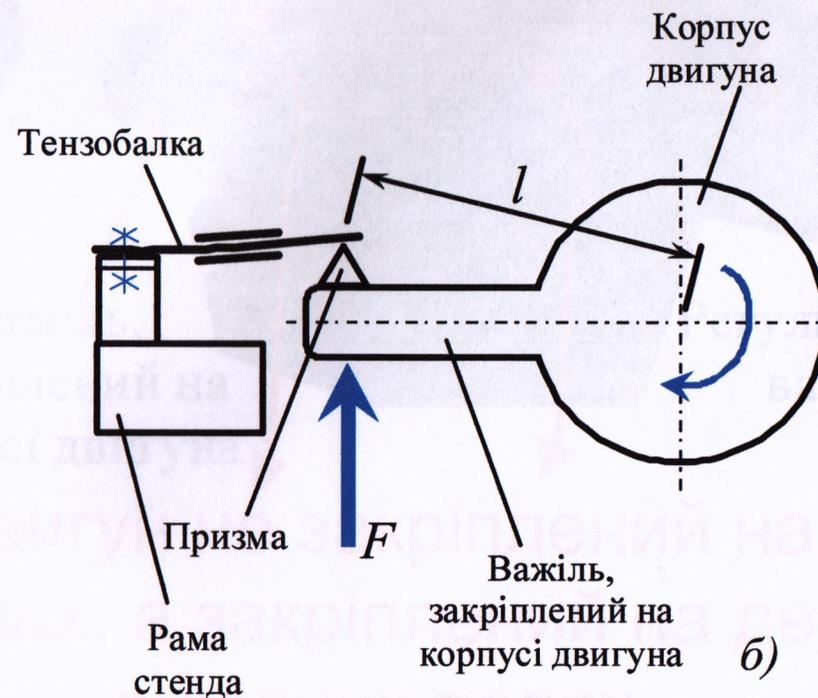
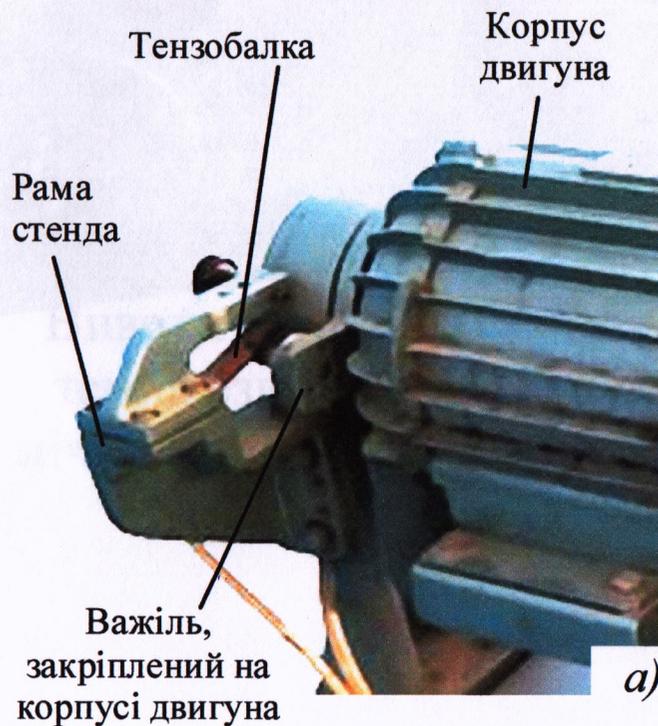
Вахіль,
закріплений на
корпусі двигуна

Резь
степця

Вахіль,
закріплений на
корпусі двигуна

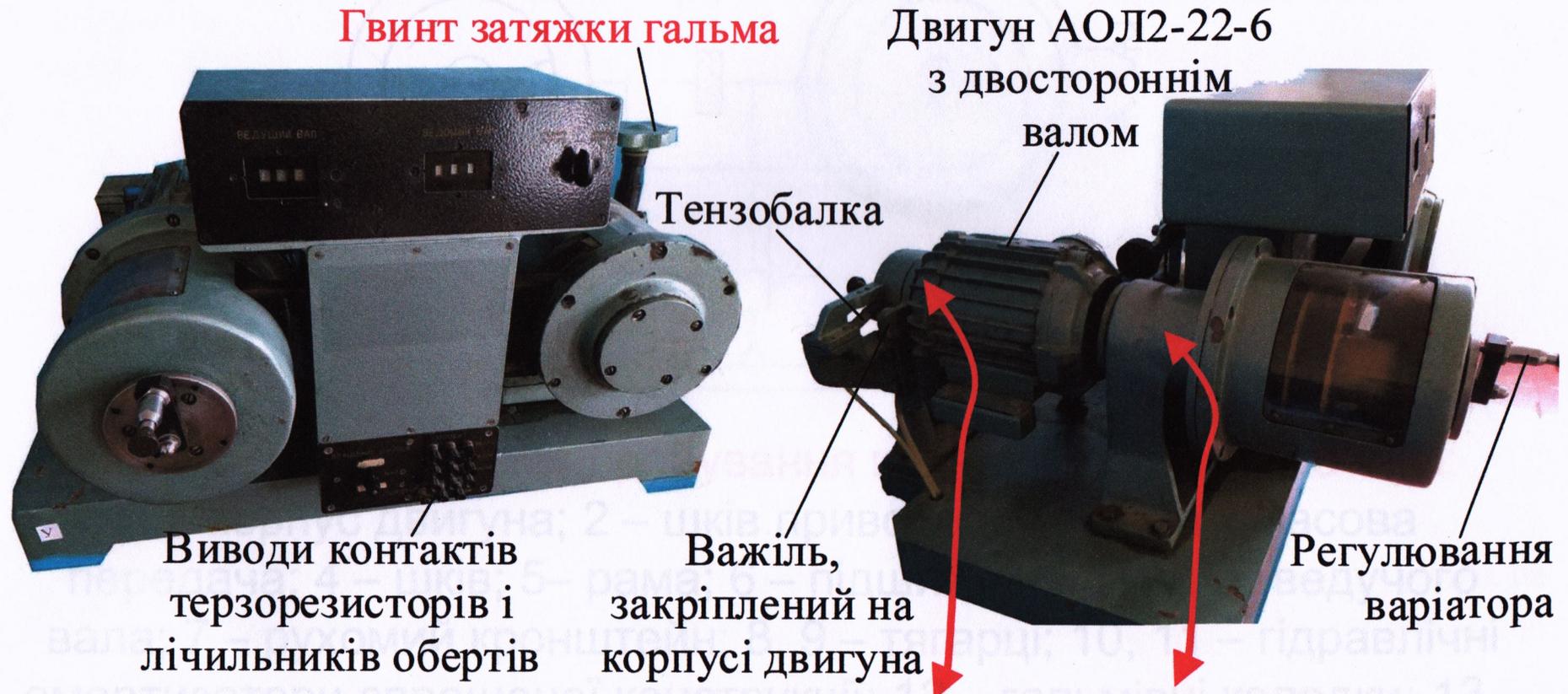
б)

Найбільш простою, дешевою і надійною у виконанні була б вимірювальна система, в якій корпус двигуна не закріплюється жорстко на рамі, а може вільно обертатися навколо валу. Фіксувати ж його від обертання повинен тензодатчик у вигляді пружної пластини з наклеєними на ній тензорезисторами.



На кафедрі галузевого машинобудування та мехатроніки нашого Університету є установка для дослідження клинопасового варіатора

12



Двигун не закріплений на лапках, а закріплений на двох вихідних валах

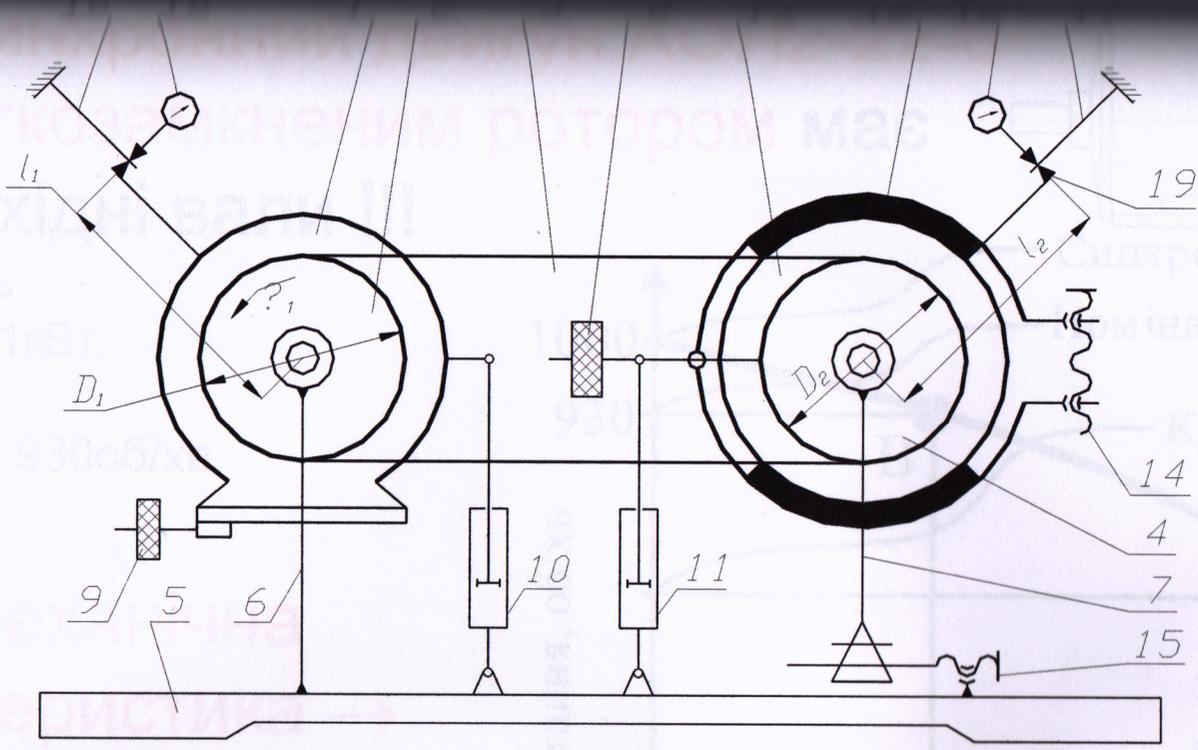
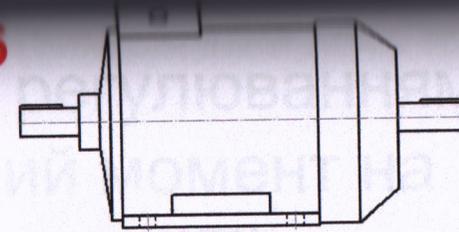


Схема стенда для випробування клинопасового варіатора:

- 1 – корпус двигуна; 2 – шків приводний; 3 – клинопасова передача; 4 – шків; 5 – рама; 6 – підшипникові опори ведучого вала; 7 – рухомий кронштейн; 8, 9 – тягарці; 10, 11 – гідравлічні амортизатори спрощеної конструкції; 12 – гальмівні колодки; 13 – барабан; 14 – гвинт ручної затяжки гальм; 15 – натяг клинопасової передачі; 16, 17 – тензобалки, 18 – годинникові індикатори; 19 – призма

Тут асинхронний двигун АОЛ2-22-6 з короткозамкненим ротором має



два вихідні вали !!!

Потужність двигуна 1,1кВт, частота обертання 930об/хв.

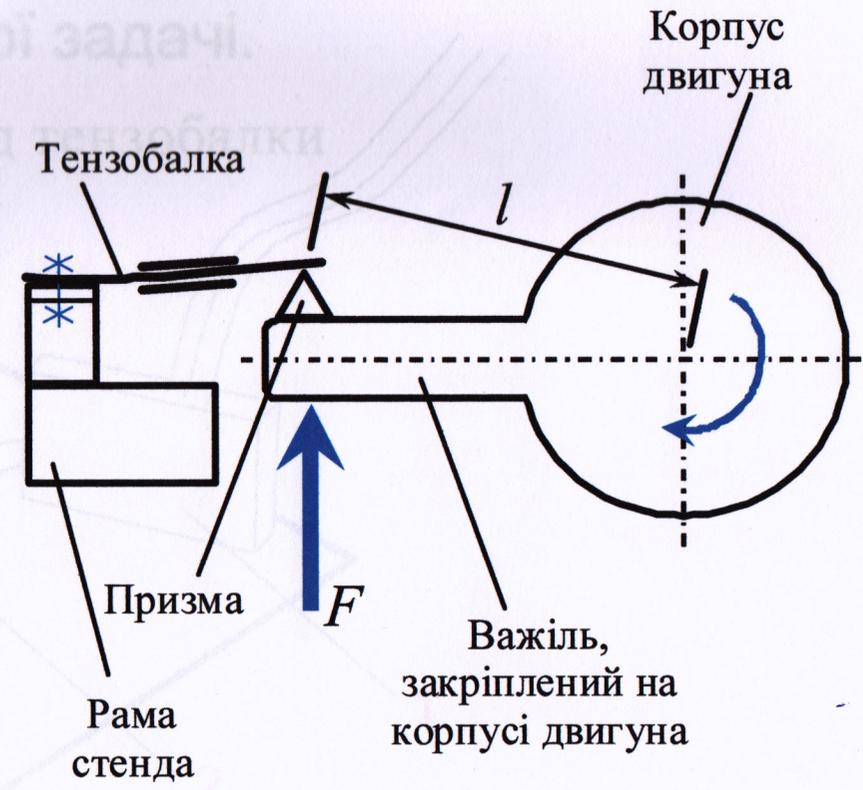
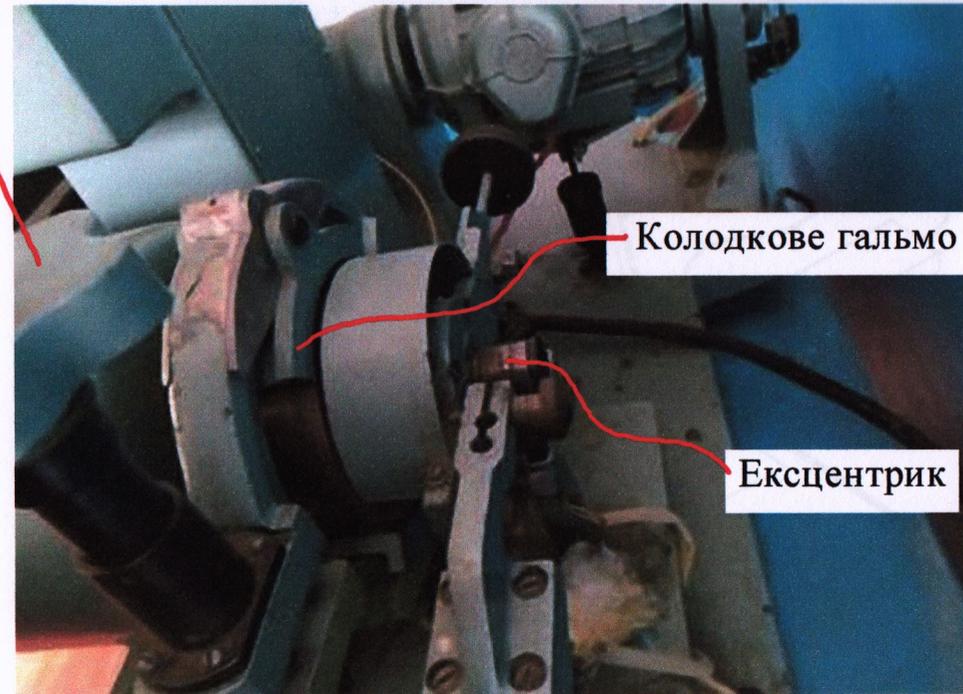
Його механічна характеристика →

Якщо ж необхідна експериментальна побудова характеристики, то треба мати координати точок А, Б, В



Регулювання навантаження на двигун здійснювалось колодковим гальмом з регулюванням за допомогою гвинта. Фактичний діючий момент на двигуні визначався за величиною зусилля " F ", що діє на довжині плеча " l "

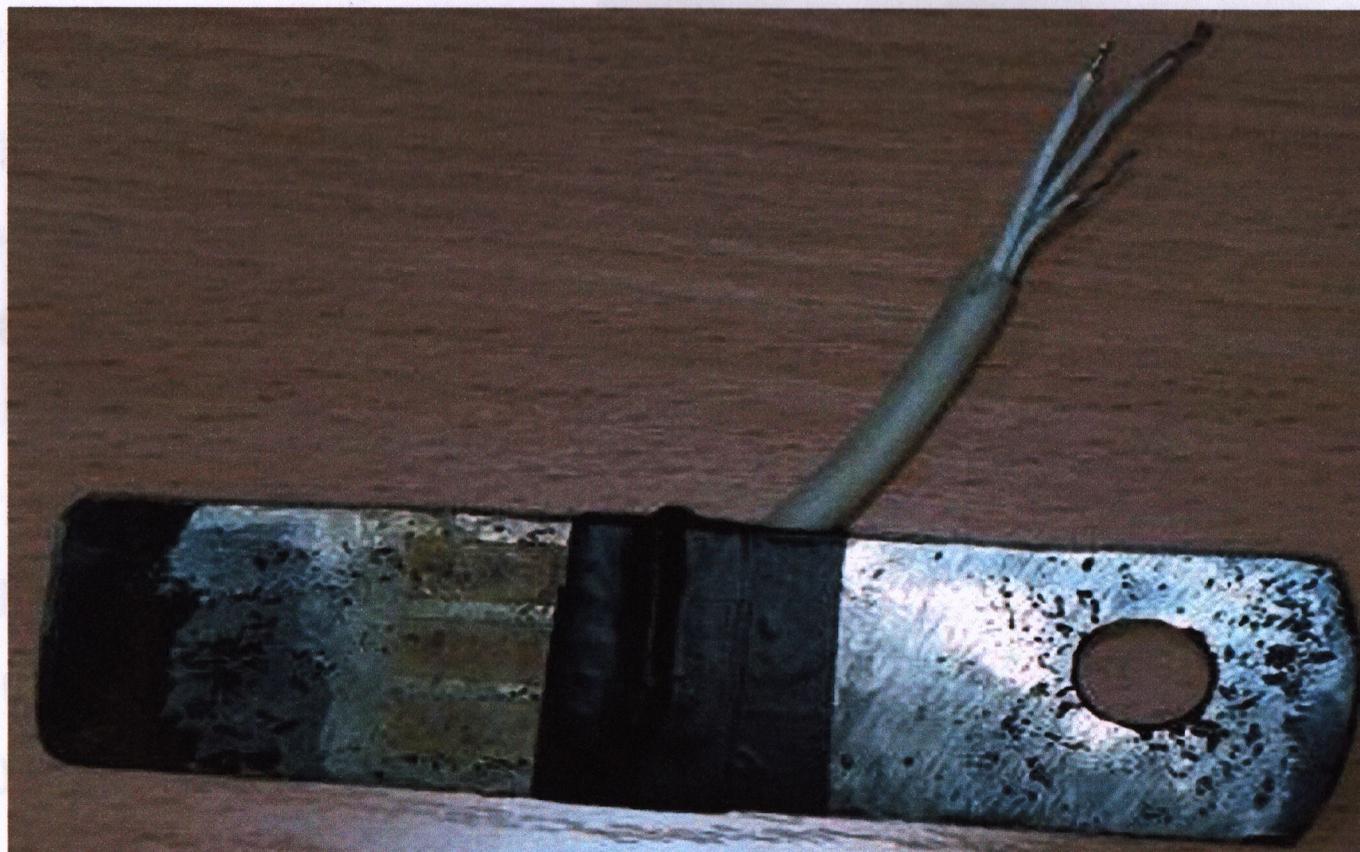
Маховичок гвинтового регулювання натягіння гальма



Використано одноканальний виготовлений власноруч **тензопідсилувач** на інтегральній мікросхемі, **аналогово-цифровий перетворювач (АЦП)** та **ЕОМ з СОМ-портом**. Зв'язок з ЕОМ через СОМ-порт позбавляє необхідності писати програму-драйвер для пристрою. АЦП у даній комплектації виконує 1050 замірів за секунду; цього цілком достатньо для поставленої задачі.

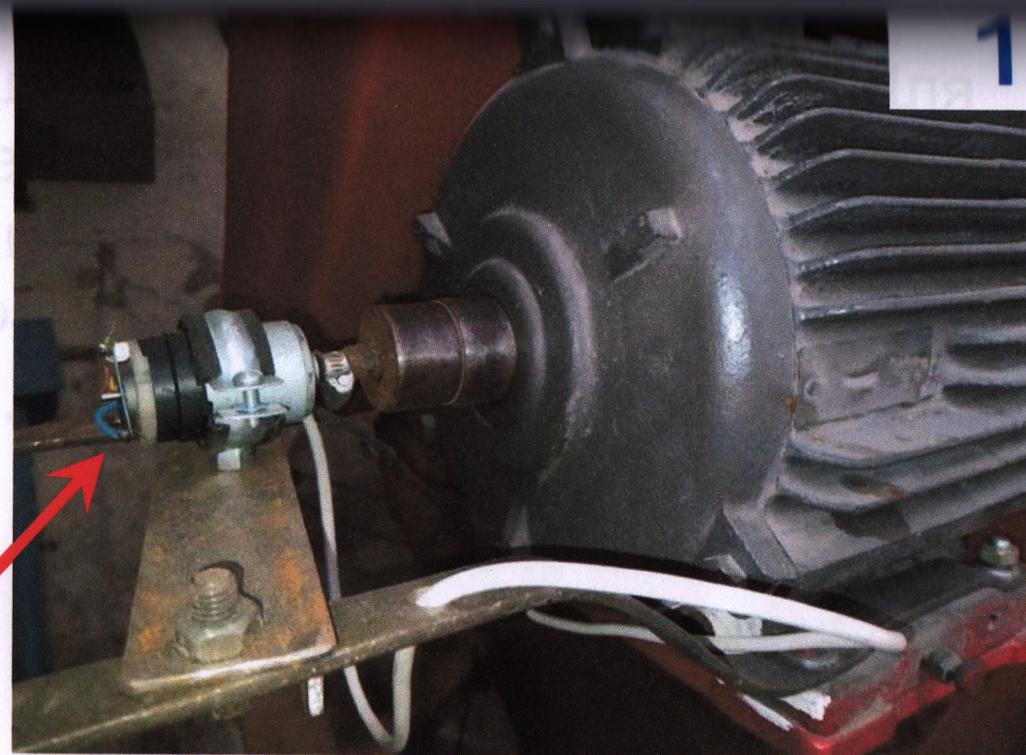


Тензобалку виготовлено з полотна механічної пилки. Матеріал полотна – швидкоріжуча сталь з маркуванням «Р» (рапід; Rapid - швидкий). Використано дровові тензорезистори опором 100 Ом кожний, по три штуки з кожного боку; з'єднання за напівмостовою схемою.



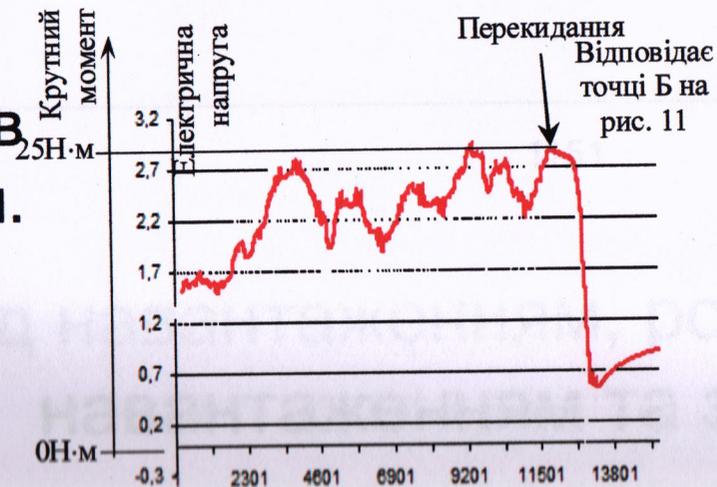
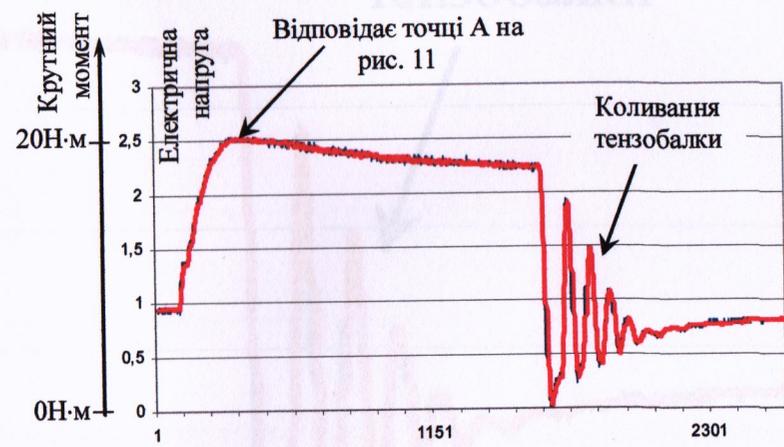
У наявній конструкції стенда передбачено визначення числа обертів за допомогою контактної пари, ексцентрика, закріпленого на валу, і контролера. Це не зручно, оскільки не дозволяє контролювати частоту обертання в динаміці.

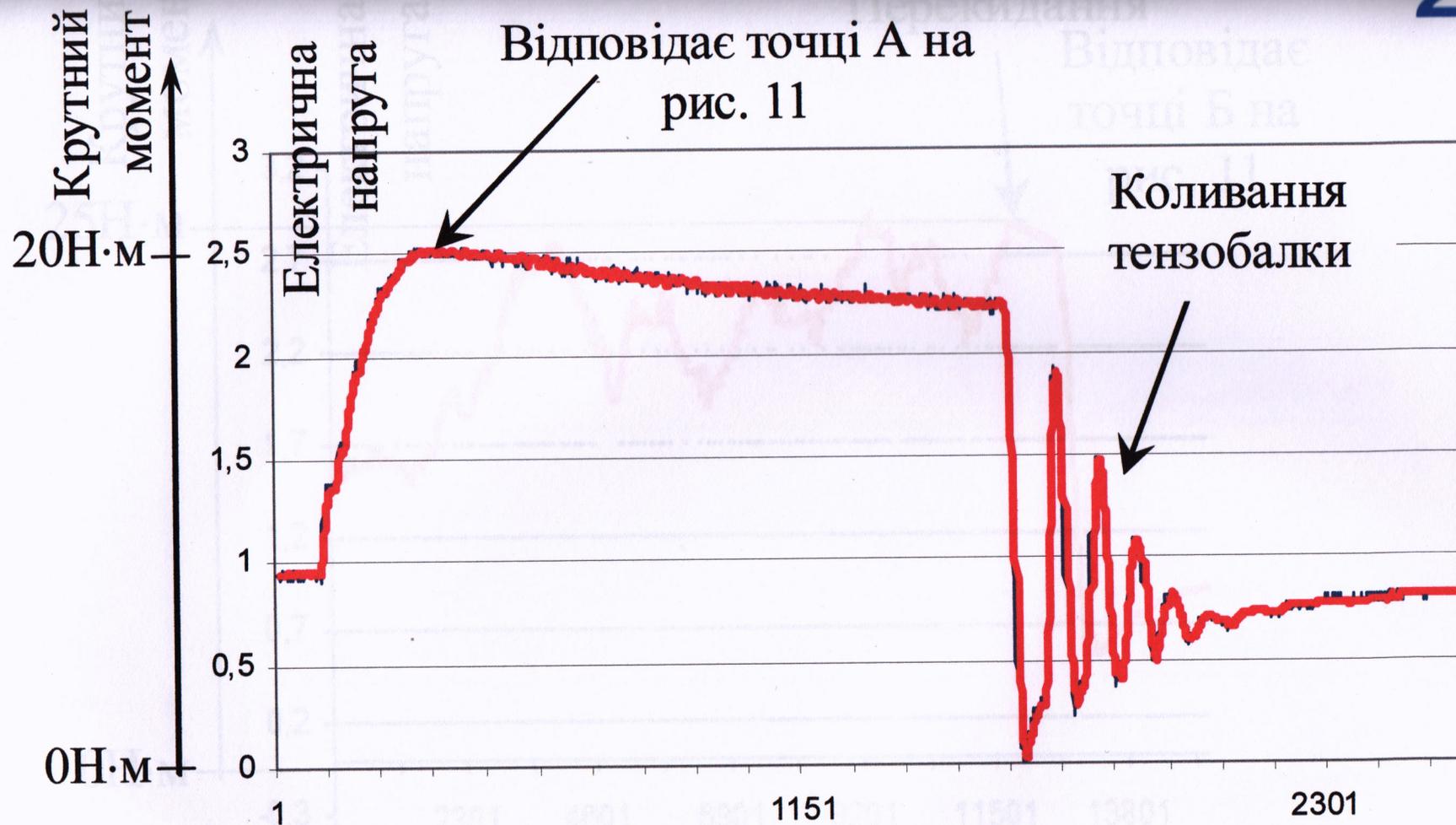
Нами запропоновано застосувати тахогенератор постійного струму для контролю частоти обертання.



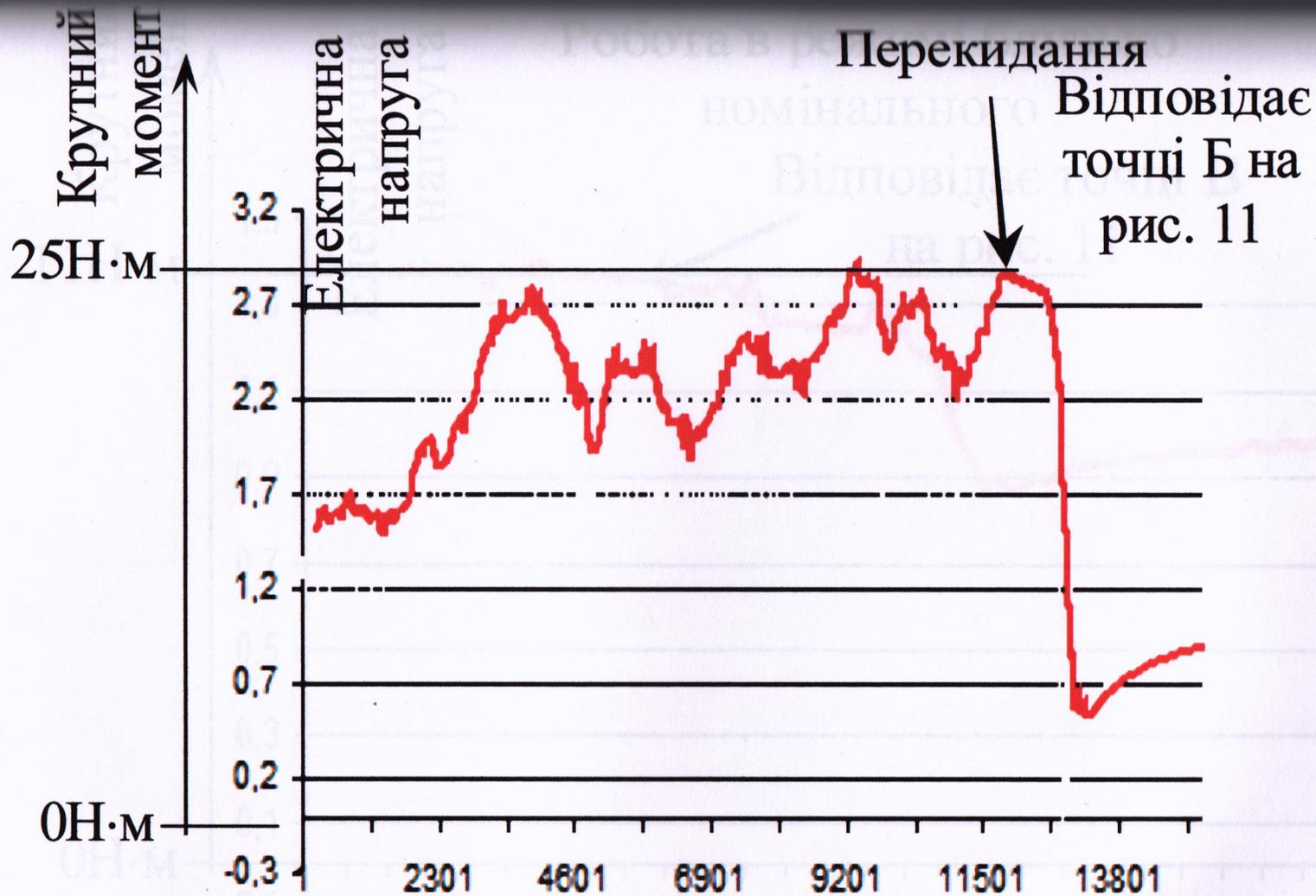
Електрична напруга, що генерується тахогенератором, сягає 12В. Це забагато для АЦП, що застосовується. Для корегування (зниження) електричної напруги застосовано потенціометр налаштований таким чином, щоб електрична напруга у колі “тахогенератор-АЦП” у режимі підіймання не перевищувала 2,5 В.

Діаграми, записані з використанням тензометричної системи для різних режимів навантаження.





Пуск під навантаженням, робота з великим навантаженням та зупинка

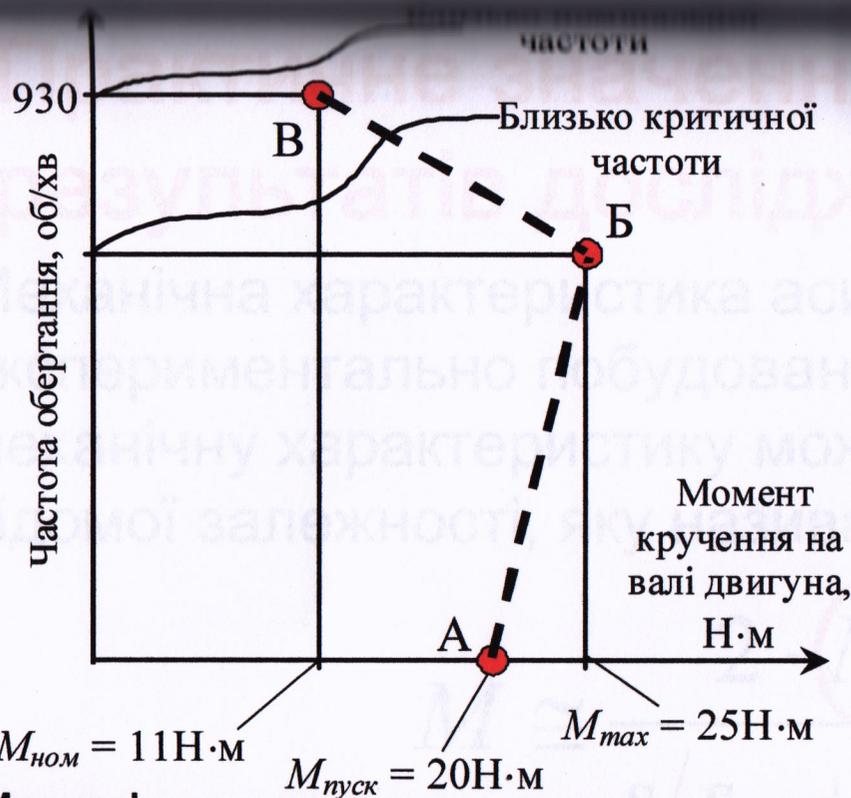


Нетривала робота під великим навантаженням та перекидання при частоті близько 700 об/хв

при частоті близько 930 об/хв



Робота під навантаженням близько номінального при частоті близько 930 об/хв



Механічна характеристика двигуна АОЛ2-22-6, побудована за результатами експериментальних даних



За основними трьома точками діаграми є дуже близькими. Отже, створений стенд і принцип визначення відповідності частоти обертання двигуна від крутного моменту на валу можна застосовувати для побудови механічної характеристики асинхронного двигуна.

Практичне значення застосування результатів дослідження

Механічна характеристика асинхронного двигуна була експериментально побудована у розділі 3 (рис. 3.12). Цю механічну характеристику можна побудувати виходячи з відомої залежності, яку називають формулою Клосса:

$$M \cong \frac{2 \cdot M_k}{s/s_k + s_k/s}$$

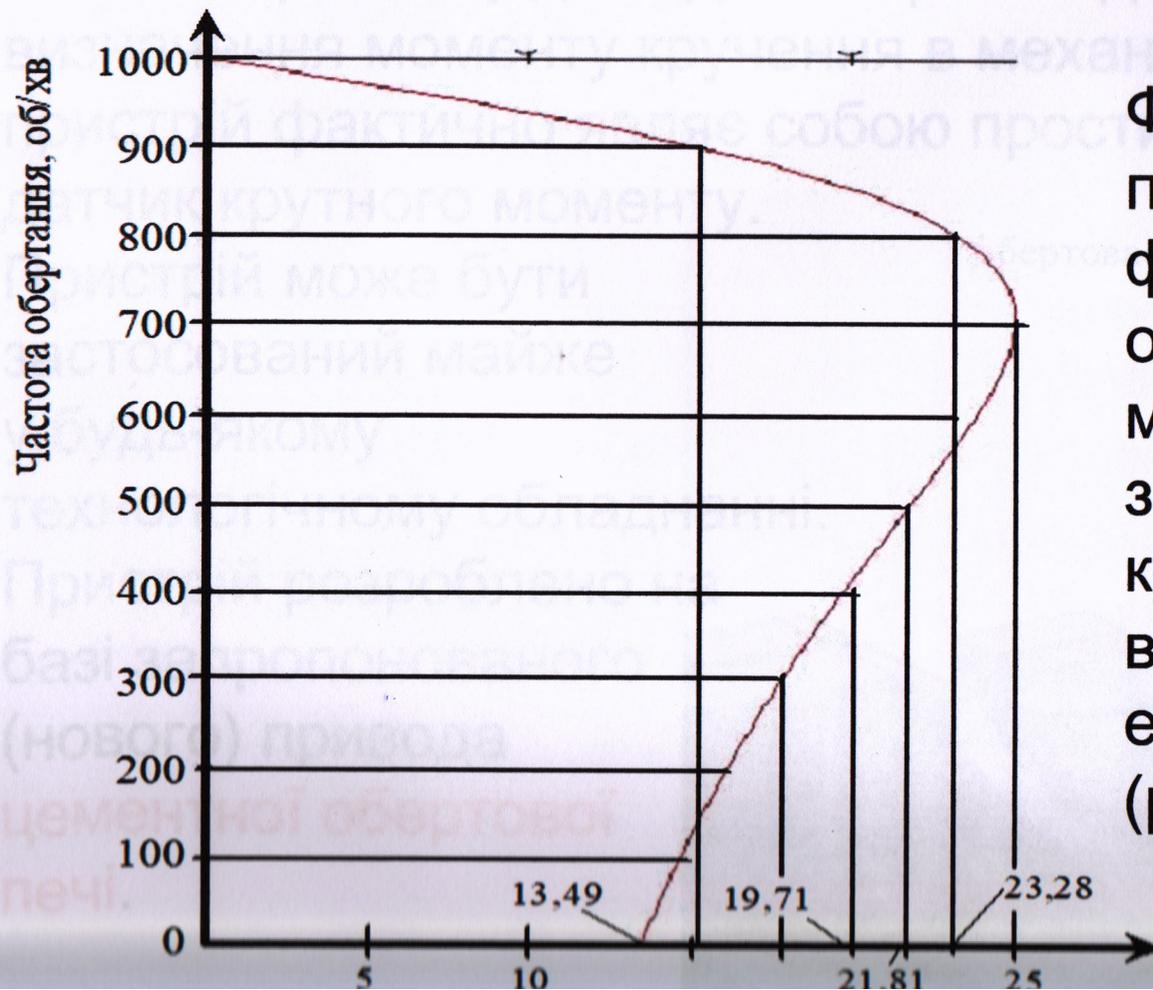
M_k - максимальний момент двигуна (визначено експериментально, Н·м;

s - ковзання, безрозмірна величина;

s_k - критичне ковзання, безрозмірна величина.

Таблиця 4.1. Залежність $M(s)$

s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$n_x = n_1 \cdot (1 - s_x)$	900	800	700	600	500	400	300	200	100	0
$M \cong \frac{2 \cdot M_x}{s/s_x + s_x/s}$	15,28	23,28	24,99	23,84	21,81	19,71	17,8	16,15	14,72	13,49



Форма кривої, побудованої за формулою Клосса (за основними точками) майже ідеально збігається з формою кривої, яка повністю визначена експериментально (рис. 3.12).

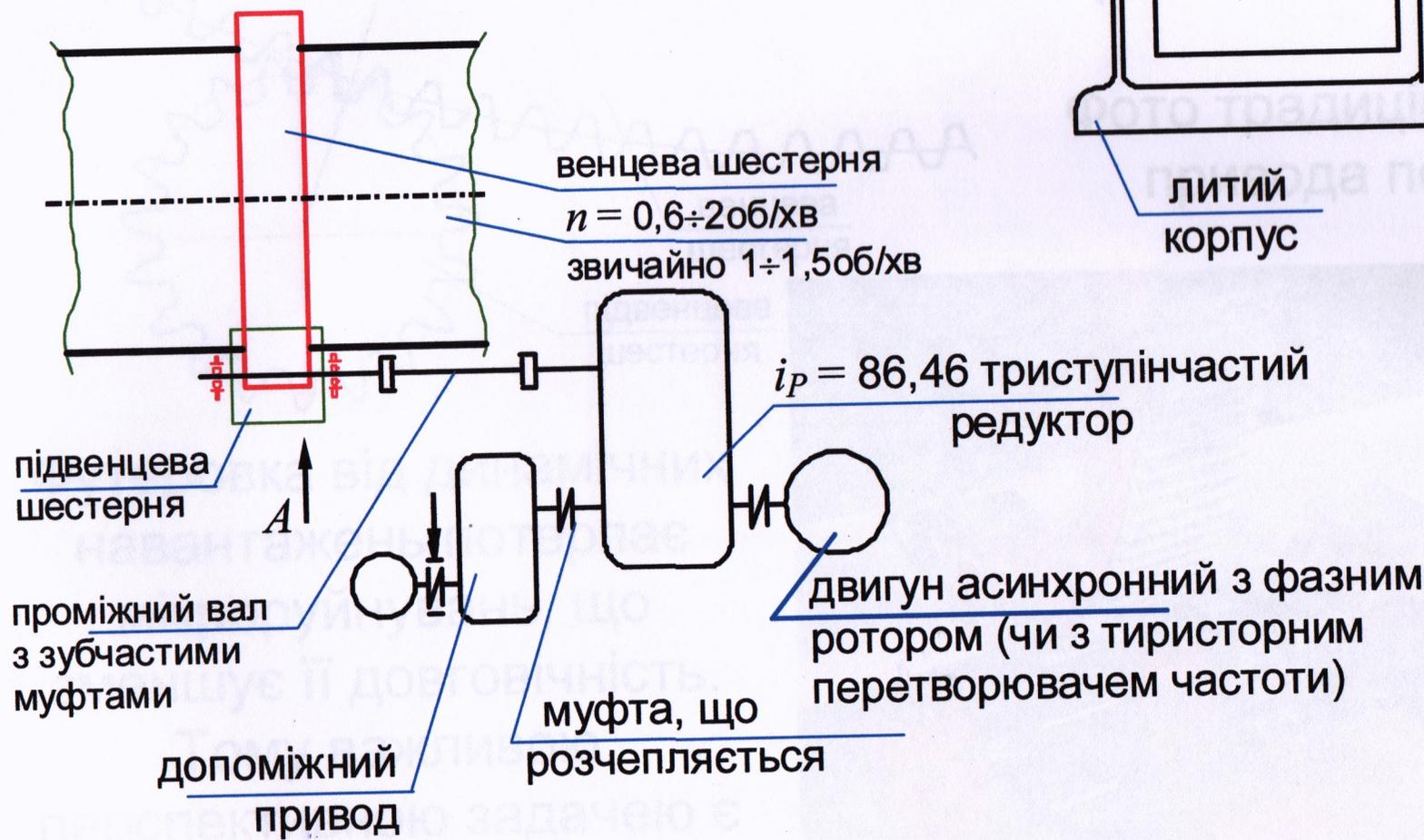
Варіант застосування результатів дослідження для технологічного обладнання

У магістерському дослідженні розглядається пристрій для визначення моменту кручення в механічних приводах. Цей пристрій фактично являє собою простий і надійний датчик крутного моменту.

Пристрій може бути застосований майже у будь-якому технологічному обладнанні.

Пристрій розроблено на базі запропонованого (нового) привода **цементної обертової печі**.





Традиційний привод печі

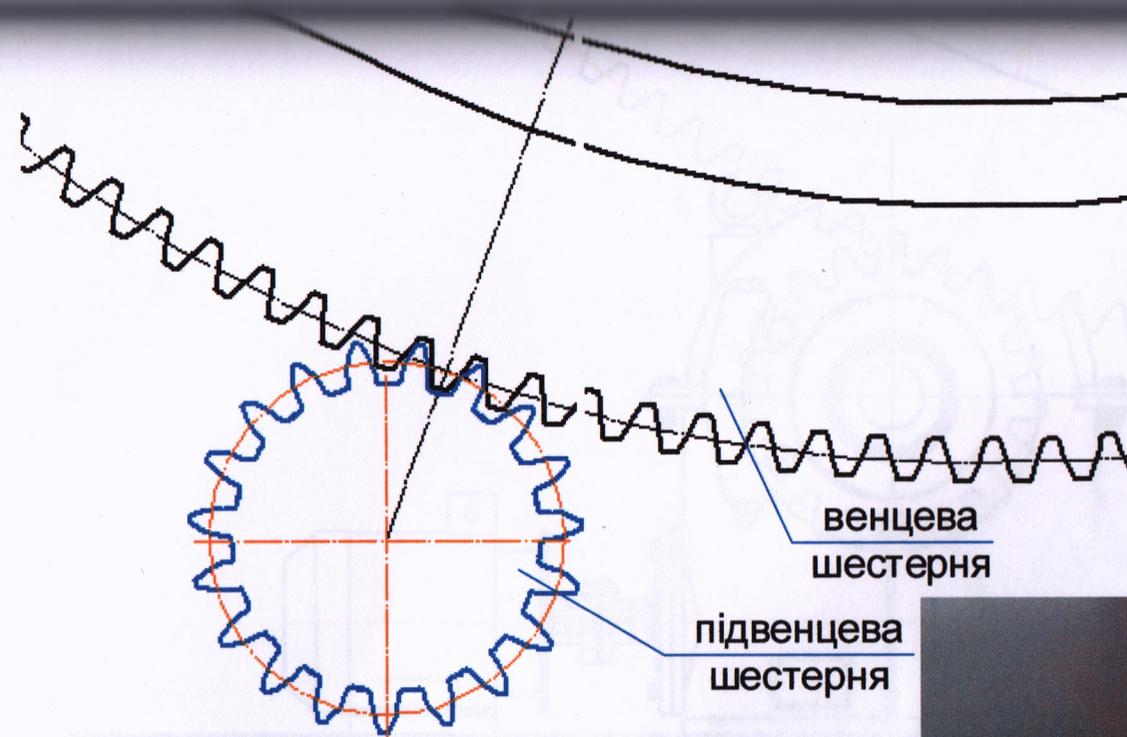
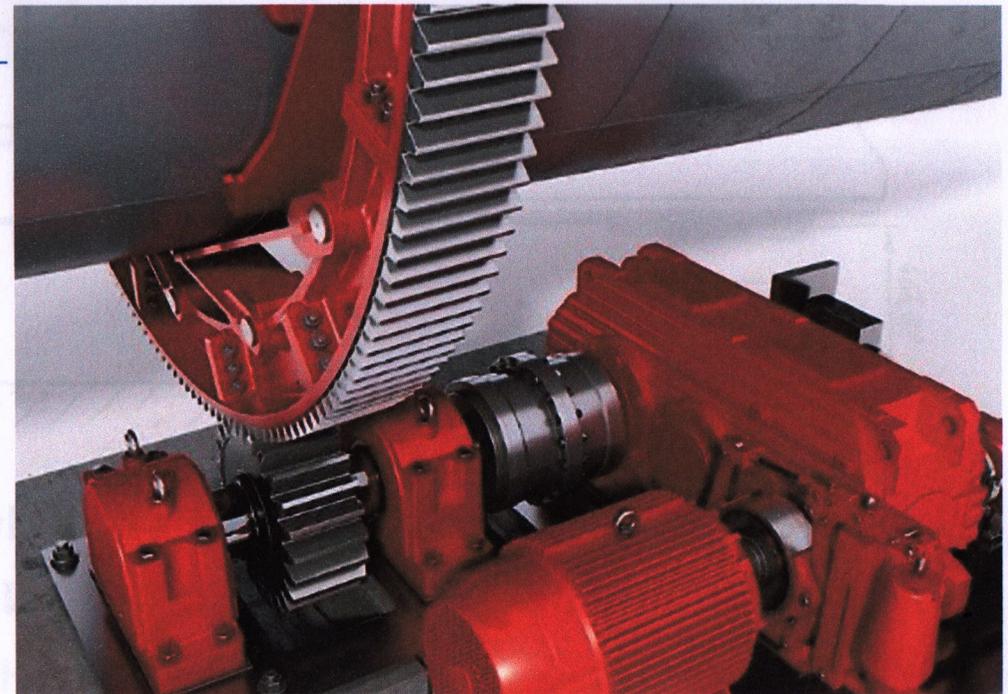
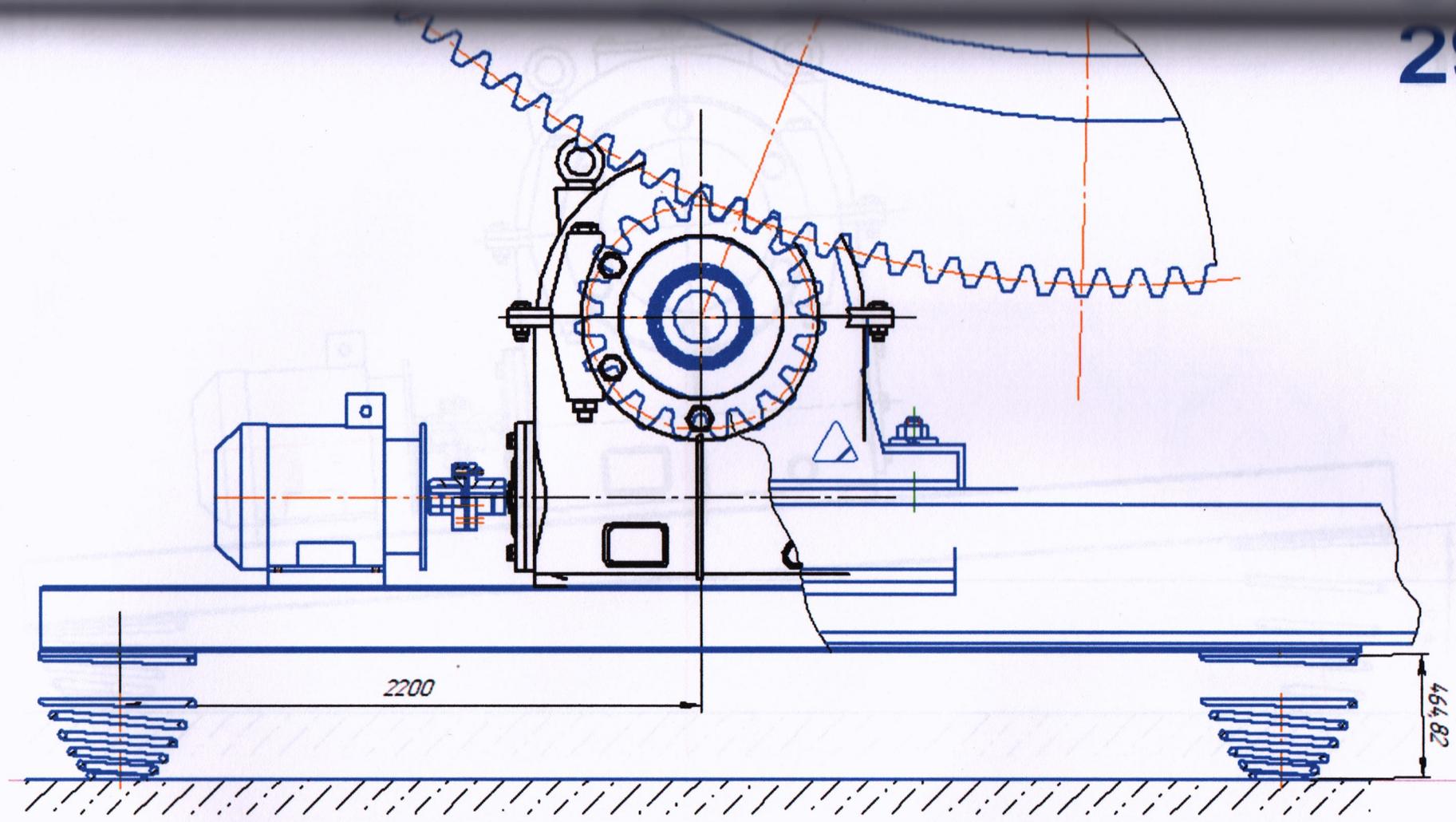


Фото традиційного привода печі

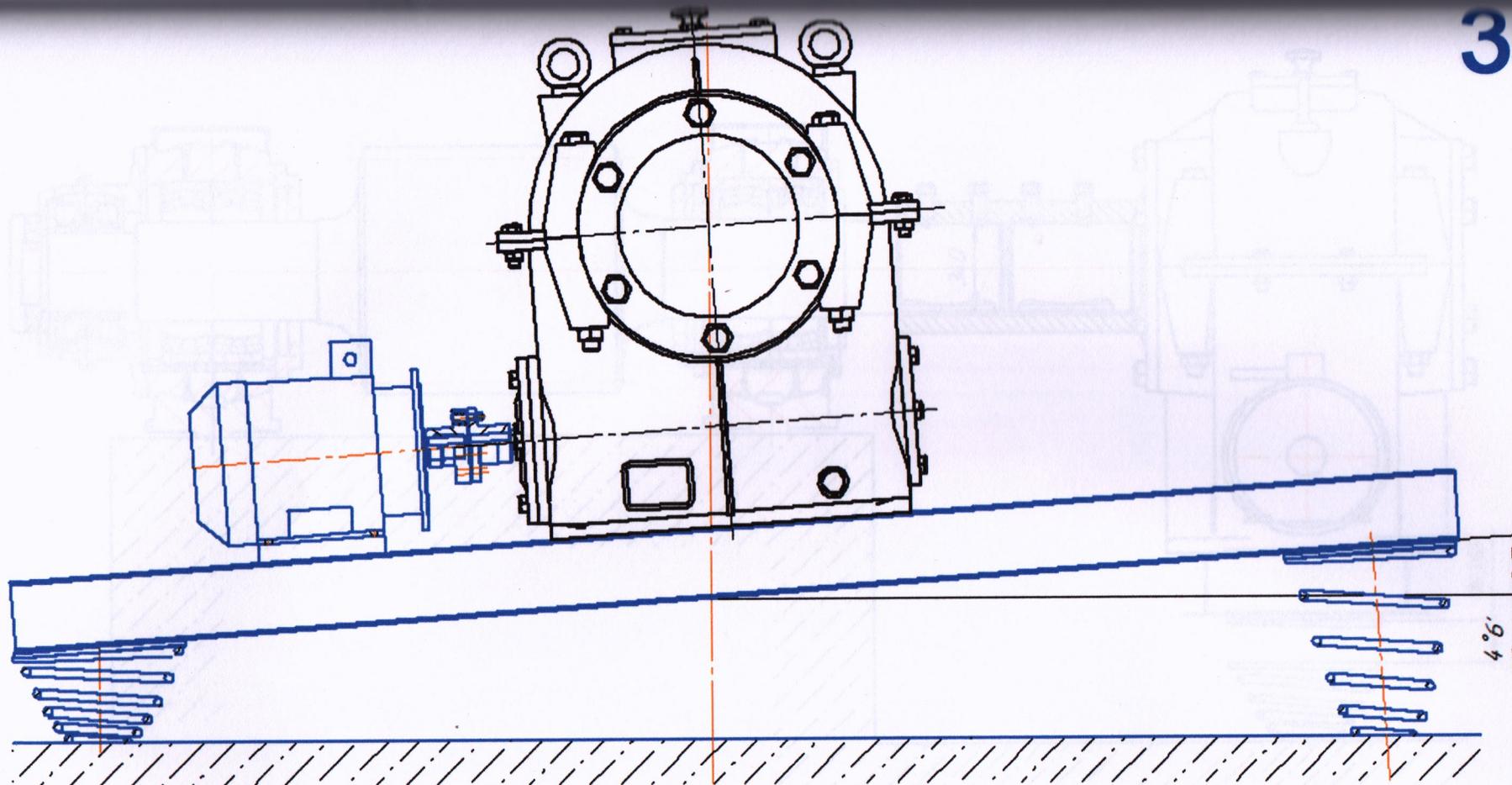
Футеровка від динамічних навантажень потерпає мікроруйнувань, що зменшує її довговічність.

Тому важливою перспективною задачею є зменшення динамічних навантажень від привода.

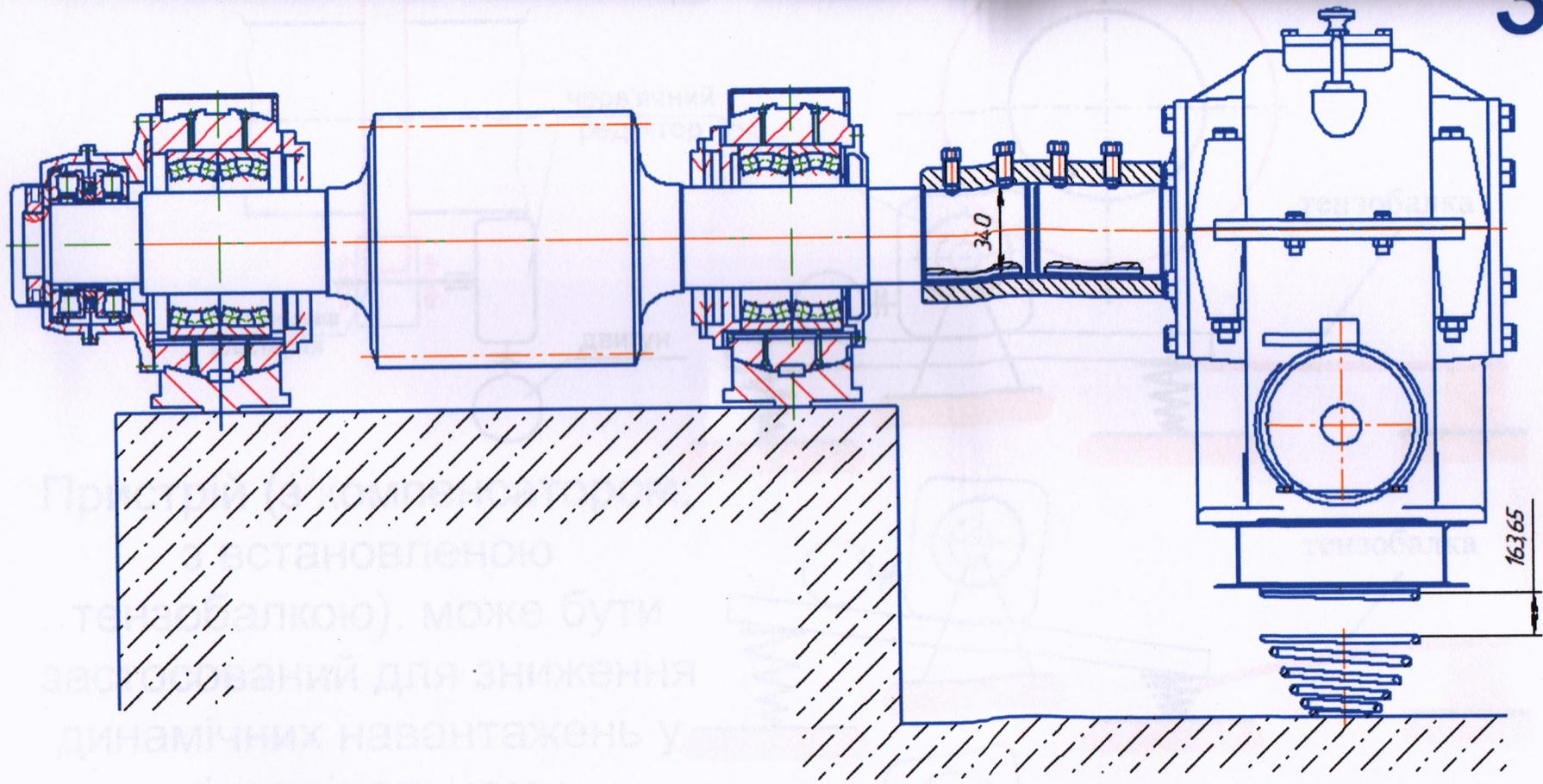




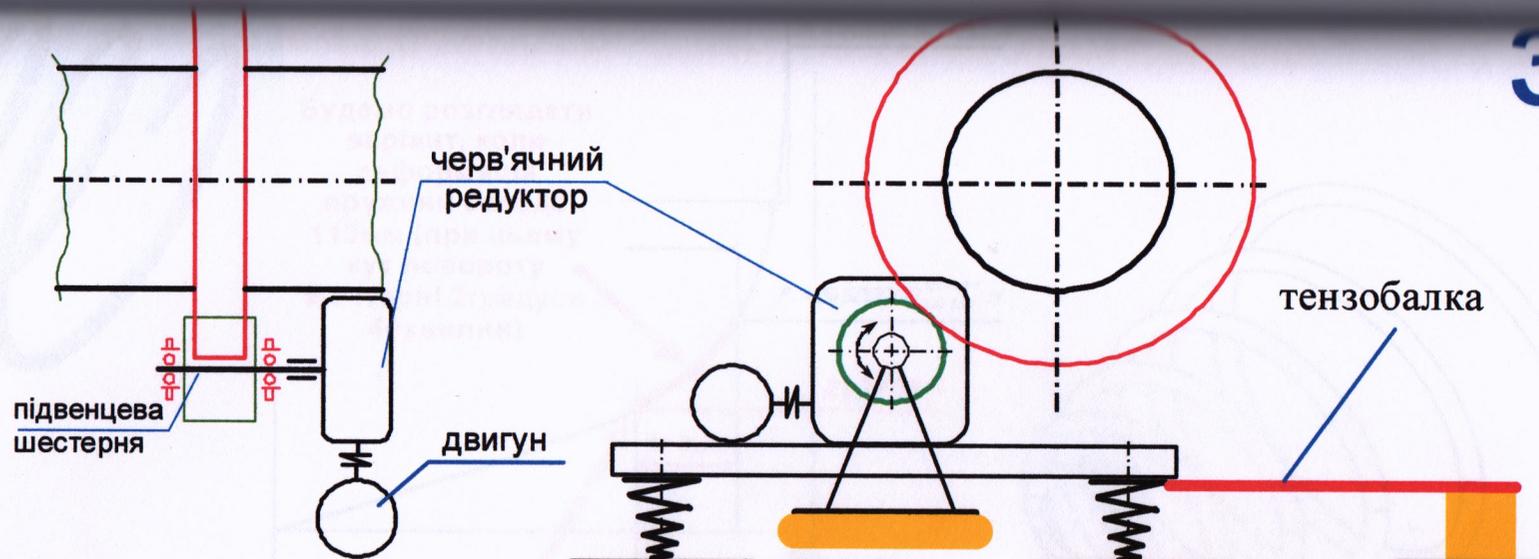
Нами запропоновано систему згладжування динамічних навантажень привода у вигляді рами, закріпленої на параболоїдних пружинах



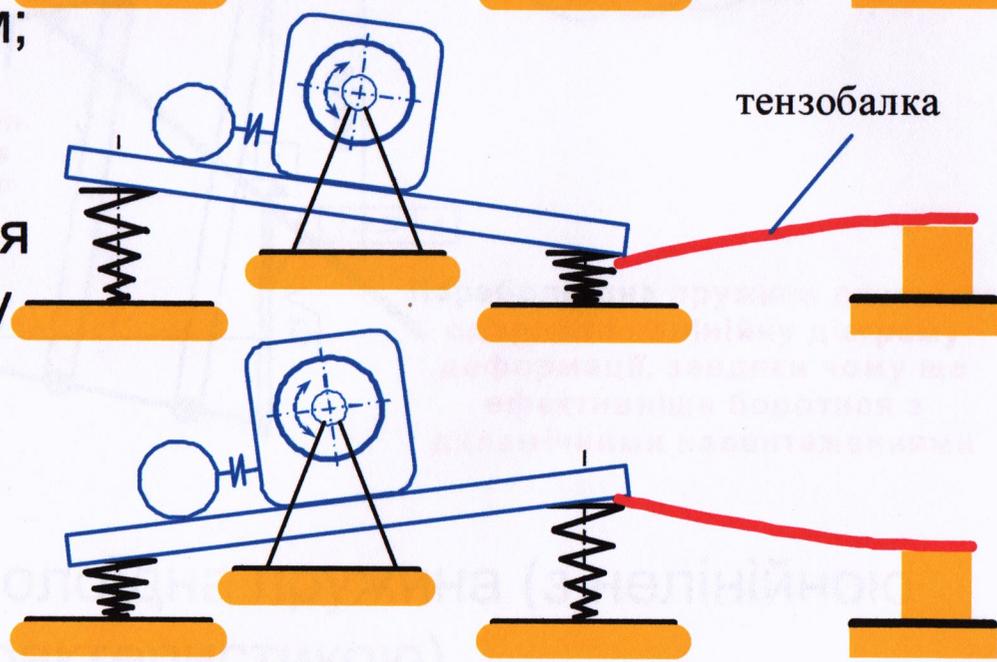
Ескіз запропонованої системи згладжування динамічних навантажень привода у вигляді рами, закріпленої на параболоїдних пружинах

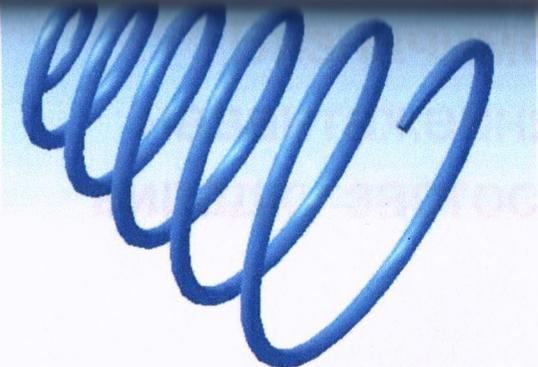


Ескіз запропонованої системи згладжування динамічних навантажень привода у вигляді рами, закріпленої на параболоїдних пружинах

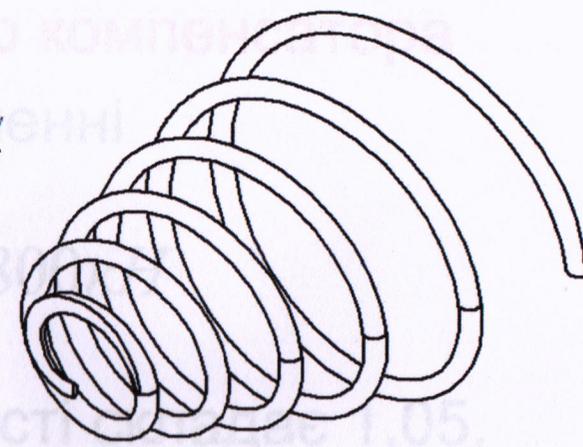


Пристрій (з компенсатором;
з встановленою
тензобалкою). може бути
застосований для зниження
динамічних навантажень у
відповідальному
обладнанні- приводі
цементної печі, і може
одночасно для контролю
крутного моменту на
приводі.





Будемо розглядати варіант, коли деформація пружини складе 113мм (при цьому кут повороту шестерні 2градуси 40хвилин)



Ця деформація відповідає дотиканню зубців

Параболоїдна пружина дозволяє одержати нелінійну діаграму деформації, завдяки чому ще ефективніше боротися з динамічними навантаженнями

Розроблена параболоїдна пружина (з нелінійною характеристикою)

Визначимо, наскільки зменшиться динамічне навантаження, що виникає на зубцях зачеплення у випадку застосування запропонованого компенсатора

Статична сила в зачепленні

$$P = \frac{M_{кр}}{r_{ділильн}} = \frac{1200кН \cdot м}{0,428м} = 2800кН$$

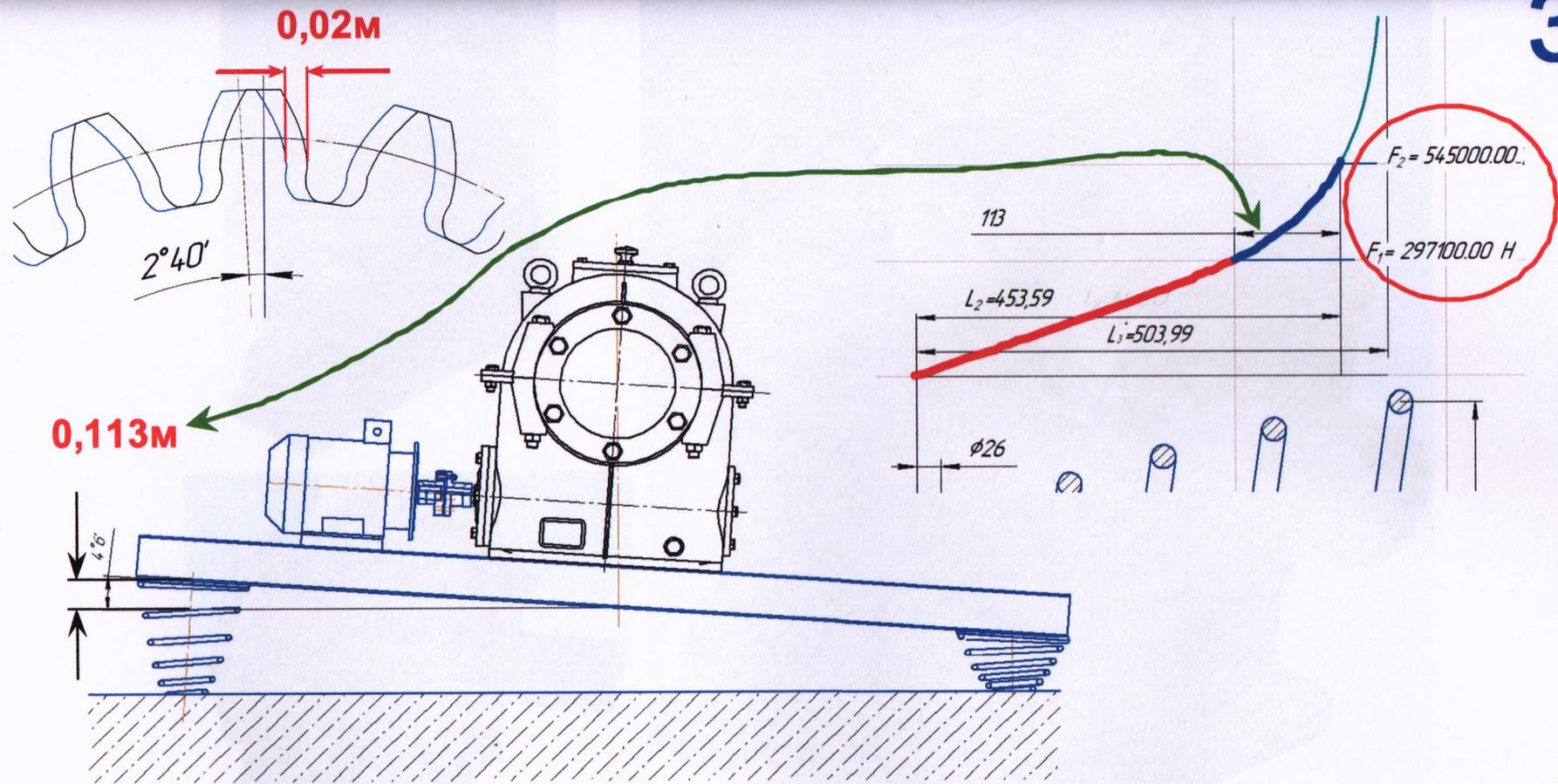
Вважаючи, що коефіцієнт динамічності складає 1,05, розрахуємо динамічне зусилля:

$$P_{дин} = 2800кН \cdot 0,05 = 140кН$$

Знайдемо динамічне зусилля у випадку демпфування запропонованим пристроєм:

$$P_{дин.демф} = 140кН \cdot \frac{297100}{545000} = 76кН$$

тут 297100Н і 545000Н – зусилля із діаграми пружини.



Отже, динамічне зусилля зменшується майже вдвічі (і це не залежить від обраного з таблиці коефіцієнта динамічності).



Додатково, у запропонованому приводі замість великого за габаритами і важкого циліндричного редуктора застосовано черв'ячний редуктор на той же крутний момент і передаточне число

1. Запропоновано для побудови механічної характеристики електричного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначати крутний момент, застосовуючи стенд з тензобалкою, закріпленою на рамі стенда.
2. Запропоновано для побудови механічної характеристики електричного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначати поточну частоту обертання двигуна, застосовуючи тахогенератор постійного струму.
3. Розроблено та реалізовано на лабораторному обладнанні кафедри стенд для експериментальної побудови механічної характеристики двигуна. Проведені дослідження на двигуні з відомими характеристиками підтверджують можливість застосування створеного стенда.
4. За визначеним експериментально максимальним крутним моментом побудовано механічну (моментно-частотну) характеристику асинхронного двигуна за формулою Клосса. Моментно-частотні характеристики (побудована виключно експериментальним шляхом та побудована за формулою Клосса) майже ідентичні.

Висновки

- 5.** Використаний принцип визначення крутного моменту може бути застосовано у інших дослідженнях механічного обладнання. Як приклад застосування розглянуто оригінальний (запропонований нами) привод обертової цементної печі з пружним компенсатором. Запропонований компенсатор забезпечує суттєве зменшення динамічних (ударних) навантажень на корпус печі. Конструкція компенсатора дозволяє застосовувати тензометричну апаратуру для визначення і поточного контролю крутного моменту, що передається на корпус печі.
- 6.** Виконано приклад розрахунку привода обертової цементної печі і вала-шестерні відкритої зубчастої передачі.



ДИПЛОМ II СТУПЕНЯ

нагороджується

Левченко Роман Іванович

студент
Національного університету
«Полтавська політехніка»

переможець II етапу
Всеукраїнського творчого конкурсу
наукових робіт
«Процеси та обладнання машинобудівних
виробництв»
за спеціальністю
131 «Прикладна механіка»

Голова галузевої конкурсної комісії,
доктор технічних наук,
професор, проректор
з науково-педагогічної роботи
Центральноукраїнського національного
технічного університету



Андрій
КИРИЧЕНКО

14 грудня 2023

За результатами дослідження була підготована наукова робота, яка отримала призове місце на Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт у 2023 році