

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка моделі мотор-компресора типу ХКВ

Назва теми

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Шифр, назва


Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Шифр, назва

Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

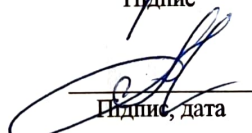
Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група МБм-23-1

  
Підпис

Малярук Ю.С.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

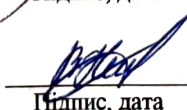
проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

доц. Тимошук  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

  
Підпис, дата

доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

17 .. 12 2024 р.

Хмельницький 2024


# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»  
Шифр і назва  
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»  
Шифр і назва  
Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

 12 .2024р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Малярук Юрій Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка моделі мотор-компресора типу ХКВ

керівник роботи д.т.н., проф. Поліщук О.С.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики мотор-компресора типу ХКВ та холодильного обладнання

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Технологічні умови експлуатації та конструктивні особливості мотор-компресорів. 2. Конструктивні особливості мотор-компресора побутового холодильника. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність мотор-компресора та дослідження його кінематичних і динамічних характеристик. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Розробка моделі МК. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Моделі мотор-компресорів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 3. Мотор-компресор фреоновий герметичний. Складальне креслення (A1). Аркуш 4. Схема компресійного агрегату. Документ ілюстраційний (A2)+Побутовий холодильник. Схема електрична (A2). Аркуш 5. Модель мотор-компресора. Документ дослідницький (A1). Аркуш 6. Розробка моделі МК. Результати розрахунків (A1). Аркуш 7. Розробка моделі МК. Документ дослідницький (A1). Аркуш 8. Розробка моделі МК. Результати розрахунків. Аркуш 9. Розробка моделі МК. Документ дослідницький.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Технологічні умови експлуатації та конструктивні особливості мотор-компресорів	до 29.10.24р.	
2. Конструктивні особливості мотор-компресора побутового холодильника	до 13.11.24р.	
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність мотор-компресора та дослідження його кінематичних і динамічних характеристик	до 18.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент

  
Підпис

Ю.С. Малярук  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

О.С. Поліщук  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1. Прізвище, ім'я та по батькові \_\_\_\_\_

Малярук Юрій Сергійович

2. Тема магістерської роботи Розробка моделі мотор-компресора типу ХКВ

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 9 арк., сторінок записки 79

5. Серед численних побутових приладів, що сприяють полегшенню домашньої праці та підвищенню рівня культури ведення господарства, особливу роль відіграють холодильники. Саме наявність холодильника в домі забезпечує можливість повноцінного і збалансованого харчування свіжими та швидкозамороженими продуктами високої якості. Коректне функціонування холодильника безпосередньо залежить від правильної циркуляції холодоагенту, за яку відповідає компресорна установка. Цей компонент є ключовим елементом конструкції, і у разі його несправності пристрій повністю втрачає свою функціональність. Тому тема магістерської роботи є актуальною. В роботі розроблено модель мотор-компресора типу ХКВ. В першому розділі проведено опис технологічних умов експлуатації та конструктивні особливості мотор-компресорів. В другому описано конструктивні особливості мотор-компресора побутового холодильника. В третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність мотор-компресора та здійснено дослідження його кінематичних і динамічних характеристик.

Підпис студента \_\_\_\_\_

" 17 " 12 20 24 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 3 від " 25 " 12 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК \_\_\_\_\_

Рекомендації ЕК \_\_\_\_\_

Особливі відмітки \_\_\_\_\_




Технічний секретар \_\_\_\_\_

" 25 " 12 20 24 р.

# ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Технологічні умови експлуатації та конструктивні особливості мотор-компресорів	9
1.1	Аналіз конструкції та функціонування мотор-компресора	9
1.2	Характеристики та особливості поршневих компресорів	11
1.3	Конструкція та переваги безсальникових компресорів	14
1.4	Принцип роботи та особливості холодильного компресора	24
1.5	Огляд виробників компресорів для побутової холодильної техніки	25
1.6	Висновки до першого розділу	31
2	Конструктивні особливості мотор-компресора побутового холодильника	32
2.1	Функціональне призначення компресора в побутовому холодильнику	32
2.2	Теоретичні основи роботи мотор-компресора холодильника	35
2.3	Особливості конструкції мотор-компресора в холодильному обладнанні	39
2.4	Компресійна система охолодження побутового холодильника	41
2.5	Електрична схема побутового холодильного обладнання	43
2.6	Висновки до другого розділу	44
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність мотор-компресора та дослідження його кінематичних і динамічних характеристик	45
3.1	Огляд та аналіз можливостей прикладних програм	45
3.2	Аналіз кінематичних і динамічних характеристик механізму машини	48

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	Нодокум.	Підпис	Дата		Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Малярук			Розробка моделі мотор-компресора типу ХКВ для побутового холодильника Пояснювальна записка	М	4	79
Перевір.		Поліщук				ХНУ гр.МБм-23-1		
Н.контр.		Неймак						
Затвер.								

3.3	Розрахунок параметрів кривошипно-кулісного механізму компресора	57
3.4	Розробка моделі кривошипно-кулісного механізму мотор-компресора	62
3.5	Розробка моделі електродвигуна мотор-компресора	67
3.6	Отримані результати моделювання	70
3.7	Висновки до третього розділу	73
	Висновки	75
	Перелік джерел посилання	76
	Додаток А	
	Додаток Б	
	Додаток В	

## ВСТУП

Серед численних побутових приладів, що сприяють полегшенню домашньої праці та підвищенню рівня культури ведення господарства, особливу роль відіграють холодильники [1]. Саме наявність холодильника в домі забезпечує можливість повноцінного і збалансованого харчування свіжими та швидкозамороженими продуктами високої якості. Крім того, це дозволяє рідше відвідувати магазини, закуповувати продукти більшими об'ємами, що сприяє не лише економії часу для домашніх справ, але й зменшенню трудовитрат у сфері торгівлі.

За останні роки було налагоджено масштабне виробництво побутових холодильників - одного з найскладніших пристроїв серед побутової техніки [2]. Однак, щоб забезпечити ефективне вирішення завдань повноцінного харчування населення, поряд із збільшенням обсягів виробництва холодильників, необхідно також визначити їх оптимальні технічні та експлуатаційні характеристики.

Коректне функціонування холодильника безпосередньо залежить від правильної циркуляції холодоагенту, за яку відповідає компресорна установка. Цей компонент є ключовим елементом конструкції, і у разі його несправності пристрій повністю втрачає свою функціональність, перетворюючись на звичайну шафу.

Компресор виконує завдання видалення парів холодоагенту з випарника та нагнітання їх у конденсатор [3]. Цей агрегат є найбільш складним і важливим вузлом холодильного обладнання, від якого залежить його загальна працездатність. Компресор є основним споживачем електроенергії, а його робота впливає на всі економічні показники функціонування холодильника.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		6

Умови роботи компресора холодильного обладнання характеризуються наступними особливостями [4]:

- через змінні зовнішні умови роботи холодильного пристрою компресор функціонує в широкому діапазоні зміни тиску нагнітання та всмоктування з великою різницею між ними;

- робочі фреони легко розчиняються у мастилі, що впливає на робочі процеси компресора;

- пар, який потрапляє в компресор, має низьку температуру і може містити краплі робочої речовини;

- у поршневих компресорах можлива періодична конденсація робочої рідини на внутрішніх стінках циліндра, що призводить до її випаровування;

- робочі холодоагенти мають високу здатність проникати через дрібні шпарини й пори чавунних деталей, що унеможлиблює втрати робочої речовини;

- холодоагенти, що використовуються, мають значний діапазон фізичних і хімічних властивостей.

Вимоги до конструкції мотор-компресора включають [4]:

- надійність і довговічність для забезпечення тривалого терміну служби основних вузлів;

- енергетичну ефективність у широкому діапазоні робочих параметрів;

- герметичність, що виключає втрати холодоагенту;

- низьку швидкість руху пари у клапанах і трубопроводах для зменшення гідравлічних втрат;

- технологічність конструкції, що полегшує виробництво та обслуговування;

- можливість повної автоматизації роботи без необхідності постійного обслуговування;

- уніфікацію деталей і вузлів для зменшення витрат на виробництво й ремонт;

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- низький рівень шуму й вібрацій для забезпечення комфортного використання в побутових умовах.

Метою магістерської роботи є розробка моделі мотор-компресора побутового холодильника для визначення кінематичних і динамічних характеристик його роботи за умов заданих вхідних параметрів.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ МОТОР-КОМПРЕСОРІВ

## 1.1 Аналіз конструкції та функціонування мотор-компресора

Компресійний холодильник є прикладом холодильного обладнання, яке використовується для охолодження продуктів у побутових умовах. Конструкція такого холодильника включає низькотемпературний і плюсовий випарники, а також одноциліндровий компресор. Основним недоліком цього типу холодильника є низька економічність [6].

Існують також моделі двокамерних холодильників із вторинним контуром, що складаються з двох окремих контурів з випарниками, одноциліндрового компресора, конденсаторів, перемикачів потоку холодоагенту між контурами, з'єднувальних і капілярних трубок, терморегуляторів і нагрівальних елементів. У таких компресійних холодильниках використовується принцип розподілу потоку холодоагенту. Це досягається завдяки можливості циркуляції холодоагенту в двох контурах, залежно від положення триходового соленоїдного вентиля, який керується терморегулятором, встановленим в одній із камер. Роботу компресора регулює інший терморегулятор, розташований у другій камері. Кожен контур обладнаний власним випарником, а зворотний клапан забезпечує різний тиск у кожному з контурів. У режимі змінної роботи контурів компресор працює при двох рівнях тиску всмоктування, кожен з яких відповідає необхідній температурі [6].

Конструкція такого холодильника має певні недоліки, зокрема, гірші енергетичні показники та підвищений рівень сушіння продуктів. Використання одноциліндрового мотор-компресора з постійним об'ємом у кожному з контурів збільшує споживання енергії, знижує питому

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

холодопродуктивність і ускладнює налаштування холодильника для оптимальної роботи кожної з камер.

Конструктивне рішення, яке передбачає розподіл потоку холодоагенту, ускладнює конструкцію холодильника і знижує його надійність. Для підвищення холодопродуктивності та економічності пропонується використання багатоциліндрового компресора з ізольованими циліндрами. Наприклад, двоциліндровий компресор: один із циліндрів працює в автономному високотемпературному контурі під високим тиском, а інший – у низькотемпературному контурі під низьким тиском. Конденсатор у такому компресорі розділений на секції, кожна з яких належить до відповідного контуру, разом із регенеративними теплообмінниками і капілярними трубками. Усі компоненти компресора змонтовані в герметичному корпусі, підвішеному на пружинах [4, 7, 8].

Колінчастий вал компресора, на який напресовано ротор, обертається в підшипниках корпусу. Статор закріплений на корпусі за допомогою болтів. Циліндри з вбудованими глушниками встановлюються на корпус під кутом  $180^\circ$  і фіксуються болтами. Поршні припаяні до обойм і здійснюють зворотно-поступальний рух у циліндрах під дією повзуна, розташованого на кривошипній шийці вала.

У процесі роботи стиснутий пар фреону подається через трубку в автономний високотемпературний контур, який включає капілярну трубку, конденсатор, регенеративний теплообмінник і плюсовий випарник. Пари фреону з випарника через патрубок всмоктуються в герметичну камеру, яка утворюється верхньою кришкою і привареною до неї пластиною. Далі пари фреону подаються в циліндр через всмоктувальний глушник. Стиснутий пар із низькотемпературного випарника нагнітається в автономний низькотемпературний контур, що також складається з капілярної трубки, конденсатора, регенеративного теплообмінника і випарника [4, 7, 8].

Принцип роботи компресійного холодильника полягає в охолодженні продуктів за допомогою автономних контурів, випарники яких розташовані в ізольованих камерах. Компресор і електродвигун знаходяться в герметичному кожусі, поділеному пластиною на дві герметичні камери. Пари фреону з випарника через всмоктувальну трубку потрапляють у камеру, а далі – в циліндри компресора. Стиснутий пар із циліндрів нагнітається в секції конденсатора, після чого рідкий фреон потрапляє в капілярні трубки, де його тиск знижується до рівня, необхідного для кипіння в автономних випарниках. Проходячи через регенеративні теплообмінники, рідкий фреон охолоджується холодними парами фреону.

Завдяки автономним контурам, що працюють від ізольованих циліндрів із заданою холодопродуктивністю, відпадає необхідність у перемикачах потоку холодоагенту між контурами. Це підвищує надійність і економічність роботи холодильника. Крім того, використання герметичних камер всмоктування дозволяє оптимізувати тиски всмоктування та нагнітання, що забезпечує потрібні температури в камерах холодильника. Така конструкція сприяє покращенню енергетичних показників, підвищенню питомої холодопродуктивності та розширенню технічних характеристик пристрою [4, 7, 8].

## 1.2 Характеристики та особливості поршневого компресорів

Поршковий компресор використовується для видалення парів випарованого холодоагенту та їх нагнітання в конденсатор. Він є найбільш складною та важливою частиною холодильного агрегату, від якої залежить його працездатність. Компресор є основним споживачем електричної енергії, і саме від його функціонування залежить загальна економічність холодильного обладнання [9, 10].

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

За компоновкою електричного двигуна з компресором, агрегати побутових холодильників належать до пристроїв закритого типу. Таке розташування спрощує конструкцію приводу компресора, робить агрегат більш компактним та забезпечує надійну герметичність без використання спеціальних сальникових ущільнень.

Класифікація компресорів за конструктивними особливостями [11]: крейцкопфні; безкрейцкопфні; простої дії; подвійної дії; прямоточні; непрямоточні; блок-картерні; блок-циліндрові; з зовнішнім приводом; з вбудованим приводом; з горизонтальним розташуванням; з вертикальним розташуванням; з кутовим розташуванням; з опозитним розташуванням; з примусовим охолодженням; з повітряним охолодженням; з примусовою системою змащення; з вільною системою змащення.

Класифікація компресорів за функціональними особливостями [12]: стаціонарні; транспортні; високотемпературні, середньотемпературні та низькотемпературні; одно-, дво- та багатоступеневі; з пристроєм для регулювання продуктивності та без нього.

У компресійних холодильних агрегатах побутових холодильників можуть застосовуватися ротаційні, поршневі та електромагнітні компресори, які суттєво відрізняються за своєю конструкцією.

Поршневі компресори є найбільш поширеними завдяки простій конструкції та високій надійності. У холодильних агрегатах побутового призначення зазвичай використовуються одноциліндрові поршневі компресори непрямоточні, з горизонтальним розташуванням колінчастого вала [13]. Конструкція поршневого компресора представлена на аркуші [МРМА24.00.000ДО1] і рис. 1.1.

Основними складовими поршневого компресора є: корпус з підшипниками колінчастого валу; головка циліндра з клапанами; кривошипно-шатунний механізм; система змащування.

Корпус компресора (позиція 17) виготовляється методом литва із сірого чавуну, після чого проходить механічну обробку.

Кривошипно-шатунний механізм включає [13]:

- колінчастий вал (позиція 11), виготовлений зі сталі, має дві опори. У задній корінній шийці передбачена ексцентрична виточка для приводу плунжерного насоса системи змащення. На вільний кінець вала напресовується ротор електродвигуна (позиція 12);

- шатун (позиція 10), виготовлений із сірого чавуну, має роз'ємну нижню головку без вкладишів. Нижня кришка кріпиться до шатуна двома гвинтами. Верхня головка шатуна з'єднується з поршневим пальцем за допомогою стопорного пристрою, який запобігає ударам пальця об головку шатуна під час роботи;

- поршень (позиція 2), виготовлений зі сталі, з'єднується з шатуном через поршневий палець. У верхній частині поршня є дві кільцеві канавки, які під час роботи наповнюються мастилом. Це дозволяє компенсувати зазори між поршнем і циліндром без використання спеціальних поршневих кілець [12, 13].

Така конструкція забезпечує високу надійність компресора під час експлуатації та тривалий термін служби.

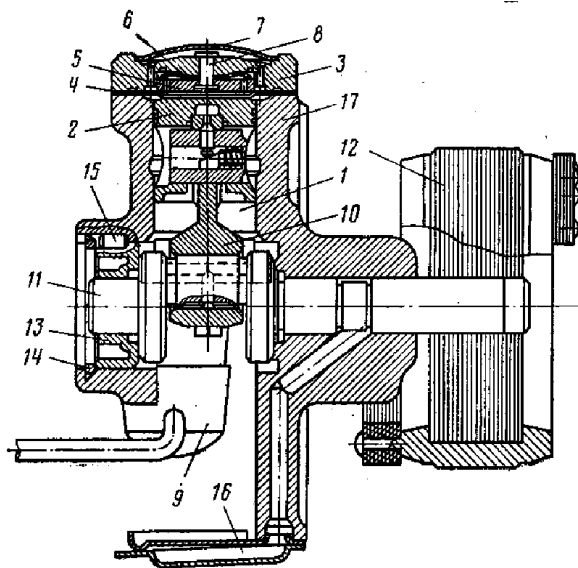


Рисунок 1.1 - Поршневий компресор

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
13

Сталева головка циліндрів кріпиться до верхнього торця циліндра компресора за допомогою болтів. Вона складається з корпусу, клапана нагнітання (позиція 6) із сідлом, кришки (позиція 5), а також патрубків для всмоктування і нагнітання, обладнаних глушниками. Камера всмоктування утворюється між верхнім торцем головки і кришкою та з'єднується з двома патрубками всмоктування. Камера нагнітання формується між корпусом головки (позиція 3) і сідлом, з'єднуючись з патрубком нагнітання .

Обидві камери - всмоктування та нагнітання - з'єднуються з циліндром компресора (позиція 17) через отвори, які розташовані по окружності корпусу та сідла (позиція 5). Клапан всмоктування (позиція 4) розміщений між циліндром (позиція 17) і головкою компресора (позиція 3).

Для зменшення зносу поверхонь тертя та підвищення довговічності роботи компресор обладнаний системою змащування. Ця система включає плунжерний насос, мастилоприймач (позиція 16), редукційний клапан і систему каналів, які представлені різними отворами.

Плунжерний насос забезпечує подачу мастила до поверхонь тертя, мастилоприймач (позиція 16) виконує функцію очищення мастила від забруднень, а редукційний клапан підтримує постійний тиск подачі мастила до стінок циліндра компресора [12, 13].

### 1.3 Конструкція та переваги безсальникових компресорів

У холодильній техніці широке застосування знайшли безсальникові та герметичні компресори. Вони мають вбудований електродвигун і блок-картерну безкрейцкопфну конструкцію. Такі компресори розраховані для роботи з холодильними агентами, які не руйнують мідну обмотку статора електродвигуна, зокрема з хладачами R12, R22, R142 та R502. На рисунку 1.2

зображено вертикальний безсальниковий компресор малої продуктивності ФБС 6 [5, 14].

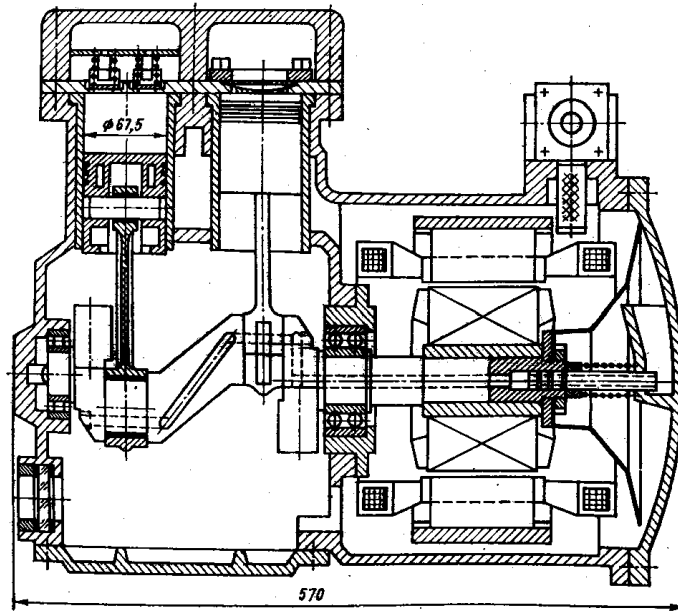


Рисунок 1.2 – Безсальниковий компресор малої продуктивності [14]

Циліндровий блок, картер і корпус електродвигуна виконані як єдиний блок. Доступ до рухомих механізмів забезпечується через кришку картера. Пара, яка всмоктується, проходить через канал між статором і ротором у порожнину всмоктування блока циліндрів, а звідти - у порожнину всмоктування кришки циліндрів.

У герметичних компресорах немає роз'ємних кришок, а весь механізм разом з електродвигуном розташований у герметичному зварному корпусі.

Розглянемо конструкцію герметичного компресора на прикладі двоциліндрового непрямоточного агрегату ФГ 0,7, зображеного на рисунку 1.3.

Цей компресор має вертикальний ексцентриковий вал і два горизонтальні циліндри, розташовані під кутом  $90^\circ$ . Корпус компресора (1) виготовлений литтям із сірого перлітно-феритного чавуну разом із циліндрами й закріплений у нижній частині герметичного кожуха за допомогою трьох пружинних підвісок (3). Бронзові шатуни (4) з

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
15

нероз'ємними головками встановлені на шатунній шийці ексцентрикового валу (5). Противага (6) фіксується на валу за допомогою гвинтів. Сталеві поршні (7) мають ущільнювальні кільця та канавки, які

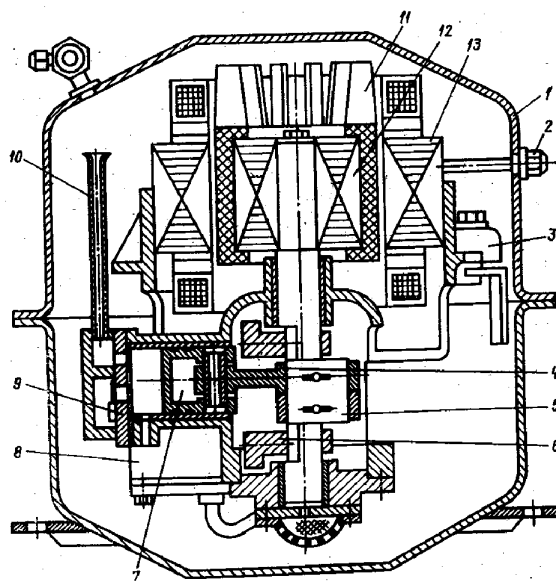


Рисунок 1.3 - Герметичний компресор ФГ 0,7

Клапани всмоктування та нагнітання в компресорі є пластинчастими та встановлені на загальній клапанній плиті (9) [15]. У верхню частину корпусу запресований пакет статора електродвигуна (13). Ротор (12) насаджений на верхній хвостовик ексцентрикового валу. Охолодження електродвигуна здійснюється за рахунок парів всмоктування. З порожнини всмоктування головки циліндрів пари потрапляють у трубку всмоктування (10). Стиснений пар виходить між циліндрами, проходить через трубопровід нагнітання і вихідний штуцер (2).

Збірка компресора разом з електродвигуном здійснюється в циліндричному корпусі, який згодом герметично закривається і заварюється з обох сторін. У кришці, з боку статора електродвигуна, встановлюються прохідні контакти для обмоток статора та штуцер для заправки холодильного агрегату мастилом і холодоагентом.

Компресори з кривошипно-шатунним приводом мають значний недолік: інерцію складних рухів шатуна в усіх точках обертання [10, 11]. Це

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
16

призводить до додаткових вібрацій компресора та збільшення навантаження на його деталі, що ускладнює балансування. Для усунення цих проблем була змінена кінематична схема приводу поршня. Замість кривошипно-шатунного механізму почали використовувати кривошипно-кулісний механізм, у якому шатун замінено кулісою, як показано на аркуші [МРМА24.00.000ДО1] і на рисунку 1.4.

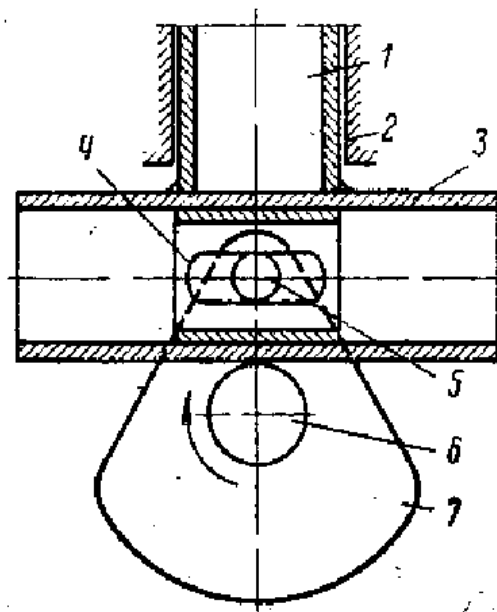


Рисунок 1.4 - Схема кулісного приводу поршня мотор-компресора

У кулісному механізмі приводу поршня (1) вісь ексцентрика вала ротора проходить через циліндричну кулісу (4), яка встановлена на ковзній посадці в обоймі (3). Циліндрична обойма (3) жорстко з'єднана з поршнем компресора (1) в перпендикулярному напрямку, завдяки чому вона може переміщатися виключно разом з поршнем у зворотно-поступальному русі. Під час обертання ексцентрикового вала (1) куліса здійснює обертальний рух навколо осі вала (6) і одночасно ковзає вздовж обойми (3). Це призводить до перетворення обертального руху ексцентрикового вала у зворотно-поступальний рух поршня (1).

Ротаційні компресори з ротором кочення широко використовуються в компресійних холодильниках, призначених для торгових мереж. Схема ротаційного компресора з ротором кочення наведена на рисунку 1.5 [16].

Основні компоненти компресора: ротор (А), ексцентрикний вал (Б), зубчаста передача для синхронізації внутрішнього зачеплення (В), радіальне ущільнення (Г), отвір для всмоктування (Д), отвір для нагнітання (Е), клапан нагнітання (1), корпус (2), ротор (3), бічні кришки (4, 5), ексцентрикний вал (6), зубчасте колесо внутрішнього зачеплення (7).

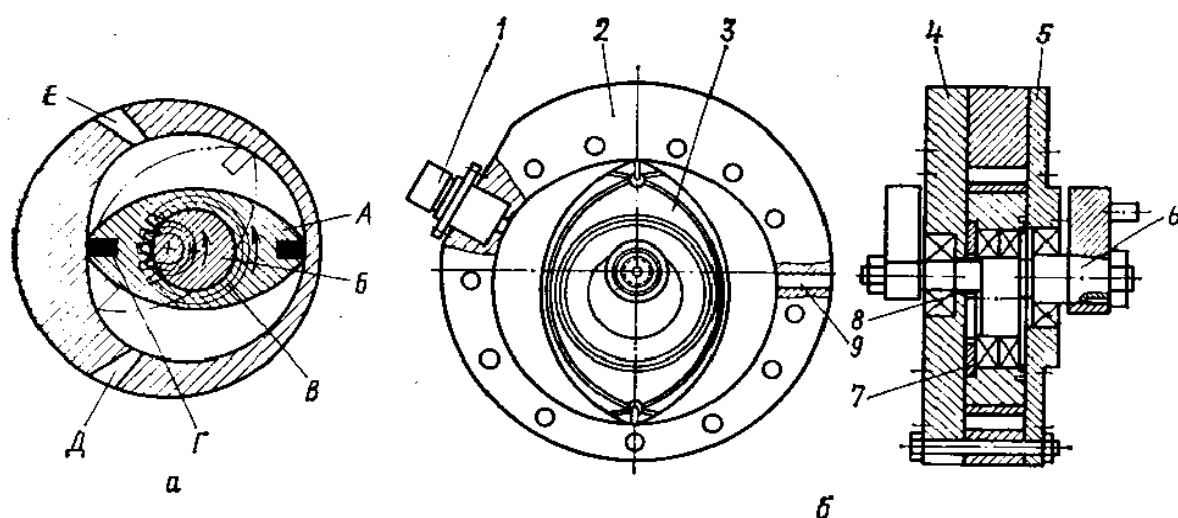


Рисунок 1.5 - Принцип дії (а) та будова (б) роторно-поршневого компресора

Як тільки ексцентрикний вал (6) починає обертатися, ротор (3) відкриває клапан всмоктування (Д). У правій частині циліндра утворюється всмоктувальна порожнина, яка поступово збільшується в об'ємі. Через зниження тиску в цій порожнині пари холодоагенту відсмоктуються з випарника і через всмоктувальний вентиль потрапляють до головки компресора, де відбувається процес видалення мастила. Краплини мастила стікають у корпус мотор-компресора, забезпечуючи змащення лопаті та всіх поверхонь тертя.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Після відділення мастила пари холодоагенту через всмоктувальний трубопровід наповнюють всмоктувальну порожнину. У цей час на протилежному боці лопаті формується нагнітальна порожнина, яка поступово зменшується. Коли тиск у нагнітальній порожнині перевищує тиск конденсації, відкривається клапан нагнітання (Е), і стиснуті пари надходять через запірний вентиль у конденсатор. Процес нагнітання завершується, коли ротор закриває патрубок нагнітання. У цей момент всмоктувальна порожнина досягає максимального об'єму. Після закриття ротором трубки всмоктування всмоктувальна порожнина переходить у нагнітальну, об'єм якої зменшується.

Перспективним напрямком розвитку є спіральний компресор, конструкція якого зображена на рисунку 1.6 [17].

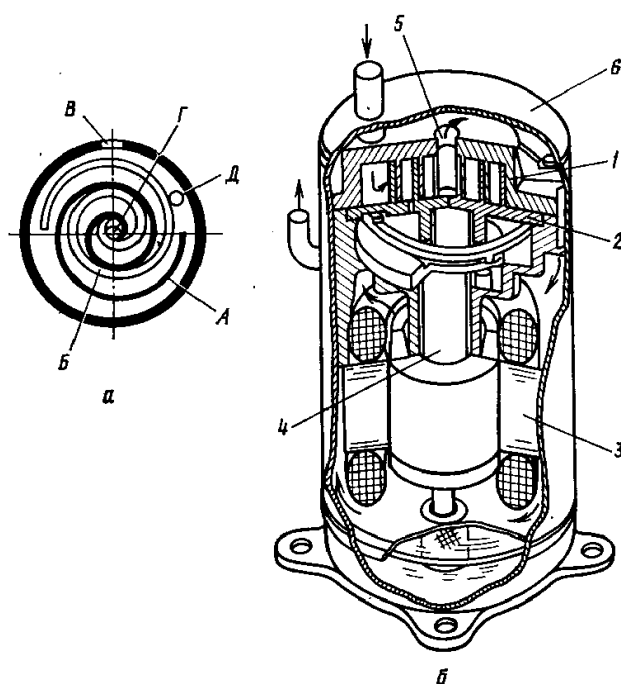


Рисунок 1.6 - Принцип дії (а) та будова (б) спірального компресора

Компресор включає в себе нерухому спіраль (А), рухому спіраль (Б), отвір для всмоктування (В), отвір для нагнітання (Г), траєкторію руху рухомої спіралі (Д), елемент із нерухомою спіраллю (1), елемент із рухомою спіраллю (2), електродвигун (3), ексцентриковий вал (4), отвір для нагнітання

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

(5) і герметичний кожух (6). Принцип роботи спірального компресора базується на тому, що при плоско-паралельному русі рухомої спіралі, кожна точка якої описує коло, точка дотику між нерухомою та рухомою спіралями переміщується таким чином, що між ними утворюється камера змінного об'єму, в якій здійснюється стискання газу [17].

Електромагнітний компресор, на відміну від поршневого, відрізняється лише приводом [18]. У такому компресорі поршень виконує роль якоря електромагніта, струмові котушки якого створюють змінний магнітний потік з частотою напруги живлення. Під впливом цього магнітного потоку якор здійснює зворотно-поступальний рух.

На основі викладеного вище можна зробити висновок, що існує широкий спектр конструкцій компресорів, і виділити одну з них як універсальну неможливо. Кожна конструкція має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при виборі компресора.

Основні технічні характеристики поршневих компресорів включають: холодопродуктивність; споживану потужність електричного двигуна; коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна; кількість обертів вала електродвигуна; робочий об'єм; обсяг мастила; рівень шуму; вагу компресора.

Технічні характеристики певних моделей уніфікованих компресорів наведені в табл. 1.1 та на аркуші [МРМА24.00.00.000ДО1].

Серед переваг поршневих мотор-компресорів можна виділити простоту конструкції та високу надійність у роботі. Ці особливості роблять їх одними з найпопулярніших при конструюванні холодильних агрегатів. Додатковою перевагою є можливість уніфікації компресорів: за умови однакового діаметра циліндра робочий об'єм можна змінювати, лише коригуючи довжину ходу поршня. Також важливою перевагою є велика кількість теоретичних досліджень і практичних розробок, які сприяють вдосконаленню роботи компресорів.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики уніфікованих компресорів

№	Параметри	ФГ-0,07	ФГ- 0,01	ФГ-0,14	ФГ-0,18	ФГ-0,22
1	Продуктивність	52.38	78	122.2	151.3	186
2	Потужність електродвигуна, Вт	63	86	127	146	170
3	ККД двигуна, %	68	70	71	73	74
4	Робочий об'єм, см <sup>3</sup>	2.77	3.46	4.92	5.9	7.0
5	Рівень шуму, дБ	Не більше 43	Не більше 43	Не більше 43	Не більше 43	Не більше 43
6	Кількість мастила, см <sup>3</sup>	280	280	280	280	280
7	Вага компресора, кг	7.55	7.55	8.4	9.0	9.5

Недоліки поршневих компресорів включають значну інерцію рухомих мас, яка лише частково зменшується за рахунок застосування кривошипно-кулісного приводу замість кривошипно-шатунного. Проте, ці інерційні сили залишаються великими і спричиняють значний рівень шуму. Ще одним недоліком є залежність продуктивності компресора від температури головки циліндра, що вимагає додаткових заходів для її зниження [4-6].

У порівнянні з поршневими компресорами, ротаційні компресори мають ряд переваг. Вони позбавлені масивних деталей, які здійснюють

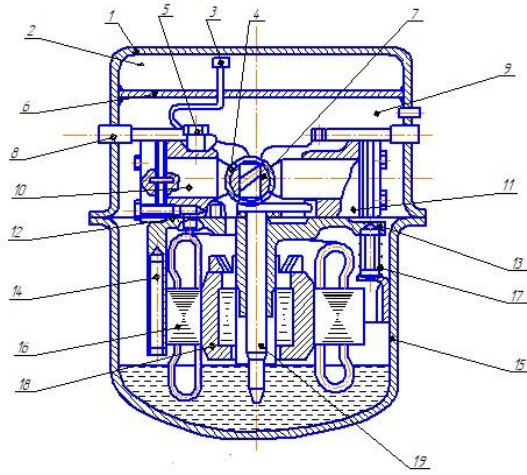
зворотно-поступальний рух, завдяки чому їх рухомі маси краще зрівноважені. Крім того, у ротаційних компресорах процеси всмоктування, стискання і нагнітання відбуваються одночасно. Це дозволяє зменшити швидкість всмоктування порівняно з поршневими компресорами, покращити наповнення циліндра парами холодоагенту, збільшити коефіцієнт подачі та зменшити матеріалоемність і трудомісткість виготовлення. Відсутність клапана всмоктування є ще однією важливою перевагою [4-6].

За енергетичними показниками ротаційні компресори наближаються до поршневих, але мають менші масу і габаритні розміри. Однак їх основний недолік полягає в наявності зон тертя між лопаттю і ротором, а також між циліндром і ротором. Крім того, при зменшенні розмірів ротаційного компресора до необхідних для побутових холодильних агрегатів вони втрачають частину своїх переваг. Зважаючи на це, ротаційні компресори здебільшого використовуються у великих і середніх промислових холодильних установках [4-6].

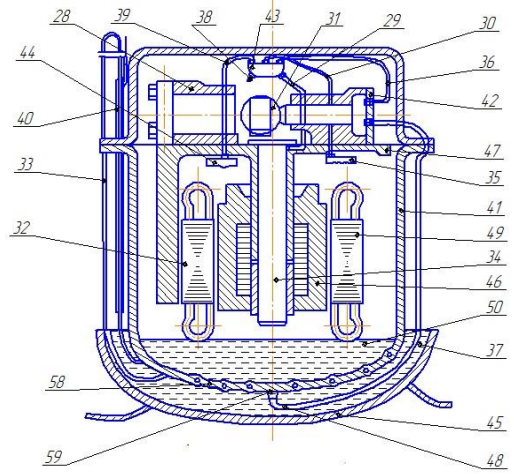
Спіральний компресор характеризується підвищеними робочими коефіцієнтами, що досягається завдяки відсутності клапанів всмоктування та нагнітання, а також низькому рівню вібрацій і шуму. Однак такі компресори є складнішими у виробництві через потребу у високій точності обробки деталей і складання [4-6, 17].

Електромагнітний компресор, основною перевагою якого є проста конструкція і компактність, ефективний для використання в малих холодильних агрегатах. Однак із збільшенням потужності цього типу компресорів суттєво зростають енерговитрати на перемагнічування заліза якоря електромагніту, що спричиняє підвищення температури компресора і зниження його продуктивності. Внаслідок цього збільшуються також загальні енергетичні витрати [4-6, 18].

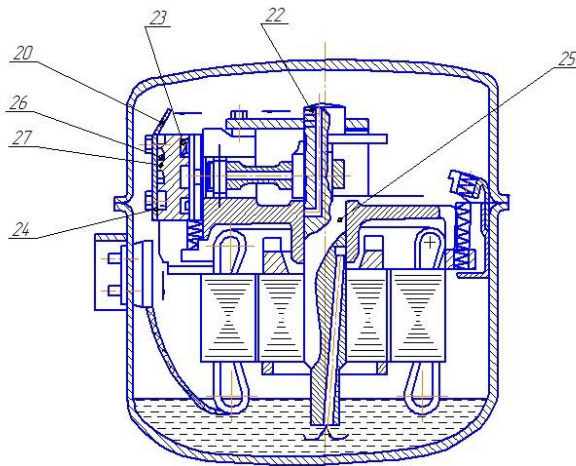
Приклади моделей мотор-компресорів, підтверджені авторськими свідоцтвами, наведені на рис. 1.7 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО2]).



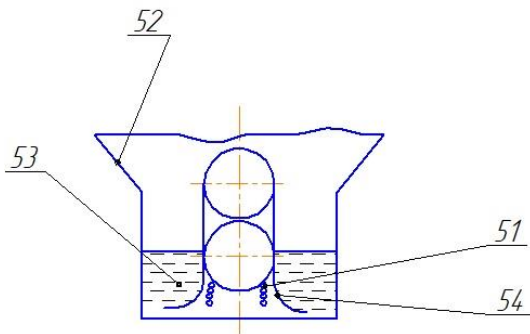
а



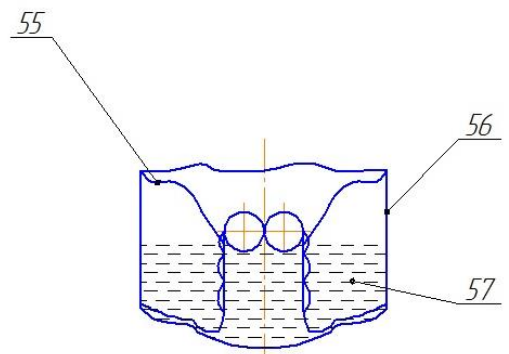
б



в



г



д

а- мотор компресор; б-мотор компресор; в- мотор компресор; г-компресор; д- охолоджувач

Рисунок 1.7 – Моделі мотор-компресорів:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
23

Назви елементів та їх позиції, зображених на рис. 1.7, наведені в експлікації, яка подана в додатку А.

#### 1.4 Принцип роботи та особливості холодильного компресора

Холодильна установка, що включає герметичний компресор із тепловим обмінником у вигляді випарника допоміжного контуру, розміщеним у картері компресора, а також конденсаційну батарею, встановлену по ходу охолоджувального повітря, наприклад за конденсатором, має свої недоліки. Зокрема, вона не використовує найбільш охоложене мастило в картері компресора і потребує великогабаритних теплових обмінників для охолодження усього мастила [12].

Компресор із картером, який має масляну ванну та оснащений забірником мастила і охолоджувачем, є найближчим аналогом до описаного винаходу. Однак такий компресор не забезпечує ефективного охолодження мастила, яке подається до підшипників, через відсутність примусової подачі мастила.

У запропонованій конструкції холодильний компресор також містить картер із масляною ванною, забірник мастила і охолоджувач. Проте охолоджувач розташовується всередині забірника мастила. У деяких варіантах охолоджувач може бути виконаний у вигляді каналів у корпусі забірника мастила.

Під час роботи компресора гаряче мастило з масляної ванни надходить до забірника, де воно проходить через охолоджувач і охолоджується, а потім подається до підшипників компресора. Після використання мастило знову нагрівається і повертається у масляну ванну, де цикл повторюється. У разі виконання охолоджувача у вигляді каналів у корпусі забірника, охолодження здійснюється через стінки забірника мастила.

Розміщення охолоджувача всередині забірника мастила або його виконання у вигляді каналів у корпусі дозволяє знижувати температуру лише тієї частини мастила, яка подається до підшипників. Це зменшує навантаження на охолоджувач і його габарити. Крім того, гаряче мастило у ванні сприяє покращенню системи охолодження за рахунок більшої тепловіддачі через стінки корпусу [12].

### 1.5 Огляд виробників компресорів для побутової холодильної техніки

Мотор-компресор є ключовим елементом будь-якого компресійного холодильника чи морозильника, забезпечуючи роботу всього агрегату [19]. У сучасних моделях він має герметичний кожух із розміщеними всередині компресором та приводом. У більшості холодильників використовуються поршневі компресори, а ротаційні встановлюються лише в окремих імпортованих моделях (рис. 1.8).

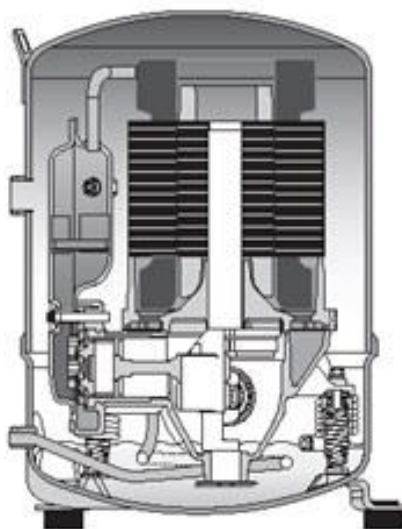


Рисунок 1.8 – Поршковий компресор [19]

Більшість сучасних поршкових компресорів працює від асинхронних електродвигунів із вертикально розташованим валом і внутрішньою підвіскою, де компресор та двигун підвішені на пружинах у герметичному

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
25

кожусі. Ротаційні компресори використовують електродвигун із горизонтальним валом і зовнішню підвіску, де компресор і статор двигуна жорстко закріплені у кожусі, який через пружини з'єднаний із рамою [19].

Раніше поршневі компресори також мали горизонтальний вал і зовнішню підвіску, що спричиняло підвищений рівень шуму через передавання вібрацій на холодильну шафу [19].

Кривошипно-шатунні компресори демонструють кращу довговічність під високими навантаженнями завдяки двом точкам опори в колінчастому валу, на відміну від кривошипно-кулісних із консольним валом. «Лінійні» компресори, що вперше з'явилися в Україні у 2005 році, відзначаються високою надійністю [19].

Кулісні компресори, через нижчі виробничі витрати, встановлюються в компактних моделях, тоді як поршневі з кривошипно-шатунним механізмом використовуються в усіх типах холодильників. «Лінійні» компресори підходять для великих об'ємів.

Ротаційні компресори не мають поршнів; у них ротор із рухомою пластиною, що розділяє камери всмоктування й нагнітання, обертається в порожнині еліптичної форми (рис. 1.9) [19].

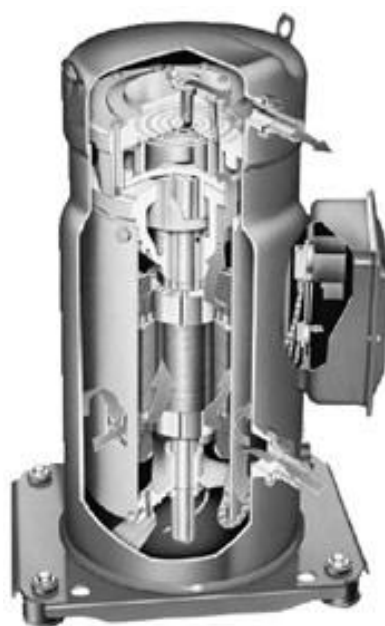


Рисунок 1.9 – Ротаційний мотор-компресор

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
26

Камери всмоктування і нагнітання ротаційного компресора з'єднані трубопроводами, що забезпечують циркуляцію холодоагенту через зони тиску та розрідження, створювані обертанням ротора. Це дозволяє зменшити розміри ротаційного компресора порівняно з поршневим, збільшуючи корисний об'єм холодильника без зміни габаритів. Однак в Україні серійне виробництво ротаційних і «лінійних» компресорів наразі не здійснюється.

Поршневі компресори з кривошипно-кулісним механізмом на багатьох підприємствах випускаються за японською ліцензією [19].

В Україні кривошипно-шатунні компресори виготовляв Донецький завод АТ «Норд», найбільший виробник побутових холодильників із потужністю до 1 млн компресорів на рік (рис. 1.10). Виробництво компресорів на інших заводах у регіоні має обмежений масштаб і незначний вплив на ринок [19].

Ротаційний компресор, завдяки своїй конструкції, забезпечує циркуляцію холодоагенту, займає менше місця порівняно з поршневим і збільшує корисний об'єм холодильника. Однак в Україні серійне виробництво ротаційних і «лінійних» компресорів не здійснюється [19].

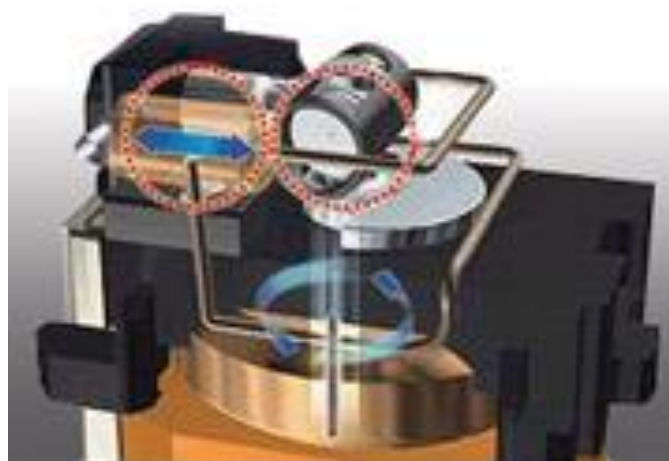


Рисунок 1.10 – Кривошипно-шатунний мотор-компресор

Імпорт мотор-компресорів в Україні з 2016 по 2021 роки зріс у 5 разів, а частка імпортованих компресорів на ринку з 2008 по 2014 роки збільшилася з 39% до 74%.

Поршневі компресори з кривошипно-кулісним механізмом виробляють у Японії, Кореї, Тайвані, Італії, Китаї, а з кривошипно-шатунним — в Америці, Європі та Азії. Лідером є американська компанія TECUMSEH, за документацією якої працюють багато заводів, зокрема L'UNITE GERMETIQUE у Франції.

Найбільшим виробником є італійський концерн EMBRACO (Aspera), який випускає понад 20 млн компресорів щороку. Заводи концерну ELECTROLUX (Італія, Австрія, Іспанія, США) виробляють близько 12 млн компресорів щорічно, поставляючи їх і для інших брендів, зокрема MIELE та VESTFROST.

Датські компресори Danfoss відомі надійністю й використовуються в холодильниках BOSCH, SIEMENS, VESTFROST (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 - Мотор-компресори датської фірми Danfoss

Мотор-компресори використовуються в холодильниках багатьох виробників, зокрема Snaipe, а також українських, російських і білоруських

заводів для експортних моделей. BOSCH і SIEMENS встановлюють компресори Danfoss, EMBRACO-Aspera та Matsushita, а Liebherr — компресори EMBRACO.

Італійські компресори широко застосовуються у продукції брендів A. Merloni SpA, Candy, Bompani, Kaiser, Bauknecht, Asko та інших. На окремих моделях ELECTROLUX встановлюють «лінійні» компресори LG, а TECUMSEH використовують у холодильниках Brandt, Gorenje та інших європейських марках.

Корея (LG, SAMSUNG), США (AMANA, GENERAL ELECTRIC) та Японія (SHARP) комплектують свої холодильники власними компресорами. Усі провідні виробники вдосконалюють компресори, роблячи їх економічнішими, тихішими та екологічно безпечними, включаючи моделі зі змінними обертами валу для оптимізації енергоспоживання.

Перші мотор-компресори працювали зі швидкістю 1500 об/хв, тоді як у вертикальних моделей другого покоління швидкість збільшили до 3000 об/хв для підвищення холодопродуктивності. Оптимальна ефективність поршневих компресорів досягається при 2000 об/хв.

У кривошипно-шатунних компресорах 20% енергії витрачається на перетворення руху, тоді як «лінійні» компресори без обертового валу значно знижують енергоспоживання та шум. Компресори зі змінною швидкістю потребують інвертора для синхронізації роботи залежно від навантаження.

«Лінійні» компресори забезпечують ефективну роботу завдяки електронному управлінню, скорочуючи споживання електроенергії на 40% у моделях із природним охолодженням та на 30% із примусовою циркуляцією.

Розробка «лінійного» компресора тривала 8 років за участі LG Electronics, Matsushita, Electrolux і Embaco. LG першою інтегрувала «лінійний» компресор у побутовий холодильник, забезпечивши собі конкурентну перевагу (рис. 1.12).

LG інвестувала 51 млн доларів, отримала 910 патентів і планує щорічно експортувати до 1 млн компресорів для великих холодильників до США та Європи. У 2005 році компресори LG почали використовувати в холодильниках Electrolux і Liebherr.

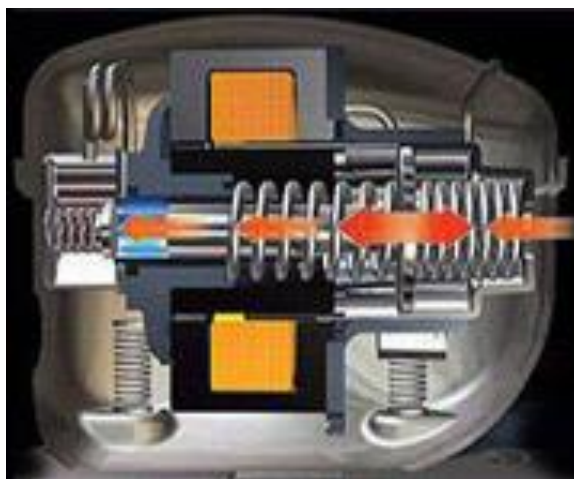


Рисунок 1.12 - «Лінійний» компресор фірми LG Electronics

На українському ринку представлені мотор-компресори для різних холодоагентів, включаючи R 12, R 134a, R 600A та газові суміші (С-1, С-2, Екохол-3). Деякі заводи випускають універсальні модифікації компресорів, сумісні з різними агентами. У 2015 році з'явилися холодильники з «лінійними» компресорами від японських, корейських і європейських виробників.

Заводи з власним виробництвом зазвичай використовують свої компресори, але експортні вимоги можуть змушувати їх встановлювати компресори певних марок чи адаптуватися до специфічних умов, таких як тип холодоагента чи відсутність радіоперешкод. Наприклад, компресори з позисторним запуском не створюють радіоперешкод.

Уніфікація приєднувальних розмірів дозволяє використовувати компресори однієї марки в холодильниках різних брендів або встановлювати компресори різних марок у межах однієї моделі залежно від обставин.

## 1.6 Висновки до першого розділу

У цьому розділі проведено аналіз технологічних умов експлуатації мотор-компресорів та їх конструкцій. Розглянуто особливості конструкцій різних типів мотор-компресорів, включаючи поршневі та безсальникові моделі. Також наведено інформацію про основних виробників цього обладнання.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ МОТОР-КОМПРЕСОРА ПОБУТОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА

### 2.1 Функціональне призначення компресора в побутовому холодильнику

Серед численних побутових приладів, які полегшують повсякденні справи та сприяють підвищенню культури ведення господарства, особливе місце займають побутові холодильники. Лише за їх наявності можливе забезпечення збалансованого і повноцінного харчування свіжими та швидкозамороженими високоякісними продуктами.

Існує кілька способів отримання холоду, що обумовлює різні конструктивні типи холодильників. Найпоширенішими з них є [20]:

- компресійні холодильники;
- абсорбційні холодильники;
- холодильники, засновані на термоелектричних явищах (здебільшого малого об'єму).

Крім того, існують й інші методи отримання холоду, а відповідно і конструкції холодильників, які базуються на таких принципах [4-6]:

- квазірівноважне розширення газів із виконанням зовнішньої роботи (температурний діапазон роботи ( $T = 5 \dots 300 \text{ }^\circ\text{K}$ );
- відкачування насичених парів рідини, що кипить ( $T = 0.5 \dots 300 \text{ }^\circ\text{K}$ );
- хвильові процеси розширення газів ( $T = 10 \dots 300 \text{ }^\circ\text{K}$ );
- трубка Ранка (Rank) ( $T = 20 \dots 300 \text{ }^\circ\text{K}$ );
- розмагнічування парамагнетиків ( $T = 0.02 \dots 300 \text{ }^\circ\text{K}$ );
- нерівноважне розширення газів із виконанням зовнішньої роботи ( $T = 5 \dots 300 \text{ }^\circ\text{K}$ );
- дроселювання газів ( $T = 3 \dots 300 \text{ }^\circ\text{K}$ );
- ефект Етінсгаузена (Ettingshausen) ( $T = 150 \text{ }^\circ\text{K}$ )

Попри наявність цих методів, багато з них не набули широкого поширення через низьку економічність, складність конструкції чи незручність в експлуатації.

Компресійні холодильники є найбільш поширеним типом холодильних агрегатів у побуті на сьогоднішній день [21]. У їх конструкції використовують рідкий холодоагент, що кипить при від'ємних температурах. Принцип роботи таких холодильників полягає в тому, що теплота від охолоджуваного середовища передається рідкому холодильному агенту та витрачається на його випаровування при низькій температурі. Пари холодоагенту надходять у теплообмінний апарат, розташований у зовнішньому середовищі, де вони віддають отримане тепло і переходять у рідкий стан. Далі рідкий холодоагент повертається в охолоджуване середовище, і процес повторюється циклічно. У компресійних холодильних парових агрегатах циркуляція холодоагенту забезпечується роботою компресора.

Компресор виконує функцію видалення парів холодоагенту з випарника та нагнітання їх у конденсатор [22]. Цей елемент є найважливішим і найскладнішим вузлом холодильного агрегату, оскільки саме він визначає працездатність пристрою. Компресор є основним споживачем електроенергії, і його робота суттєво впливає на загальну енергоефективність побутового холодильника.

Умови експлуатації холодильного компресора характеризуються наступними особливостями [22]:

- компресор функціонує у широкому діапазоні тисків нагнітання і всмоктування через змінні зовнішні умови роботи холодильної машини, що супроводжуються великою різницею між цими тисками;
- під час роботи поршневого компресора можливе періодичне конденсація невеликої кількості робочої рідини на внутрішніх стінках циліндра, з подальшим її випаровуванням;

- холодоагенти, такі як фреони, легко розчиняються у мастилі, що використовується для змащення компресора, що суттєво впливає на його робочі процеси.

Такі особливості конструкції та функціонування компресора вимагають врахування його технічних характеристик при проєктуванні холодильних агрегатів.

Конструкція компресора повинна відповідати високим вимогам, обумовленим його метою та умовами роботи в складі холодильного обладнання. Основними вимогами є:

- забезпечення високої надійності та достатнього моторесурсу для тривалої експлуатації основних вузлів і компресора в цілому;
- гарантування високого рівня герметичності;
- можливість повної автоматизації роботи компресора та забезпечення його надійної експлуатації без необхідності постійного обслуговування;
- досягнення високої енергетичної ефективності в умовах значних коливань робочих параметрів;
- високий рівень уніфікації деталей і вузлів, що спрощує ремонт та обслуговування;
- технологічність конструкції, що полегшує виробництво та збирання;
- мінімальна матеріалоємність конструкції для зниження витрат на виробництво;
- забезпечення низьких швидкостей руху холодоагенту в клапанах і трактах для зменшення втрат і підвищення ефективності;
- низький рівень шуму та вібрації під час роботи.

Покращення технічних характеристик компресора досягається за рахунок застосування примусового охолодження головки циліндра та електродвигуна, а також забезпечення додаткового охолодження холодоагенту під час стискання. Це дозволяє підвищити ефективність роботи компресора та продовжити його термін служби.

## 2.2 Теоретичні основи роботи компресора холодильника

На рисунку 2.1 та в кресленні [МРМА24.00.00.000ДО1] представлено принципову схему роботи одноступеневого поршневого компресора, а також його теоретичну індикаторну діаграму [1, 5].

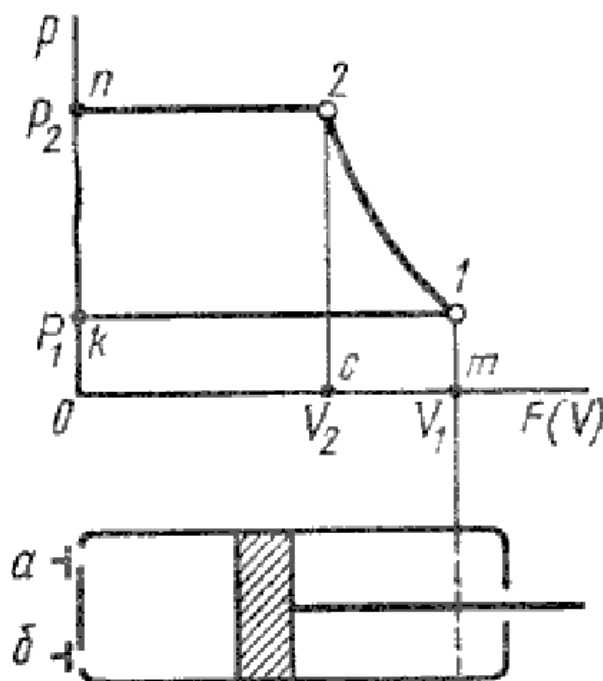


Рисунок 2.1 - Схема принципова одно ступеневого поршневого компресора та теоретична індикаторна діаграма його роботи

При русі поршня з крайнього лівого положення вправо через всмоктувальний клапан а в циліндр надходить холодильний агент. У наступному циклі, під час зворотного руху поршня (з правого положення в ліве), відбувається стискання холодоагенту від початкового тиску  $p_1$  до тиску  $p_2$ . При досягненні тиску  $p_2$  відкривається випускний клапан б, і під час подальшого руху поршня (зліва направо) здійснюється нагнітання стислого холодоагенту з циліндра в нагнітальний трубопровід. Коли поршень знову повертається у крайнє ліве положення, впускний клапан відкривається, і цикл роботи повторюється [5].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

На аркуші [МРМА24.00.00.000ДО1] та на рис. 2.2 представлено  $pV$ -діаграму роботи компресора. Процес стискання газу в компресорі відбувається відповідно до політропного закону. Технічна робота, що виконується компресором, зображається на  $pV$ -діаграмі як площа, обмежена кривими, що відповідають процесам всмоктування, стискання та нагнітання [5].

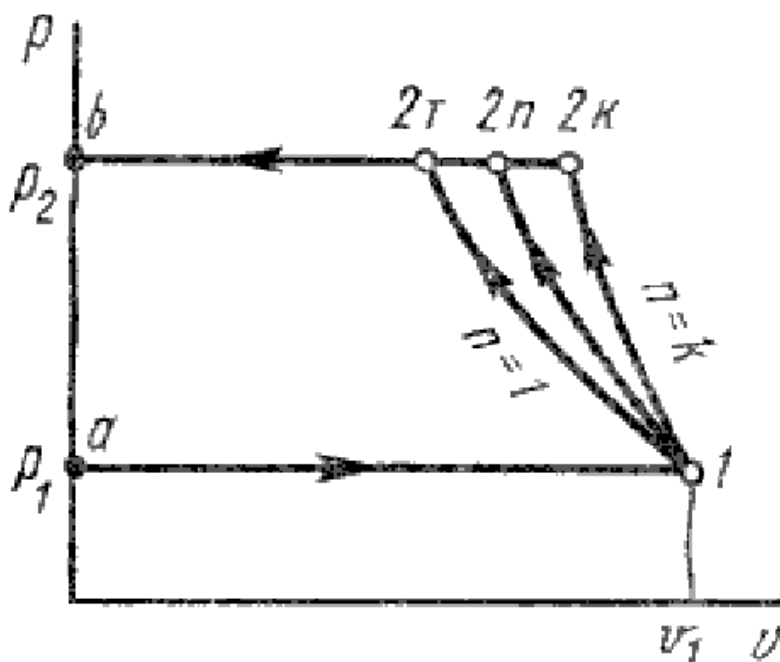


Рисунок 2.2 -  $PV$ -діаграма роботи компресора

Якщо стискання холодоагенту в циліндрі компресора відбувається настільки швидко, що теплообмін через стінки циліндра не встигає здійснитися, такий процес можна вважати адіабатним, де  $n=k$  ( $k$  - показник адіабати, а  $n$  - показник політропи). Уявимо, що компресор обладнано кожухом охолодження, який забезпечує ізотермічне стискання ( $n=1$ ). У цьому випадку мінімальна технічна робота досягається саме в ізотермічному процесі. Оскільки реальний процес стискання в мотор-компресорі відбувається швидко, а швидкість теплообміну є обмеженою, фактичний процес представляє собою політропу.

У реальних компресорах існують конструктивні та експлуатаційні фактори, які зменшують їхню продуктивність та економічність у порівнянні з ідеальними теоретичними моделями. До таких факторів належать [5]:

- у реальному компресорі об'єм циліндра більший за об'єм, який описується поршнем за один хід, на величину так званого "мертвого об'єму". Це той об'єм, у якому залишаються пари холодоагенту, які не можуть бути витіснені, коли поршень досягає верхньої мертвої точки.

- у тракці всмоктування і нагнітання виникають втрати тиску пари, що спричиняє зниження об'ємного та енергетичного коефіцієнтів компресора;

- на ділянці між патрубком всмоктування і циліндром компресора відбувається підвищення температури пари, що, у свою чергу, зменшує масову продуктивність компресора;

- під час процесів стискання та зворотного розширення між парою і стінками циліндра та поршня виникає теплообмін різного напрямку і інтенсивності, що призводить до зміни показника політропи та зниження ефективності компресора;

- поршневий компресор є машиною періодичної дії, тому у порожнинах нагнітання і всмоктування тиск змінюється із певною частотою та амплітудою, що з одного боку збільшує потужність приводу компресора, а з іншого - у деяких випадках сприяє підвищенню фактичної продуктивності порівняно з теоретичною;

- під час роботи холодильного компресора спостерігаються перетікання пари через різні конструктивні шпарини;

- частина енергії приводу компресора витрачається на подолання тертя у механічних парах агрегату.

Реальні робочі процеси компресора значно відрізняються від теоретичних. Це наочно демонструє порівняння індикаторних діаграм теоретичного компресора (a-b-c-d) та фактичного компресора (1'-2'-3'-4'), представлених на рисунку 2.3.

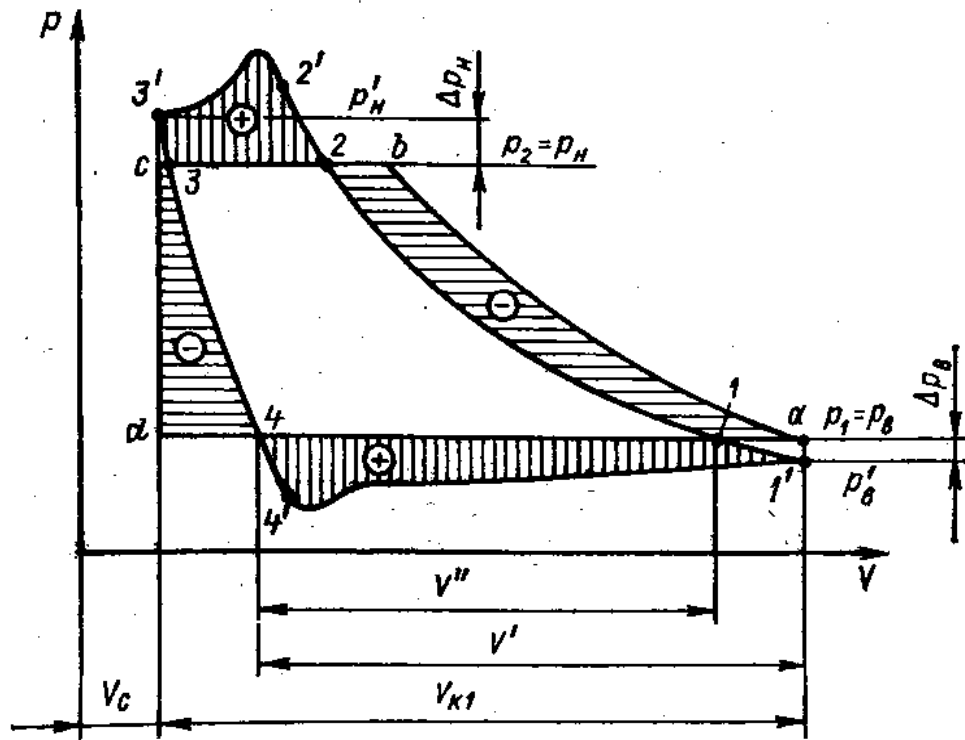


Рисунок 2.3 - Дійсна індикаторна діаграма

Процес всмоктування ( $4'-1'$ ) здійснюється при змінному тиску, який нижчий за тиск всмоктування в патрубку компресора. Точки 4 і 1 відповідають моменту початку відкриття та повного закриття клапана всмоктування. Різниця між тиском у патрубку всмоктування та у циліндрі під час процесу  $4'-1'$  зумовлена опором потоку пари на шляху від патрубка до циліндра. Зміна цієї різниці пояснюється двома основними причинами [5]:

- варіюванням ступеня відкриття клапана всмоктування;
- зміною швидкості пари через змінну швидкість руху поршня.

Подібна ситуація спостерігається і в процесі нагнітання ( $2'-3'$ ). Точка 2' відповідає моменту відкриття клапана нагнітання. Через обмежений переріз отвору клапана тиск у циліндрі продовжує зростати навіть після початку його відкриття. Досягнувши максимуму, тиск поступово знижується, але наприкінці нагнітання все ще залишається вищим за тиск у патрубку нагнітання.

Реальні умови роботи, включаючи технічний стан деталей і вузлів компресора, спричиняють зниження його ефективності порівняно з ідеальною моделлю.

### 2.3 Конструкція мотор-компресора холодильного обладнання

Кривошипно-кулісний мотор-компресор із вертикально розташованим валом підвішений усередині герметичного кожуха на пружинах, які служать для гасіння коливань, що виникають під час роботи компресора [20]. Пружини працюють на стискання або розтягування залежно від конструкції підвісу. Їх встановлюють у кронштейни, розташовані у верхній частині кожуха, і фіксують в отворах спеціальних приливів на корпусі компресора. Корпус компресора, у свою чергу, опирається приливами на пружини.

Електродвигун компресора - однофазний асинхронний із пусковою обмоткою. Для запуску двигуна та захисту від перевантажень використовується пускозахисне реле, з'єднане з електродвигуном через клемну колодку, яку фіксують пластинчастою скобою. Реле встановлене на рамі.

Ротор електродвигуна закріплений на валу компресора, тоді як статор електродвигуна прикріплений до корпусу компресора за допомогою чотирьох гвинтів. Статор виготовлений із листів електротехнічної сталі, штампованих у пакет. Обмотка статора є двополюсною та чотирикотушковою. Корпус компресора виконано з чавуну, який слугує також опорою вала [20].

Циліндр компресора виготовлений разом із глушниками шляхом лиття. Він встановлений на корпусі компресора за допомогою чотирьох контрольних штифтів і закріплений двома гвинтами. Противага, інтегрована з кривошипним валом, знижує інерційні маси. Поршень виготовлений із листової сталі та з'єднаний із обоймою мідною пайкою. Обойма також

виконана зі сталі, скрученої в циліндричну форму. Повзун куліси виготовлений із чавуну [20].

На торці циліндра встановлені прокладка клапана всмоктування та сам клапан, фіксований двома установочними штифтами. Нагнітальний клапан, разом із обмежувачем, прикріплений до сидла за допомогою заклепок.

Складальне креслення герметичного фреонового компресора наведено на рис. 2.4 та аркуші [МРМА24.00.00.000СК].

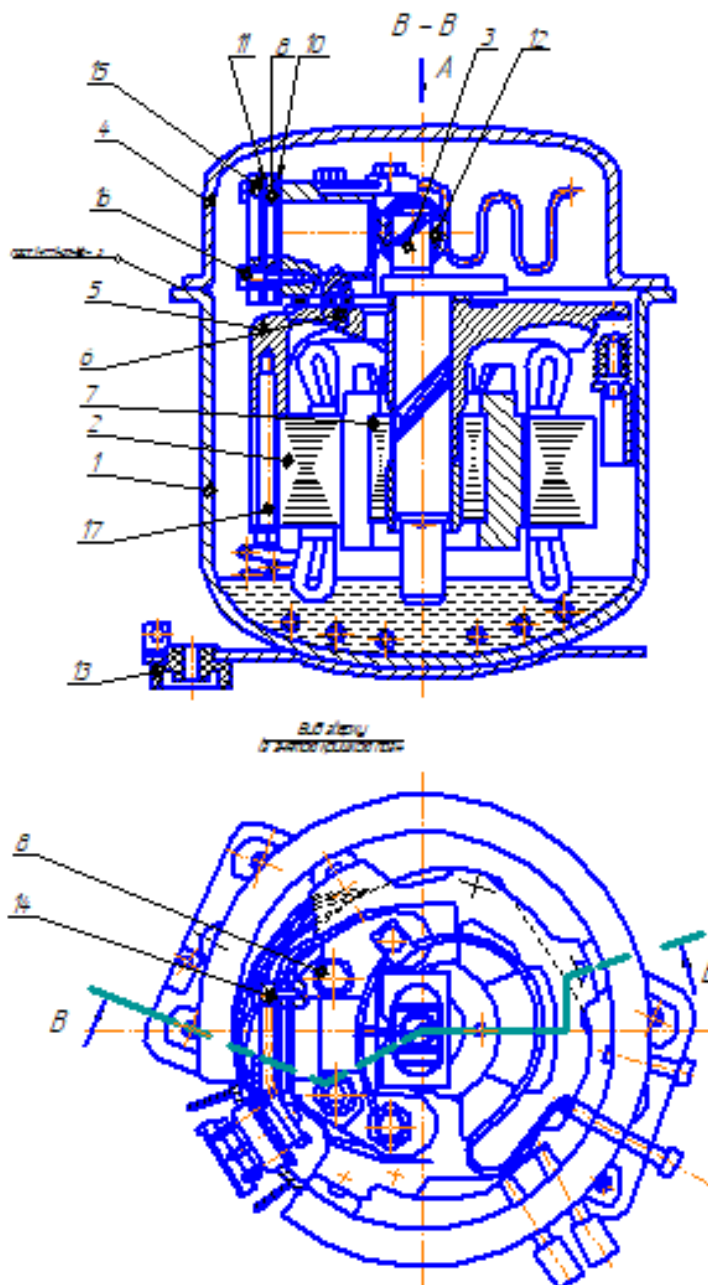


Рисунок 2.4 – Складальне креслення герметичного фреонового мотор-компресора

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
40

Основними вузлами мотор-компресора являються: кожух 1; статор 2; ротор 3; корпус компресора 4.

## 2.4 Компресійна система охолодження побутового холодильника

Технологічна схема системи охолодження побутового холодильника наведена на рис.2.5 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДІ]).

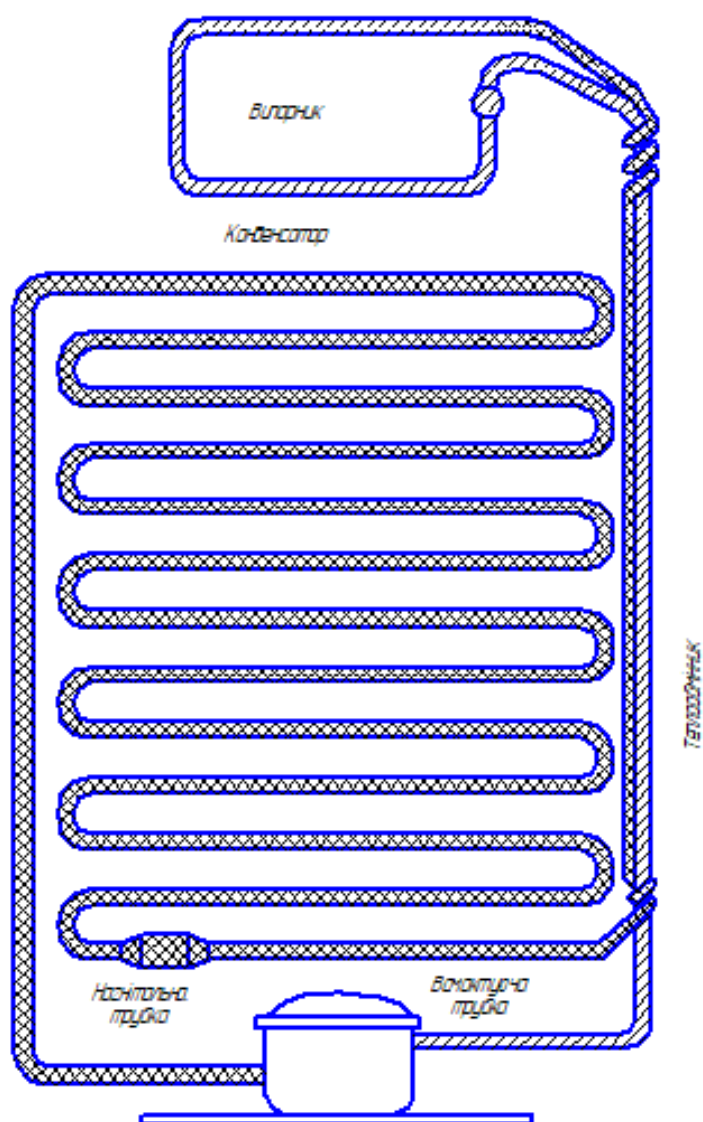


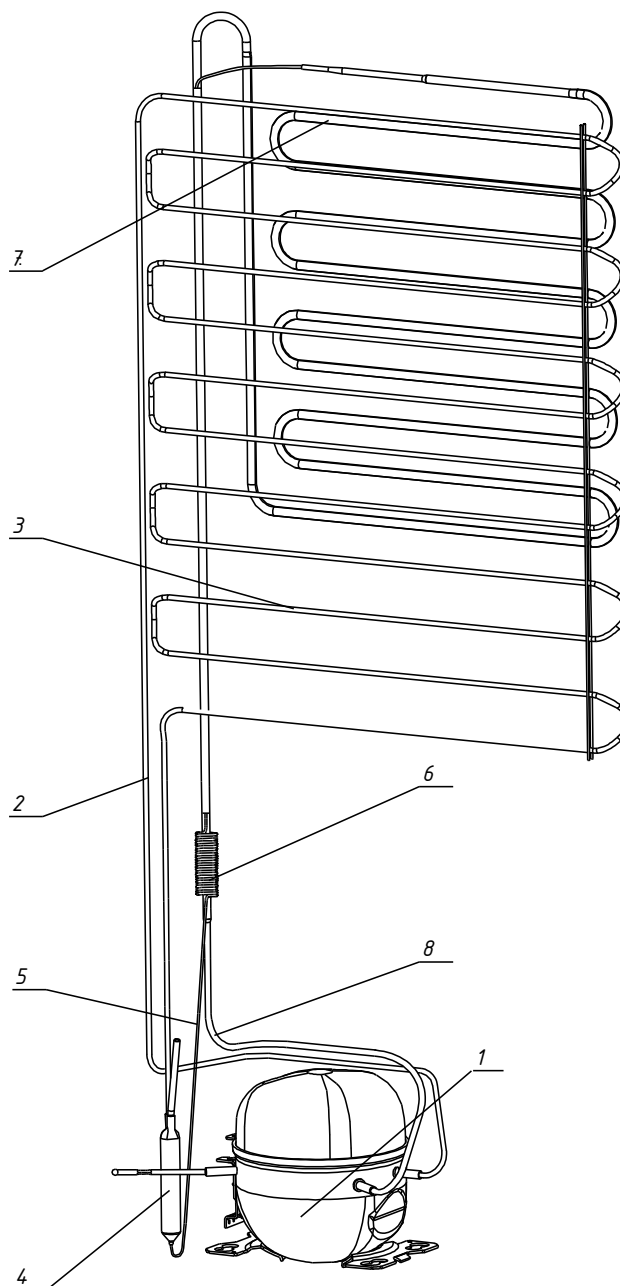
Рисунок 2.5 - Технологічна схема системи охолодження побутового холодильника

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
41

Система охолодження побутового компресійного холодильника зображена на рис. 2.6.



1 - компресор з вертикальною віссю, 2 - трубка нагнітання, 3 - конденсатор, 4 - фільтр-осушувач, 5 – трубка капілярна, 6 - теплообмінник труба в трубі, 7 – випарник.

Рисунок 2.6 – Схема системи охолодження холодильника побутового компресійного типу:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
42

Вона складається з таких основних компонентів: компресор із вертикальною віссю (поз. 1), трубка нагнітання (поз. 2), конденсатор (поз. 3), фільтр-осушувач (поз. 4), капілярна трубка (поз. 5), теплообмінник типу труба в трубі (поз. 6) та випарник (поз. 7) [20].

Компресор виконує роль циркуляційного насоса, забезпечуючи стискання парів холодоагенту і їх нагнітання у конденсатор. Трубка нагнітання слугує для транспортування стиснутих парів холодоагенту до конденсатора, де вони віддають тепло і переходять у рідкий стан. Після цього холодоагент проходить через фільтр-осушувач, який очищує його від домішок і вологи, захищаючи капілярну трубку від закупорювання.

Капілярна трубка знижує тиск холодоагенту та регулює його подачу у випарник, де відбувається його випаровування з поглинанням тепла з внутрішнього простору холодильника. Теплообмінник типу труба в трубі підвищує ефективність роботи системи, використовуючи тепло парів, що виходять із випарника, для охолодження рідкого холодоагенту перед подачею у випарник.

Ця система функціонує у замкнутому циклі, забезпечуючи підтримання необхідного температурного режиму у камерах холодильника.

## 2.5 Електрична схема побутового холодильного обладнання

Електрична схема побутового холодильника зображена на рис. 2.7 (аркуш [MPMA24.00.00.000E2]). Основними компонентами схеми є X-вилка для підключення до електромережі, вимикач SQ, терморегулятор, що забезпечує підтримання заданої температури в холодильній камері SK, пускозахисне реле К, яке виконує запуск мотор-компресора М та захищає його від перевантажень, мотор-компресор М, що забезпечує циркуляцію холодоагенту, конденсатор для роботи двигуна компресора, позистор  $t^0$ , який служить для запуску двигуна, та лампа освітлення EL внутрішнього простору

холодильника. Схема забезпечує автоматичну роботу холодильника, включаючи запуск і вимикання компресора залежно від температури, а також освітлення при відкриванні дверцят [1, 6].

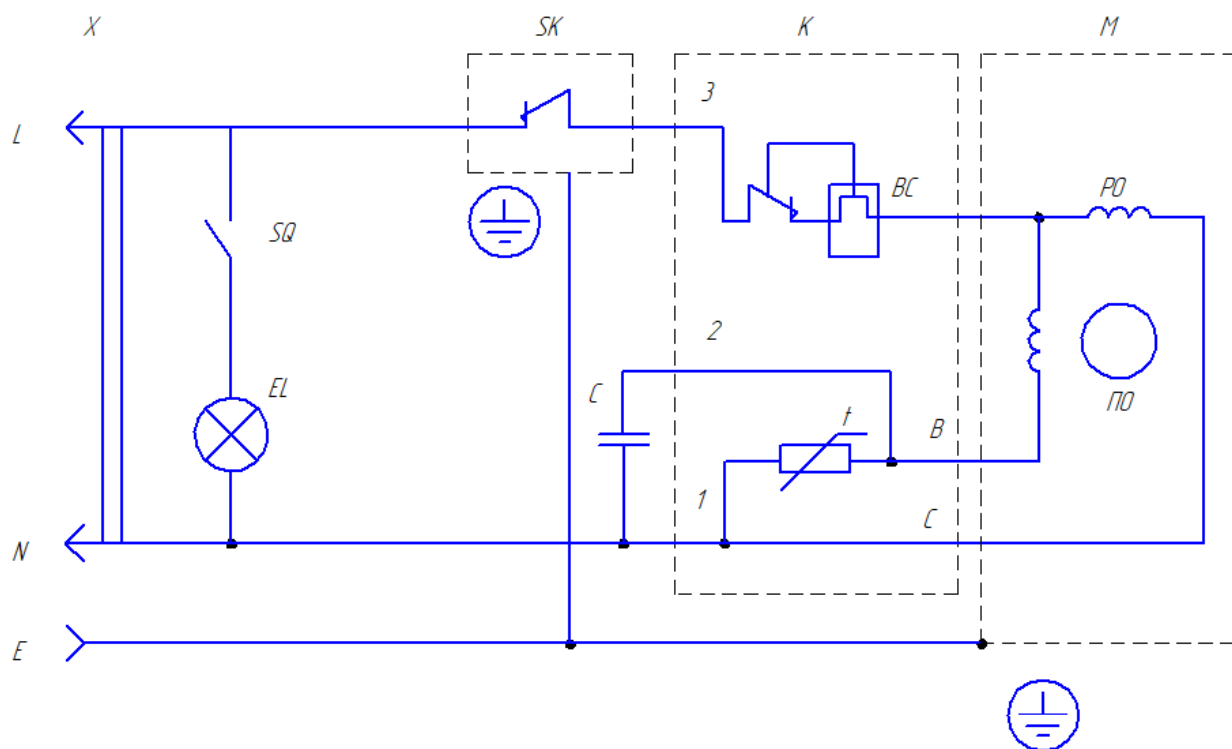


Рисунок 2.6 - Електрична схема побутового холодильника

## 2/6 Висновки до другого розділу

У цьому розділі розглянуто конструкцію мотор-компресора побутового холодильника. Описано основне призначення мотор-компресора в системі холодильного обладнання. Розглянуто теоретичні аспекти його роботи та наведено конструкцію з деталізацією основних елементів. Представлено схему функціонування мотор-компресора в системі охолодження, а також електричну схему холодильника.

На основі проведеного аналізу визначено технічні характеристики холодильного обладнання та мотор-компресора, необхідні для подальшого дослідження їх основних параметрів і роботи.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

### 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ МОТОР-КОМПРЕСОРА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО КІНЕМАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

#### 3.1 Аналіз функціональних можливостей прикладних програм

##### 3.1.1 Загальна інформація

Впровадження інформаційних технологій у навчальний процес спричиняє значні зміни в підходах до викладання спеціалізованих дисциплін. Згідно з вимогами державних освітніх стандартів, випускники мають не лише володіти професійними знаннями, вміннями, навичками та компетенціями, а й бути готовими до засвоєння нових знань, що сприятимуть їхній професійній конкурентоспроможності. Активне застосування інформаційних технологій викликало підвищений попит на висококваліфікованих фахівців, які здатні працювати з системами автоматизованого проектування [23].

У вищих навчальних закладах основна увага приділяється підготовці конкурентоспроможних фахівців. Важливим елементом інженерної освіти є навчання навичкам проектування та моделювання. Конкурентоспроможність студентів забезпечується завдяки можливості виконувати завдання як традиційними методами моделювання та аналізу отриманих результатів, так і з використанням систем автоматизованого проектування (САПР) і пакетів прикладних програм. Ці інструменти інтегровані в навчальні дисципліни, такі як проектування механізмів і машин, деталі машин і основи конструювання, прикладна механіка, основи розрахунку і конструювання типових вузлів і механізмів, електропобутова техніка, теорія автоматичного керування [23].

Для досягнення високого рівня професіоналізму майбутній інженер має опанувати одну або кілька систем автоматизованого проектування і вміти працювати з прикладними програмами. Впровадження нових технологій у

навчальний процес не лише зробило його більш інтенсивним і захопливим для студентів, але й значно спростило створення конструкторських і технологічних проектів [23].

### 3.1.2 Огляд та аналіз можливостей прикладних програм

Для навчання роботі в системах автоматизованого проектування (САПР) технічні кафедри обрали програмне забезпечення, яке найкраще відповідає вимогам виконання інженерних завдань [24]. До цього переліку входять як вітчизняні програми: АРМ, TFlex, так і закордонні рішення: AutoCAD, ANSYS, Comsol, Simufac, Adams, Nastran. Ці програми призначені для вирішення різноманітних інженерних завдань і відповідають міжнародним стандартам.

АРМ – це програмні продукти інженерного аналізу (CAE), розроблені для моделювання конструкцій з метою пошуку оптимальних проектно-конструкторських рішень та автоматизації підготовки конструкторської документації [24]. Ці програми ефективно застосовуються в наукових дослідженнях, проведенні експертиз, навчанні студентів, аспірантів і магістрантів технічних спеціальностей, а також у перепідготовці інженерів. АРМ використовується для аналізу критичних ситуацій та виконання інших завдань в усіх сферах інженерної діяльності.

TFlex – це професійна конструкторська програма, яка поєднує широкі можливості параметричного 2D і 3D моделювання [25]. Вона відзначається високою продуктивністю, стабільністю та надає інноваційні інструменти для створення спеціалізованих САД-систем, зокрема у галузях проектування трубопроводів, металоконструкцій, електричних схем, будівель та інших конструкцій. Система TFlex розрахована на професіоналів у сфері проектування, забезпечуючи весь необхідний функціонал для розрахунку, моделювання та підготовки виробництва конструкцій будь-якої складності.

AutoCAD – це програма для 2D і 3D автоматизованого проектування та креслення, створена компанією Autodesk [26]. AutoCAD та його спеціалізовані додатки активно використовуються у машинобудуванні, будівництві, архітектурі та інших галузях промисловості. Популярність AutoCAD у світі обумовлена його адаптивністю та можливістю налаштування під потреби користувачів, що дозволяє значно розширити базовий функціонал системи.

ANSYS – це універсальна програмна система аналізу методом кінцевих елементів, яка протягом останніх трьох десятиліть залишається однією з найпопулярніших серед фахівців у сфері CAE [27]. ANSYS призначена для вирішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформованих тіл і конструкцій, включаючи задачі контактної взаємодії, геометрично та фізично нелінійні задачі.

### 3.1.3 Пакет автоматизованого проектування фізичних неоднорідних систем ПРАНС

Пакет прикладних програм ПРАНС-ПК автоматизує проектування динамічних систем, що включають елементи різної фізичної природи: гідравлічні, пневматичні, механічні, електричні, магнітні тощо [28]. Головна особливість пакету полягає у проектуванні самої системи, а не її математичної моделі чи структурної схеми, що спрощує роботу розробників і підвищує ефективність проектування завдяки використанню галузевої термінології.

Основні функції пакету [28]:

1. Розрахунок тимчасових характеристик - аналіз змінних (тиск, витрати, струм, швидкість тощо) за будь-яких законів зовнішніх впливів.

2. Розрахунок частотних характеристик - визначення співвідношення вхід-вихід у натуральному та логарифмічному масштабах.
3. Розрахунок сталих станів - визначення змінних у системі при сталих впливах.
4. Спектральний аналіз - отримання характеристик сигналів, таких як амплітуди, резонансні частоти, спотворення.
5. Моделювання статистичних досліджень - оцінка надійності, параметрів і допустимих відхилень системи.
6. Багатоваріантний аналіз - повторення розрахунків для різних умов роботи.
7. Розрахунок найгіршого випадку - визначення характеристик за несприятливих параметрів.
8. Параметрична оптимізація - пошук оптимальних вихідних характеристик системи.
9. Розрахунок оптимальних допусків - встановлення меж відхилень параметрів.

Пакет обладнаний банком даних із моделями елементів для їх повторного використання, має модульну структуру та засоби динамічного розподілу пам'яті. Закони функціонування елементів задаються компонентними рівняннями, що пов'язують змінні типу потоку (наприклад, струм) із змінними типу потенціалу (наприклад, напруга). Математична модель системи створюється через об'єднання компонентних і топологічних рівнянь [28].

### 3.2 Аналіз кінематичних і динамічних характеристик механізму машини

При проектуванні шарнірно-важільних механізмів кінематичний і динамічний аналіз зазвичай виконують графоаналітичним методом, але

використання ЕОМ значно скорочує час і підвищує точність, створюючи можливості для синтезу механізмів із заданими характеристиками [29].

Кінематичний аналіз із застосуванням комп'ютера базується на трансцендентних рівняннях, що залежать від конкретного механізму, але виникають труднощі з неоднозначностями знаків і вибором квадрантів [28]. Це ускладнює програмування для кожного механізму.

У пакеті "ПРАНС-ПК" для аналізу механізмів використовується методика, яка розглядає найпростіші механізми як такі, що передають швидкісні й силові змінні через трансцендентні рівняння. Динамічний вплив проміжних ланок враховують шляхом приведення їх мас до вхідних і вихідних ланок, але це знижує точність і не дозволяє повністю оцінити внутрішні параметри, такі як сили в шарнірах або відносні швидкості ланок.

Інший підхід описує шарнірно-важільну ланку як тверде тіло з масою  $m$  і моментом інерції  $J$ , де положення шарнірів задається векторами відносно центру мас [28].

На рис. 3.1 наведено приклад моделі ланки площинного механізму.

У моделі позначено:

- А,В,С – шарніри,
- ЦМ – центр мас,
- $L_i$  – вектор положення  $i$ -го шарніру відносно центру мас,
- $F_i$  – вектор зусилля від  $i$ -го шарніру,
- $V_i$  – вектор швидкості  $i$ -го шарніру,
- $m$  – рушійний момент,
- $\omega$  – кутова швидкість обертання.

Рух ланки, що є твердим тілом, під дією сил у шарнірах і моменту описується рівняннями руху центру мас після приведення всіх сил до цього центру та обертання ланки навколо нього:

$$\sum_{i=1}^{i=3} F_{ix} = m \cdot \frac{dV_{ix}}{dt}; \quad \sum_{i=1}^{i=3} F_{iy} = m \cdot \frac{dV_{iy}}{dt}; \quad \sum_{i=1}^{i=6} M_{Fi} + M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.1)$$

Пакет прикладних програм «ПРАНС – ПК» дозволяє створювати універсальну модель твердого тіла, що є основою для аналізу шарнірно-важільних механізмів. Для конкретизації такої моделі необхідно лише задати довжини  $L$  векторів, що визначають положення шарнірів, початкові значення кутів між цими векторами і осями координат, а також масу та момент інерції ланки.

Схематичне заміщення моделі такого тіла наведено на рис. 3.2.

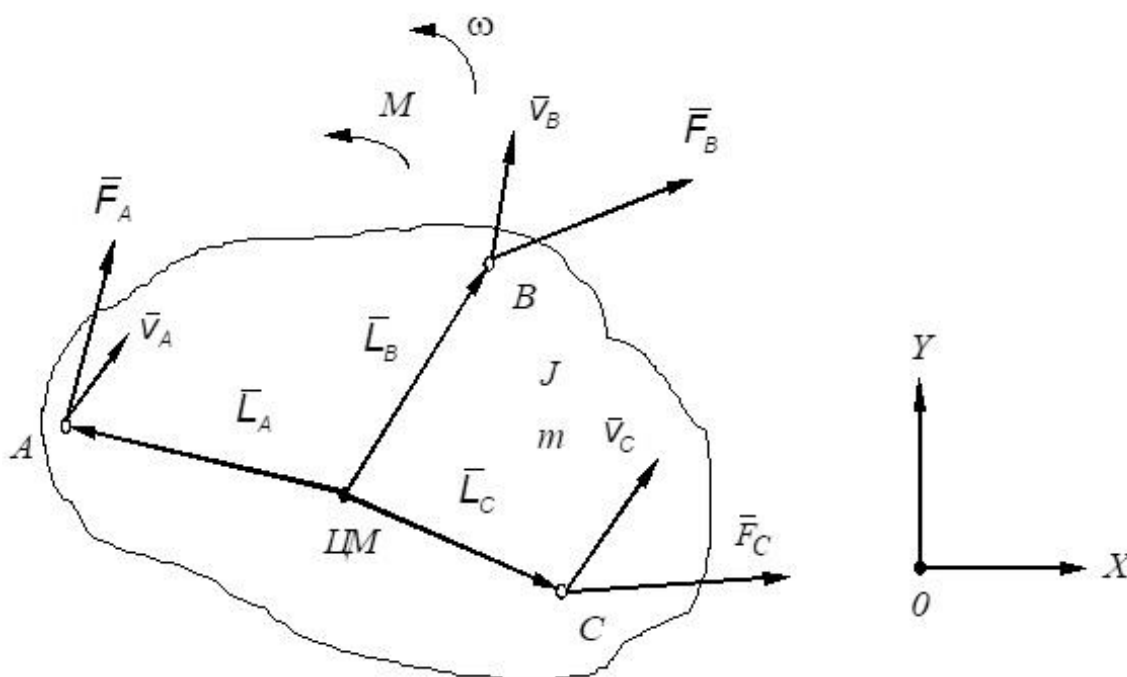


Рисунок 3.1 - Модель ланки площинного механізму

Для аналізу руху шарнірно-важільного механізму позначимо основні параметри та їх математичні вирази:

- $XI$  - полюс проекції швидкості  $i$ -го шарніру на вісь  $y$ ,
- $UI$  - полюс проекції швидкості  $i$ -го шарніру на вісь  $x$ ,
- $EXI$  - додаткова швидкість  $i$ -го шарніру вздовж осі  $x$  за рахунок обертання тіла навколо центру мас (обчислюється як  $\omega L_i \sin \alpha_i$ ),
- $EYX$  - додаткова швидкість  $i$ -го шарніру вздовж осі  $y$  за рахунок обертання тіла навколо центру мас,
- $CM1$  та  $CM2$  - маси, що дорівнюють  $m$ ,

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

- CJ - момент інерції, що дорівнює J,
- M - полюс кутової швидкості,
- JYI - додатковий момент обертання за рахунок проекції сили i-го шарніру на вісь y відносно центру мас,
- JFI - додатковий момент обертання за рахунок проекції сили i-го шарніру на вісь x відносно центру мас,
- FI - полюс кута повороту тіла,
- CFI - елемент інтегратора для обчислення кута повороту.

Ці параметри використовуються для створення математичної моделі динаміки шарнірно-важільного механізму, яка дозволяє враховувати вплив сил, моментів та швидкостей на рух системи.

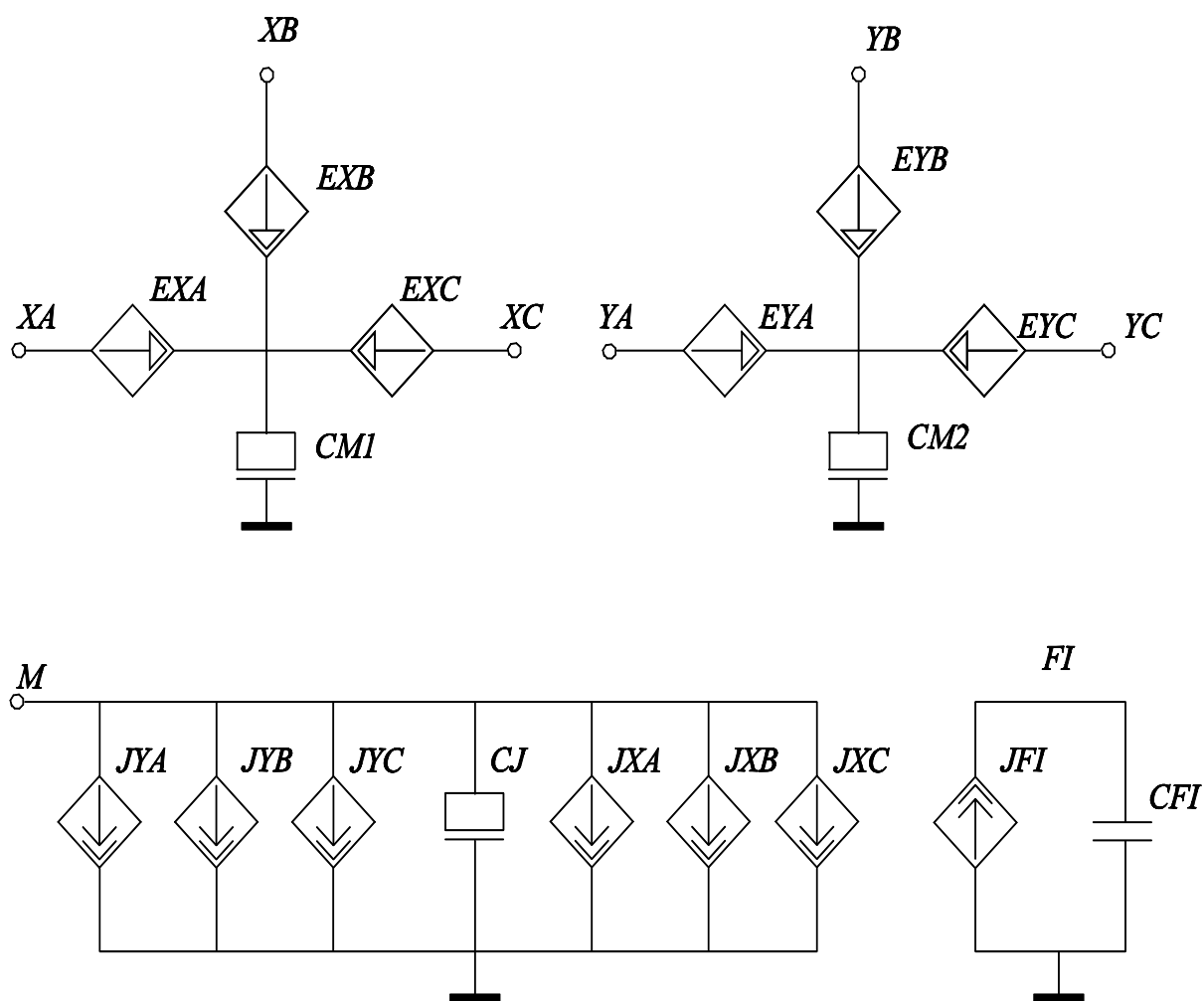


Рисунок 3.2 - Схема заміщення трьох шарнірної ланки площинного механізму для пакета „ПРАНС - ПК”

Об'єднуючи наведені моделі, тобто встановлюючи зв'язки між шарнірами різних ланок через відповідні полюси, можна створити модель механізму будь-якого рівня складності. Як приклад розглянемо модель кривошипно-повзунного механізму, який складається з трьох рухомих ланок. Для цього використовувалася спрощена модель із двома шарнірами.

Опис механізму задається трьома рядками:

- кривошип (список пов'язаних полюсів) = СП1. ДВШПАНКА;
- шатун (список пов'язаних полюсів) = СП2. ДВШПАНКА;
- коромисло (список пов'язаних полюсів) = СП3. ДВШПАНКА.

Параметри кожної ланки задаються у форматі: параметр = значення.

Для випробувального розрахунку були встановлені наступні параметри кривошипно-повзунного механізму:

- маси ланок: кривошип - 30 г, шатун - 150 г, коромисло - 300 г;
- моменти інерції: кривошип - 0,1 г·м, шатун - 50 г·м, коромисло - 50 г·м;
- довжини ланок: кривошип — 3 см, шатун — 10 см, коромисло — 20 см;
- початкове розташування ланок: кривошип - вертикально вгору, шатун - горизонтально, коромисло - вертикально вгору;
- центри мас знаходяться посередині кожної ланки;
- швидкість обертання кривошипа - 50 об/с.

Аналіз механізму, проведений за допомогою пакета «ПРАНС-ПК», дозволив визначити всі необхідні кінематичні та динамічні характеристики, зокрема:

- абсолютні та відносні швидкості;
- прискорення;
- кути повороту;
- момент на кривошипі;

- реакції у шарнірах від інерційних сил руху ланок (досягали значень близько 900 Н);

-інерційні моменти ланок.

Цей підхід демонструє ефективність використання пакета «ПРАНС-ПК» для аналізу механізмів різної складності.

У запропонованій методиці рух ланок моделюється як рух окремих твердих тіл у площині координат  $x$ - $y$  під впливом реакцій у шарнірах. Ланки представляються електричними моделями, де з'єднання через шарніри відповідає електричному з'єднанню через полюси. База, яка моделює стояк, має нульовий потенціал, а потенціали полюсів відповідають швидкості шарнірів у напрямках  $x$  і  $y$ . Електричний струм між полюсами відображає сили взаємодії між ланками.

Методика дозволяє моделювати рух і взаємодії механізмів, але при з'єднанні кількох ланок у замкнуте електричне коло, наприклад, у чотирьохланковому механізмі, програма «ПРАНС-ПК» припиняє розрахунки через похибки округлення. Це вказує на необхідність удосконалення алгоритмів або підвищення точності обчислень.

Розрахунок моделі на ЕОМ базується на законах Кірхгофа: сума струмів у вузлі та падінь напруги в контурі дорівнюють нулю. Модель ланки включає залежні джерела напруги (рух уздовж осей  $X$  і  $Y$ ) і струму (обертальний рух), значення яких визначаються математичними формулами на кожному етапі. Замикання електричних кіл у моделі відповідає замиканню механічних контурів ланками. Однак через похибки чисельних розрахунків закони Кірхгофа виконуються лише приблизно, що обмежує точність моделі.

Для уникнення похибок у замиканні моделей ланок у єдине електричне коло пропонується використовувати хоча б одне з'єднання через залежне джерело струму замість напруги. Таке джерело струму, моделюючи пружно-пластичний контакт металевих поверхонь, забезпечує нульову суму струмів і

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

напруг у контурі. У пакеті «ПРАНС-ПК» передбачені спеціальні елементи для реалізації таких джерел.

Методика для плоских механізмів класифікує ланки з поступальними парами на три типи: повзун із обертовою парою, куліса, повзун із поступальною парою. Наприклад, для повзуна з обертовою парою (рис. 3.3, а), рух забезпечується реакціями шарніра  $F_A$  і поступальної пари  $F_B$ .

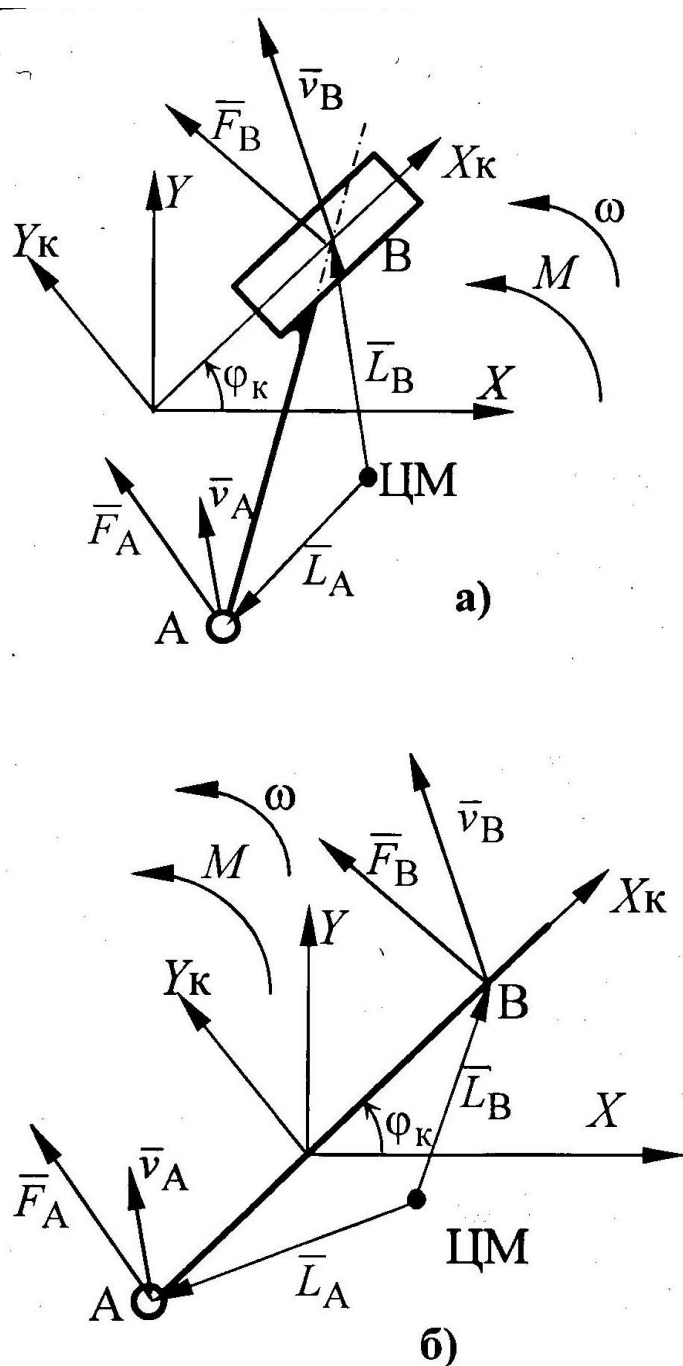


Рисунок 3.3 - Фізична модель повзуна з обертовою парою (а) і куліси (б)

Відмінність у моделюванні пов'язана зі зміною напрямів проекцій реакцій: у шарнірі вони постійні, а в поступальній парі залежать від осей куліси ( $X_k$  і  $Y_k$ ) та кута  $\kappa$ , що змінюється під час її обертання. Це дозволяє адаптувати схему повзуна до змін у його моделі.

Фізичну модель куліси (рис. 3.3, б) подано як двошарнірну ланку, де контакт куліси з повзуном умовно вважається другим шарніром (точка В). Контактні взаємодії куліси в системі координат  $X_k$ – $Y_k$  переносяться в систему  $X$  –  $Y$  через перетворювач координат (рис. 3.4), встановлений перед схемою заміщення двошарнірної ланки.

На відміну від звичайної двошарнірної ланки, у кулісі положення точки В змінюється відносно центру мас, тому в схему додано компоненти для врахування руху центру мас вздовж осей  $X$  і  $Y$ . Також враховано додаткові швидкості, що виникають через зміну відстані між точками А та В. Для обліку змін моментів сили взаємодії при повороті куліси додано два джерела моменту в коло обертового руху.

Додаток до схеми заміщення повзуна щодо схеми заміщення двошарнірної ланки наведено на рис.3.4.

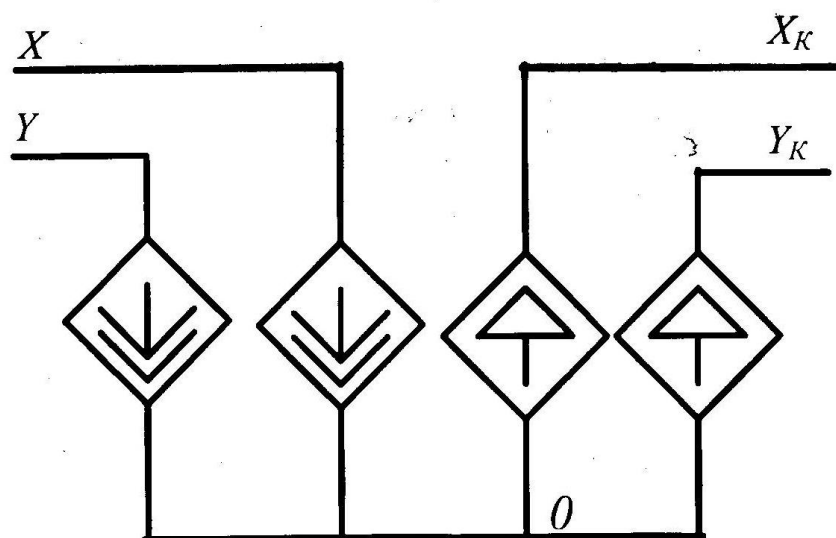
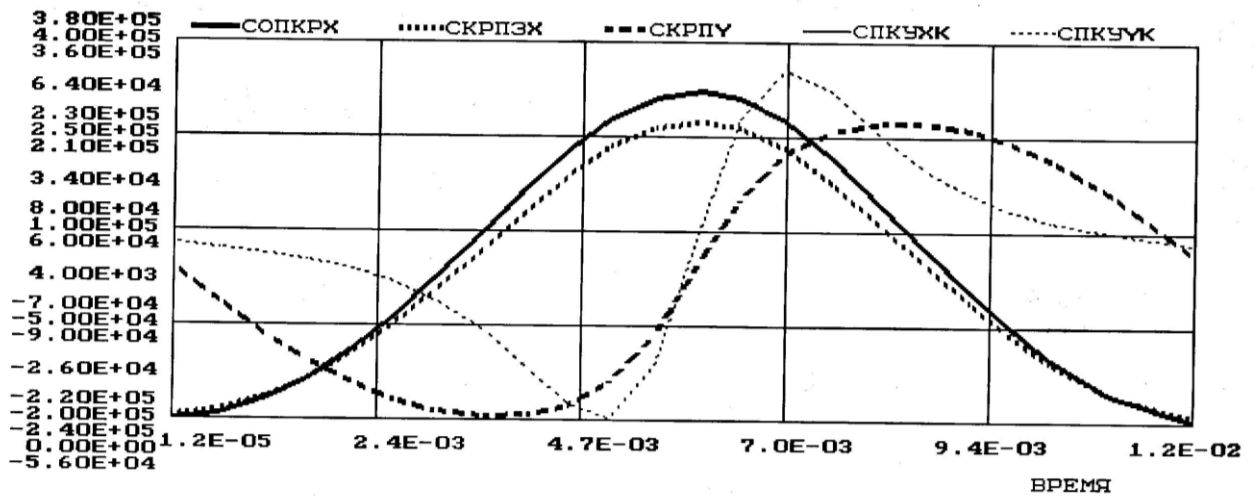


Рисунок 3.4 - Додаток до схеми заміщення повзуна щодо схеми заміщення двошарнірної ланки

Приклад схеми заміщення для кривошипно-кулісного механізму:

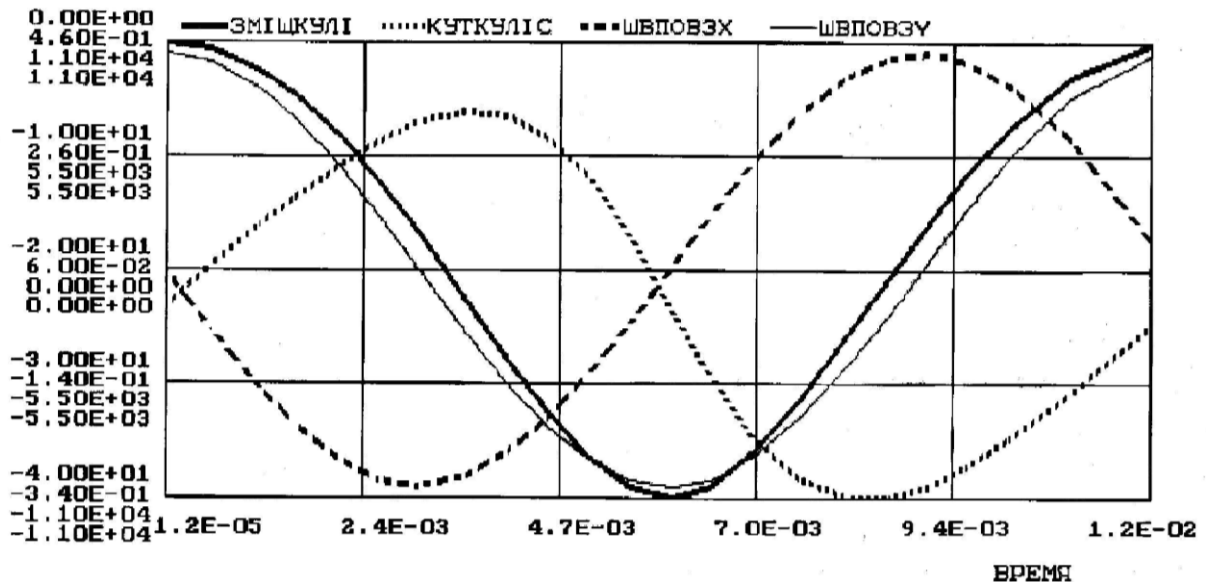
- кривошип: маса – 10 г, момент інерції – 1 кг·мм, довжина – 20 мм, центр мас посередині, швидкість обертання – 5000 об/хв;
- повзун: маса – 40 г, момент інерції – 0,5 кг·мм;
- куліса: маса – 10 г, момент інерції – 1 кг·мм, довжина – 80 мм, центр мас посередині.

Отримані результати моделювання наведено на рис.3.5 і 3.6.



ЗМІЩКУЛІ – зміщення повзуна вздовж куліси, КУТКУЛІС – кут повороту куліси, ШВПОВЗХ – швидкість повзуна вздовж осі X, ШВПОВЗУ – швидкість повзуна вздовж осі Y.

Рисунок 3.5 - Кінематичні результати розрахунку кривошипно – кулісного механізму:



СОПКРХ – зусилля взаємодії кривошипа з опорою вздовж осі Х,  
 СКРПЗХ – зусилля взаємодії кривошипа з повзуном у шарнірі вздовж осі Х,  
 СКРПУ – зусилля взаємодії кривошипа з повзуном у шарнірі вздовж осі У,  
 СПКУХК – зусилля взаємодії повзуна з кулісою вздовж направляючої,  
 СПУУК – зусилля.

Рисунок 3.6 - Динамічні результати розрахунку кривошипно – кулісного механізму:

### 3.3 Розрахунок параметрів кривошипно-кулісного механізму компресора

#### 3.3.1 Визначення маси поршня і обойми

Масу поршня і обойми, як однієї деталі знаходимо сумою двох окремих деталей за наступною формулою:

$$m_3 = \rho \cdot \left[ \pi \frac{(D^2 - d_1^2)}{4} \cdot l_1 + \pi \cdot \frac{(D_2^2 - d_2^2)}{4} \cdot l_2 \right], \quad (3.1)$$

де,  $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг / м}^3$  - питома густина сталі;

$l_1, l_2$  - довжини поршня та обойми в м;

$d_1, d_2$  - внутрішній діаметр поршня та обойми м;

$D$  - зовнішній діаметр поршня, в м;

$D_2$  - зовнішній діаметр обойми, в м,

$$m_3 = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \left[ 3,14 \frac{(0,02^2 - 0,015^2)}{4} \cdot 0,04 + 3,14 \cdot \frac{(0,056^2 - 0,05^2)}{4} \cdot 0,1 \right] = 0,25(\text{кг}),$$

### 3.3.2 Знаходження моменту інерції поршня і обойми

Центр мас обох деталей є на центральній осі поршня і відстань від вісі поршня до пальця кривошипа можна знайти з наступного рівняння:

$$m_{об} \cdot x = m_n \cdot (l - x), \quad (3.2)$$

де  $m_{об}, m_n$  - маси обойми та поршня, відповідно складають

$$m_n = 70\text{г} = 0,07\text{кг}, \quad m_{об} = 180\text{г} = 0,18\text{кг};$$

$l$  – відстань між центрами мас,  $l=0,02\text{м}$ /

З рівняння (3.2) знаходимо:

$$x = \frac{l \cdot m_n}{m_{об} + m_n}, \quad (3.3)$$

$$x = \frac{0,02 \cdot 0,07}{0,25} = 0,08 \cdot 0,07 = 0,0056\text{м}.$$

Момент інерції двох складових мас  $m_n$  і  $m_{об}$  щодо їх спільного центру мас визначається за наступною формулою:

$$I_3 = m_{об} \cdot x^2 + m_n (l - x)^2 \quad (3.4)$$

$$I_3 = 0,18 \cdot 0,0056^2 + 0,07 \cdot (0,02 - 0,0056)^2 = 0,21 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

### 3.3.3 Обчислення маси та моменту інерції каменю

Камінь - це циліндр, який має діаметр  $d_k = 50 \text{ мм}$ , довжину  $l_k = 30 \text{ мм}$  з отвором під палець кривошипу діаметром  $d_{кр} = 10 \text{ мм}$ . Тому масу каменя можна знайти із наступної формули:

$$m_2 = \rho \cdot \left( \frac{\pi d^2 k}{4} \cdot l_k - \frac{\pi d^2 k_p}{4} \cdot dk \right), \quad (3.5)$$

$$m_2 = \frac{7,8 \cdot 10^3 \cdot 3,14}{4} \cdot (0,05^2 \cdot 0,03 - 0,01^2 \cdot 0,05) = 0,392 \text{ кг}.$$

Момент інерції каменя визначається як момент інерції вагомого циліндра, який обертається навколо центра мас посередині.

Тоді:

$$I = \frac{1}{4} m_2 l_k^2, \quad (3.6)$$

$$I = \frac{1}{4} \cdot 0,392 \cdot 0,03^2 = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

### 3.3.4 Визначення маси та моменту інерції кривошипу разом з противагою та ротором

Маса циліндра противаги знаходиться із слідуючого виразу:

$$M_{ц.нр} = l_{нр} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \rho, \quad (4.7)$$

$$M_{ц.нр} = 0,0090 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 1,5 \text{ кг}$$

Радіус знаходження центру мас сектора противаги дорівнює:

$$R_{ц.м.нр.} = 0,424 \cdot \frac{d_1^3 - d_2^3}{d_1^2 - d_2^2} = 0,424 \cdot \frac{0,05^3 - 0,01^3}{0,05^2 - 0,01^2} = 0,0219 \text{ м.}$$

Тоді маса противаги, яка зосереджена в центрі мас буде знаходитися з слідуючої залежності:

$$m_{нр} = M_{ц.нр} \frac{R_{кр}}{R_{ц.м.нр.}}, \quad (3.8)$$

$$m_{нр} = 1,5 \cdot \frac{0,0145}{0,0219} = 0,93 \text{ кг.}$$

Момент інерції противаги визначається із слідуючої формули:

$$I_{np} = m_{np} \cdot R_{ц.м.нр.}^2 \quad (3.9)$$

$$I_{np} = 0,93 \cdot 0,0219^2 = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Маса ротора визначається:

$$m_p = \rho \cdot l_{ром} \frac{\pi d_{ром}^2}{4}, \quad (3.10)$$

$$m_p = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,06^2}{4} = 1,2(\text{кг})$$

Загальна маса ротора, противаги і пальця знаходиться із:

$$M_1 = m_p + m_{np} + m_n, \quad (3.11)$$

$$M_1 = 1,2 + 0,93 + 0,06 = 2,19 \text{ кг}.$$

Відстань загального центра мас від вісі ротора визначається із наступного виразу:

$$R_{ц.м} = 0,0067 \text{ м}.$$

Остаточний момент інерції визначається із формули:

$$I_1 = M_1 \cdot R_{ц.м.}^2, \quad (3.12)$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$I_1 = 2,19 \cdot 0,0067^2 = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

### 3.4 Розробка моделі кривошипно-кулісного механізму мотор-компресора

На рис. 3.7 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДД1]) зображено схему заміщення механізму. У цій схемі три складові елементи - кривошип, камінь і обойма - представлені у вигляді трьох моделей двошарнірних ланок. Кожна ланка має свою унікальну назву та набір параметрів, які визначені у відповідних списках: СП1, СП2 та СП3.

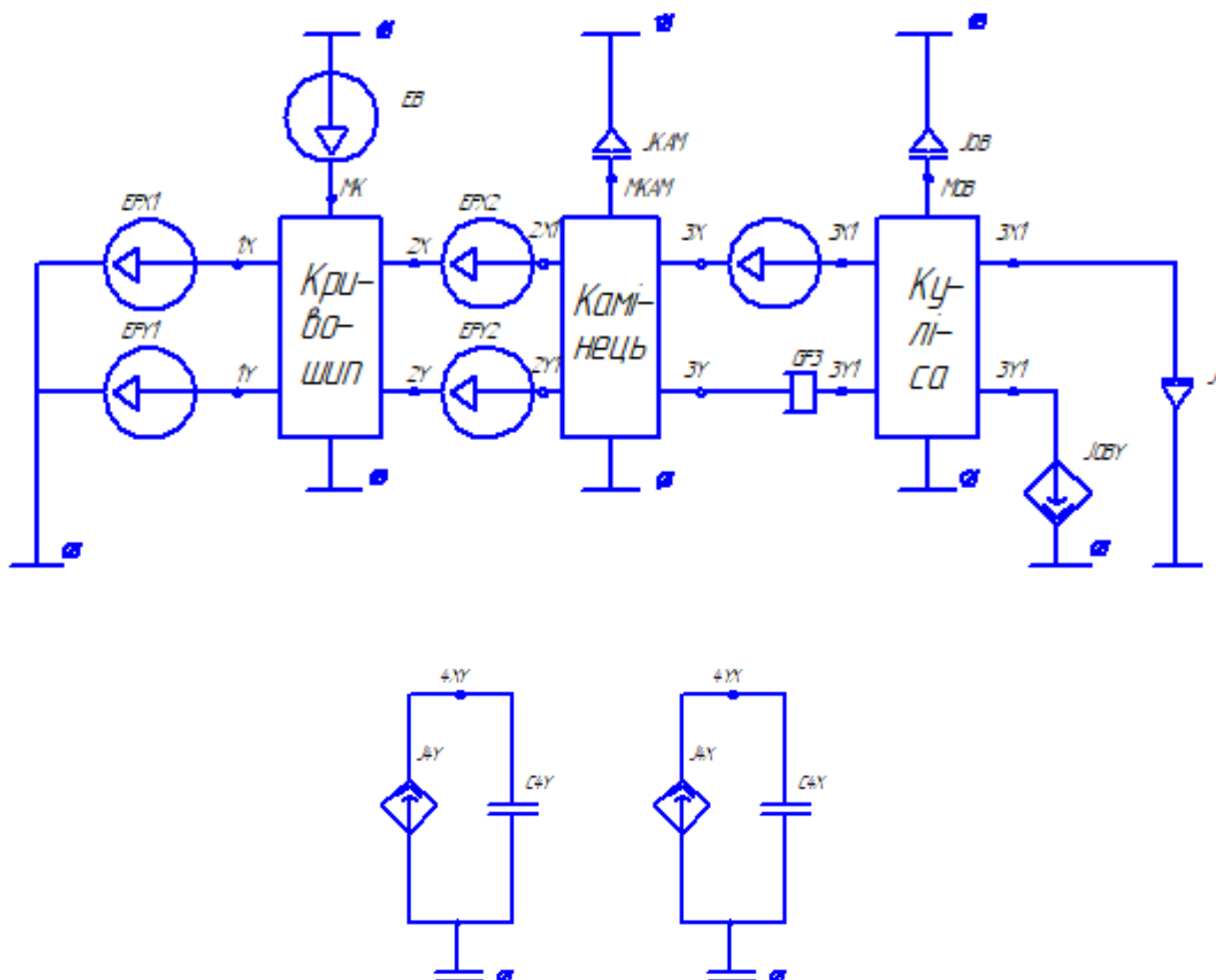


Рисунок 3.7 – Схема електрична заміщення кривошипно-кулісного механізму мотор-компресора

В додатку Б та на аркуші [МРМА24.00.00.000 ДД1] наведена програма для проектування.

Опишемо зв'язки між ланками механізму.

Кривошип через шарнір 1 пов'язаний із корпусом (вузол О) за допомогою двох нульових джерел напруги — EPX1 та EFY1, які виконують роль вимірювачів сил реакції цього шарніра вздовж відповідних осей X та Y. Подібними джерелами - EFX2 та EFY2 - з'єднані між собою камінь та кривошип у шарнірі 2. Камінь і обойма взаємодіють через пару тертя: зусилля, яке передається вздовж осі X, реалізується за допомогою джерела EFX3, а сила вздовж осі Y обумовлена тертям в'язкої природи, що моделюється компонентом GF3. Обойма жорстко закріплена у русі вздовж осі Y (через джерело IOBX) і має можливість вільно рухатись вздовж осі X (за допомогою джерела IM).

Кривошип приводиться в дію зовнішнім джерелом напруги EV, яке забезпечує обертання зі сталою швидкістю 3000 об/хв (еквівалентно  $314,159 \text{ c}^{-1}$ ).

Для запобігання неузгодженості та некоректного моделювання, моментні вузли каменя та обойми замкнені на корпус через нульові джерела моменту. Це гарантує, що вузли не залишаються «висіти» без зв'язків. Напруги на цих нульових джерелах дозволяють визначити швидкість обертання каменя та обойми, яка у нашому випадку повинна дорівнювати нулю.

Вузол 4x може бути додатково навантажений силою тертя або технологічною силою, що додається до моделі. На схемі також передбачено два інтегратори, які визначають переміщення обойми вздовж осей X і Y.

На рис. 3.8–3.12 (аркуш [МРМА24.00.00.000PP1]) представлені результати моделювання роботи механізму протягом одного повного оберту

кривошипа (0,02 с). У цих графіках використані наступні позначення змінних:

- сили контакту між обоймою та корпусом вздовж осі Y:  
 $IOV=СИЛАЗАМИ$ ;

- момент на валу кривошипа:  $IOV=МОМВАЛІ$ ;

- реактивні сили корпусу на кривошип вздовж осей:  
 $IEFX1=РЕАККРХІ$ ,  $IEFY1=РЕАККРУІ$ ;

- сили взаємодії між кривошипом та каменем: ( $IEFX2 = СИЛАКРКХ$ ,  
 $IEFY2 = СИЛАКРКУ$ );

- величина переміщення обойми вздовж осі X (вліво — від'ємне значення):  $IC4X=ПЕРОБХІ$ ;

- величина переміщення обойми вздовж осі Y (догори — додатне значення): ( $IC4X = ПЕРОБХ$ ) вздовж у (догори - додатне) ( $IC4Y = ПЕРОБУ$ );

- сили взаємодії між каменем та обоймою вздовж осей: ( $IEFX3 = СИЛАКОБХ$ ,  $IGF3 = СИЛАКОБУ$ );

- швидкість обертання каменя навколо його центру мас:  
 $НУКАМ=СКВРКАМ$ .

Ці результати дозволяють аналізувати роботу механізму, враховуючи динамічні характеристики кожної ланки, їх взаємодію та розподіл навантажень у системі.

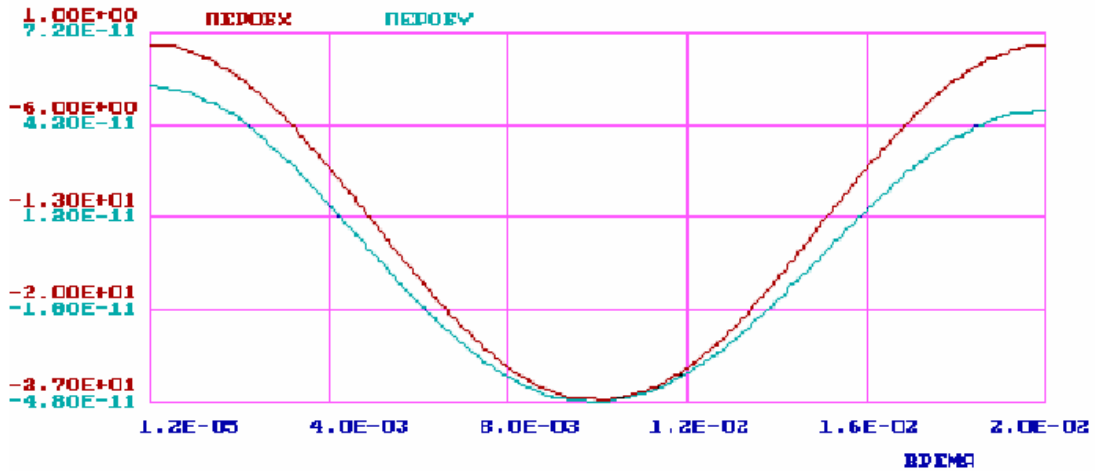


Рисунок 3.8 - Залежність величини переміщення обойми вздовж вісі x (PEPOBX) та переміщення обойми вздовж вісі y (PEPOBY) від часу одного оберту

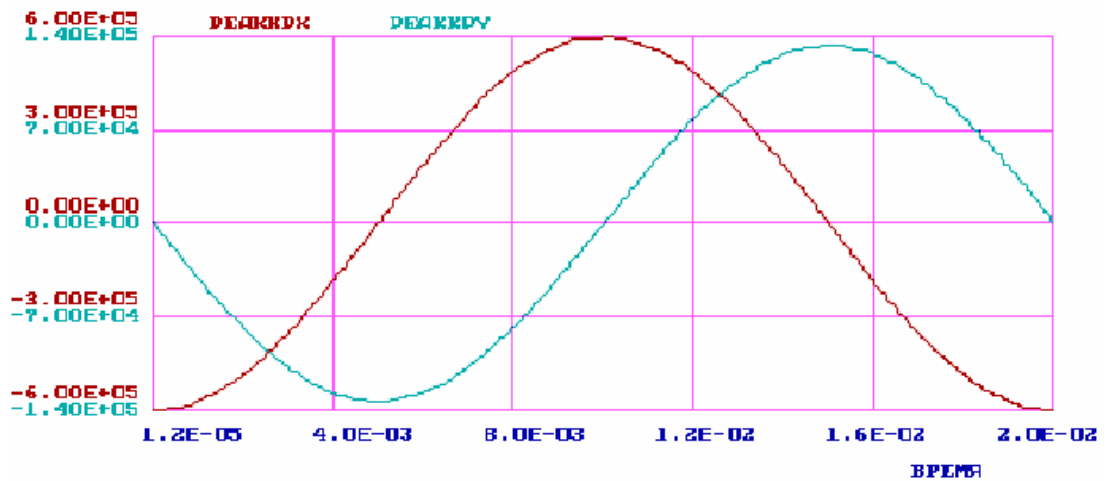


Рисунок 3.9 - Залежність зусилля взаємодії кривошипа та каменя вздовж вісі x (PEAKPX) та зусилля взаємодії кривошипа та каменя вздовж вісі y (PEAKPY) від часу одного оберту

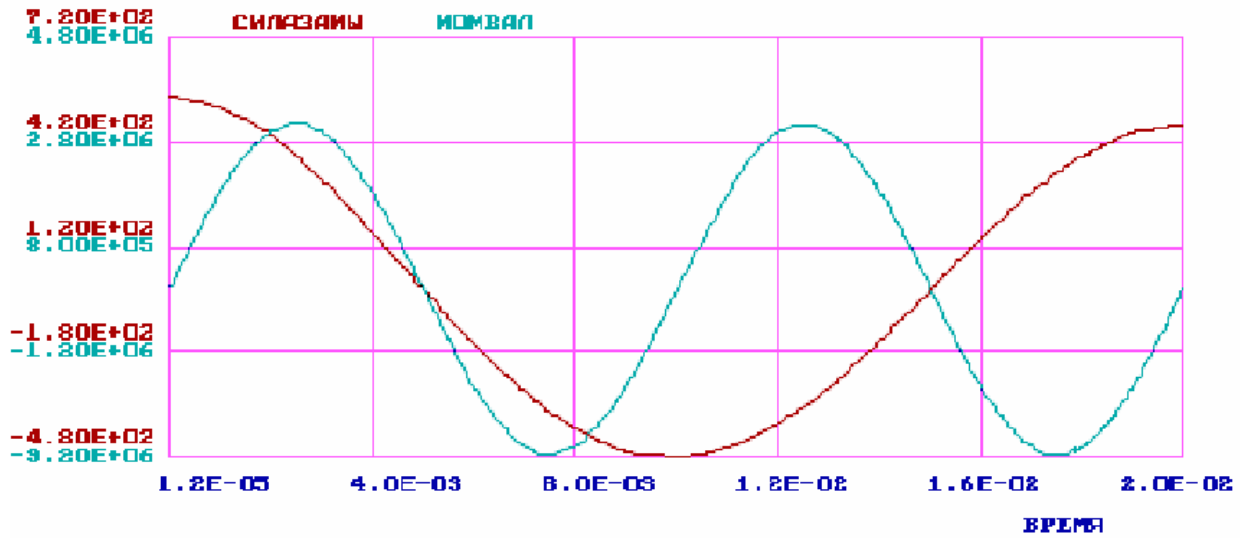


Рисунок 3.10 - Залежність зусилля контакту обойми щодо корпусу вздовж вісі у (СИЛАЗАМИ) та моменту на валу кривошипа (МОМВАЛ) від часу одного оберту

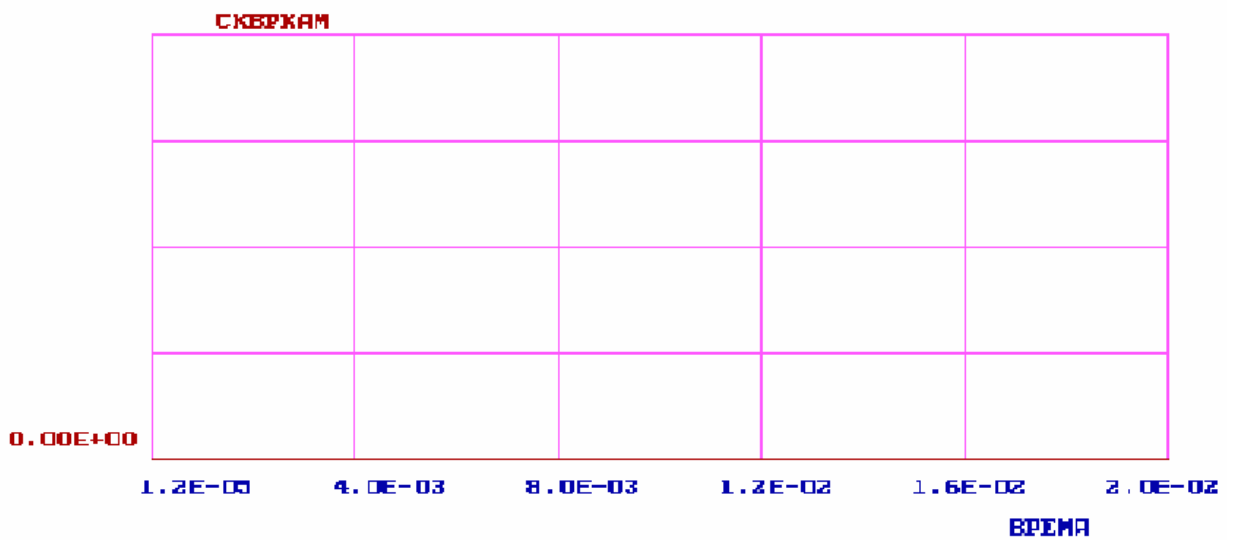


Рисунок 3.11 - Залежність швидкості обертання каменю навколо його центра мас (СВРКАМ) від часу одного оберту

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

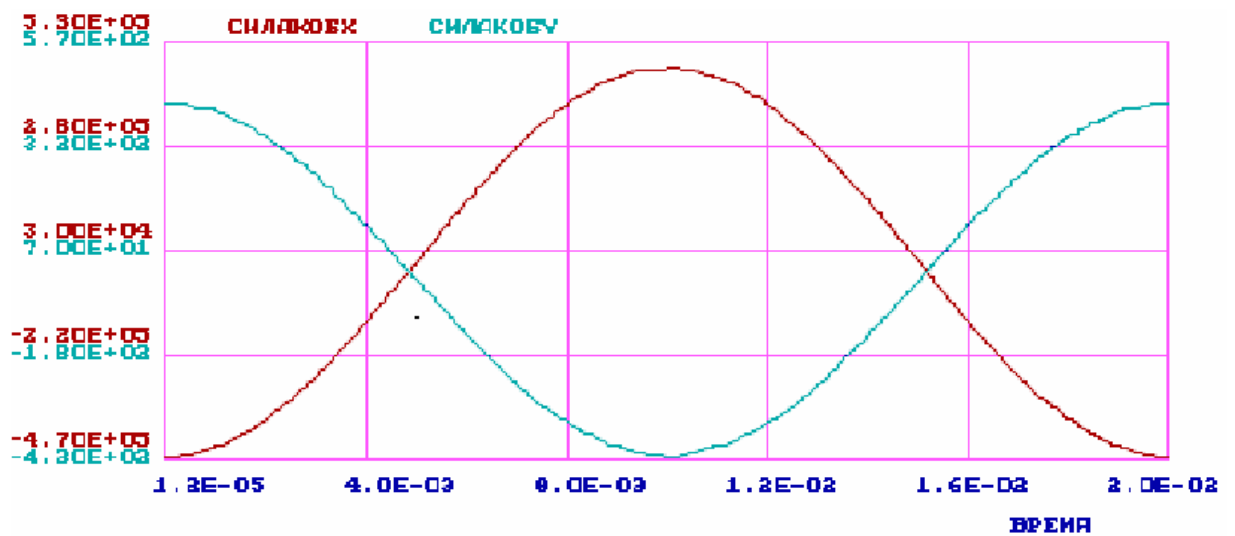


Рисунок 3.12 - Залежність зусилля взаємодії обойми та каменю вздовж вісей x та y (СИЛАКОБХ,СИЛАКОБУ) від часу одного оберту

Попередній аналіз моделі підтверджує її достовірність. Відповідно до розрахунків, камінь залишається нерухомим в плані обертання, а обойма зміщується вліво на відстань, рівну подвійному ексцентриситету, тобто на дві довжини кривошипа.

Задання параметрів моделі виконувалося у наступних одиницях виміру: розміри — в міліметрах, маси — в кілограмах.

Це означає, що отримані значення сил представлені в одиницях 0,001 Н, що відповідає заданим масштабам і одиницям виміру. Такий підхід забезпечує коректність моделювання і спрощує аналіз отриманих результатів.

### 3.5 Розробка моделі електричного двигуна мотор-компресора

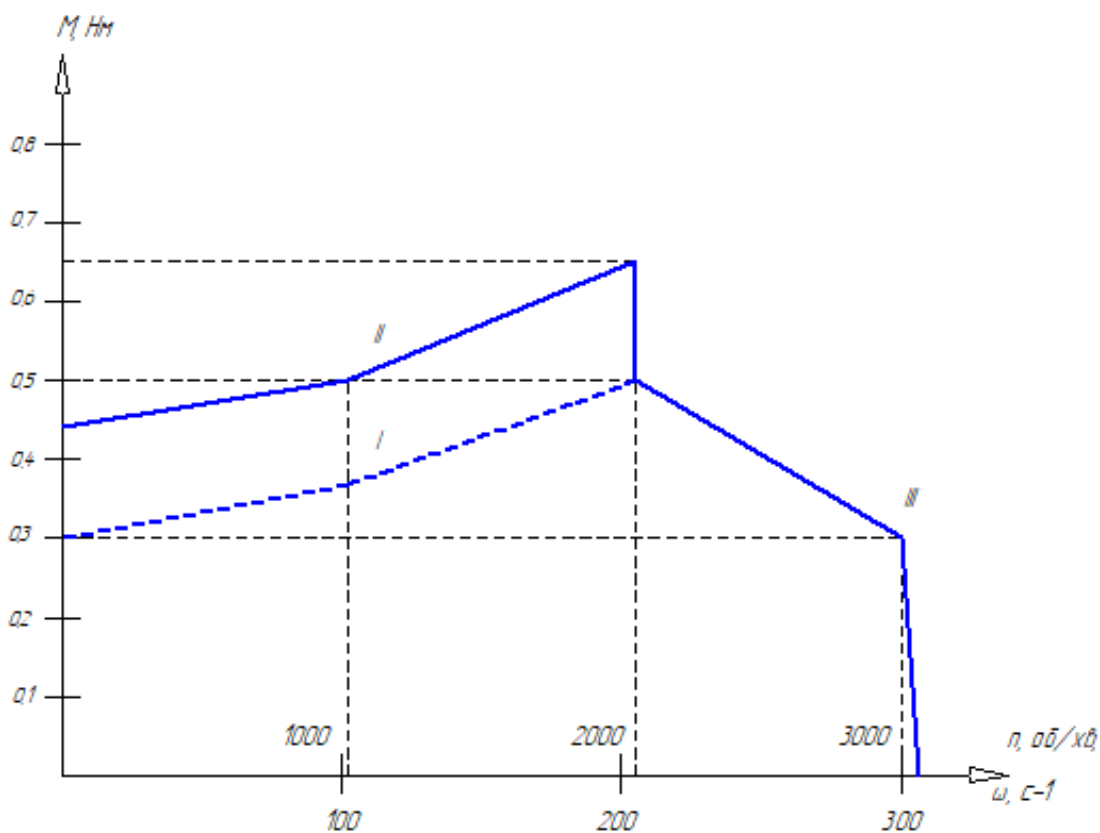
Електродвигун розглядається як джерело обертового моменту, що прикладається до його валу, а взаємодія між електродвигуном і компресором

моделюється через механічну характеристику. Ця характеристика є залежністю:

$$M = \int(\omega),$$

де  $M$  – момент;

$\omega$  – кутова швидкість, (додаток В, аркуш [МРМА24.00.00.000 ДДЗ]).



I, III - конденсаторний, II - з пусковою обмоткою/

Рисунок 3.13 - Зображення механічної характеристики електродвигуна:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
68

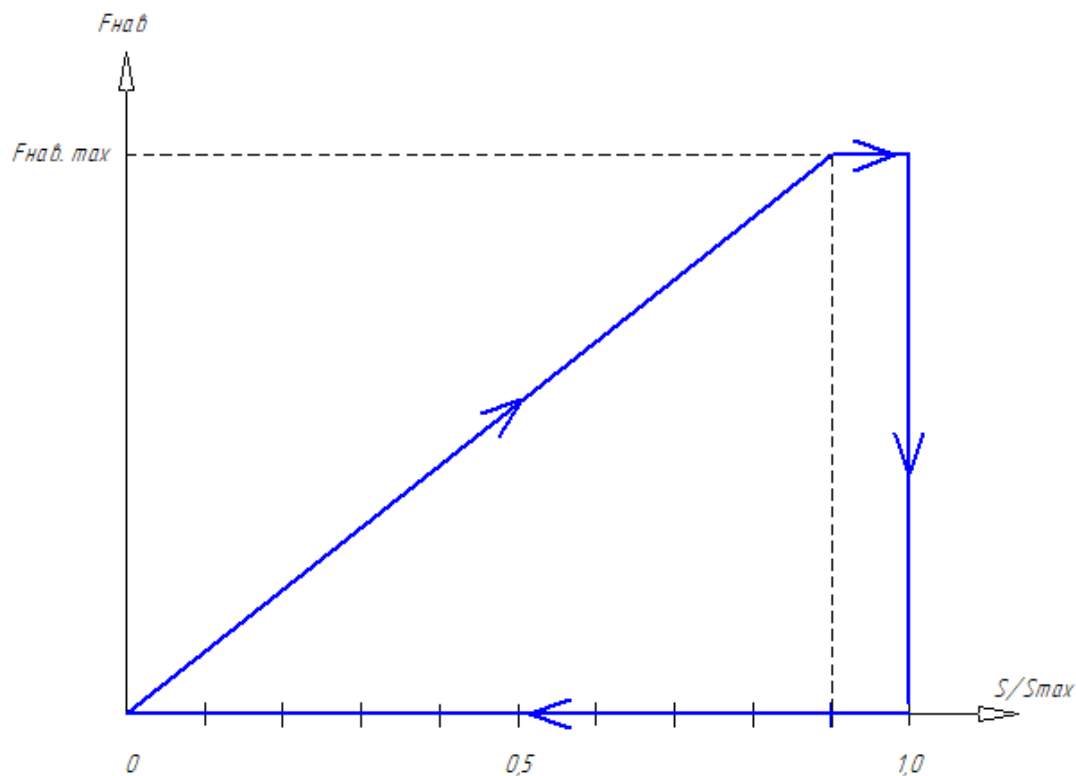


Рисунок 3.14 - Зображення сили  $F_{\text{нав}}$  навантаження зусиллям стискання пари в циліндрі в залежності від відносного ходу  $S/S_{\text{max}}$  поршня

Особливістю запуску електродвигуна в розглянутому випадку є робота у двох режимах. На початковому етапі двигун працює в режимі з використанням пускової обмотки (режим II), при якому конденсатор підключений через позистор. У цьому режимі забезпечується початковий розгін двигуна. Як тільки частота обертання досягає критичного значення, позистор нагрівається, його опір зростає до десятків кілоом, і конденсатор переключується в робочу обмотку. На цьому етапі двигун починає працювати як конденсаторний (режим III), завершуючи розгін до мінімальної швидкості обертання.

Залежність моменту  $M = f(\omega)$ , від частоти обертання  $\omega$  представлена у табличній формі у вигляді пар значень  $\omega$ - $M$ : 0, 0.45; 100, 0.5; 200, 0.65; 200.01, 0.5; 300, 0.3; 314.15, 0.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Електродвигун у термінах пакету прикладних програм «ПРАНС-ПК» описується набором елементів і параметрів, які включають зазначену залежність моменту від швидкості, а також інші необхідні характеристики для моделювання роботи в обох режимах. Отже:

$$IDV(0, M) = TABMOM(IIO);$$

$$IO(M, O) = O;$$

$TABMOM = 0, 0.45, 100, 0.5, 200, 0.65, 200.01, 0.5, 300, 03, 314.15,$   
0;

де  $IDV$  – саме джерело моменту,

$IO$  – вимірювач кутової швидкості, напруга на ньому і є  $w$ .

Файл опису моделі мотор-компресора типу ХКВ наведено в додатку В (аркуш [MPMA24.00.00.000 ДД2]).

### 3.6 Отримані результати моделювання

Моделювання здійснювалося в умовах роботи електродвигуна в режимі наповненого конденсатора, коли тиск у циліндрі досягає свого максимального значення. Цей сценарій відображає критичний режим роботи, за якого двигун повинен забезпечувати безперебійний запуск.

На рис. 3.13 (аркуш [MPMA24.00.00.000PP2]) наведено кінематичні характеристики роботи вала електродвигуна, зокрема кутову швидкість і кут повороту. З отриманих результатів видно, що розгін двигуна триває приблизно 0,9 секунди. Кутова швидкість наближається до синхронного значення, хоча залишається невелике ковзання.

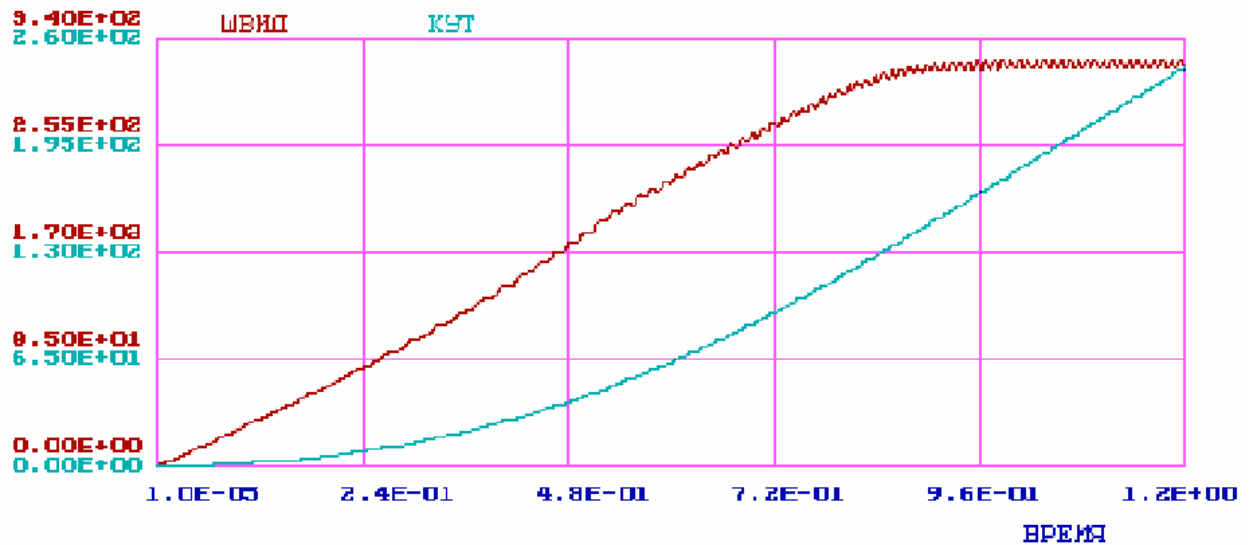


Рисунок 3.13 - Залежність кутової швидкості (ШВИД) в радіанах за секунду, та кута повороту (КУТ) в радіанах вала електричного двигуна при розгоні від часу (ЧАС) в секундах

На рис. 3.14 (аркуш [MPMA24.00.00.000 PP2]) представлено реальну характеристику навантаження на поршень залежно від його переміщення. Як видно, вона практично збігається з теоретичною діаграмою. Невеликі розбіжності виникають лише через дискретність графіків при їх відображенні на екрані.

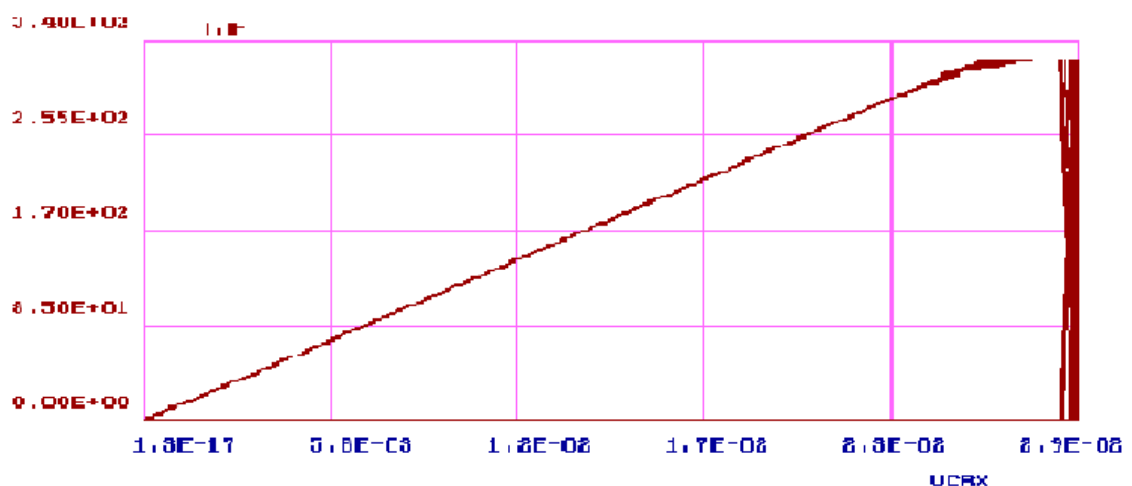


Рисунок 3.14 - Залежність зусилля стиску пари холодоагенту (IJF) в ньютонках від переміщення поршня (UCRX) в метрах

На рис. 3.15 (аркуш [МРМА24.00.00.000РР2]) представлено підтвердження механічної характеристики двигуна. Графік демонструє, що зусилля між поршнем і циліндром у напрямку, перпендикулярному до їхніх поверхонь, залишається незначним і коливається в межах  $\pm 0,5$  Н. Це є основною перевагою використання кривошипно-кулісного механізму, який забезпечує менший вплив таких зусиль, у порівнянні з кривошипно-шатунним механізмом.

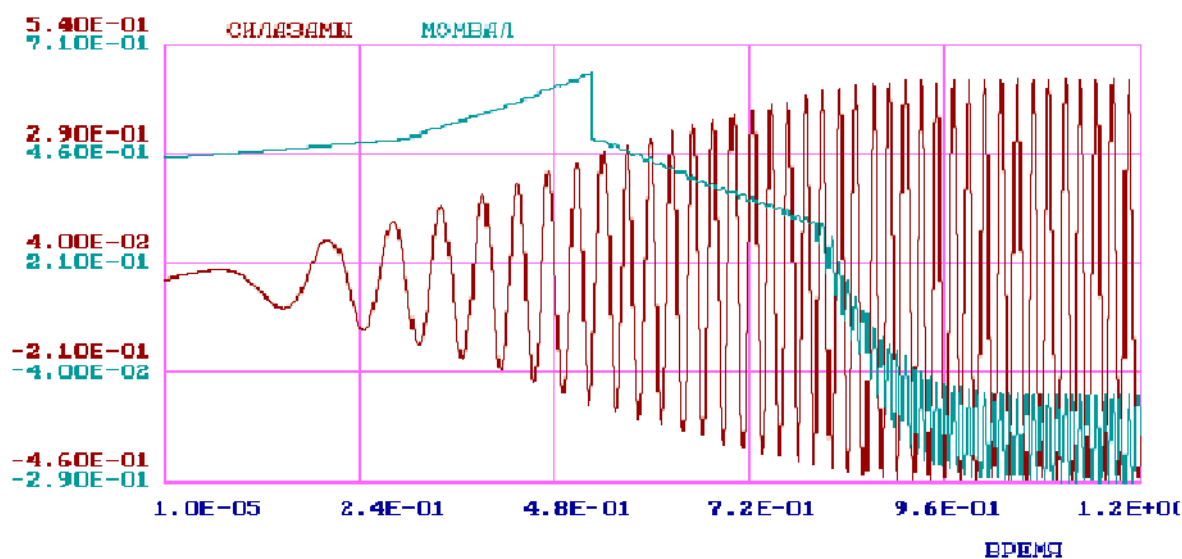


Рисунок 3.15 - Залежність зусилля між поршнем та циліндром (СИЛА) в ньютонах та моменту на валу електричного двигуна (МОМЕНТ) в ньютонметрах від часу (ЧАС) в секундах при його розгоні

На останньому рис. 3.16 (аркуш [МРМА24.00.00.000 РР2]) демонструється, що запропонована модель має можливість визначення будь-яких реакцій у опорах, шарнірах і з'єднаннях. У даному випадку на рисунку представлено розрахунок реакції в опорі вала електродвигуна (шарнір 1), що підтверджує універсальність і точність моделі для аналізу подібних механізмів.

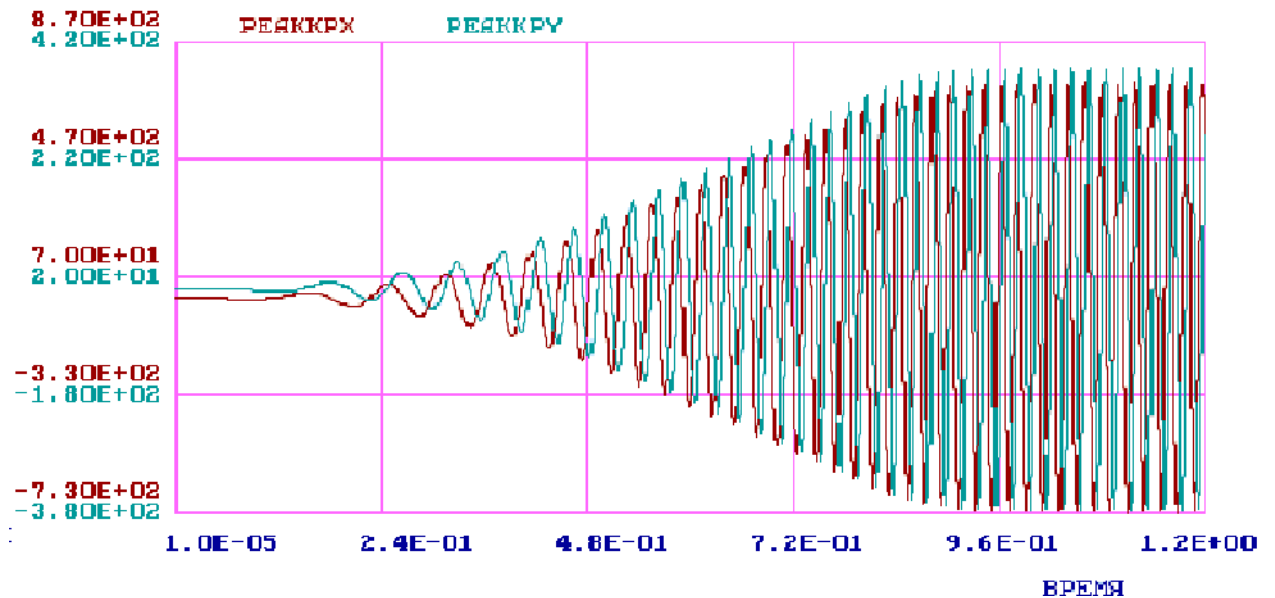


Рисунок 3.16 - Залежності проєкцій сили реакції опори валу електричного двигуна на вісь X (PEAKKPX) та на вісь Y (PEAKKPY) в ньютонках від часу при розгоні (ЧАС) в секундах

З аналізу моделі можна зробити висновок, що реакція опори валу електродвигуна вздовж горизонтальної осі X (яка відповідає напрямку руху поршня і технологічного зусилля) змінюється в межах від -730 до +730 Н. У свою чергу, реакція опори валу вздовж вертикальної осі Y коливається від -370 до +370 Н. Такі показники підтверджують стабільність і передбачуваність роботи механізму в межах розрахункових параметрів.

### 3.7 Висновки до третього розділу

У цьому розділі проведено детальний розрахунок механізму мотор-компресора, а також дослідження його кінематичних та динамічних характеристик. Було виконано аналіз можливостей прикладних програм для моделювання та розрахунку механізмів. Проведено обчислення кінематичних і динамічних параметрів механізму, визначено значення основних

характеристик кривошипно-кулісного механізму компресора, розроблено модель цього механізму та модель електродвигуна мотор-компресора. Окрім цього, наведено результати моделювання, що підтверджують ефективність застосованих методів та обраних параметрів.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

Зростання реальних доходів громадян України сприяє підвищенню попиту на холодильне обладнання. Завдяки значним зручностям, які забезпечують холодильники в побуті, їхнє виробництво щороку зростає.

У межах даної магістерської роботи було створено універсальну модель механізму мотор-компресора в пакеті прикладних програм «ПРАНС-ПК». Для побудови моделі були використані такі параметри: довжини векторів шарнірів, початкові значення кутів між ними і координатними осями, маси та моменти інерції ланок.

За допомогою програмного забезпечення «ПРАНС-ПК» вдалося визначити всі основні кінематичні та динамічні параметри, серед яких:

- абсолютні та відносні швидкості,
- кути поворотів,
- прискорення,
- реакції в шарнірах, обумовлені інерційними силами руху ланок.

Розроблена математична модель мотор-компресора, створена з використанням пакету «ПРАНС-ПК», продемонструвала свої можливості у визначенні кінематичних та динамічних характеристик роботи мотор-компресора холодильного обладнання за різних вхідних параметрів.

Модель надає змогу, шляхом підбору оптимальних значень параметрів, досягати поліпшення умов роботи реального мотор-компресора побутового холодильного обладнання.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Семенюк Д.П., Петренко О.В. Холодильне обладнання. - К.: Світ книг, 2021. – 633 с.
2. Історія розвитку холодильників [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://holodservice.com.ua/articles/327-history.html>.
3. Принцип роботи чіллера [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://evroprom.com/ua/novosti-i-stati-ua/princzip-roboti-chillera/>.
4. Тітлов О.С. Холодильне обладнання підприємств харчової промисловості. Новий світ, 2021. – 286 с.
5. Ялпачик В.Ф. Лабораторний практикум з холодильного устаткування – Мелітополь: Мелітополь, 2017. – 203 с.
6. Вассерман О.А. Холодильні установки та їх інноваційні цикли. Фенікс, 2022. – 428с.
7. Теплохолодотехніка. За ред. Василенко М.С. – К.: Ліра-К, 2019. – 258с.
8. Hundy G.F. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps. Elsevier, 2016. – 510p.
9. Поршневий компресор [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://letiss.com.ua/ua/articles-UA/piston\\_kompris\\_ua?srsltid=AfmBOooUQ3RnAjRb84q1-kNSJhtm3UTlhpKZWPAI-6-xC6qbWt6pC2u1](https://letiss.com.ua/ua/articles-UA/piston_kompris_ua?srsltid=AfmBOooUQ3RnAjRb84q1-kNSJhtm3UTlhpKZWPAI-6-xC6qbWt6pC2u1).
10. Поршневий компресор [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%9F%D0%BE%D1%80%D1%88%D0%BD%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%B9\\_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%81%D0%BE%D1%80](https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%9F%D0%BE%D1%80%D1%88%D0%BD%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%81%D0%BE%D1%80).
11. Поршневий компресор [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%80%D1%88%D0%BD%>

D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%B9\_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%81%D0%BE%D1%80.

12. Холодильні установки: Підручник / 6-е вид., перероблене і доповнене / І.Г. Чумак, В.П. Чепурненко, С.Ю. Лар'яновський та ін.; За ред. І.Г. Чумака. – Одеса: Рефпринтінфо, 2006. – 550 с.

13. Масліков М.М. Холодильна технологія харчових продуктів: Навч. посіб. / М.М. Масліков – К.: НУХТ, 2007. – 335 с.

14. Вивчення конструкції компресорів парової компресійної холодильної машини. Методичні вказівки для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр» зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» - Таврійський державний агротехнологічний університет, 2018 – 24 с. 15. Компресори холодильних машин [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9133501/page:10/>.

16. Що таке ротаційний компресор [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/sho-take-rotacijnyj-kompresor?srsltid=AfmBOorbmtTAs8IaQO1b4ZY1cZgLsyXg4gHYwDQkYdubW5wi4avTuvBf>.

17. Спіральний компресор - пристрій та принцип роботи [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/spiralnyj-kompresor-prystrij-ta-pryncyp-roboty?srsltid=AfmBOoq6A45k75BOcL7K3\\_51UfEaHoQTRSzU4d10uIbpwjX-Dmhh6hqQ](https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/spiralnyj-kompresor-prystrij-ta-pryncyp-roboty?srsltid=AfmBOoq6A45k75BOcL7K3_51UfEaHoQTRSzU4d10uIbpwjX-Dmhh6hqQ).

18. Електромагнітний компресор [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p2040211160-elektromagnitnyj-vozdushnyj-kompressor.html>.

19. Компресори для побутових холодильників і морозильників [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://m.holodilnik.info/articles/kompressor\\_for\\_holod/](http://m.holodilnik.info/articles/kompressor_for_holod/)

20. Побутова холодильна техніка [Електронний ресурс]. Режим доступу:

[https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib\\_upload/%D0%9F%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B8%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8/page14.html](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%9F%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B8%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8/page14.html).

21. Холодильна машина [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://polair.com.ua/stattiholod/holodilnaja-mashina>.

22. Мартинов І. Е., Труфанова А. В. Холодильне обладнання вагонів: Конспект лекцій.– Харків: УкрДАЗТ. – 2012.-66 с.

23. Інноваційні технології навчання в умовах модернізації сучасної освіти : монографія / за наук. ред. д. пед. н., проф. Л. З. Ребухи. Тернопіль : ЗУНУ, 2022. - 143 с.

24. Системи автоматизованого проєктування: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерноінтегровані системи та технології в приладобудуванні» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; автори: К.С. Барандич, О.О. Подолян, М.М. Гладський. – Електронні текстові дані (1 файл 3,05 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 97 с. 25. Встановлення T-FLEX CAD [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dnipro.lvivservice.com.ua/vstanovlennya-t-flex-cad>.

26. Методичні рекомендації до організації самостійної роботи та проведення практичних занять із навчальної дисципліни «Проектування в системі AutoCAD» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, галузі знань 19 – Архітектура та будівництво) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : А. М. Панкєєва, Е. А. Шишкін, В. В. Івасенко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 26 с.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 78
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

27. Спеціалізовані застосунки ANSYS [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.cadfem.com.ua/spetsializovani-zastosunki-ansys/>.

28. Автоматизація моделювання мехатронних систем транспортно-технологічних машин [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://books.google.com.ua/books?id=p5egDwAAQBAJ&pg=PA61&lpg=PA61&dq=%D0%9F%D0%9F%D0%9F+%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81+%D0%9F%D0%9A&source=bl&ots=s3ZMAncqEX&sig=ACfU3U2IbMkz231E84mLkV9qxIerF7OmyQ&hl=uk&sa=X&ved=2ahUKEwjg9m388HtAhW16uAKHcULBZwQ6AEwBXoECAUQA#v=onepage&q=%D0%9F%D0%9F%D0%9F%20%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%20%D0%9F%D0%9A&f=false>.

29. Вірник, М.М. Курсове проектування з теорії механізмів і машин : навчальний посібник / М. М. Вірник, Ю. В. Булига. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 211 с.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		