Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра Е та М

# ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

**на тему «Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу обладнання для первинної очистки ріпакової олії»**

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) ___Апреленко В. В.___
(прізвище, ініціали)

2 курсу АЕМм-22 групи

Керівник д.т.н., доцент Осадчук П. І.___
(посада, прізвище та ініціали)

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від _____17.06.2024 р., протокол №_12.

Завідувач(ка) кафедри Е та М _____ Петро Осадчук
(назва кафедри) (підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2024рік

# Одеський національний технологічний університет

Інститут: *Навчально-науковий інститут КС і Т «Індустрія 4.0» ім. П.М. Платонова*
Факультет: *Автоматизації та робототехніки*
Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки* Рівень ВО: *другий*
Ступень ВО: *магістр*
Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*
Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*
Освітня програма: *Інтелектуально-керовані електромеханічні системи*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри ЕтаМ
_____Осадчук П.І.
«____»_____2024р.

**ЗАВДАННЯ**
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**
**здобувач СВО «МАГІСТР» гр. АЕМм - 22**
**Апреленко Володимир Віталійович**

**1.** Тема роботи: **«Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу обладнання для первинної очистки ріпакової олії»**
Керівник роботи: Осадчук Петро Ігорович, д.т.н., доцент.
Затверджено наказом ОНТУ № 504-03 від 07.09.2023 р.
2. Строк подання студентом роботи: 15.06.2024 р.
3. Вхідні дані до проекту: Технічні характеристики електроприводу центрифуги для очистки ріпакової олії: частота обертання ротора, хв $^{-1}$1500, маса 722 кг., потужність електроприводу мішалки 3 кВт.; обґрунтувати інформативні параметри управління електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії.
4. Зміст розрахунково-конструкторської частини пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
**Вступ. 1 Загальна характеристика роботи**: Вибір об'єкта управління для модернізації системи електроприводу, опис і аналіз реалізованого ним технологічного процесу і відповідного обладнання. Актуальність теми. Об’єкт і мета модернізації.
**2 Розрахунково-конструкторська частина**: Вимоги до автоматизованого електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії. Розрахунок потужності і вибір двигуна, перевірка за перевантаженням. Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна. Схема управління електропривода.
**3 Моделювання динамічних режимів роботи електропривода:** Розрахунок параметрів схеми заміщення АД електропривода для MATLAB та розробка імітаційної моделі електроприводу устаткування для центрифугування ріпакової олії і дослідження її роботи у середовищі Simulink.
**4 Організаційна та технологічна частина**: Організація технології монтажу, ремонту і обслуговування та техніки безпеки праці при обслуговуванні електропривода.
**5 Економічна частина:** Розрахунок економічної ефективності від модернізації електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії.
**6 Результативна частина:** Висновки і рекомендації за прийнятими в проекті рішеннями.
**Список використаних джерел**, на які є посилання.
**Додатки.**
Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації (обов’язкові):
1. Титульний слайд. 2. Актуальність теми, об’єкт проектування, мета і завдання роботи. 3. Технологічна схема первинної очистки ріпакової олії. 4. Конструкція і технічні характеристики центрифуги. 5. Розрахунок потужності і вибір двигуна електропривода центрифуги. 6. Модель

та результати моделювання електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії до його модернізації (прямий пуск двигуна). 7. Модель та результати моделювання електропривода після його модернізації (з частотним регулюванням). 8. Висновки (технічні, технологічні, т/б і охорона праці, економічні).

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Економічна частина | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання: 15.06.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ
ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра | Строк виконання етапів | Прим |
|---|---|---|---|
| 1 | **1. Загальна характеристика роботи: в**ибір об'єкта управління для модернізації системи електроприводу, опис і аналіз реалізованого ним технологічного процесу і відповідного обладнання. Актуальність теми. Об'єкт і мета модернізації. | 05.04.2024 | |
| 2 | **2 Розрахунково-конструкторська частина**: вимоги до автоматизованого електропривода устаткування для нейтралізації ріпакової олії. Розрахунок потужності і вибір двигуна, перевірка за перевантаженням. Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна. | 30.04.2024 | |
| 3 | **3 Моделювання динамічних режимів роботи електропривода:** розрахунок параметрів схеми заміщення АД електропривода для MATLAB та розробка імітаційної моделі електроприводу<br>устаткування для нейтралізації ріпакової олії. | 10.05.2024 | |
| 4 | **4. Організаційна та технологічна частина:** організація технології монтажу, ремонту і обслуговування та техніки безпеки праці при обслуговуванні електропривода. | 25.05.2024 | |
| 5 | **5. Економічна частина:** Розрахунок економічної ефективності від модернізації електропривода устаткування для нейтралізації ріпакової олії. | 01.06.2024 | |
| 6 | **6 Результативна частина:** Висновки і рекомендації за прийнятими в проекті рішеннями. Література. | 05.06.2024 | |
| 7 | Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра. | 17.06.2024 | |
| 8 | Перевірка роботи на доброчинність. Рецензування роботи. | 20.06.2024 | |
| 9 | Захист кваліфікаційної роботи бакалавра. | 27.06.2024 | |

Здобувач: Апреленко В. В._____

Керівник: Осадчук П.І._____

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ. Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач-дипломник _____ Апреленко В. В..

# РЕФЕРАТ

Апереленко В. В. «Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу обладнання для первинної очистки ріпакової олії». Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2024. – 75 с. Бібліогр: 14. Іл: 19. Табл: 15.

В роботі розрахована потужність приводного двигуна. Здійснена перевірка за перевантажувальною здатністю. За результатами розрахунку вибрана система «частотний перетворювач – асинхронний двигун змінного струму. Розраховані та побудовані механічні характеристики для режимів роботи, розроблена функціональна схема електропривода. Для перевірки модернізованої СУЕП проведене моделювання в середовищі Matlab, а також перевірка на стійкість та якість. Проведений техніко-економічний розрахунок системи електропривода. Розроблені заходи з електробезпеки та охороні праці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: центрифуга, ріпакова олія, електропривод, імітаційна модель, ефективність.

# ABSTRACT

Aperelenko V. V. "Research and improvement of the operation of the electric drive of equipment for the primary purification of rapeseed oil." Bachelor's qualifying work. – Odesa: ONTU, 2024. – 75 p. Bibliography: 14. Illustration: 19. Table: 15

In the robot, the tightness of the drive motor is protected. A reconciliation for a overload building has been ordered. For the results of the calculation, the system “frequency shifter - asynchronous dvigun of the snake stream” was selected. Explored and motivated mechanical characteristics for robotic modes, expanded the functional diagram of the electric drive. To re-verify the modernized SUEP, a simulation was carried out in the Matlab environment, as well as a re-verification for stability and brightness. Carrying out technical and economic investigations of the electric drive system. Rozrobleni come in with electrical safety and security praci.

KEY WORDS: centrifuge, sunflower oil, electric drive, simulation model, efficiency.

**ЗМІСТ**


| | стр. |
|---|---|
| ВСТУП | 7 |
| 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ | 9 |
| 1.1. Методи отримання якісних рослинних олій. | 9 |
| 1.2 Загальна характеристика технологічного процесу первинної очистки ріпакової олії | 16 |
| 1.3 Конструкція і технічні характеристики центрифуги для очистки ріпакової олії | 21 |
| 1.4 Характеристика електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії | 29 |
| 2 ФОРМУЛЮВАННЯ ВИМОГ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ ДВИГУНА, РОЗРАХУНОК ЙОГО ПОТУЖНОСТІ | 36 |
| 2.1 Вимоги до електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії | 36 |
| 2.2 Розрахунок швидкості осадження у центрифузі | 38 |
| 2.3 Розрахунок потужності і вибір двигуна | 40 |
| 2.4 Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна | 45 |
| 2.5 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електроприводу при скалярному частотному управлінні. | 38 |
| 2.6 Вибір перетворювача частоти | 48 |
| 2.7 Розрахунок параметрів перетворювача | 50 |
| 3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА | 51 |
| 3.1 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода центрифуги | 51 |
| 3.2 Моделювання пуску двигуна електропривода з ПЧ | 53 |
| 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА | 60 |

4.1 Розрахунок інвестиційних витрат на модернізацію і впровадження системи електроприводу 60
4.2 Розрахунок змін основних показників діяльності підприємства 61
4.3 Розрахунок змін основних показників діяльності підприємства 67
5 БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ МОНТАЖІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ 69
5.1 Забезпечення безпеки при виконанні монтажно-налагоджувальних робіт 69
5.2 Забезпечення безпеки при експлуатації системи електроприводу 70
ВИСНОВКИ 74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 75

# ВСТУП

Енергоефективність є однією з проблем, яких неможливо уникнути при роботі з електричними приладами, машинами, приводами та системами. Виробництво, яке не досягає мінімального рівня ефективності не є прибутковим, і кожне підвищення енергоефективності зменшує споживання енергії та таким чином витрати на енергопостачання. Покращення енергоефективності електроприводів в глобальному масштабі зменшує енергію на попит і збільшує постачання енергії, що опосередковано зменшує викиди парникових газів.

Ключовий елемент у підвищенні енергоефективності електричних пристроїв, машин і приводів – це зменшення втрат, яких можна досягти за допомогою різних методів.

Застосування нових матеріалів, нові рішення в конструкції, оптимізація режимів роботи і створення автоматизованих електроприводів може суттєво сприяти підвищенню енергоефективності. Подальше підвищення енергоефективності може бути досягнуто за допомогою відповідного вибору і узгодження компонентів силової електроніки з успадкованими характеристиками машин або пристроїв. Належний контроль систем, що складаються з електричних пристроїв або машин, і компоненти силової електроніки, засновані на передових моделях системи, можуть ще більше покращити загальну енергоефективність систем.

Таким чином, завдання модернізації існуючих електроприводів з метою підвищення ефективності їх використання в нинішніх умовах є актуальним напрямком досліджень.

Метою написання кваліфікаційної роботи є модернізація електроприводу центрифуг для очищення ріпакової олії.

При написанні роботи були поставлені наступні задачі:

1. Навести загальну характеристику технологічного процесу отримання та очищення ріпакової олії, а також розглянути характеристики обладнання, необхідні для виконання процесу.

2. Сформулювати вимоги до електроприводу центрифуг для очищення ріпакової олії. Провести розрахунок потужності і вибір електродвигуна.

3. Виконати моделювання динамічних режимів роботи електропривода.

4. Показати доцільність модернізації електроприводу центрифуги для очищення ріпакової олії шляхом розрахунку економічних показників.

5. Розглянути питання безпеки праці при виконанні монтажно-налагоджувальних робіт і експлуатації системи електроприводу.

Об’єкт дослідження – процес модернізації електроприводу центрифуги для очищення ріпакової олії.

Предмет дослідження – є електропривод центрифуги для очищення ріпакової олії.

Методи дослідження, які були використані при написанні роботи – аналіз, синтез, моделювання.

Практична значимість отриманих результатів. Отриманий автоматизований електропривод можна застосовувати в процесі очищення ріпакової олії.

# 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

## 1.1. Методи отримання якісних рослинних олій.

### Способи та технологія виробництва ріпакової олії.

Олію з насіння добувають двома основними способами: механічним, в основі якого лежить пресування подрібненої маси, і хімічним, за якого спеціально підготовлена олійна сировина обробляється органічними розчинниками. Ці два способи використовуються в технології виробництва олії самостійно або у поєднанні. Принципова технологічна схема виробництва олії така: очистка насіння від домішок, підсушування, лущення (шеретування), поділ рушанки, подрібнення ядра, вологотеплова обробка його, добування олії пресуванням або екстракцією, очищення олії.

Очистка насіння олійних культур від смітних домішок проводиться спеціальними машинами з урахуванням геометричних і аеродинамічних властивостей, для видалення металевих домішок застосовують феромагнітну очистку за допомогою електромагнітних сепараторів.

Підсушування насіння проводять за умови, якщо його вологість на рівні критичної або більша. Оптимальною вологістю насіння олійних культур перед лущенням вважається така, яка приблизно на 2 % менша від критичної.

Основна кількість олії зосереджена в ядрі насіння (зародок і ендосперм), в плодовій і насінній оболонці (покривних тканинах) міститься мала кількість олії, яка має інший ліпідний склад. Тому під час переробки насіння потрібно відокремлювати від ядра плодові і насінні оболонки: сировина звільняється від низькоолійних компонентів і відносна кількість олії збільшується; збільшується продуктивність технологічного обладнання; поліпшується якість олії (відсутні ліпіди лузги, які мають воски і воскоподібні речовини); зменшується втрата олії. Під час шеретування потрібно не допустити руйнування ядра, для цього операція повинна проводитися одним ударом по насінині; створити раціональне співвідношення між вологістю оболонок і ядра, перед шеретуванням провести калібрування насіння за

розмірами. Якість шеретування насіння залежить від вмісту небажаних фракцій в рушанці (так називають одержаний матеріал після шеретування): зовсім необлущеного насіння, частково облущеного, подрібненого ядра (січки), пороху насіння.

Після шеретування рушанку розділяють в сепараторах і пнемо-очисних машинах з метою відокремлення ядра від плодових і насінних оболонок з мінімальними втратами олії. Для цього використовують аспіраційні віяльні машини, які розділяють рушанку на фракції ядро, оболонки, ціле насіння і недолущене. Останні дві фракції направляють на повторне шеретування. Схеми поділу рушанки і формування фракцій для насіння різних культур неоднакові.

Наступним етапом є подрібнення ядра, яке суттєво впливає на вихід олії і продуктивність обладнання. Головне завдання цього процесу полягає у максимальному руйнуванні клітинної структури. Для цього насіння соняшнику декілька разів пропускають крізь валкокі станки. На якість подрібнення значно впливає вологість ядра. Найкраще руйнування клітинної структури відбувається за його вологості 5,5...6,0%. Подрібнене ядро називають м'яткою, яку не можна довго зберігати, тому що фермент ліпаза швидко розщеплює жири, гідролізуючи їх на гліцерин і вільні жирні кислоти. Від цього погіршуються як харчові, так і технологічні якості олії.

З сирої м'ятки під пресом, не зважаючи на великий тиск, можливо видалити лише 10...15% загальної кількості олії. Пояснюється це тим, що олія в м'ятці розподілена на поверхні частинок подрібненого ядра у вигляді тонких плівок, яка утримується значними силами молекулярної взаємодії, величина яких значно перевищує тиск пресів Для зменшення сил, які зв'язують олію з поверхнею м'ятки, застосовують гідротермічну обробку. При цьому відбувається денатурація білків, зменшення зв'язності олії, зміна хімічних і фізико-хімічних властивостей.

Приготування м'язги (так називають м'ятку після гідротермічної обробки) проводять в два етапи:

1) зволоження м'ятки і підігрівання в апаратах інактиваторах або в паро-зволожувальних шнеках до температури 80...85°С і поступовим зволоженням та зменшенням зв'язності олії з неліпідною частиною насіння на поверхні частинок м'ятки;

2) висушування і нагрівання (підсмажування) м'ятки в жаровнях різної конструкції: чанних, шнекових і барабанних. Під час підсмажування відбувається явище самопропарювання - водяна пара проходить крізь товстий шар м'ятки і сприяє частковому розпаду грудочок які утворилися в процесі зволоження в перший період гідротермічної обробки. Тривалість прожарювання-40...45 хвилин.

В подальшому видаляють олію або способом пресування, або екстракції. Пресування проводять за допомогою шнекових пресів МП-68, КСП-26, ЕТП-20.1 або шнекових пресів-грануляторів Г-24 (видалення олії з одночасним одержанням каліброваних гранул макухи). На початку віджимання м'язга ущільнюється, зближаються її частинки і з'єднуються верхні шари олії, потім товщина шарів збільшується, і олія не утримується поверхневими силами на частинках і відділяється у вільному стані. Під час наступного ущільнення м'язги частинки деформуються, олія починає витікати і по внутрішніх капілярах деформованих частинок.

Від фізико-механічних властивостей м'язги, її вологості і температури залежить величина максимального тиску преса: м'язга з вологістю, яка перевищує оптимальну, не формується у вигляді макухи, не відбувається повне видалення олії; із пересушеної м'язги з-під преса виходить сипкий несформований матеріал у вигляді борошна. Температура пресування істотно впливає на ефективність видалення олії: на холодному, нерозігрітому пресі неможливо одержати макуху з низьким вмістом олії. Пресовий метод не дає можливості повністю видалити олію з макухи.

Для збільшення виходу олії після пресування застосовують екстракцію органічними розчинниками, які повинні відповідати таким вимогам;

- не розчиняти ніякі інші компоненти, крім олії;
- володіти здатністю повністю звітрюватися з олії у вузькому температурному інтервалі;

- не шкодити здоров'ю людей;
- не бути вибухо- і пожежонебезпечними;
- бути економічно вигідними;
- не діяти шкідливо на обладнання.

Нині розчинників, які відповідали б усім цим вимогам, нема. Використовуються бензин марки А та нефрас.

Підготовка сировини для екстракції з попереднім видаленням олії практично не відрізняється від підготовки її для пресування. Проте, для збільшення поверхні дотику з розчинником, подрібнену макуху пропускають крізь спарені гладенькі плющильні валки, щоб одержати пелюстки товщиною 0,2...0,4мм. На швидкість процесу екстракції впливають: розмір поверхні дотику, температура процесу, розмір молекули екстрагуючої речовини і розчинника, в'язкість. Чим більша поверхня контакту розчинника і олії, вища їх температура, менший радіус молекул, менша в'язкість розчинника, тим швидше відбувається екстракція. Температура матеріалу, який іде на екстракцію, повинна бути на 5°С нижчою від температури кипіння і не перевищувати 50°С при використанні бензину марки А чи нефрасу. Якщо темпера тура перевищує цей рівень, то матеріал охолоджують. Продукт, який утворюється від з'єднання подрібненої макухи (пелюсток) з розчинником, називають місцелою.

В процесі екстракції відбуваються процеси, в результаті яких зменшується вміст незамінних ненасичених жирних кислот, відбувається розпад провітамінів та біологічно активних речовин, нагромадження продуктів окислення, що спричинює утворення вторинних білково-ліпідних комплексів, стійких як до пресування, так і до екстракції. Все це погіршує якість олії та скорочує строки її зберігання. Деякі продукт ліпідного окислення містять токсичні речовини, зменшують біологічну цінність олії.

Для добування олії екстракцією використовують два способи: занурення і ступінчасте зрошення. Способом занурення олію з макухи добувають в процесі безперервного проходження крізь потік розчинника в

умовах протилежного напрямку, за якого і розчинник, і екстракційний матеріал безперервно рухаються назустріч один одному. При цьому відбуваються висока швидкість екстракції, невелика тривалість процесу добування олії, утворюються низькі концентрації кінцевих місцел, високий вміст домішок, використовуються проста конструкція апаратів і складна система фільтрації.

За ступінчастого зрошення відбувається безперервне переміщення лише розчинника, а екстрагуючий матеріал залишається нерухомим Цим способом одержують місцелу підвищеної концентрації і чистішою; подовжується процес екстракції; можливість утворення вибухонебезпечних концентрацій; вміст твердих домішок в місцелі може досягати 0,8... 1% від маси. Домішки, зокрема, збільшують осад (гущу) в олії, утворюють накип на гріючих поверхнях, погіршують умови теплопередачі, погіршують якість екстракційної олії, ускладнюють рафінування місцели. Після закінчення екстракції шрот містить біля 1% олії і розчинника 40%. Його обробляють парою для звітрювання розчинника, сушать, охолоджують і подрібнюють.

Місцелу після екстракції фільтрують за допомогою спеціальних фільтрів і зливають в місцелозбірник. Вона містить олії 10…15% і розчинника 85...90%, коли використовують спосіб занурення, і 30...35 % олії та 65.. .70 % розчинника за способу ступінчастого зрошення. Чим більша концентрація місцели, тим ближчі її властивості до властивостей олії.

Для відокремлення олії місцелу подають в дистилятори безперервної дії. Спочатку її підігрівають гарячою парою в попередньому дистиляторі до температури 100-105°С. При цьому частина розчинника випаровується і концентрація олії збільшується до 75...85 %. Потім місцелу подають в кінцевий дистилятор і знову обробляють гарячою парою до температури 210...220°С, внаслідок чого з неї повністю видаляється розчинник. Олію, що утворилася, виводять з дистилятора і охолоджують водою.

Олія після пресування чи екстракції містить тверді і колоїдні домішки, зокрема білкові і слизисті речовини, фосфатиди, тригліцероли, фосфоліпіди, жиророзчинні вітаміни, провітаміни, які погіршують її якість. Для очистки олії застосовують різні способи: фізичні (відстоювання, центрифугування, фільтрування); хімічні (гідратація, лужна рафінація, окислення фарбуючих речовин); фізико-хімічні (відбілювання, дезодорація - відокремлення летких речовин, які зумовлюють специфічний смак і запах, видалення вільних жирних кислот тощо). Цей процес називається рафінація, що в перекладі з французької означає очищати.

Для відстоювання олію в ємкостях залишають на тривалий час. Важкі частинки осідають на дно відстійника. Від механічних домішок і води олію очищають центрифугуванням. Фільтрування дозволяє відокремити механічні домішки, щільність яких не відрізняється від щільності олії. Фільтрують олію крізь спеціальну тканину або тканину і фільтрувальний папір у фільтрах-пресах.

На деяких заводах олію після першої гарячої фільтрації очищають способом гідратації. Гідратація - очистка олії від колоїдно-розчинних фосфатидів, білкових та інших речовин. Вводячи в олію насичену пару або воду і перемішуючи їх, зволожують білкові речовини і фосфатиди, які, володіючи гідрофільними властивостями, в процесі гідратації інтенсивно вбирають воду, набухають і збільшуються. Внаслідок цього утворюються пластівці, які випадають в осад.

Очистку олії від вільних жирних кислот здійснюють шляхом обробки її слабкими розчинами лугів (NaOH). При взаємодії жирних кислот з лугами утворюються нерозчинні в нейтральній олії солі - мило, яке випадає в осад у вигляді пластівців. Очищена олія надходить у вакуум-сушарку, де висушується в безперервному потоці. Потім її охолоджують в калориферах до температури 25...30°С.

Від фарбуючих речовин олію очищають адсорбційною рафінацією. Олію обробляють спеціальними порошками, дрібненькі частинки яких адсорбують на своїй поверхні фарбуючі речовини. Для відбілювання використовують спеціальні глини та інші сорбенти. Видалення неприємних запахів і присмаку проводять дезодорацією олії в спеціальних апаратах. Крізь шар олії пропускають перегріту водяну пару, з якою звітрюються ароматичні речовини. Цей процес називається дистиляцією. Рафіновану олію зберігають в щільно закритих резервуарах, без доступу повітря, вологи і світла.

**Класифікація та якість олії**

За здатністю до висихання олію поділяють на висихаючу, напівви сихаючу і невисихаючу. Базується це на можливості швидкого окислення ненасичених жирних кислот. У висихаючої олії йодне число становить 130...295. Основну масу цих олій становить гліцерид, до складу якого входять лінолева (50...60%) та ліноленова (17...45%) кислоти. Характерними представниками є лляна та конопляна олії. У напіввисихаючої олії йодне число становить 85... 130. До складу цих олій входять головним чином гліцериди лінолевої (40...57 %) та олеїнової (28...50 %)кислот. Це соняшникова, соєва і кукурудзяна олії. У невисихаючих олій йодне число до 85. Ці олії (арахісова, рицинова) складаються переважно з гліцеридів олеїнової кислоти (до 83 %).

За консистенцією розрізняють тверді та рідкі олії. До твердих олій належать кокосова і какао, до рідких - усі інші.

За характером використання олії поділяють на технічні і харчові. Харчові олії поділяються на кулінарні, столові (салатні) і консервні До столових відносять олії, одержані способом пресування за відносно низької температури, та всі рафіновані олії незалежно від способу одержання. В кулінарії харчові олії використовують у натуральному вигляді або у вигляді маргарину та спеціальних кулінарних жирів.

Залежно від глибини очистки і цільового призначення олія поділяється на нерафіновану (очищена від механічних домішок); гідратовану (очищена від

фосфатидів, вільних жирних кислот, фарбуючих речовин); рафіновану дезодоровану (очищена від ароматичних, смакових і канцерогенних речовин, а також від пестицидів).

Якість олії визначають за зовнішнім виглядом, фізичними властивостями і хімічним складом. Харчова олія за зовнішнім виглядом по винна бути повністю прозорою, світло-жовтого кольору. Запах, колір і прозорість визначають за температури олії біля 20°С. Визначають також кількість осаду, вологість, легкі речовини.

Важливими показниками якості олії є кислотне та йодне число і число омилення. Під кислотним числом розуміють кількість КОН, необхідного для нейтралізації вільних жирних кислот, які містяться в 1 г. олії. Збільшене кислотне число свідчить про низьку якість сировини, псування її під час зберігання або тривале зберігання олії. Під йодним числом розуміють кількість грамів йоду, яка повністю насичує вільні зв'язки в 100 г олії. Чим більше йодне число, тим більший вміст неграничних кислот в олії і тим кращою сировиною вона для виготовлення оліфи. Під числом омилення розуміють кількість міліграмів КОН, необхідного як для омилення гліцеридів (зв'язаних жирних кислот), так і для нейтралізації вільних жирних кислот, що входять до складу 1 г олії.

Якість олії значною мірою залежить від умов зберігання. Важливим фактором захисту олії від окислення є зменшення контакту з киснем повітря. Для цього потрібно зберігати олію в герметичній тарі, колір якої має важливе значення. Олія в тарі коричневого або темно-зеленого кольору зберігається в 1,5...2 рази довше, ніж у світлій тарі. Температура зберігання повинна бути низькою позитивною.

### 1.3. Відходи олійного виробництва

До відходів олійного виробництва належать макуха і шрот. Конопляна і соняшникова макуха є цінним концентрованим кормом для тварин, її використовують для виробництва комбікормів. Хімічний склад макухи і шроту

залежить від виду насіння і вмісту олії в сировині, а також від способу виробництва олії.

Високоякісна макуха повинна бути сірого кольору різних відтінків від світлого до бурого (лляна), без стороннього запаху, гіркоти. Макуху, одержану від переробки насіння арахісу, маку, кунжуту, використовують в кондитерській промисловості. Так, з макухи арахісу і кунжуту виробляють халву, з макухи гірчиці – порошок столової гірчиці.

Після переробки олійної сировини одержані макуху і шрот висушують, охолоджують та проводять відгонку розчинника (екстракційний спосіб добування олії). Вологість макухи і шротів відповідно до стандартів повинна знаходитись у межах 6-10%, температура зберігання – до 25 $^0$С. Зберігають насипом або в мішках у сухому затемненому сховищі.

**Аналіз ефективності технологічного обладнання**

Аналіз проводимо із показників технологічних характеристик, особливу увагу приділяємо на збільшення продуктивності та зменшення споживання електроенергії машинами.

Аналіз ефективності проводимо по ходу просування сировини в технологічному процесі.

Елеватор 46ПКЦ-3-91-5. Технічна характеристика:

Продуктивність 1250 кг/год.

Сепаратор ЗСМ-1,5.

Технічна характеристика:

Продуктивність 1300 – 1500 кг/год.

Ефективність очистки, не менш 65%.

Частота обертання ексцентрикового вала 462,5 хв$^{-1}$.

Амплітуда коливань 6,5 мм.

Установлена потужність 2,5 кВТ.

Габаритні розміри 1750*1325*1855 мм.

Вага 565 кг.

Показники ефективності очистки відповідають сучасним вимогам.

Колонка магнітна ВКМА2.300А.

Призначена для виділення із насіння соняшника метало-магнітних домішок.

Технічна характеристика:

Продуктивність1200 кг/год.

Габаритні розміри, мм 424*332*555

Вага 25 кг.

Досить висока ефективність якості очистки. Споживання електроенергії відсутнє, працює за рахунок встановлених природних магнітів.

Обрушуюча машина МРН.

Технічна характеристика:

Частота обертання барабана 560-630 $хв^{-1}$.

Частота обертання живильного валика 98-110 $хв^{-1}$.

Потужність електродвигуна 3,75 кВт.

Габарити 1490*1435*1755 мм.

Вага машини 1380 кг.

Якість обрушування (шеретування)

Склад рушанки:

Січки 7,08%, пилі 4,96%, недоруш 16,28%, ціляк 10,08%.

Шнековий транспортер.

Транспортування рушанки до віяльної машини.

Технічна характеристика.

Продуктивність 1200-1300 кг/год.

Установлена потужність 3 кВТ.

Габаритні розміри 2000*300*600 мм.

Вага 72 кг.

Станок вальцевий Б6-МВС.

Технічна характеристика.

Продуктивність 500 кг/год.

Продуктивність електродвигуна 5,58 кВТ.

Габаритні розміри 1809*910*1190 мм.

Вага 1150 кг.

Подрібнене ядро соняшникового насіння (м'ятка) подається до жаровні Е8-МЖА. Технічна характеристика:

Продуктивність 400 кг/год.

Частота обертання мішалки 21,5 $хв^{-1}$

Установлена потужність 3 кВт.

Температура нагріву продукта 120 $^0$С.

Габаритні розміри 2250*1670*800 мм.

Вага 2400 кг.

Прес шнековий зеерний Е8-МПШ. Технічна характеристика:

Продуктивність 10-15 тон.

Остаточна маслічність жмиха 10-11%.

Тиск пресування 25 МПа.

Установочна потужність електродвигуна 11 кВт.

Габаритні розміри 1995*800*2665.

Вага 2920 кг.

Технічна характеристика масло пресу задовольняє всім вимогам технологічного процесу та ефективності виробництва. Масло прес заміні та удосконалення не потребує.

Макух від масло преса транспортується в вище приміщення транспортером У10-ТСЦ, технічна характеристика аналогічна попередньому.

Далі олія проходить через дільницю очищення, яка складається з рамного фільтр-пресу, центрифуги НОГШ-325 та гідрататора.

**Технічні характеристики фільтр-пресу:**

Продуктивність при температурі 80$^0$С – 60-65 кг/ч.

Площа фільтрації - 2 м$^2$.

Номінальна міцність - 1,2 кВт.

Маса – 500 кг.

**Технічна характеристика центрифуги:**

Продуктивність по осаду – 400-500 кг.

Частота обертання ротора – 3500 кг.

Габаритні розміри – 650-1140-970.

Потужність електродвигуна – 7,5 кВт.

Вага – 682 кг.

**Технічні характеристики гідрататора (змішувача):**

Продуктивність 150 кг/год.

Установочна потужність електродвигуна 2,5 кВт.

Габаритні розміри 1130*600*1550 мм.

Вага 190 кг.

З метою покращення якості ріпакової олії пропонуємо, використання у процесі очистки додатково фізичного поля, такого як центробіжне. Для цього проведемо ряд досліджень, результати яких наведені у наступних розділах.

Далі олія перекачується насосом НЦС12-10 в бак готової продукції де проходить її відстоювання.

## 1.2 Загальна характеристика технологічного процесу первинної очистки ріпакової олії

Якість олії, що споживається, залежить від рівня технологій, що використовуються для видалення домішок та супутніх речовин, що містяться у первинному продукті. Споживачами рафінованих жирів є багато галузей народного господарства, такі як хлібопекарська, кондитерська, консервна, їжеконцентратна та інші. Вторинні продукти з олії використовуються з технічною метою (оліфоварення, машинобудування, хімічна, текстильна промисловості та ін.) [1].

Умовою протікання процесу очищення олій та жирів є безперервність процесу, незважаючи на наявність декількох етапів цього процесу. Оскільки якість кінцевого продукту переробки, а також ефективність процесу залежить від параметрів проміжних стадій, то ведення процесу рафінації потребує постійного контролю, не тільки за технологічними, але й за економічними параметрами, які характеризують вихід продукту на конкретній стадії процесу. Проте більшість заводів по виробництву олій та жирів мають низький ступінь автоматизації виробництва, що можна пояснити низьким рівнем автоматизованих систем керування, їх локальністю та високою вартістю.

Недоліками контролю параметрів продукції є те, що в технологічному потоці використовуються об'ємні методи, які мають велику похибку, а також неефективні в роботі. Недостатня точність контролю витрат та додатків напівфабрикатів і кінцевого продукту процесів рафінації обумовлює втрати продукції. Додатковою проблемою вирішення завдань виробництва олії є недостатня ефективність каналів впливу на хід процесу рафінації олії, який би дозволив зменшувати дії збурень і завад процесу. Впровадження автоматизації процесу рафінації спрямовано на забезпечення якісного контролю (з архівацією даних) за витратами сировини, проміжних та фінішного продукту. Отже, реалізація завдань автоматизації контрольно-вимірювальних операцій є передумовою по досягненню сучасного рівня розвитку систем керування, що базуються на використанні мікропроцесорних засобів керування.

Складність процесу рафінації олії полягає взаємопов'язаності хімічних та фізичних параметрів, які дотично характеризують впливи на процеси, які відбуваються при видаленні тригліцерідів з олії.

Рафінація являє собою складний комплекс різних фізичних і хімічних процесів. Як зазначалося, необхідність використання тих чи інших процесів, що формують процес очищення, залежить від якості сировини та необхідним рівнем очищення [1, 2].

Класифікація методів рафінації жирів представлена у вигляді таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація методів рафінації жирів

| Процеси | Методи | Призначення |
|---|---|---|
| Гідромеханічні | Відстоювання | Поділ утворених фаз |
| | Центрифугування | |
| | Фільтрування | |
| Фізики-хімічні | Нейтралізація | Видалення фосфоліпідв та інших гідрофільних речовин |
| | Виморожування | Видалення високо плавких речовин |
| | Нейтралізація | Видалення вільних жирних кислот |
| | Промивання | Видалення мила та інших водорозчинних речовин |
| Маслообмінні | Висушування | Видалення вологи |
| | Відбілювання | Видалення пігментів та інших забарвлених речовин |
| | Дезодорація | Видалення одоруючих речовин |
| | Дистиляційна рафінація | Видалення вільних жирних кислот одоруючих речовин |

Швидкість гідромеханічних процесів визначається законами гідродинаміки. Ці процеси використовуються для поділу рідинних неоднорідних середовищ в гравітаційному полі.

Інший варіант – застосування дії відцентрових сил, або дії різниці тисків при переміщенні продукту через пористу речовину; Швидкість фізико-хімічних процесів залежить від природи хімічної кінетики та умов масопереносу реагуючих речовин.

Стан цих процесів визначається ступенем фізичного впливу на умови масопереносу.

Адсорбція, екстракція з розчинів, дистиляція та інші, відносяться до масообмінних процесів, для яких характерні переходом однієї чи декількох компонентів вихідної суміші з однієї фази в іншу.

Окрім головної мети рафінації олії – отримати найбільший вміст вільних жирних кислот, додатковим завданням підвищення ефективності процесу є мінімізувати втрати цінних супутніх речовин, що можуть використовуватись як самостійні продукти.

До цих продуктів відносяться воскові речовини та фосфоліпіди. Довільні початкові умови процесу, які полягають в зміні параметрів олії та жирів, що надходять на рафінацію, а також прагнення виробника задовольнити різних замовників, що пред'являють різні вимоги до фінішного продукту, призводять до використання різних методів процесу рафінації або різних комбінацій їх поєднання [1, 3].

Присутність в рослинній олії нерозчинних механічних домішок призводить до інтенсифікації окислювальних, ферментативних і гідролітичних процесів, оскільки ці процеси проходять значно швидше на поверхні часток механічних домішок, ніж в об'ємі [2].

Вищеназвані процеси погіршують якість олії і збільшують її втрати при подальшій переробці.

Порівняно висока температура і тривалість процесу первинного очищення рослинної олії в присутності механічних часток білкового походження сприяють проходженню сахароамінних реакцій, денатурації білкових речовин, утворенню ліпопротеїнових комплексів, переходу одоризуючих речовин в олію. Все це погіршує фізіологічну цінність олії, її органолептичні властивості, товарний вигляд і утрудняє подальшу переробку олії. Тому в процесах виробництва рослинної олії прагнуть до швидкого і найбільш повного видалення з олії нерозчинних механічних домішок.

У вітчизняній практиці в даний час застосовуються різні способи розділення суспензій [3], які можна класифікувати на осадження і фільтрування. Відмінність

між цими способами полягає в тому, що при одному з них частки дисперсної фази рухаються відносно дисперсійного середовища (осадження), а в іншому дисперсійне середовище рухається відносно часток дисперсійної фази (фільтрування). Осадження може здійснюватися під дією гравітаційних і відцентрових сил; фільтрування - через перфоровану поверхню, пористий шар фільтротканини або намитий (дренажний) шар часток різного походження.

Найбільш поширені наступні схеми первинного очищення пресової олії від механічних домішок:

1) відстоювання в механічній пастці і фільтруванні у фільтр-пресах (одноразове або дворазове);

2) відстоювання в механічній пастці, осадження часток у відцентровому полі на центрифугах НОГШ-325, фільтрування у фільтр-пресах (одноразове або дворазове);

3) відстоювання в механічній пастці, осадження часток у відцентровому полі на центрифугах НОГШ-325, перша сепарація зволоженого масла і друга сепарація.

Простим апаратом, що дозволяє досягти значного видалення зважених часток з олії відстоюванням у гравітаційному полі, є механічний вловлювач [4]. У ньому здійснюється, зазвичай, перше очищення олії відстоюванням від крупних домішок. Простота конструкції, велика продуктивність, виключення ручної праці при обслуговуванні зробили її застосування переважним.

В даний час в промисловості знаходять застосування подвійні механічні вловлювачі. У такому пристрої, на відміну від одинарного, забезпечується більш повне видалення зважених часток з олії завдяки наявності другого відсіку, в якому створені умови, що реалізують ефективне спокійне відстоювання олії. Так, при масовій частці нежирових домішок у вихідній олії 2,1 - 2,3 %, після одинарної пастки масова частка нежирових домішок в олії склала в середньому 0,95%, після подвійної пастки - відповідно 0,30 %. Ці дані відносяться до приблизно однакової продуктивності пасток, що складає по олії 200 - 250 т/добу.

Проте осадження у гравітаційному полі може мати значення лише як метод попереднього грубого очищення від найбільш крупних часток.

Для виділення дрібних зважених часток досить перспективним є осадження у відцентровому полі.

Апаратурно-технологічна схема первинного очищення ріпакової олії зі застосуванням центробіжного впливу на оброблювану речовину.

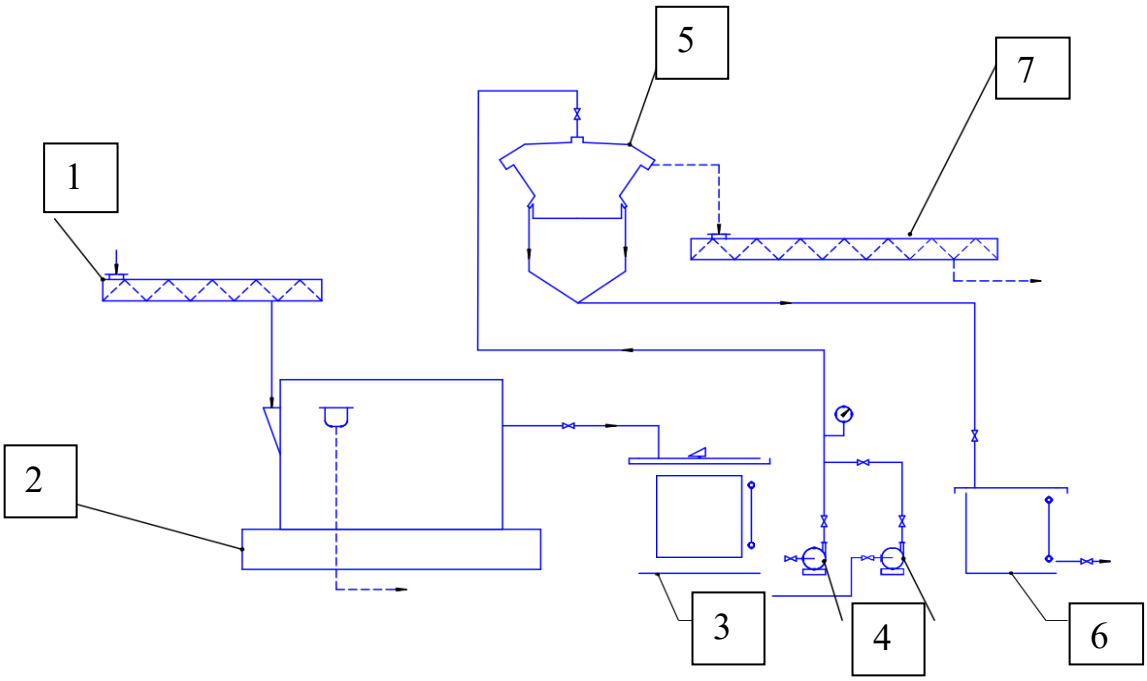


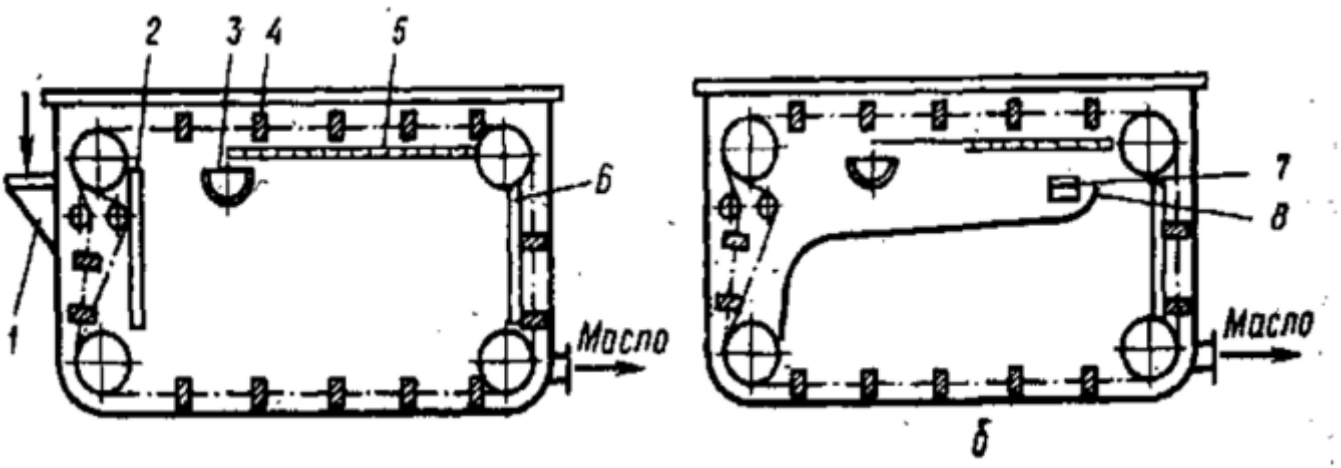

Рис. 1.1 Технологічна схема первинного очищення ріпакової пресової олії: 1 – шнек; 2 – механічна пастка; 3 – збірник для олії; 4 – насос; 5 – центрифуга; 6 – бак для олії; 7 – шнек

Технологічна схема первинного очищення олії, що пропонується, передбачає наступну послідовність операцій.

Олія соняшникова у вигляді суспензії (масова частка нежирових домішок 2-10%) збірним шнеком 1 (рис.1.1) подається у гравітаційну пастку 2, в якій при температурі 80-90 °С відбувається осадження механічних часток розміром більше 0,04 мм. Осад (масова частка жиру 25 % виводиться з апарату і передається на подальшу переробку.

## 1.3 Конструкції і технічні характеристики центрифуг для очистки ріпакової олії

У процесі попереднього або остаточного знімання олії в шнекових пресах в нього потрапляють частинки мезги і макухи, які виносяться потоками олії через щілини зеєрні. Наявність в олії твердих домішок знижує її якість і ускладнює подальшу переробку, а контакт домішок з олією веде до інтенсифікації його окислення, ферментативного гідролізу і, отже, погіршення біологічної цінності масла, його органолептичних властивостей. У процесі маслодобування в масло переходять фосфатиди, воски, вільні жирні кислоти, барвники та інші супутні речовини. Фосфатиди, стероли, токофероли підвищують біологічну цінність олії, а воски, вільні жирні кислоти, держсипол – знижують його якість. Так наявність фосфатидів в олії погіршує його технологічні властивості, ускладнюючи рафінацію та гідрогенізацію. Тому первинне очищення масла має важливе значення у забезпеченні безпеки його якості. Для підвищення стійкості олії до зберігання необхідно проводити первинне очищення відразу після отримання. Слід також зазначити, що олія відразу після отримання повинна бути охолоджена до температури не вище 60 °С. Це необхідно для запобігання окислювальним процесам, можливих при зіткненні гарячої олії з киснем повітря при первинному очищенні та зберіганні у відкритих ємностях. При переробці бавовняного насіння зберігання олії вже при температурі вище 40 °С супроводжується також глибокими незворотними змінами держсиполу, що ускладнюють подальше його видалення з олії. При первинному очищенні масла, в основному, видаляють механічні домішки, використовуючи для цього відстоювання (в гущаловушках), інерційне очищення (на вібраційних ситах), центрифугування (в центрифугах; і сепараторах) та фільтрацію (на фільтр-пресах). Як фільтруючу поверхню (перегородки) використовують спеціальну тканину (бельтинг, лавсан, капрон та інші). На існуючих фільтр-пресах фільтрація ведеться за постійної швидкості до створення тиску не більше 0,2 МПа. Для механічного очищення відстоюванням використовують механізовані гущаловушки (рис. 1.2).




Рiс. 1.2 - Гущаловушка

Гущаловушка - це найпростіший сепаратор, призначений для видалення механічних домішок із пресової олії. Гущаловушка є прямокутною ємністю, в якій розміщений скребковий ланцюговий механізм 4. Ланцюг натягнутий і переміщається за допомогою чотирьох зірочок, закріплених на валиках. Олія з домішкою до 10 % механічної суспензії надходить у перший відсік гущеловушки через прийомну кишеню 1. Суспензія, що міститься в маслі, поступово переноситься вгору і подається на сітчасту поверхню горизонтальної перегородки 5, звідки переміщається скребками до вивідного шнека 3. Олія, що пройшла 5 надходить у другу секцію через щілину 7, де очищається за аналогічною схемою. Очищене масло з вмістом суспензії до 0,3% виводиться на подальшу обробку через патрубки 8, розташовані під сітчастою перегородкою. Рух ланцюгів скребкового механізму проходить повільно, зі швидкістю від 2 до 3 м/год, продуктивність гущаловушки - від 8 до 10 т олії на годину. Виготовляють її як не стандартизоване устаткування.

У гущаловушках відбувається відділення олії від найбільших частинок, а виділення дрібних зважених частинок використовують осадження їх у відцентровому полі. Для цих цілей використовуються центрифуги та сепаратори. У схемах первинного очищення олії на багатьох підприємствах застосовують горизонтальні шнекові центрифуги безперервної дії типу НОГШ, ОГШ та рідинні розділові та освітлювальні сепаратори.

Центрифуга ОГШ-321К горизонтальна, безперервної дії, із шнековим вивантаженням осаду призначена для поділу суспензій середньої дискретності. На маслодобувних підприємствах вона застосовується для первинного очищення олій від механічних домішок. Основним вузлом центрифуги (рис. 1.3) є ротор 8 циліндроконічної форми, розташований горизонтально на двох опорах 5 підшипників. З торців ротор закритий цапфами. Кришками він спирається на підшипники кочення. Головні опорні підшипники змонтовані на станині 7. Обертання ротора здійснюється від електродвигуна через клинопасову передачу 1. Усередині ротора співвісно розташований шнек 3 для переміщення твердого осаду до розвантажувальних вікон ротора. Шнек складається з порожнистого циліндричного барабана, на зовнішній поверхні якого розташовані спіралі. Усередині порожнього барабана приварені перегородки,

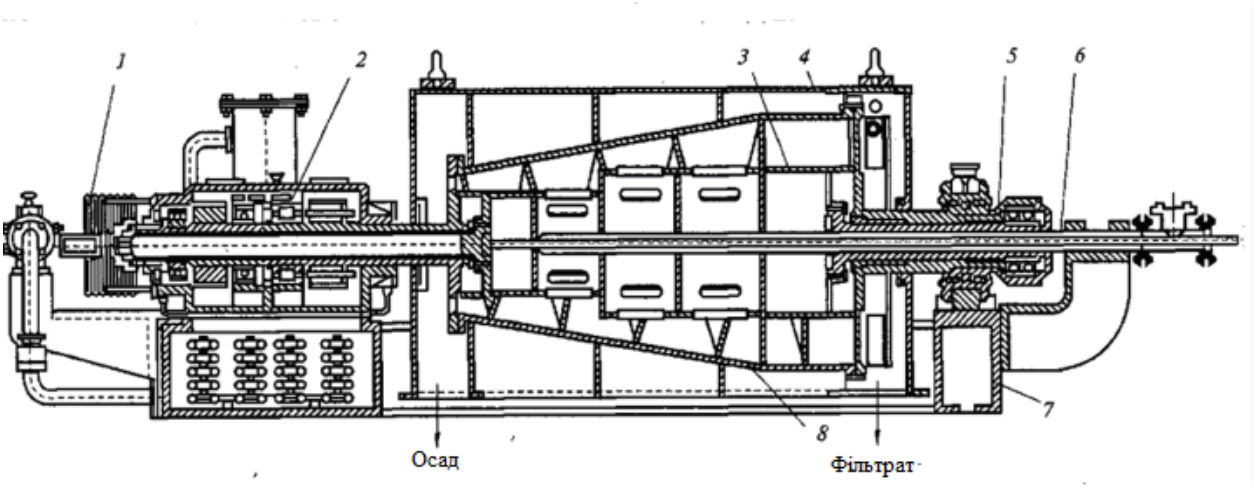


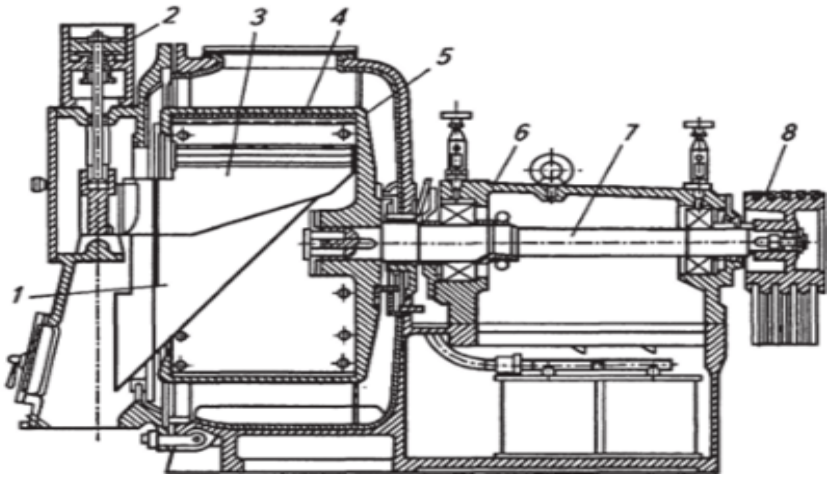

Рис. 1.3 - Центрифуга горизонтальна ОГШ-321К

Камери мають три розвантажувальні вікна. До торців барабана шнека прикріплені цапфи, що утворюють опорні шийки шнека. Ліва цапфа шнека забезпечена шліцами, якими вона з'єднується з водилом другого ступеня планетарного редуктора 2. Обертання шнека передається від ротора через планетарний редуктор 2, який забезпечує обертання шнека в один бік з ротором при відставанні на 1% від частоти обертання. Різниця кутових швидкостей шнека та ротора створює умови примусового переміщення осаду вздовж внутрішньої

поверхні барабана ротора. Через порожнисті цапфи ротора і шнека проходить труба живлення 6, по якій підводиться суспензія у внутрішню порожнину барабана шнека, звідки вона через вікна викидається у внутрішню порожнину ротора. Під дією відцентрових сил у роторі тверда фаза відокремлюється від рідкої, причому тверда фаза осідає на стінках ротора і транспортується шнеком до розвантажувальних вікон у вузькій стороні ротора. На шляху просування осаду до розвантажувальних вікон у зоні зневоднення з осаду видаляється волога. Рідина прямує до широкої сторони ротора і через зливні вікна в першій цапфі викидається в приймальний відсік кожуха 4 центрифуги і потім зливається в збірник. Тверда фаза через розвантажувальні вікна ротора потрапляє у приймальний відсік кожуха, звідки під впливом своєї маси падає вниз. Завантаження, відділення твердої фракції від рідкої, вивантаження осаду та злив фугату відбуваються безперервно. Продуктивність ОГШ-321К по осаду – від 400 до 500 кг, а продуктивність на вході – до 8 м3/год.

Горизонтальна центрифуга з ножовим розвантаженням осаду на ходу показана на рис. 1.4. Основний робочий орган – перфорований ротор, розташований усередині литого корпусу. Він за допомогою шпонки кріпиться на валу, який обертається від електродвигуна через клинопасову передачу. Ніж переміщається до поверхні.

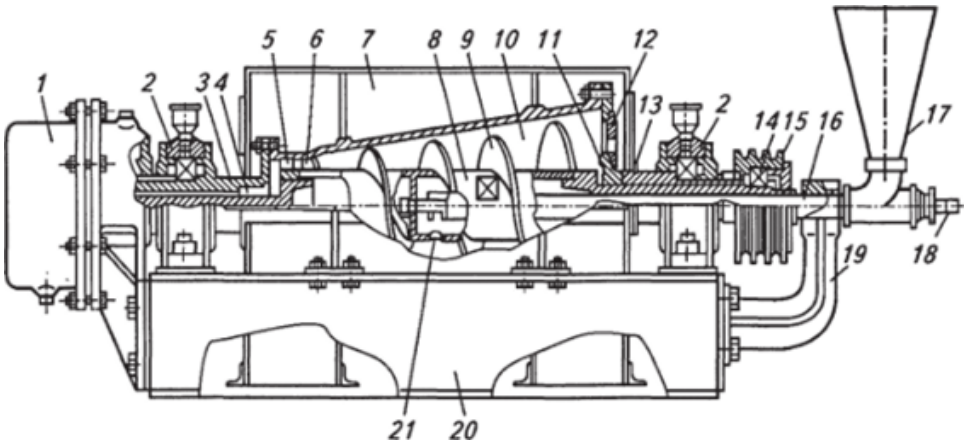
При підйомі ніж зрізає осад, який падає в жолоб і виводиться назовні. Суспензія подається по трубі з щілинним вікном на ділянці, розташованому всередині ротора, через певні проміжки часу завантажувальним клапаном з гідравлічним керуванням. Центрифуга управляється електрогідравлічним автоматом, відмінна риса якого полягає у можливості контролювати наповнення центрифуги не за часом, а за товщиною шару осаду.




Рмс.. 1.4. Центрифуга з ножовим вивантаженням осаду: 1 - Похилий жолоб; 2 гідроциліндр; 3-ніж; 3-сітка; 5-ротор; б-корпус центрифуги; 7-вал; 8-шків

Центрифуга зі шнековим вивантаженням осаду показано на рис. 5.3. Два концентричні барабани - зовнішній і внутрішній - обертаються з різною частотою. Зовнішній барабан призначений для центрифугування, внутрішній для кріплення спіральної стрічки або лопаток по гвинтовій лінії. Осад, що утворюється на стінках зовнішнього барабана, транспортується спіральною стрічкою або лопатками до вивантажувальних вікон, через які викидається до приймача. Істотною перевагою таких центрифуг є безперервність дії. Барабани відстійних (осаджувальних) центрифуг зі шнековим вивантаженням можуть бути конічною або циліндричною формою. Поки суспензія переміщається в барабані від його вузького сопла до широкого осаду, що утворюється транспортується в протилежному напрямку. При цьому осад виводиться шнеком із суспензії і по дорозі до вивантаження проходить через зону осушки, де втрачає частину рідкої фази. Для поділу суспензій з концентрацією твердої фази 1...40% використовують відстійні центрифуги зі шнековим вивантаженням осаду. На відміну від центрифуг, що фільтрують, вони видають осад з вмістом рідкої фази 30...40 %. Порівняно з відстійними центрифугами з ножовим зніманням осаду витрата

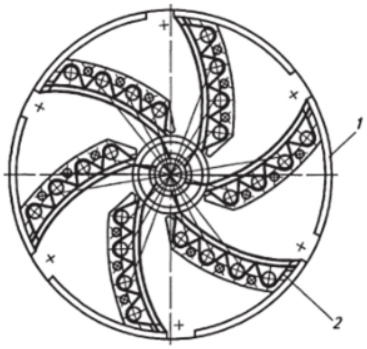
енергії у них менша у 3...4 рази, а металу — у 5...6 разів. Однак у порівнянні з іншими центрифугами витрата енергії на 1 т продукту.




Мал. 1.5. Центрифуга зі шнековим вивантаженням осаду: 1 - Редуктор; 2-корінні підшипники; 3 задня цапфа ротора; 4, 13-ущільнення; 5 - зворотний виток; 6 вікна для осаду; 7 - кожух; 8 - пустотілий вал шнека; 9 конічний шнек ротора; 10 конічний ротор; 11 - передня цапфа ротора; 12 - вставки зливних вікон; 14 - підшипник; 15-привідний шків; 16 - живильна труба; 17-приймальна лійка; 18 промивна труба; 19 кронштейн; 20 - рама; 21 вікна для подачі суспензії та у них у 4...6 разів більше.

Осаджувальні центрифуги зі шнековим вивантаженням застосовні для суспензій досить широкого діапазону дисперсності з розмірами частинок приблизно 0,01...1 мм. Все більше застосування в харчовій промисловості знаходять безперервно діючі конічні центрифуги з відцентровим вивантаженням осаду. У таких центрифугах продукт безперервним струменем тече до приймача з малим кутом розчину конуса, де він розганяється до окружної швидкості обертання, і надходить на сито, що фільтрує. При русі оброблюваного матеріалу вздовж ротора відокремлюється міжкристалітна рідина, осад промивається і пропарюється. Рідка фаза потрапляє у кільцевий приймач. Кут розчину фільтруючого конуса забезпечує рух продукту у верхній зоні ротора під дією

підпору нових порцій продукту. Продукт викидається в приймач і прямує на подальшу переробку. Для конічних центрифуг застосовують фільтруючі сита з малими отворами як щілин шириною 0,04...0,15 мм. Лопатеві центрифуги з відцентровим вивантаженням осаду застосовують у крохмалопатковій промисловості. Лопатеве сито по конструкції аналогічно відцентровому насосу. Відрізняється воно лише тим, що має вигнуті вперед (у напрямку обертання) лопатки як сит (рис. 1.6). При центральному живленні ротора суспензія, що обробляється, тече вздовж ситової лопатки, рідка фаза з тонкою фракцією




Рмс. 1.6. Ротор лопатевої центрифуги:

1 - корпус ротора; 2- лопатя проходить через сито, а груба фракція затримується та викидається у радіальному напрямку.

Центрифуга з ротором, що фільтрує, виконаним з фільтруючого сита, показана на рис. 1.7. Усередині ротора розташований пристрій, що складається із системи сопел для подачі промивних вод, що обертається з певною швидкістю щодо конічного ротора. Під час проходження продукту по конічній поверхні ротора сопла подають воду, що промиває продукт і тонкі фракції, що виносить з нього.

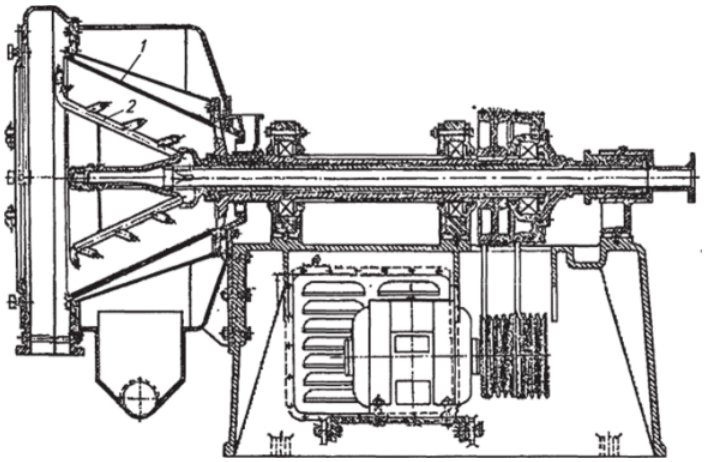



Рис.. 1.7. Центрифуга з фільтруючим ротором: 1-фільтруючий ротор; 2-пристрій, що несе систему сопел

Центрифуга НОГШ-325 використовується у схемі очищення рослинної олії для додаткового віджиму, захопленого шламом.

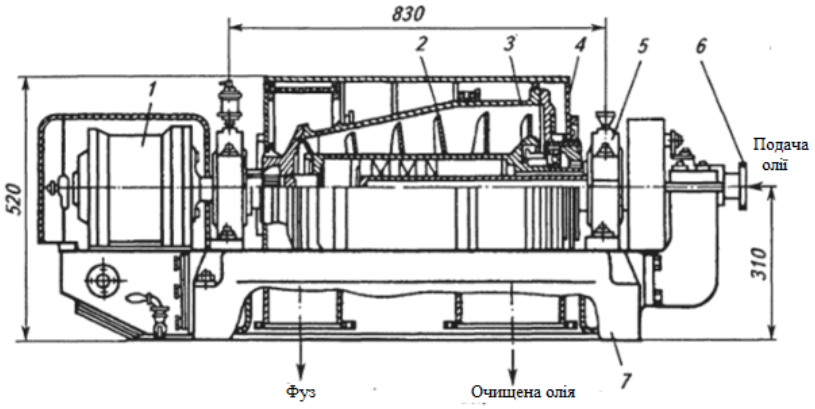



Рис. 1.8. Центрифуга НОГШ-325: 1 - планетарний редуктор; 2 шнек; 3-ротор; 4-кожух; 5-підшипники; 6-живильна труба; 7-станина олії.

Її можна також застосовувати безпосередньо для відокремлення зважених частинок від олії. Процес осадження механічних частинок у відцентровому полі відбувається значно інтенсивніше, ніж відстоювання у полі гравітаційних сил. Центрифуга відноситься до відстійних шнекових центрифуг безперервної дії.

Основний вузол центрифуги – ротор 3 (рис. 1.8), встановлений горизонтально в підшипниках 5. Зверху ротор закритий кожухом 4, з торців – кришками з цапфами, що спираються на підшипники. Ротор приводиться в обертання від електродвигуна через клинопасову передачу. Шнек 2 для виведення шламу, що осів на внутрішні стінки ротора, обертається від ротора центрифуги через планетарний редуктор 1. Ротор зі шнеком, кожух, опори, планетарний редуктор змонтовані на станині 7. Центрифуга працює в такий спосіб. Суспензія, що підлягає поділу, надходить у внутрішню порожнину шнека через трубу живлення, звідки через вікна обичайки шнека потрапляє в ротор. Тверді зважені частинки під дією відцентрових сил осідають на внутрішню поверхню ротора і направляються шнеком до отворів, що розташовані у вузькій частині ротора. Осад надходить у приймач. Освітлена рідина прямує до зливних вікон, переливається через зливний борт і викидається з ротора до приймального відсіку кожуха центрифуги. Режим процесу можна регулювати зміною швидкості суспензії, частоти обертання ротора, діаметра зливного борту. Основні технічні дані центрифуги НОГШ-325 Продуктивність при очищенні олії, т/год 2,0 Частота обертання ротора, хв. $^{-1}$1500; 3000; 5500 Відносна частота обертання шнека, хв. $^{-1}$ 16,5; 20; 23,5 Потужність електродвигуна, 3 кВт. Габаритні розміри, мм: довжина 1512 ширина 1465 висота 520 Маса, кг 722.

Найбільш поширене розповсюдження у виробництві олії отримала центрифуга НОГШ – 325.

## 1.4 Характеристика електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії

Існуюча динаміка поступального руху у напрямі підвищення технічного рівня автоматизованого електроприводу призводить до необхідності періодичного узагальнення накопиченого досвіду у проектуванні та експлуатації існуючого електрообладнання.

Завдання експлуатаційників полягає у збереженні працездатного стану існуючих електроустановок та переведення їх у максимально енергозберігаючий режим.

Поява автоматизованого електроприводу з одного боку пов'язана з виникненням нових електронно-цифрових систем управління та з іншого боку – з появою потокових ліній, а також з подальшим розвитком процесу зрощування робочої машини з електродвигуном. Технологи почали пред'являти підвищені вимоги до електроприводу з точки зору надійності та якості роботи: розширення функцій, наявність пристроїв отримання та зберігання інформації, зобов'язання [5].

Електроприводи центрифуг для очистки олії побудовані на застарілій елементній базі, відсутня автоматизація та відмічена невисока функціональність існуючого електропривода.

Саме тому в межах написання роботи прийнято рішення здійснити модернізації електроприводу шнека центрифуги (основного устаткування процесу первинної очистки ріпакової олії).

# 2 ФОРМУЛЮВАННЯ ВИМОГ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ ДВИГУНА, РОЗРАХУНОК ЙОГО ПОТУЖНОСТІ

## 2.1 Вимоги до електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії

Сучасний електропривод – це сукупність безлічі електромашин, апаратів і систем керування ними. Він є основним споживачем електричної енергії (до 60%) і головним джерелом механічної енергії в промисловості.

Для механізмів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, більшу частину робочого циклу двигун працює на природній характеристиці і лише відносно невеликий час на штучній, зазвичай на зниженій частоті обертання. У цьому випадку втрати електроенергії на штучній характеристиці порівняно невеликі, тому що час роботи на ній невеликий. Тут можна застосовувати прості і дешеві способи регулювання, навіть якщо вони викликають підвищені втрати потужності в обмотках.

Тому завдяки простоті реалізації методу регулювання швидкості шляхом зміни опору в ланцюзі ротора, такі електроприводи знайшли найбільш широке застосування в кранових системах, і зараз складають основну частину від всіх електроприводів, що застосовуються в промисловості.

У той же час зростає число електроприводів з плавним регулюванням швидкості, в першу чергу до них відносяться електроприводи по системам “тиристорний перетворювач – двигун постійного струму” (ТП-Д) і “перетворювач частоти – асинхронний двигун” (ПЧ-АД).

Сформуємо основні вимоги до перехідного процесу автоматизованого електроприводу шнеку центрифуги:

- перерегулювання δ – не більше 10%;
- час регулювання перехідного процесу $t_р$ – не більше 1 с;
- час наростання – не більше 0,5 мс;
- стале значення Н = 1.

**2.2 Розрахунок швидкості осадження у центрифузі.**

Осадження в центрифузі здійснюється під дією гравітаційної або відцентрової сили, що виникає під час обертання тіл, у багато разів перевищує силу тяжіння, її використовують для прискорення процесу осадження. Основною частиною центрифуги є барабан, який обертається. При обертанні виникає відцентрова сила.

Визначаємо відцентрову силу за формулою:

$$\sigma_в = m\omega^2 r \qquad (2.1)$$

де m - вага частинка, кг $10*10^{-6}$

$\omega$ - кутова швидкість обертання частинки, $с^{-1}$, $1,1*10^6$

r - радіус обертання частинки 0,3 м

Отриманні значення підставляємо в формулу (3.1)

$$\sigma_в = 10*10^{-6}*1,1*10^6*0,3 = 3H$$

Силу тяжіння визначаємо за формулою (3.2);

$$G_T = mg \qquad (2.2)$$

$$G_T = 10*10^{-6}*9,8 = 9,8*10^{-5}H$$

Визначаємо фактор розділення за формулою;

$$F_r = \frac{G_B}{G_T} \qquad (2.3)$$

$$F_r = \frac{3}{9.8*10^{-5}} = 3.1*10^4$$

Таким чином фактор розділення показує, в скільки разів відцентрова сила перевищує гравітаційну. Чим більше фактор розділення, тим вища розділяюча здатність відцентрових установ.

Визначаємо швидкість осадження у відцентрованому полі за формулою;

$$\omega^2 = \frac{d^2(P_ч - P_c)\omega^2 r}{18\mu_c} \quad (2.4)$$

де d – діаметр частинки, 0,003 м,

$P_ч$ = 2525 кг/м$^3$ – густина частинки,

$P_c$ = 920 кг/м$^3$ – густина середовища,

$\mu_c$ - 0,00595 Па*с – динамічна в'язкість середовища,

n = 3000 об/хв. Частота обертання барабана.

Підставляємо значення в формулу (3.4);

$$\omega^2 = \frac{0{,}003^2 * (2525 - 920) * 18840 * 0{,}3}{18 * 0{,}00595} = 0{,}3 м/с$$

Визначаємо нульову швидкість за формулою (3.5);

$$\omega = 2\pi n; \quad (2.5)$$

$$\omega = 2 * 3{,}14 * 3000 = 18840 рад/хв.$$

Визначаємо тривалість осадження за формулою (3.6);

$$\tau = \frac{18\mu_{ж}}{d^2(2\pi n)^2(P_ч - P_c)} Ln\frac{R}{R_0} \quad (2.6)$$

де $\mu_{ж}$ = 0,00585 – динамічна в'язкість води,

R = 0,25 м – радіус барабана,

$R_0$ = 0,2 м – радіус радіального кільця в барабані.

$$\tau = \frac{18 * 0{,}00595}{0{,}03^2 * 18840 * (2525 - 920)} Ln\frac{0{,}25}{0{,}2} = 0{,}209 * 10^{-7} с$$

Визначаємо споживчу потужність за формулою (3.7);

$$P_i = j_i * V_i; \quad (2.7)$$

$$P_i = 3.25 * 380 = 1235 Вт$$

Визначаємо тривалість осадження частинок за формулою (3.8);

$$\tau = \frac{18\mu_{ж} * 900}{d^2(P_ч - P_c)\pi^2 n^2} Ln \frac{0,25}{0,2} \quad (2.8)$$

$$\tau = \frac{18 * 0,00595 * 900}{0,003^2 * (2525 - 920) * 3,14^2 * 3000^2} Ln \frac{0,25}{0,2} = 0.2 * 10^{-4}$$

Визначаємо споживчу потужність електроенергії за формулою:

$$W_i = P_i r; \quad (2.9)$$

$$W_i = 1235 * 11,1 = 13708,5 Дж$$

**2.3 Розрахунок потужності і вибір двигуна.**

Для привода робочих машин частіше всього використовують трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серії 4А або міжнародної серії AIP. Останні є уніфікованими двигунами серії Інтерелектро, виконаними з конструкційних матеріалів підвищеної якості. Вони відрізняються меншими габаритами і масою, низьким рівнем вібрацій і підвищеними енергетичними показниками, котрі відповідають рівню кращих зарубіжних зразків. При виборі типу двигуна за рівнем захисту від впливу навколишнього середовища частіше всього використовують захищені – 1Р23 або закриті – 1Р44. У пожежо-вибухонебезпечних приміщеннях використовують двигуни спецвиконання-1Р54.

Для електропривода робочих машин, як правило вибирають прості та надійні трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором серії 4А, AIP, AIPC або інші.

Електродвигуни вибирають із каталогу за розрахунковою потужністю $P_{НОМ} \geq P_{РОЗРАХ}$ і синхронній частоті обертання $n_0$ ($n_0$ = 3000, 1500, 1000, 750 об/хв.) з урахуванням режиму роботи двигуна: S1 – тривалий, ПВ > 60%; режим S2 – короткочасний, ПВ < 15%; режим S3 – повторно-короткочасний, 15% ≤ ПВ ≤ 60%.

При роботі машини у тривалому режимі із малозмінним навантаженням, що відповідає режиму роботи *S1*, потужність двигуна вибирають за результатами енергетичних розрахунків:

$$P_{НОМ} \geq P_{ДВ}, \tag{2.10}$$

а вибрані двигуни на нагрівання, відповідність пусковому моменту і на перевантажувальну здатність не перевіряють, так як в цьому випадку завод-виготовлювач гарантує їх тривалу роботу.

Енергія, яка розходується при роботі шнекового преса, витрачається на привод шнека, стискання і розчавлювання продукту, його переміщення і подолання сил тертя, причому остання складова, дуже велика. Крім того, при наявності гідрорегулятора енергія витрачається і на гідронасос.

Вихідні технічні параметри для розрахунку потужності двигуна центрифуги:

$R_{MAX}$ , $R_{MIN}$, $R_{CP}$ – максимальний, мінімальний і середній радіус лопатей шнеку центрифуги, $R_{MAX}$ = 0,25 м, $R_{MIN}$ = 0,10 м, $R_{CP}$ = 0,12 м;

$Z_H$ – кількість лопатей, $Z_H$ = 2;

$\omega_H$ – максимальна кутова швідкість обертання шнеку,

$\omega_H$ – 157 рад/с (1450 об/хв.);

q – питомий опір олії, q =500..550 Н/м.

Напруга живлення: 3 PEN 380/220 В 50 гц.

В основі аналітичного розрахунку споживної потужності двигуна лежить визначення потужності на валу шнеку центрифуги.

Для визначення потужності на валу ротора $P_0$ (кВт) (без урахування ККД привода і коефіцієнта запасу потужності двигуна) може бути рекомендована наступна емпірічна формула [9]:

$$P_0 = q(R_{MAX} - R_{MIN}) \cdot R_{CP} \cdot \omega_н, \tag{2.11}$$

Тоді:

$$P_0 = 550\,(0.25 - 0.10)\,0.12 * 2 * 157 = 3{,}1 \text{ кВт}$$

Потужність на валу двигуна привода визначимо за формулою:

[redacted](2.12)

де $P_O$ - розрахункова потужність на валу ротора лопатей , $P_0$ = 3,1 кВт;

$\eta_З$ – загальний ККД кінематичної схеми, $\eta_З = 0{,}90$;

$K_З$ - коефіцієнт запасу потужності двигуна, $K_З$ = 1,1…1,3.

Тоді потужність на валу двигуна:

$$P_{дв} = \frac{P_O}{\eta_O} \cdot K_з = \frac{3{,}1}{0{,}90} \cdot 1{,}1 = 3{,}78 кВт$$

За розрахованою потужністю двигуна $P_{ДВ}$ = 3,78 кВт і за заданим значенням частоти обертання ротора двигуна $n$ = 1450 об/хв., вибираємо трифазний асинхронний двигун 4А100L4У3 з короткозамкненим ротором, серії 4А, для режиму *S1* з напругою 380 В 50 Гц.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика двигуна **4А100L4У3**

| **Рном, кВт** | **$n_{ном}$, об/хв.** | **(ККД)$\eta_{ном}$, %** | **cos$\varphi_{ном}$** | **$J_{ДВ}$, кг·м$^2$** |
|---|---|---|---|---|
| 4.0 | 1450 | 84 | 0.84 | 0.15 |
| $\frac{M_П}{M}$ | $\frac{M_{max}}{M}$ | $\frac{M_{min}}{M}$ | $\frac{I_П}{M}$ | |
| 2 | 2.2 | 1.6 | 6 | |

**Визначення додаткових параметрів двигуна**

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

[redacted](2.13)

Номінальна частота обертання двигуна:

[redacted](2.14)

чи

(2.15)

Номінальний момент двигуна:

(2.16)

Номінальна фазна напруга і номінальний фазний і лінійний струм статора при схемі з'єднання обмоток Y:

(2.17)

(2.18)

(2.19)

де,

$I_{1лн}$ - струм, споживаний двигуном з мережі в номінальному режимі роботи.

Максимальний споживаний струм двигуна при прямому пуску:

(2.20)

Критичний момент двигуна на природній характеристиці:

(2.21)

Пусковий момент двигуна при прямому пуску:

(2.22)

## 2.4 Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

(2.23)

Максимальна швидкість електроприводу:

[redacted] (2.24)

Значення електромагнітного номінального моменту при номінальному ковзанні:

$$M_{эм.Sн} = \frac{3 \cdot U_{1.фн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_н \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_н}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_н \cdot X_\mu}\right)^2\right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 219{,}39^2 \cdot 1.628}{157{,}08 \cdot 0{,}053 \left[5{,}77^2 + \left(1.653 + \frac{1{,}628}{0{,}053}\right)^2 + \left(\frac{1{,}653 \cdot 1{,}628}{0{,}053 \cdot 123{,}57}\right)^2\right]}$$

$$= 27{,}416\ H \cdot m \qquad (2.9.3)$$

[redacted] (2.26)

Значення кутової швидкості обертання двигуна:

[redacted] (2.27)

Значення електромагнітного критичного моменту при критичному ковзанні:

$$M_{эм.Sк} = \left[\frac{3 \cdot U_{1.фн}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2) \cdot \left[1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2\right]}\right]}\right] = 63{,}145\ H \cdot m$$

[redacted] (2.28)

Момент тертя на валу двигуна:

[redacted] (2.29)

Пусковий момент двигуна при прямому пуску:

[redacted] (2.30)

[redacted] (2.31)

[redacted] (2.32)

де, s = 0,0001; 0,01…1

[redacted](2.33)

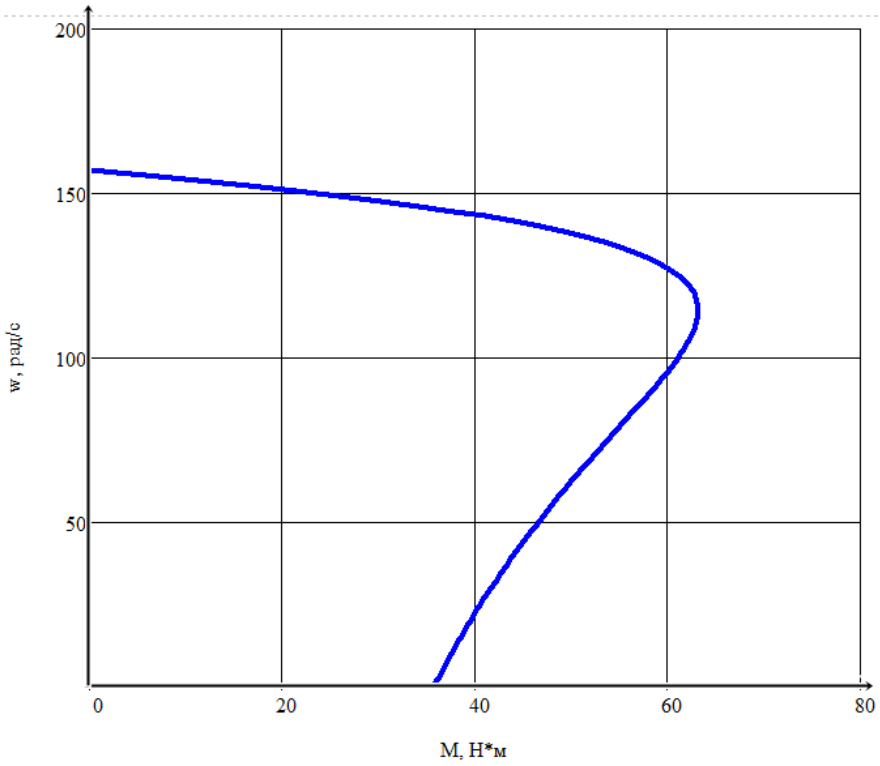



Рисунок 2.1 – Природна механічна характеристика електродвигуна

## 2.5 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електроприводу при скалярному частотному управлінні.

s = 0,00001; 0,01…1 $\omega_0 = 157{,}08$

$f_{1мин} = 20Гц$

$f_{1н} = 50\ Гц$

[redacted](2.34)

$$M_{зм}(s, f_1) = \frac{3 \cdot \left(U_{1.фн} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right) \cdot s \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_{1н}}{f_1}\right)^2\right]}$$

При частоті більше за номінальну:

[redacted] (2.35)

За результатами розрахунку будується:

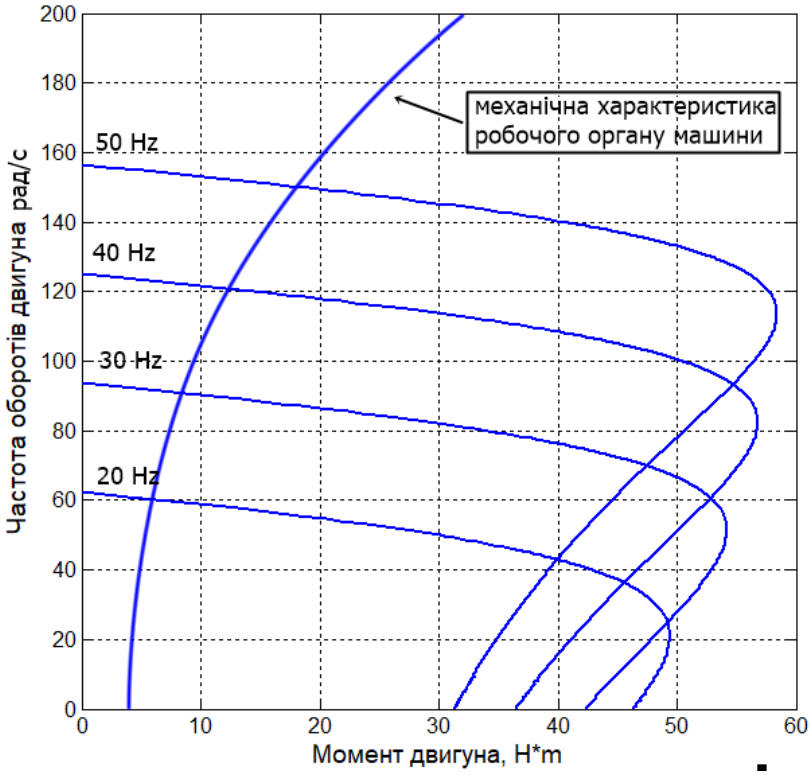


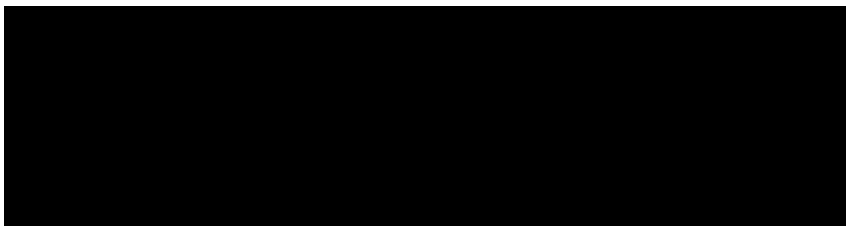

Рисунок 2.2 – Механічні характеристики електроприводу при скалярному частотному управлінні

Сімейство електромеханічних характеристик:

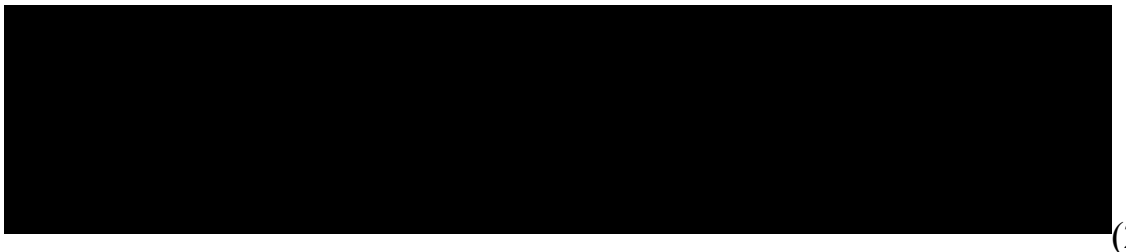
[redacted] (2.36)

[redacted] (2.37)

Приведений струм ротора до обмотки статора :


(2.38)

Природні електромеханічні характеристики:


(2.39)

(2.40)

При частоті більше за номінальну:

(2.41)

(2.42)

(2.43)

(2.44)

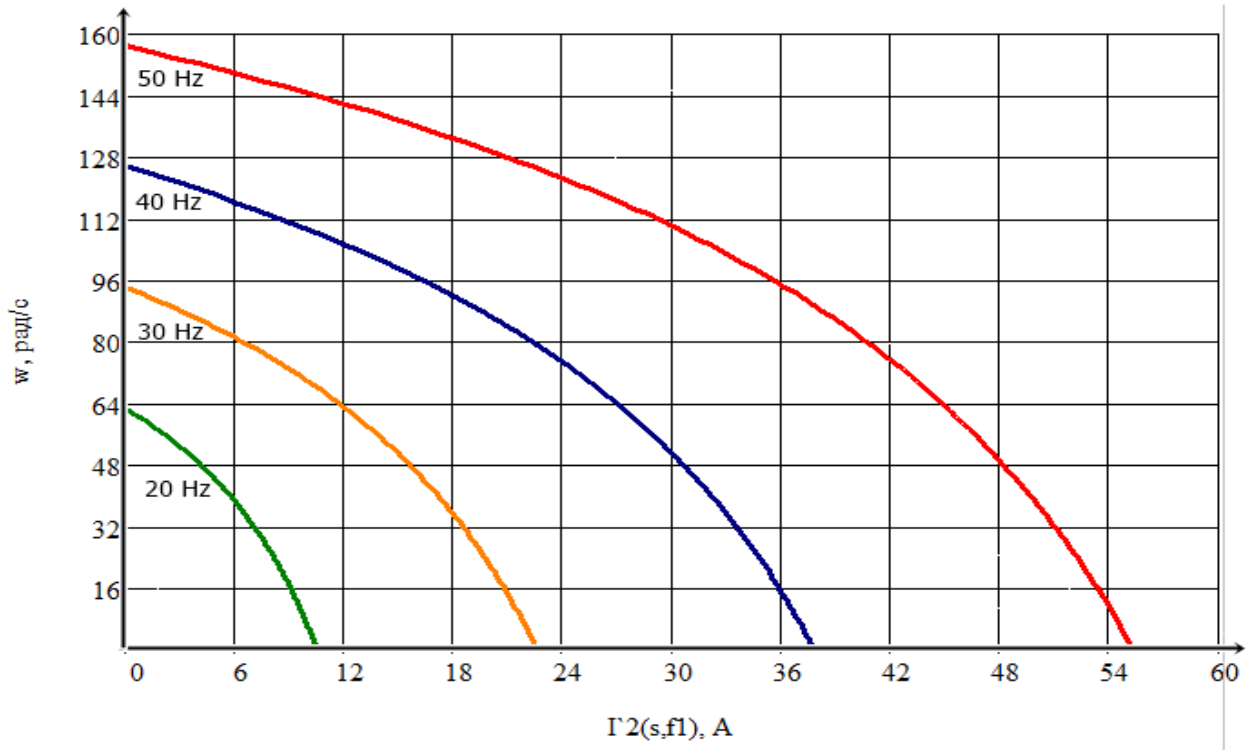



Рисунок 2.3 – Електромеханічні характеристики $I`2(s,f1)$

### 2.6 Вибір перетворювача частоти

Максимальний струм інвертора має бути більше максимального струму навантаження:

[redacted] (2.45)

[redacted] (2.46)

[redacted] (2.47)

Навіть якщо двигун працює при малому завантаженні, максимальний струм інвертора повинен задовольняти умові:

[redacted] (2.48)

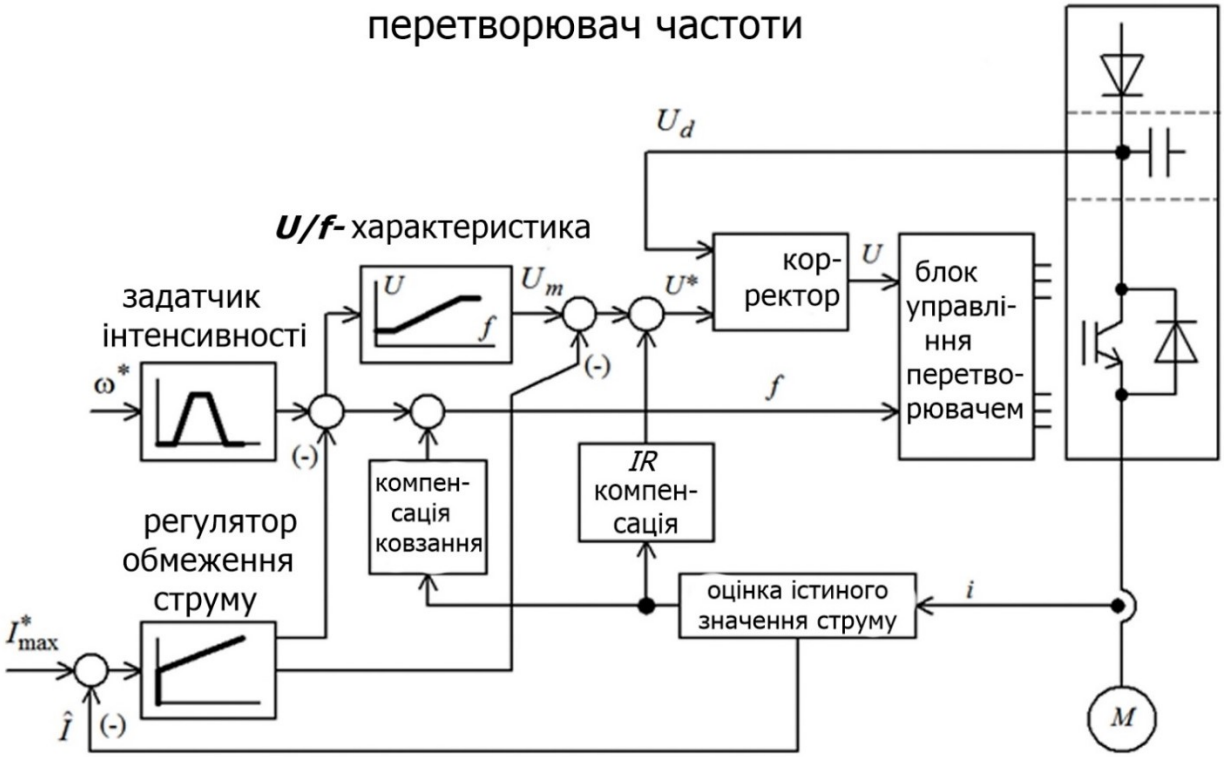



Рисунок 2.4 – Структурна схема перетворювача частоти

Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти

Параметри перетворювача частоти зображенні у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Параметри перетворювача частоти

| Модель | Кількість фаз на вході | $U_н$, В | $I_{ін}$, В | $I_{imax}$, В | Рекомендована потужність двигуна, кВт |
|---|---|---|---|---|---|
| VLT2840 | 3 | 380-480 | 9.1 | 14.5 | 4.0 |

Загальні технічні дані перетворювача частоти серії *VLT* 2800:

– несуча частота: 3000–14000 Гц;

– частотний діапазон: 0,2 - 132 Гц, 1 - 1000 Гц;

– розширення по вихідній частоті: 0,013 Гц, 0,2 - 1000 Гц;

– живляча мережа: 380–480 В ± 10%; 48–62 Гц, 3 фазы;

– коефіцієнт потужності 0,9/1 при номінальному навантаженні;

– перевантаження по струму: 160% впродовж 1 хвилини.

– діапазон регулювання в розімкненій системі: 1:10 від синхронної швидкості обертання;

– діапазон регулювання в замкнутій системі: 1:120 від синхронної швидкості обертання;

– точність швидкості обертання (розімкнений контур), об/хв: макс. погрішність ± 150 - 3600 об/хв;

– точність швидкості обертання (замкнутий контур), об/хв: макс. погрішність ± 30 - 3600 об/хв.

## 2.7 Розрахунок параметрів перетворювача

Максимальне значення напруги управління:

$$U_{\text{уп.макс}} = 10 \text{ В}$$

Максимальне значення коефіцієнта посилення перетворювача:

[redacted] (2.49)

Несуча частота інвертора, приймаємо за: $f_{\text{шим}} = 4000$ Гц

Еквівалентна постійна часу перетворювача:

[redacted] (2.50)

[redacted] (2.51)

# 3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

## 3.1 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода центрифуги

Модель прямого пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором електропривода тістомісильної машини представлена на рис. 3.1

Схема містить джерело трифазного живлення, трифазний вимикач, трифазний вимірювач напруги і струму обмоток статора двигуна, графобудівник механічної характеристики, осцилографи та вимірювальні прилади.

Навантаження на валу двигуна має пропорційну характеристику. Інформація про частоту обертання поступає з виходу датчика швидкості.

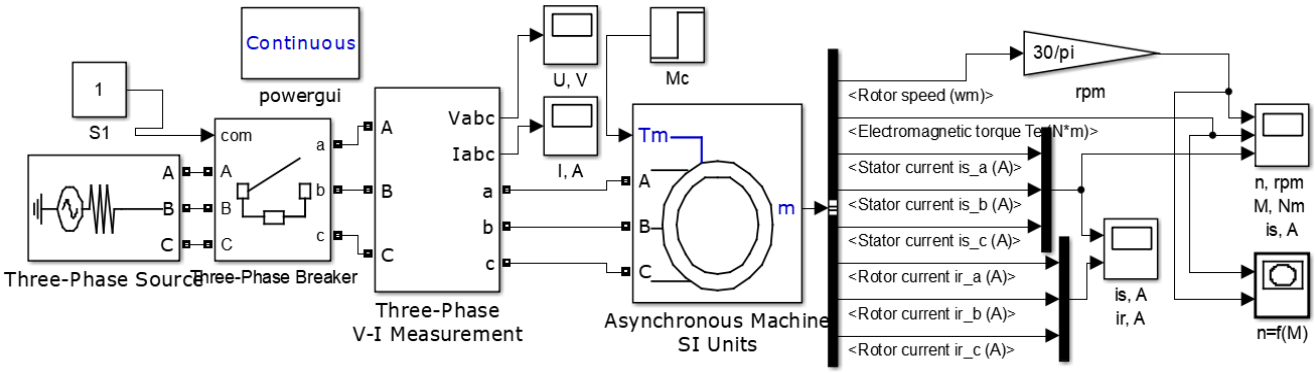



Рис. 3.1 - Схема моделювання прямого пуску АД центрифуги

Результати моделювання прямого пуску асинхронного двигуна представлені на рис. 3.2.

У результатах виведені діаграми наступних величин:

**а** – осцилограма фазних напруг на обмотках статора АД;

**б** – часова діаграма перехідного стуму в обмотках статора АД;

**в** – часова діаграма швидкості ротора при розгоні АД;

**г** – часова діаграма зміни обертового моменту на валу ротора при розгоні АД;

**д** – співвідношення швидкості ротора двигуна та електромагнітного моменту при прямому пуску АД.

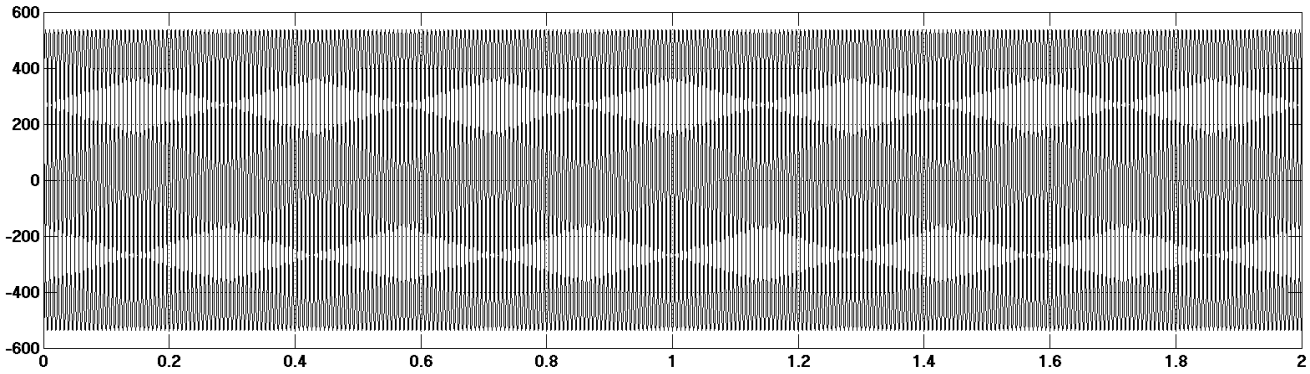
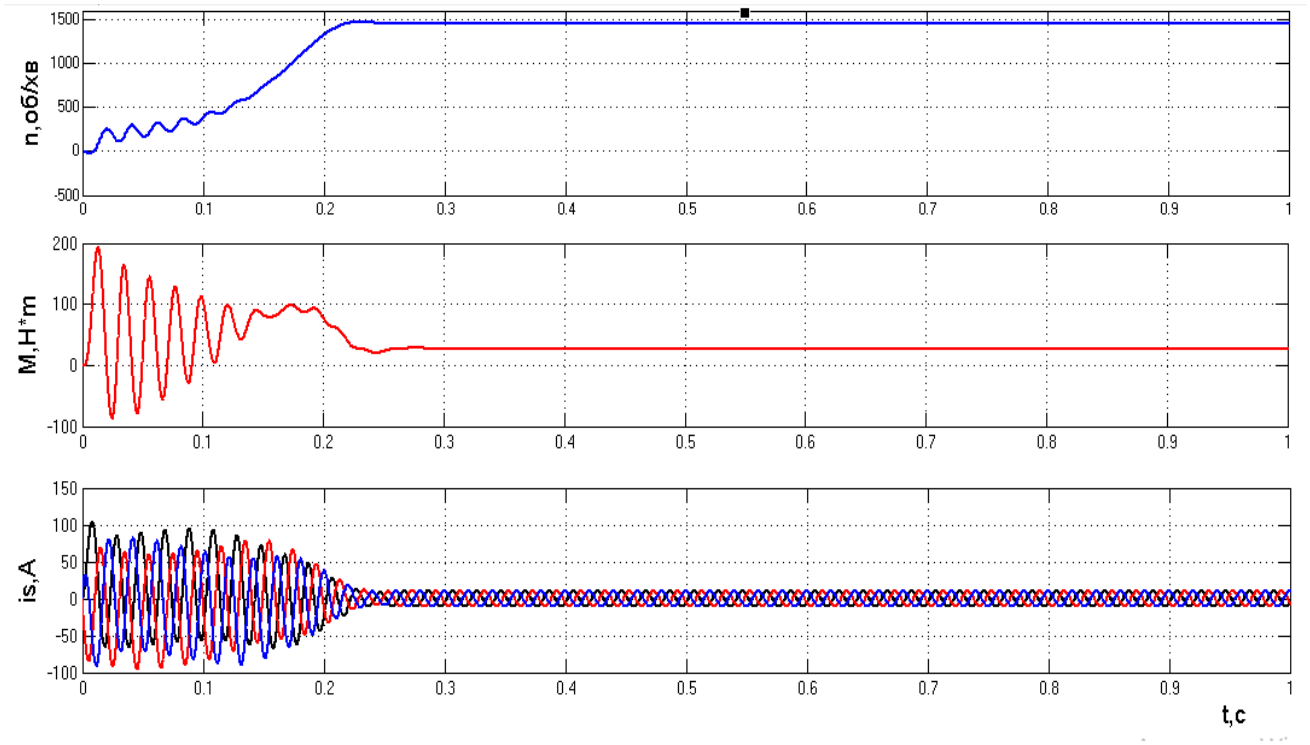
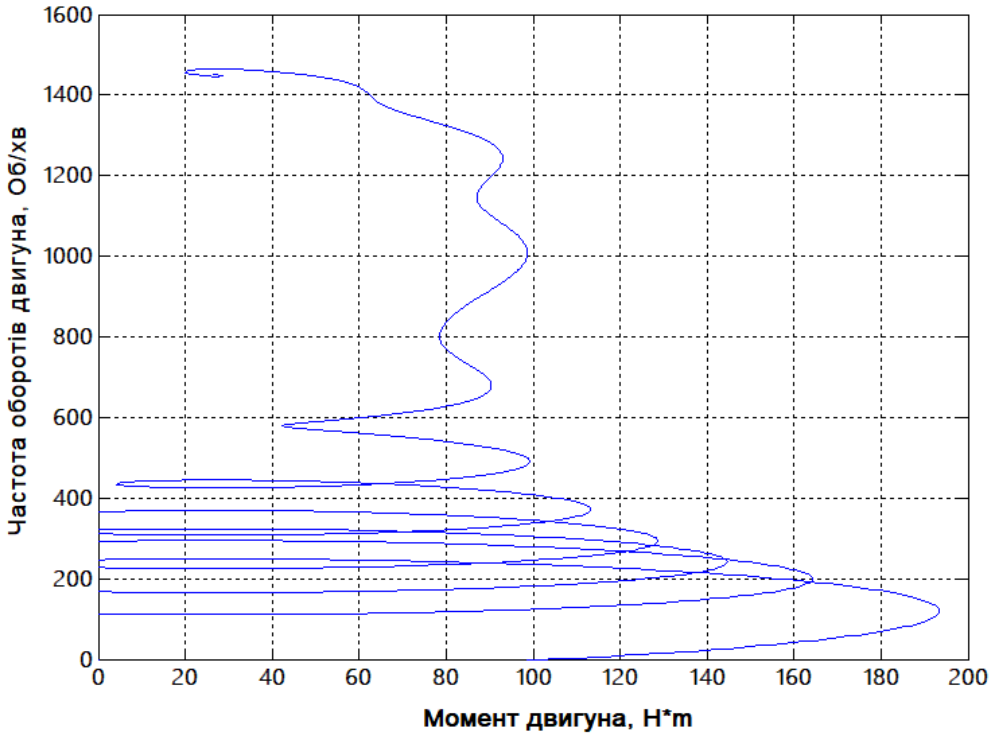



Рис. 3.2 - Результати моделювання прямого пуску АД центрифуги.

а – осцилограма фазних напруг на обмотках статора АД;




б – часова діаграма швидкості ротора, електромагнітного моменту на валу ротора, перехідного стуму в обмотках статора АД і навантаження АД.




в – співвідношення швидкості ротора двигуна та електромагнітного моменту при прямому пуску АД.

### 3.2 Моделювання пуску двигуна електропривода з ПЧ

Модель електропривода з перетворювачем частоти ПЧ-АД представлена на рис. 3.3 В моделі використовується система управління із зворотним зв'язком за швидкістю двигуна, яка забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості. Схема містить джерело трифазного живлення з ШІМ, трифазний вимикач, трифазний вимірювач напруги і струму обмоток статора двигуна, осцилографи та вимірювальні прилади.

Закон зміни частоти струму аперіодичний, час зміни 1 с. Навантаження на валу двигуна має вентиляторну характеристику. Інформація про частоту обертання поступає з виходу датчика швидкості.

У результатах виведені діаграми наступних величин:

**а** – осцилограма зміни частоти вихідної напруги ПЧ, тобто на обмотках АД;

**б** – осцилограма форми вихідної напруги ПЧ, тобто на обмотках статора АД;

**в** – часова діаграма перехідного стуму в обмотках статора АД;

**г** - часова діаграма зміни обертового моменту на валу ротора при розгоні АД;

**д** – часова діаграма швидкості ротора при розгоні АД.

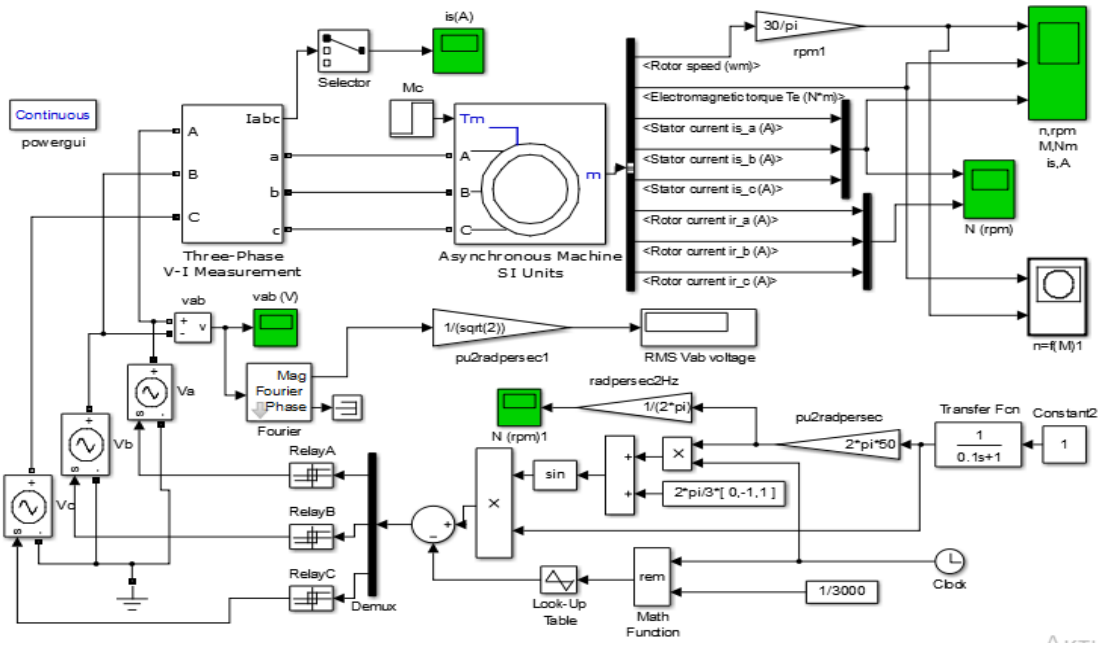



Рис. 3.3 – Схема моделі пуску асинхронного двигуна з перетворювачем частоти ПЧ-АД

Результати моделювання асинхронного двигуна з частотним перетворювачем представлені на рис. 3.4

Результати моделювання пуску АД з ПЧ:

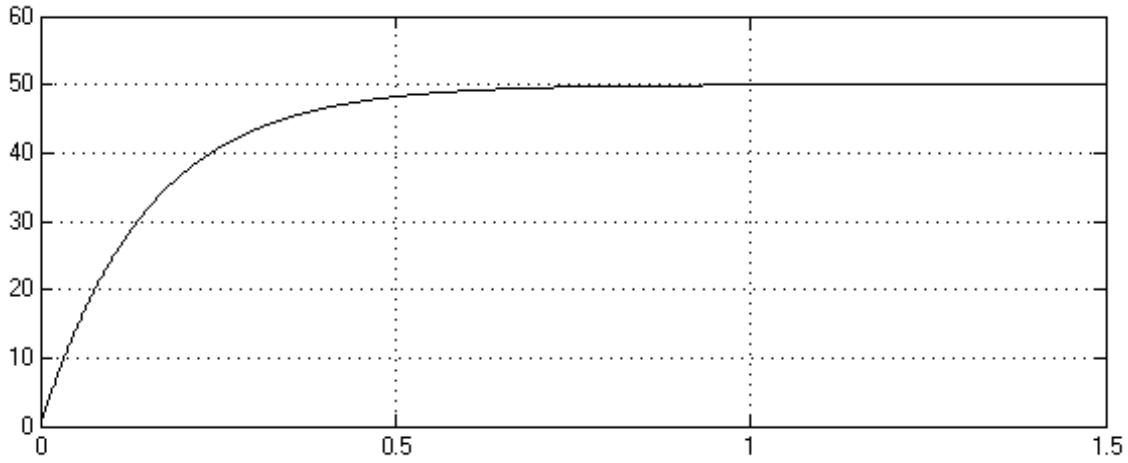



Рис. 3.4 - осцилограма зміни частоти вихідної напруги ПЧ, тобто на обмотках АД

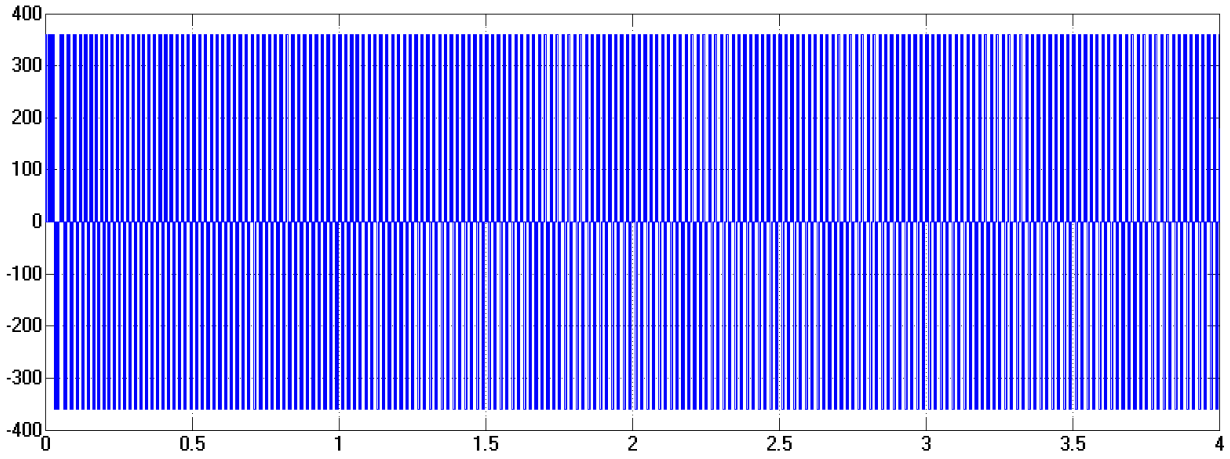



Рис. 3.5- осцилограма форми вихідної напруги ПЧ, тобто на обмотках статора АД

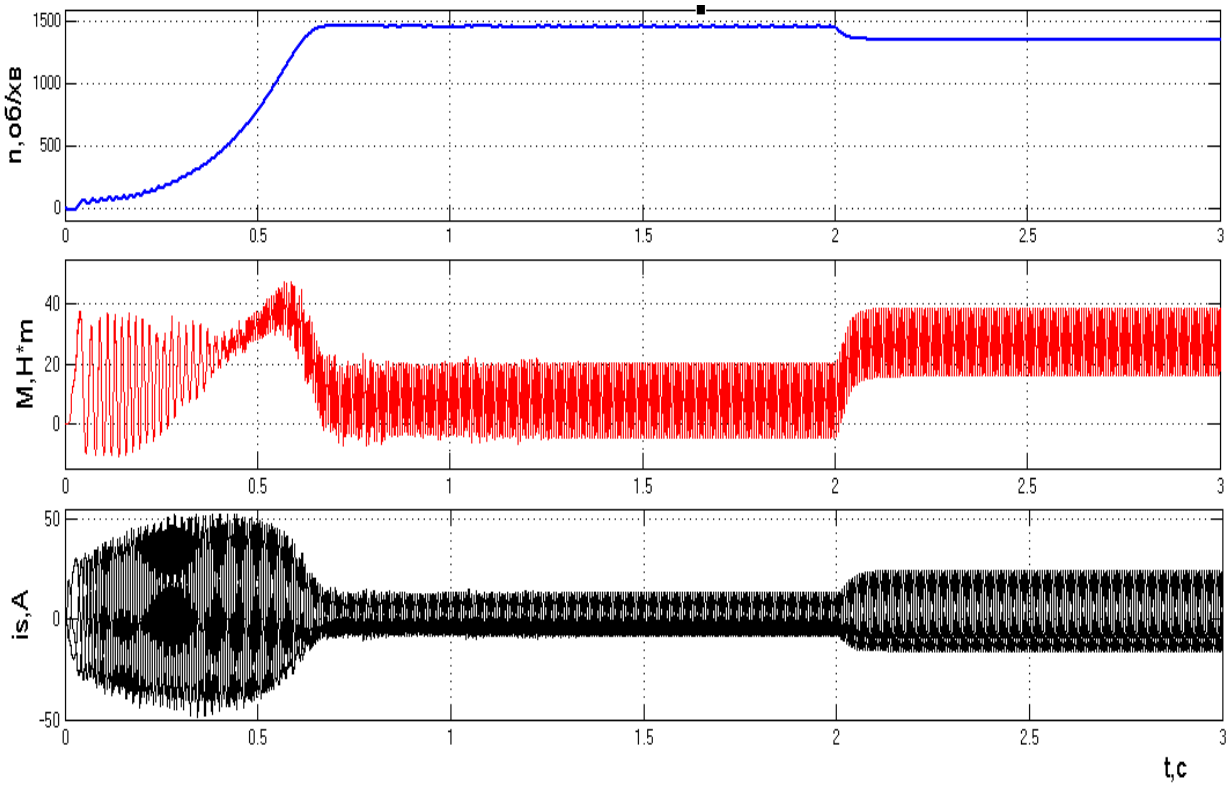



Рис. 3.6 - Динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті $f_1$=50 Гц для номінального режиму роботи двигуна

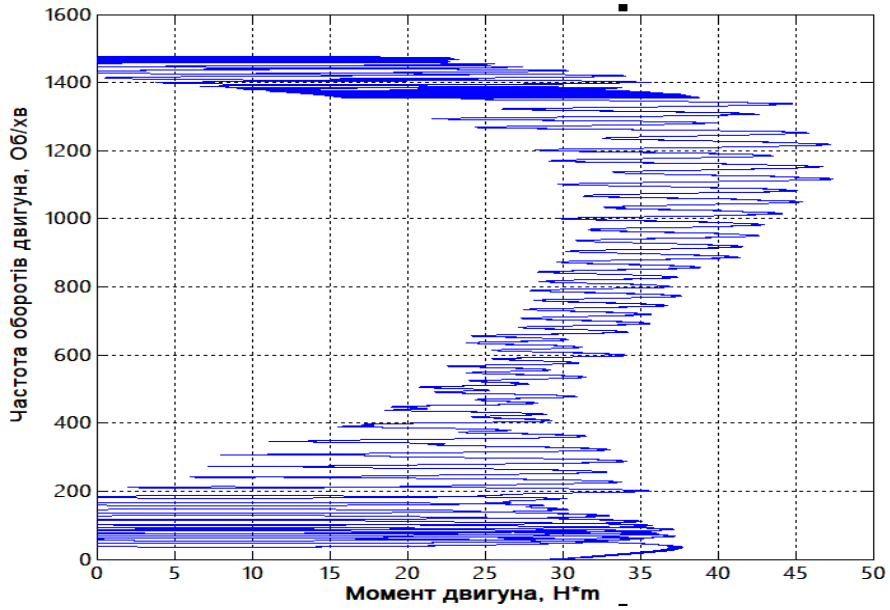



Рис. 3.7 - Динамічна механічна характеристика асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті $f_1$=50 Гц для номінального режиму роботи

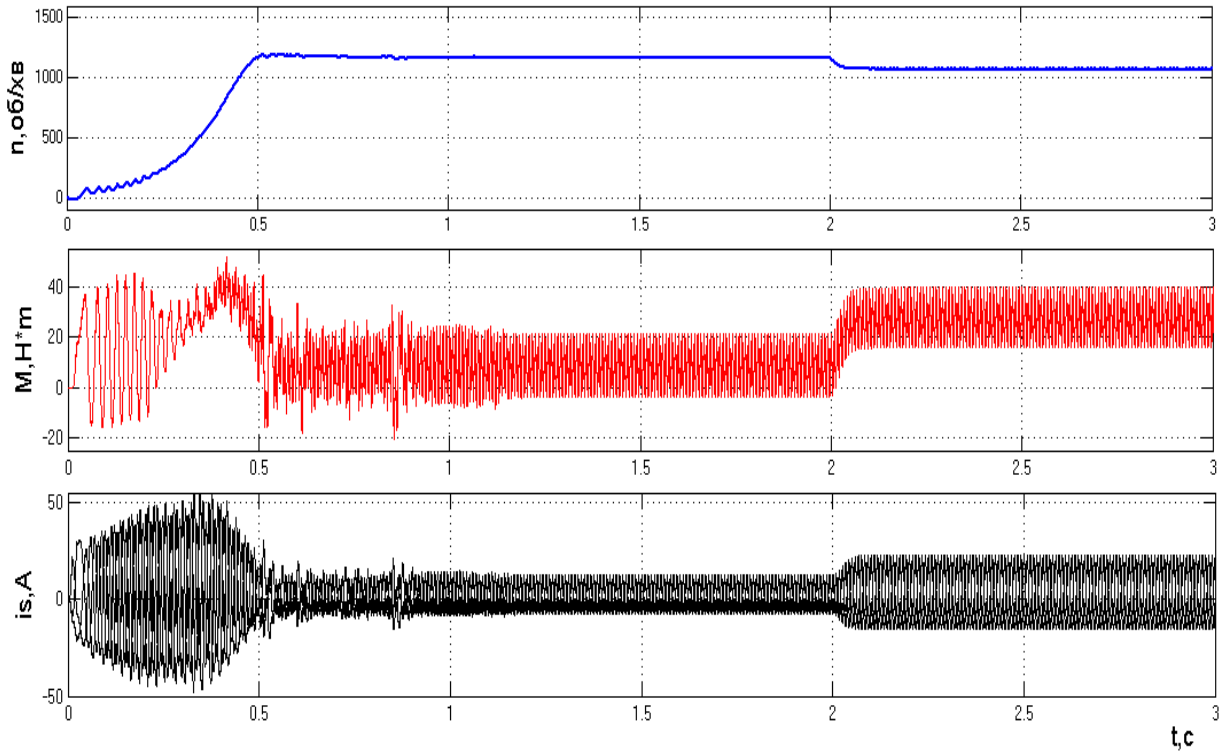



Рис. 3.8 - Динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті $f_1$=40 Гц для режиму роботи з швидкістю $n = 1200$ об/хв.

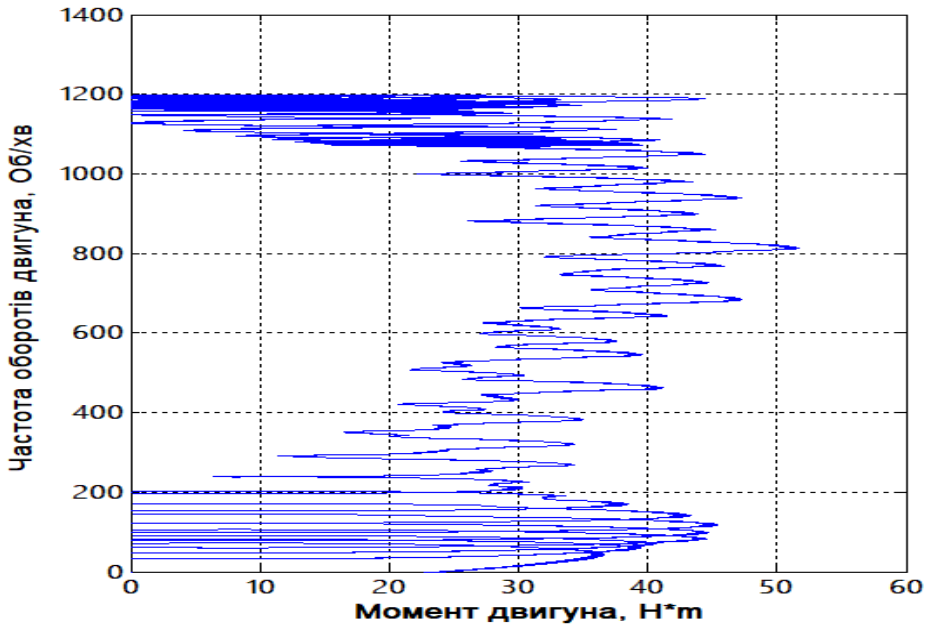



Рис. 3.9- Динамічна механічна характеристика асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті $f_1$=40 Гц для режиму роботи зі швидкістю $n = 1200$ об/хв.

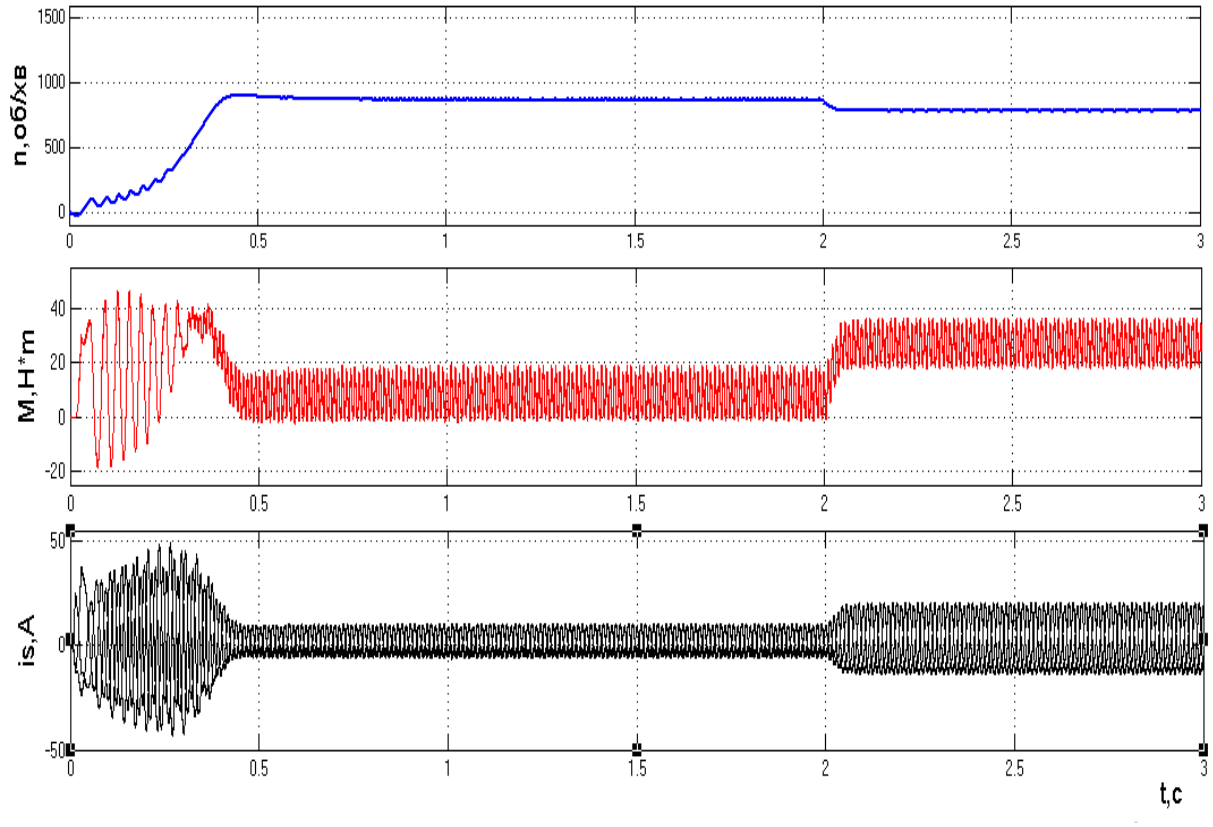



Рис. 3.10- Динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті $f_1$=30 Гц

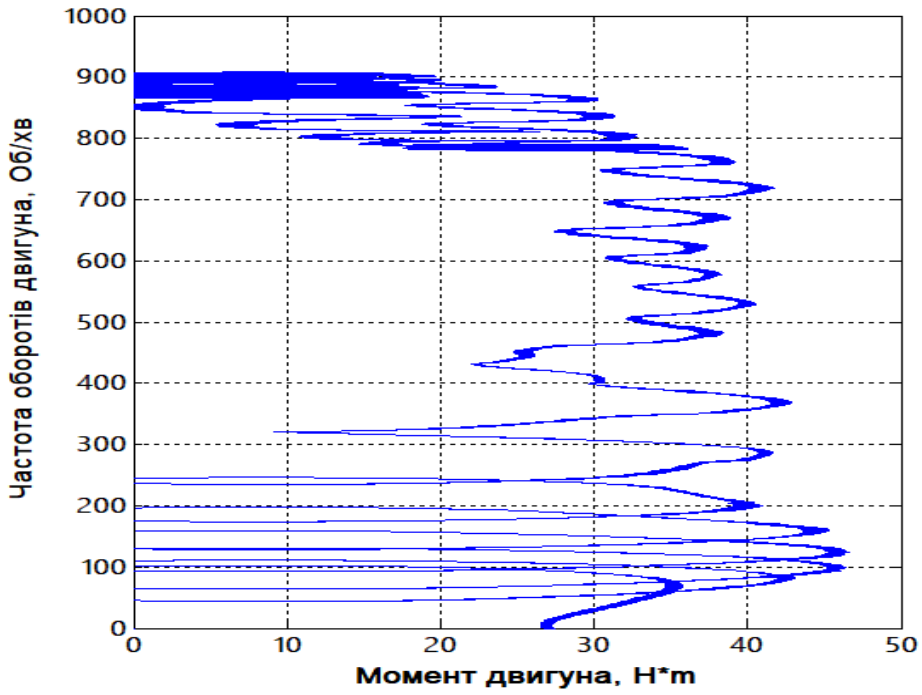



Рисунок 3.4.10- Динамічна механічна характеристика асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті $f_1$=30 Гц

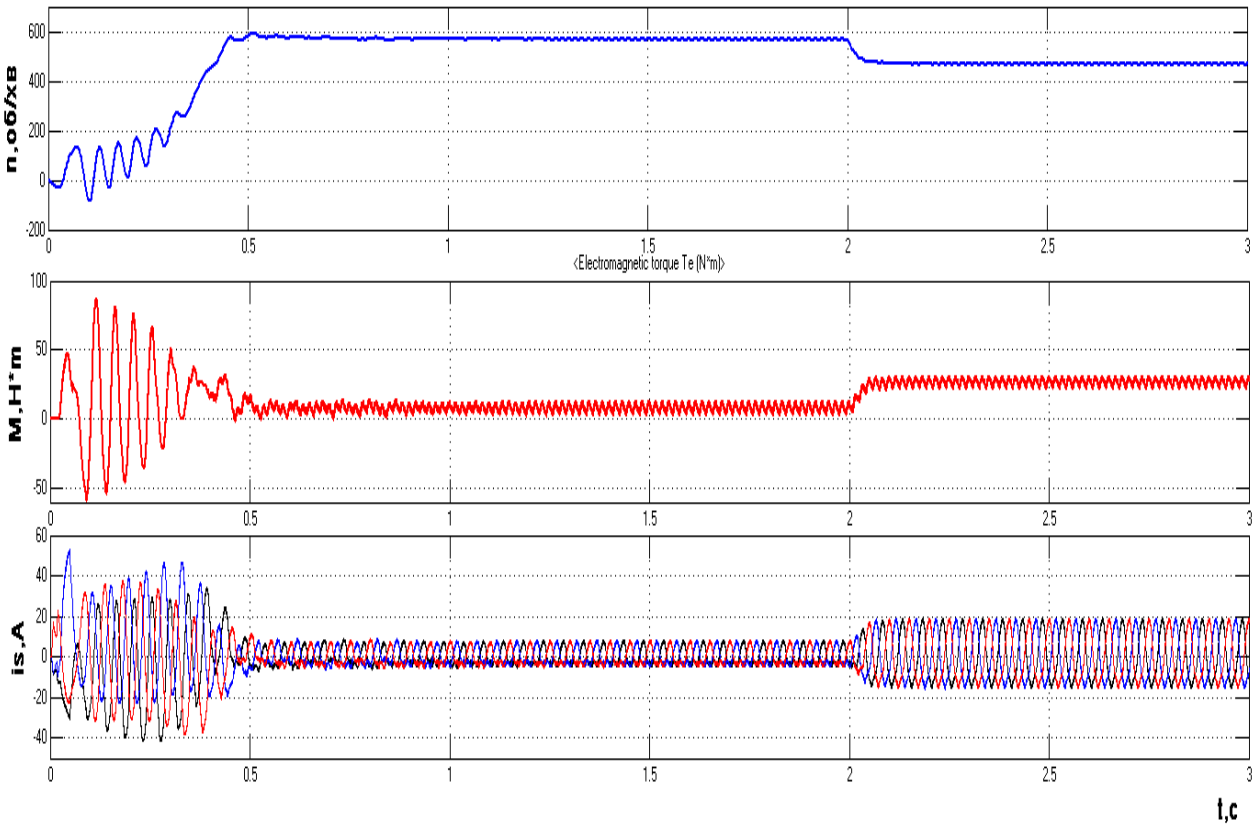



Рисунок 3.4.11- Динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті $f_1$=20 Гц

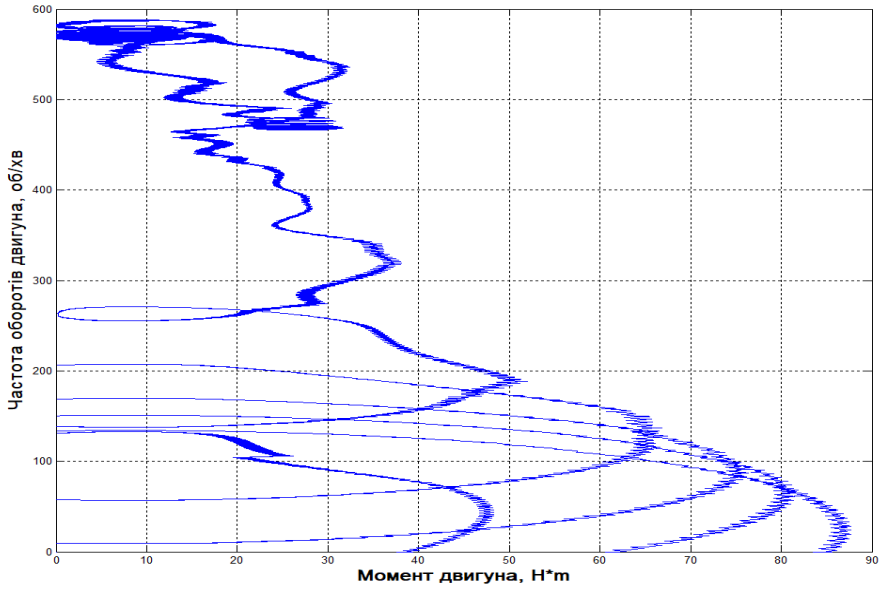



Рис. 3.11- Динамічна механічна характеристика асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті $f_1$=20 Гц

# 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

## 4.1 Розрахунок інвестиційних витрат на модернізацію і впровадження системи електроприводу

Предметом вдосконалення у даному дипломному проекті є електропривод шнека центрифуги ріпакової олії. Розроблена система керування дозволяє автоматично змінювати частоту обертання двигуна в залежності від умов. До модернізації частота обертання завжди була постійною і не змінювалася.

Враховуючи викладене вище, можна провести економічне обґрунтування пропонованих заходів по модернізації електроприводу.

Одноразові капітальні витрати на обладнання для створення САК будуть складатись з вартостей основного та додаткового обладнання. Перелік основного обладнання, яке треба закупити для створення системи, наведено в таблиці 4.1.

Відзначимо, що до модернізації застосовувався також двигун змінного струму. Установлений двигун повністю задовольняє вимогам, які пред'являються до САК, тому у купівлі нового двигуна необхідності немає.

У таблиці наведено виключно основне обладнання, яке необхідне для створення САК.

Таблиця 4.1 – Основне обладнання, яке необхідно закупити для модернізації електроприводу

| Найменування | Кількість, шт | Ціна, грн |
|---|---|---|
| Перетворювач частоти VLT2840 | 1 | 5400 |
| Резистори, конденсатори та інші складники | 1 | 550 |
| Всього | | 5950 |

Додаткові витрати:

$$З_{ДОД} = 0{,}1 \cdot 5950 = 595 \; грн .$$

Тоді загальні інвестиційні витрати:

$$З_К = З_{ОСН} + З_{ДОД}. \quad (4.1)$$

Підставивши чисельні значення, одержимо:

$$З_К = 5950 + 595 = 6545 \text{ грн}.$$

### 4.2 Розрахунок змін основних показників діяльності підприємства

Для створення модернізованого електроприводу необхідно виконати роботи по монтажу, наладці та пуску системи.

Дані роботи буде проводити один працівник шостого розряду протягом одного дня.

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{ЗПМ} = K_{НВ} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{t=1}^{m} C_{ti} \cdot (1 + H), \quad (4.2)$$

де $K_{НВ}$ – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату, $K_{НВ} = 1,3$;

$\lambda$ – коефіцієнт, який враховує премії, $\lambda = 1,25$;

$t$ – час виконання робіт, $t = 16$ год;

$H$ – норма нарахування на заробітну плату; Н = 0,362;

$m$ – кількість робітників, $m = 1$ чол.

Тоді заробітна плата з нарахуваннями дорівнює:

$$S_{ЗПМ} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 16 \cdot 29,74 \cdot (1 + 0,362) = 526,57 \text{ грн}.$$

Витрати на модернізацію визначимо як суму витрат на купівлю комплектуючих та витрат на заробітну платню з нарахуваннями робітників, які проводять модернізацію:

$$З_М = З_К + З_{ЗПМ}\,. \tag{4.3}$$

Тоді

$$З_М = 6545 + 526{,}57 = 7071{,}57\ грн\,.$$

Розрахунок річного фонду часу роботи системи визначимо формулою:

$$Т_Р = \frac{Т_Ф}{\dfrac{1}{t_{ЗМ}\,K_{ЗМ}} + D_Р}\,. \tag{4.4}$$

де $T_P$ – річний фонд робочого часу, $T_Ф = 251$ *день*;

$t_{ЗМ}$ – тривалість зміни в машино-годинах, $t_{ЗМ} = 8$ *машино-годин*;

$K_{ЗМ}$ – коефіцієнт змінності роботи устаткування, $K_{ЗМ} = 2$;

$D_P$ – простої в машино-днях у всіх видах технічного обслуговування і ремонту, який приходиться на одну машино-годину.

Останній визначимо за формулою:

$$D_P = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{Pi}\,a_{Pi}}{T_Ц}, \tag{4.5}$$

де $n$ – число різновидів ТО та ремонтів за міжремонтний період, приймемо рівним $n = 3$;

$d_{Pi}$ – тривалість перебування в і-му ремонті або ТО, приймаємо рівним 0,5 год;

$T_Ц$ – час міжремонтного циклу, приймаємо рівним $T_Ц = 8950$ год;

$a_{Pi}$ – кількість ремонтів або технічних обслуговувань за міжремонтний період, приймаємо рівним 12.

$$D_P = \frac{3 \cdot 0{,}5 \cdot 12}{8950} = 0{,}0021\ \frac{маш \cdot днів}{маш \cdot год}\,.$$

Річний фонд часу роботи установки до і після модернізації дорівнює:

$$T_P = \frac{251}{\frac{1}{8 \cdot 2} + 0{,}0021} = 3885{,}44 \text{ год}.$$

Річну експлуатаційну продуктивність можна розрахувати виходячи з виразу:

$$B = B_{еч} T_P K_{ПР}, \quad (4.6)$$

де $B_{еч}$ – часова експлуатаційна продуктивність, од.прод./год;

$K_{ПР}$ – коефіцієнт, що враховує простоювання не враховані в часовій експлуатаційній продуктивності, приймаємо рівним 0,9.

Використання розробленої САК веде до зменшення браку продукції на 5%, тому річна експлуатаційна продуктивність буде різною до і після модерізації.

Після модернізації:

$$B = 4176 \cdot 3885{,}44 \cdot 0{,}9 = 14{,}6 \cdot 10^6 \text{ од}.$$

До модернізації:

$$B = 4176 \cdot 3885{,}44 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}95 = 13{,}87 \cdot 10^6 \text{ од}.$$

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{ÇÏÌ} = \hat{E}_{ÍÂ} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{t=1}^{m} C_{ti} \cdot (1 + H), \quad (4.7)$$

де $K_{НВ}$ – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату, $K_{НВ} = 1{,}3$;

$\lambda$ – коефіцієнт, який враховує премії, $\lambda = 1{,}25$;

$t$ – час виконання робіт, приймаємо рівним річному фонду часу роботи установки;

$C_{ti}$ – годинна тарифна ставка для працівників і-розряду;

$H$ – норма нарахування на заробітню плату, $H = 0,362$;

$m$ – кількість робітників, $m = 1$ *чол.*

Витрати на заробітну до і після модернізації з нарахуванням визначимо таким чином:

$$S_{ЗПМ} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3885,44 \cdot 9 \cdot (1 + 0,362) = 77395,05 \text{ грн}.$$

Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт визначимо за формулою:

$$S_{\grave{O}\hat{I}} = S_{\grave{O}\hat{I}Ç} + S_{\grave{O}\hat{I}\grave{I}} \quad , \tag{4.8}$$

де $S_{ТОЗ}$ – витрати на заробітну плату ремонтників з нарахуваннями;

$S_{ТОМ}$ – витрати на матеріали та запасні частини.

До модернізації технічне обслуговування проводив один робітник четвертого розряду, а після модернізації система стала більш складною, тому її обслуговування повинен виконувати спеціаліст із розрядом не нижче п’ятого.

Витрати на заробітну плату ремонтним робітникам із нарахуваннями визначаються за формулою:

$$S_{\grave{O}\hat{I}Ç} = \frac{\grave{O}_{Ð}}{\grave{O}_{Ö}} \hat{E}_{\acute{I}\acute{A}} \lambda \tilde{N}_{Ð} \sum_{i=1}^{m} a_i \times {}_{з}(1 + \acute{I}\ ), \tag{4.9}$$

де $C_P$ – середня тарифна ставка ремонтного робітника четвертого розряду;

$a_i$ – кількість техобслуговувань і поточних ремонтів без капітального ремонту,

$Ч_i$ – трудоємкість і-го технічного обслуговування та поточного ремонту, $Ч_i = 1,57$.

Витрати на матеріали та запасні частини визначаються за формулою:

$$S_{ТОМ} = K_{1n} \frac{S_{ТОЗ}(1 - H)}{K_{НЗ}} K_{ЗР}, \tag{4.10}$$

де $K_{1n}$ – норма накладних витрат по всім видам витрат, крім заробітної плати;

$K_{1n} = 1,1$, $K_{ЗР}$ – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запасні частини, $K_{ЗР} = 1,25$.

Таким чином, витрати на заробітну плату ремонтних робітників дорівнюють:

– до модернізації:

$$S_{ТОЗ} = \frac{3885,44}{8950} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 11,15 \cdot 12 \cdot 1,57 \cdot (1 + 0,362) = 201,83 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТОЗ} = \frac{3885,44}{8950} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 12,80 \cdot 12 \cdot 1,57 \cdot (1 + 0,362) = 231,70 \text{ грн}.$$

Відповідно витрати на матеріали та запасні частини:

– до модернізації:

$$S_{ТОМ} = 1,1 \cdot \frac{201,83 \cdot (1 - 0,362)}{1,3} \cdot 1,25 = 108,95 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТОМ} = 1,1 \cdot \frac{231,70 \cdot (1 - 0,362)}{1,3} \cdot 1,25 = 125,08 \text{ грн};$$

Таким чином, витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт системи:

– до модернізації складають:

$$S_{ТО} = 201,83 + 108,95 = 310,78 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТО} = 231,70 + 125,08 = 356,78 \text{ грн}.$$

Величину витрат на електроенергію визначимо за формулою:

$$S_{ЕЛ} = K_{1n} W_{ЕЛ} Ц_{КЛ} T_P, \quad (4.11)$$

де $Ц_{ЕЛ}$ – ціна 1 кВт·год електроенергії для підприємств;

, $W_{ЕЛ}$ – витрата за годину енергії, кВт·год.

До модернізації електропривод споживав 1,1 кВт·год, після модернізації споживання електроенергії зменшилося на 20% і складає 0,88 кВт·год.

Відповідно, витрати на електроенергію становили:

– до модернізації:

$$S_{ЕЛ} = 5923{,}74 \, грн;$$

– після модернізації:

$$S_{ЕЛ} = 4738{,}99 \, грн.$$

Розрахунок суми річних витрат на експлуатацію зводимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Сума річних витрат на експлуатацію

| Найменування статті витрат | Величина витрат, грн | |
|---|---|---|
| | До модернізації | Після модернізації |
| Заробітна плата з нарахуваннями | 77395,05 | 77395,05 |
| ТО та поточний ремонт | 310,78 | 356,78 |
| Електроенергія | 5923,74 | 4738,99 |
| Всього | 83629,57 | 82490,82 |

Вартість машино-годин розрахуємо за формулою:

$$S_{i\times} = \frac{S}{\grave{O}_{Ð}}. \qquad (4.12)$$

До модернізації:

$$S_{MЧ} = \frac{83629,57}{3885,44} = 21,52\ грн/год,$$

після модернізації:

$$S_{MЧ} = \frac{82490,82}{3885,44} = 21,23\ грн/год.$$

Вартість технологічної операції для одиниці продукції визначається за формулою:

$$S_{1П} = \frac{S}{B}. \qquad (4.13)$$

До модернізації:

$$S^{/}_{1П} = \frac{83629,57}{13,87 \cdot 10^6} = 0,006\ грн/од.$$

після модернізації:

$$S_{1П} = \frac{82490,82}{14,6 \cdot 10^6} = 0,0056\ грн/од.$$

### 4.3 Розрахунок змін основних показників діяльності підприємства

Економічний ефект від проведення модернізації визначається за формулою:

$$E = (S^{/}_{1П} - S_{1П})B. \qquad (4.14)$$

Тоді

$$E = (0,006 - 0,0056) \cdot 14,6 \cdot 10^6 = 6845 \; грн \, .$$

Термін окупності витрат після модернізації визначимо за формулою:

$$T_M = \frac{З_M}{E} \, . \qquad (4.15)$$

Тоді

$$T_M = \frac{7071,57}{6845} = 1,31 \; років \approx 15,5 \; місяців \; .$$

Виходячи із проведених розрахунків, можна зробити такі висновки:

– витрати на модернізацію склали 7071,57 грн;

– витрати на заробітну плату робітників, які обслуговують установку, не змінилися;

– витрати на ТО і ПР після проведення модернізації збільшилися на 14,8%;

– витрати на електроенергію після проведення модернізації зменшилися на 20%;

– вартість машино-години роботи  після модернізації зменшилася на 1,34%;

– вартість технологічної операції для одиниці продукції після модернізації знижена на 6,6%;

– економічний ефект від проведення модернізації склав 5840 грн/рік;

– термін окупності витрат на модернізацію склав 14,5 місяців.

# 5 БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ МОНТАЖІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

## 5.1 Забезпечення безпеки при виконанні монтажно-налагоджувальних робіт

Для обслуговуючого персоналу небезпечними чинниками є рухомі частини машин і механізмів, механічних передач, а також струмоведучі частини системи електроживлення і кіл управління. Небезпечний і металевий корпус, якщо за відсутності його заземлення (занулення) трапиться пошкодження ізоляції і він опиниться під напругою.

Велику небезпеку представляє раптовий пуск агрегата в той час, коли на приводі знаходяться люди, що проводять які-небудь роботи.

Для пробних вмикань і вимикань електроприводу під час його налагоджування та регулювання допускається тимчасове вмикання допоміжних і силових кіл приводу, а також подавання повітря в привод та на вимикач. У цьому разі слід зняти плакати "Не вмикати! Працюють люди" та "Не відкривати! Працюють люди".

Дистанційно вмикати та вимикати електропривод під час його випробовування дозволяється оперативним та оперативно-виробничим працівникам, якщо це обумовлено нарядом в "Окремих вказівках".

Роботи по монтажу устаткування необхідно виконувати відповідно до проекту виконання робіт (далі по тексту – ПВР), розробленого, затвердженого і виданого до виконання робіт у встановленому порядку [9].

Перед випробуванням устаткування необхідно здійснити контроль виконання всіх необхідних врізань для первинних перетворювачів вимірювальних приладів і регуляторів відповідно до проекту автоматизації технологічних процесів.

При виконанні робіт у безпосередній близькості від діючого устаткування монтажна площадка повинна бути відділена перешкодами, що відповідають рівню

небезпеки або шкідливості технологічних факторів даного діючого виробництва з урахуванням вимог «Правил пожежної безпеки в Україні. Загальні вимоги» [9].

### 5.2 Забезпечення безпеки при експлуатації системи електроприводу

Щоб уникнути нещасних випадків при експлуатації електроприводів, необхідно дотримуватись ряду спеціальних вимог правил техніки безпеки:

1. При огляді, очищенні від пилу кожухів електродвигуна і апаратури управління без відключення і зупинки електроприводу слід переконатися, що корпуси і кожухи надійно приєднані до магістралі заземлення або нульового дроту.

2. Всі неізольовані струмоведучі частини і частини електроприводу, що обертаються, повинні мати огорожі, знімати які під час роботи не допускається.

3. Роботи по поточному ремонту і випробуванням ізоляції приводного електродвигуна і пускорегулюючих апаратів доручаються тільки електротехнічному персоналу, який в електроустановках до 1000

В повинен мати кваліфікаційну групу по ТБ не нижче III, вище 1000 В - групу IV. Роботи, що проводяться черговим персоналом на закріпленому за ним цеховому електрооболаднанні, проводяться в порядку поточної експлуатації (перелік робіт затверджується особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства, наприклад головним енергетиком або начальником електровідділу) з дотриманням наступних заходів безпеки:

а) після відключення електроприводу для проведення на ньому яких-небудь робіт необхідно на пусковому пристрої повісити заборонний переносний плакат з написом «Не включати - працюють люди!». При цьому повинен бути або видимий розрив кола, або між контактами закритого апарату, наприклад контактора, прокладений листовий ізоляційний матеріал, або від'єднані дроти живлення, що відходять в сторону електродвигуна;

б) якщо електродвигун силової установки (насоса, вентилятора, компресора і т. п.) працює при напрузі вище 1000В, наприклад 6 кВ, і отримує живлення шин розподільчого пристрою підстанції, то необхідно на цій підстанції відключити живлячий кабель вимикачем і роз'єднувачем (видимий розрив кола!), замкнути їх приводи і вивісити на приводах вимикача і роз'єднувача заборонні плакати. Про відключення двигуна в ремонт у журналі чергового робиться запис із вказанням прізвища особи, що дала вказівку про відключення електроприводу. Знімати попереджувальні плакати і включати електропривод в роботу можна тільки після закінчення роботи на ньому і оформлення закінчення записом в журналі;

в) на електродвигуні, що обертається, дозволяється шліфування контактних кілець скляною шкіркою при допомозі дерев'яної колодки. Інструменти, що застосовуються при цьому повинні бути з ізолюючими ручками;

г) допускаються роботи в колі пускового реостата у включеного асинхронного електродвигуна з контактними кільцями, але за умови, що ротор замкнутий накоротко при повністю виведеному опорі реостата. При цьому слід стояти на гумовому килимку або бути в діелектричних калошах і працювати інструментами з ізольованими ручками. Робота в пускових апаратах, встановлених в колі живлення обмоток статора, допускається тільки при знятій напрузі з струмоведучих частин;

д) якщо в ремонт виведений електродвигун насоса або вентилятора, то необхідно попередити обертання електроприводу з боку механізму (насос може почати працювати як турбіна, вентилятор - прийти в рух від натиску повітря), для чого слід закрити відповідні вентилі на трубопроводі або шибери на повітроводі вентиляційної установки.

4. Перед пуском слід подавати звуковий сигнал для попередження робочих щоб уникнути травмування їх раптовим рухом механізмів.

# ВИСНОВКИ

В результаті написання кваліфікаційної роботи виконана модернізація автоматизованого електроприводу центрифуги для очистки ріпакової олії.

Наведено загальну характеристику технологічного процесу центрифугування ріпакової олії, а також розглянуто характеристики обладнання, необхідні для виконання процесу.

На підставі вимог до електропривода центрифуги для очистки ріпакової олії проведено розрахунок потужності і вибір електродвигуна та визначені механічні і електромеханічних характеристики електроприводу при скалярному частотному управлінні.

Розроблено схему моделювання прямого пуску АД центрифуги, також схему моделі пуску асинхронного двигуна з перетворювачем частоти ПЧ-АД

Проведено моделювання роботи приводу у середовищі *Simulink MATLAB*.

Розрахована економічна ефективність модернізації електропривода. У результаті річний економічний ефект склав 6845 грн., а термін окупності капітальних вкладень – 15,5 місяців.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Лисов В.С. Автоматизація процесу рафінації олії. Кваліфікаційна робота бакалавра. Сумський державний університет, 2020. – 50 с.

2. Захарченко А.С., Соколов С.В. Система керування процесом рафінації масла/ Матеріали науково-технічної конференції ІМА. Автоматика, електромеханіка і системи управління. – Суми. – 2018. – с.172.

3. Ромашко І.С., Паска М.З., та ін. Технохімічний контроль виробництва/ Навчально-методичний посібник. – Львів. – 2016. – 98с.

4. Фіалковська Л.В., Дейдей М.М. Удосконалення апаратурно технологічної схеми нейтралізації олії./ Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія:Технічні науки.– Вінниця.– 2011.– №9. – с.187-189.

5. Оськин С.В. Автоматизований електропривод: учбовий посібник для студентів ВНЗ / С.В.Оськин -: Изд-во ООО «КРОН», 2013,- 489 с.

6. Шульга О.В. Методичні вказіки і завдання до виконання курсового проекту з дисципліни “Електропривід і автомтаизація роботів і маніпуляторів” для студентів спеціальності 7.092203 “Електромеханічні системи автоматизації і електропривод” всіх форм навчання. – Полтава: Полтавський державний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 1999. – 24 с.

7. Онушко В.В. Машини постійного струму: Посібник із модуля “Машини постійного струму” / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 111 с.

8. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид. / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

9. Правила безпечної роботи електроустановок. Харків, «Форт», 2003. – 250 с.

10. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.

11. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання. Джерело: https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/11538/3/ciganov-montazh-elektroobl-lekc-2022.pdf

12. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів СВО «Магістр» спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», галузі знань 14 – «Електрична інженерія» / Укладачі: П.І. Осадчук, В.Ф. Бабіч, А.А. Галіулін, Є.П. Штепа. – Одеса: ОНТУ, 2021. – 55 с.

13. Перетворювачі частоти SINAMICS V20, SINAMICS G120/G120P. Джерело: https://www.siemens-pro.ru/docs/sinamics_gv/GMC_nano.pdf

14. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. — Київ: Знання, 2009. — 400 с. — ISBN 978-966-346-644-6.