

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

**Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:**

«Модернізація електропривода ротора центрифуги технологічного процесу  
виробництва цукру»

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-216  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Даніель КОБЗИСТИЙ

(ім'я ПРИЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри КЕМСК

Олена НАНАКА

(ім'я ПРИЗВИЩЕ, підпис)

«20» травня 2025 р.

Рецензент:

(прізвище та ініціали)

«10» серпня 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри КЕМСК Микола МОЩКОРИЗ

«3» серпня 2025 р.



Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувачкафедри**

К.Т.Н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

“18” лютого 2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кобзистому Даніелю Віталійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру

Керівник роботи Нанака Олена Миколаївна, к.т.н., доц. каф.КЕМСК  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20”березня 2025року №97

2. Термін подання студентом роботи 03.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: час роботи центрифуги – 157 с.; час паузи центрифуги – 30 с.; фактична тривалість включення – 84%; коефіцієнт тертя – 0,03-0,09; максимальне навантаження ротора – 450 кг.; густина сталі – 7900 кг/м<sup>3</sup>

4. Зміст текстової частини: Вступ. Огляд технологічного процесу та обладнання. Розробка вимог до електроприводу, систем керування та автоматизації. Попередній розрахунок потужності електродвигуна. Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода. Вибір приводного електродвигуна. Побудова схем електричних функціональної та принципової системи електропривод. 6 Розрахунок і вибір елементів силового кола. Математична модель системи електропривода. Охорона праці. Висновки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Мета, задачі та об'єкт дослідження. Загальна характеристика досліджуваного об'єкта. Машино-апаратна схема виробництва цукру із цукрового буряка. Функціональна схеми системи керування ЕП центрифуги Тахограма робочого циклу електропривода ротора. Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода. Тахограма швидкостей, діаграма моменту статичного опору. Навантажувальна діаграма електропривода. Схема електрична функціональна. Схема електрична принципова. Розрахунок перехідних процесів системи електропривода. Висновки.



# 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта                 | Підпис, дата   |                   |
|--------------------|-----------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|                    |                                                           | завдання видав | виконання прийняв |
| Спеціальна частина | к. т. н., доц. каф. КЕМСК<br>Нанака О.М.                  | 18.02.2025<br> | 20.02.2025<br>    |
| Охорона праці      | Зав. каф. БЖДПБ,<br>д.пед.н., проф.<br>Кобилянський О. В. | 18.02.2025<br> | 20.05.2025<br>    |

7. Дата видачі завдання 18.02.2025

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                                                       | Строк виконання етапів роботи | Приміт |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------|
| 1     | Формування та затвердження теми бакалаврської дипломної роботи (БДР)      | 18.02.2025                    | вик.   |
| 2     | Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР | 06.05.2025                    | вик.   |
| 3     | Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР | 20.05.2025                    | вик.   |
| 4     | Виконання розділу «Охорона праці»                                         | 20.05.2025                    | вик.   |
| 5     | Попередній захист БДР                                                     | 03.06.2025                    | вик.   |
| 6     | Нормоконтроль БДР                                                         | 03.06.2025                    | вик.   |
| 7     | Рецензування БДР                                                          | 10.06.2025                    | вик.   |
| 8     | Захист БДР                                                                | 19.06.2025                    | вик.   |

Студент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська дипломна робота складається з 120 сторінки формату А4, на яких є 28 рисунків, 18 таблиць, список використаних джерел містить 23 найменування.

Виконана модернізація електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру. Досліджено технологічний механізм, визначено його характеристики та режими функціонування. В результаті розрахунку вибрано електродвигун. Спроектовано систему керування електропривода системи ЧП-АД. На основі параметрів керованого двигуна вибрано тип та номінальні параметри елементів силової схеми та схеми керування, розраховано та побудовано тахограми робочого механізму, діаграми навантажень двигуна, створено математичну модель системи та досліджено її роботу в різних режимах за допомогою ППП Matlab Simulink. Побудовано відповідні графіки, які відображають роботу системи в перехідних режимах.

Ключові слова: ротор, центрифуга частотний електропривод, система керування, електродвигун, математична модель.



## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis consists of 120 pages of A4 format, on which there are 28 figures, 18 tables, the list of used sources contains 23 names.

The electric drive of the centrifuge rotor of the sugar production process was modernized. The technological mechanism was investigated, its characteristics and operating modes were determined. As a result of the calculation, an electric motor was selected. The control system of the electric drive of the CHP-AD system was designed. Based on the parameters of the controlled motor, the type and nominal parameters of the elements of the power circuit and the control circuit were selected, tachograms of the working mechanism and engine load diagrams were calculated and constructed, a mathematical model of the system was created and its operation in different modes was investigated using the Matlab Simulink PLC. The corresponding graphs were constructed, which reflect the operation of the system in transient modes.

Keywords: rotor, centrifuge, frequency electric drive, control system, electric motor, mathematical model.



## ЗМІСТ

|                                                                                                        |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| ВСТУП.....                                                                                             | 5        |
| 1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ.....                                                      | 9        |
| 1.1 Опис технологічного процесу автоматизації та систем<br>електроприводів цукрового виробництва ..... | 9        |
| 1.2. Принципи побудови електроприводів центрифуг .....                                                 | 18       |
| 1.3 Завдання автоматизації технологічного процесу центрифугування<br>та принцип дії центрифуги.....    | 21       |
| 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ЕЛЕКТРОПРИВОДА<br>РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ.....                               | 25       |
| 2.1 Вимоги до вибору потужності електродвигуна .....                                                   | 25       |
| 2.2 Визначення режиму роботи<br>двигуна.....                                                           | 26<br>30 |
| 2.3 Розрахунок та побудова навантажувальної діаграми механізму .....                                   | 36       |
| 2.4 Розрахунок потужності електродвигуна.....                                                          | 28       |
| 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ<br>СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....                              | 40<br>40 |
| 3.1 Технічне обґрунтування вибору системи електропривода.....                                          | 42       |
| 3.2 Економічне обґрунтування вибору системи електроприводу.....                                        | 47       |
| 4 МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ .....                                                  |          |
| 4.1 Вибір приводного двигуна та побудова статичних<br>характеристик.....                               | 47<br>53 |
| 4.2 Типова система електропривода ротора центрифуги.....                                               | 51       |
| 4.3 Розробка функціональної схеми САЕП та розрахунок її параметрів...                                  | 55       |
| 4.4 Вибір засобів автоматизації технологічного механізму .....                                         | 63       |
| 4.5 Розробка схеми електричної принципової з використанням засобів<br>автоматизації.....               | 75       |
| 5 РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ .....                                               | 79       |
| 6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....                                                                                   | 82       |



|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| ВИСНОВКИ.....                                            | 97  |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                          | 98  |
| Додаток А Технічне завдання.....                         | 101 |
| Додаток Б Ілюстративні матеріали.....                    | 106 |
| Додаток В Протокол перевірки кваліфікаційної роботи..... | 120 |



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Автоматизація виробничих процесів є ключовим чинником прискорення науково-технічного розвитку агропромислового сектору України.

Із стрімким удосконаленням технічних засобів, зокрема мікропроцесорної техніки та персональних комп'ютерів, з'явилася можливість застосовувати найсучасніші методи керування у складних автоматизованих системах.

Сучасні автоматизовані системи, що базуються на мікропроцесорах і електронно-обчислювальній техніці, вирізняються високою функціональністю та передовими технічними характеристиками. Вони забезпечують зростання надійності й довговічності роботи, підвищення швидкодії, оперативності управління, розширення кількості вхідних і вихідних сигналів, а також покращення умов праці оператора.

Надійне функціонування автоматизованих засобів можливе лише за умови правильного монтажу, налаштування та експлуатації, тому до роботи з такими системами повинні допускатися лише фахівці з відповідною кваліфікацією.

Виробництво цукру є складним багаторівневим технологічним процесом, що включає основні стадії: підготовку сировини, дифузію, очищення соку, його випарювання, кристалізацію, центрифугування та сушіння. На кожному з цих етапів необхідно точно дотримуватись заданих технологічних режимів, тому автоматизація має вирішальне значення для забезпечення високої якості продукції, зменшення витрат і підвищення енергоефективності.

Цукрове виробництво характеризується високим ступенем взаємозв'язку фізико-хімічних процесів, які відбуваються одночасно й взаємно впливають одне на одного. У зв'язку з цим автоматизація має охоплювати не окремі



елементи, а повноцінні технологічні ділянки, враховуючи взаємозалежність між окремими стадіями.

З роками цукрова промисловість поступово модернізується, розширює свої виробничі потужності та впроваджує сучасні технічні рішення. Одним із ключових напрямів цього розвитку є впровадження новітнього обладнання, що створює передумови для автоматизації як всього виробничого процесу, так і окремих операцій, зокрема сушіння цукру.

Системи автоматизації забезпечують:

- контроль температури на етапах дифузії та випарювання;
- моніторинг рівнів та тиску в баках і трубопроводах;
- вимірювання концентрації цукру в розчинах (брікс);
- регулювання подачі хімічних реагентів для очищення соку;
- керування вакуумом у кристалізаторах.

Автоматизація процесів у цукровому виробництві є невід'ємною частиною сучасного підприємства. Вона сприяє підвищенню якості готової продукції, зменшенню виробничих витрат, раціональному використанню ресурсів і забезпечує стабільність технологічного процесу. Її впровадження є визначальним чинником для підтримання конкурентних позицій підприємства на ринку.

Сучасні промислові центрифуги являють собою складні технічні пристрої, що містять велику кількість високоточних механізмів і працюють на високих обертах. Керування їх роботою здійснюється за допомогою складних систем – електрогідравлічних, електропневматичних або електричних. Безперебійна експлуатація центрифуг можлива лише за умови суворого дотримання технологічних вимог, глибокого знання їхньої конструкції та правильної організації процесів налаштування, запуску, технічного обслуговування і ремонту.

Враховуючи вищевказані фактори, можна зробити висновок, що одним із головних напрямів розвитку сучасних центрифуг є модернізація систем

керування та вдосконалення силової частини електропривода шляхом використання новітніх силових модулів.

**Метою дослідження** в даній роботі є підвищення енергоефективності та працездатності електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру.

У відповідності із поставленою метою необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати режими роботи та привести основні характеристики центрифуги технологічного процесу виробництва цукру;
- виконати розрахунок та вибір потужності електродвигуна центрифуги технологічного процесу виробництва цукру;
- виконати техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода;
- здійснити розрахунок, вибір та побудову структурної, функціональної та електричної принципової схем керування електроприводу;
- для вибраної системи електроприводу виконати розрахунок механічних характеристик електродвигуна, моделювання перехідних процесів та розрахунок динаміки електропривода;
- сформулювати комплекс заходів для забезпечення належних умов праці обслуговуючого персоналу та безпечної експлуатації центрифуги.

**Об'єкт дослідження** є процеси перетворення енергії, які протікають у електротехнічній системі електропривода ротора фільтруючої підвісної центрифуги типу ФПН-100.

**Предметом дослідження** є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити ефективність електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру.

**Методи дослідження** засновані на використанні методів теорії електричних машин, теорії управління, методів синтезу нелінійних систем



управління, теорії та методів математичного моделювання, методів системних досліджень в енергетиці.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати бакалаврської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.





Процес виробництва цукру-піску з цукрових буряків включає такі основні етапи: подача буряків на завод за допомогою гідравлічної системи та видалення сторонніх домішок; миття і зважування буряків; їх подрібнення; отримання дифузійного соку; очищення цього соку; згущення очищеного соку до стану сиропу; варіння сиропу та відтоків до утфелів; а також центрифугування утфелю для відділення кристалів цукру.

Сучасні комплексні програми автоматизації, розроблені для харчової промисловості, зокрема цукрової галузі, спрямовані на досягнення ряду техніко-економічних показників, таких як:

- збільшення річного обсягу випуску продукції;
- зниження собівартості продукції внаслідок скорочення витрати сировини, матеріалів, енергетичних та трудових витрат, збільшення виходу продукції.

З огляду на те, що більшість цукрових заводів нині перебуває під управлінням або у складі великих торгово-промислових об'єднань, зростає потреба у впровадженні автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП). Такі системи повинні забезпечувати централізоване керування та контроль усіх етапів виробництва цукру на основі сучасних обчислювальних технологій та програмно-апаратних засобів [1-2].

Основні процеси по виробництву цукру:

- прийом цукрових буряків;
- розвантаження та миття цукрових буряків;
- дифузія;
- сатурація;
- випарювання;
- кристалізація цукру;
- центрифугування;
- прийом нової партії цукрових буряків.

Виробничий процес розпочинається з комплексу обладнання, призначеного для підготовки буряків до переробки. До його складу входять установка для підйому буряків, гідротранспортер, піскоуловлювач, уловлювач бадилля, каменеуловлювач, водороздільник і бурякомийна машина.

Основний технологічний комплекс включає конвеєр із магнітним сепаратором, бурякорізку, ваги, дифузійну установку, шнековий прес і сушарку для жому.

Наступна частина виробничої лінії представлена обладнанням для очищення соку: фільтрами з підігрівальними пристроями, апаратами для попередньої та основної дефекації, сатуратором, відстійниками, сульфітатором і додатковими фільтрами.

Найбільш енергоємним етапом процесу є робота випарної установки з концентратором, вакуум-апаратів, мішалок та центрифуг.

Завершальний етап виробничої лінії включає обладнання, призначене для остаточної обробки цукру, зокрема: віброконвеєр, сушильно-охолоджувальну установку та вібросито.

Машинно-апаратурна схема процесу виробництва цукру-піску з цукрових буряків зображена на рисунку 1.1.

Опис роботи лінії:

Цукровий буряк надходить на завод із бурякового або кагатного поля. По гідравлічному транспортеру він подається до буряконасосів, які піднімають його на висоту до 20 метрів. Далі буряк переміщується самопливом, проходячи всі необхідні стадії технологічного процесу.

Вздовж гідравлічного конвеєра (1) послідовно розміщені наступні пристрої: уловлювач бадилля (2), каменеуловлювач (4) і водороздільники (5). Це обладнання виконує функцію видалення легких (солома, бадилля) і важких (пісок, каміння) домішок, а також забезпечує відокремлення води, що використовується для транспортування і миття буряків.

Для підвищення ефективності затримування бадилля і соломи в спеціальну заглибину (3) подається повітря. Після проходження водороздільників буряки надходять у бурякомийну машину для остаточного очищення.

Бурякомийна машина виконує функцію остаточного очищення буряків від забруднень. Залежно від способу збирання урожаю рівень забруднення суттєво відрізняється: при ручному збиранні вміст землі становить близько 3–5%, а при механізованому збиранні комбайнами — до 8–10%.

Об'єм води, що використовується для миття буряків, визначається ступенем їх забруднення, конструктивними особливостями мийної машини і зазвичай становить 60–100% від маси оброблюваних буряків.

У стічні води з гідравлічного транспортеру та мийної машини потрапляють дрібні залишки буряків — відламані хвостики, невеликі фрагменти коренеплодів і дрібні буряки, що складає приблизно 1–3% від загальної маси сировини. Щоб запобігти втратам, ці транспортерно-мийні води спочатку подаються в сепаратор, де відокремлюються залишки буряків. Після цього вони передаються на стрічковий конвеєр (14) для подальшої обробки.

Відмитий цукровий буряк зрошується чистою водою зі спеціальних пристроїв 7, піднімається елеватором 8 і надходить на конвеєр 9, де електромагніт 10 відокремлює металеві предмети, які випадково потрапили в буряк. Потім буряк зважують на вагах 11 із бункера 12 направляють в подрібнювальні машини-бурякорізки 13. Стружка повинна бути рівною, пружною і без мезги, пластинчастого або ромбовидного перерізу, товщиною 0,5 ... 1,0 мм.



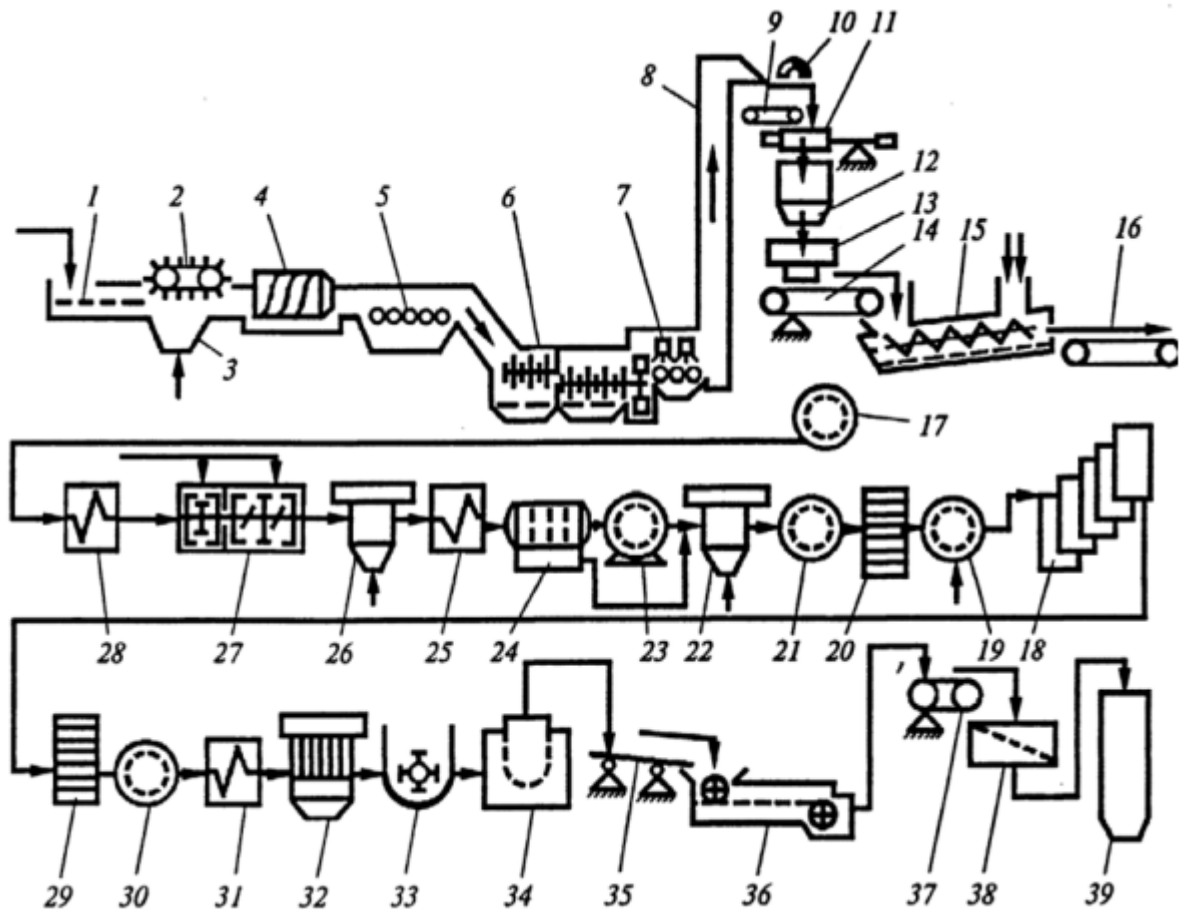


Рисунок 1.2 – Машино-апаратурна схема виробництва цукру із цукрового буряка

Бурякомийна машина виконує функцію остаточного очищення буряків від забруднень. Залежно від способу збирання урожаю рівень забруднення суттєво відрізняється: при ручному збиранні вміст землі становить близько 3–5%, а при механізованому збиранні комбайнами — до 8–10%.

Об'єм води, що використовується для миття буряків, визначається ступенем їх забруднення, конструктивними особливостями мийної машини і зазвичай становить 60–100% від маси оброблюваних буряків.

У стічні води з гідравлічного транспортеру та мийної машини потрапляють дрібні залишки буряків — відламані хвостики, невеликі фрагменти коренеплодів і дрібні буряки, що складає приблизно 1–3% від загальної маси сировини. Щоб запобігти втратам, ці транспортерно-мийні води спочатку подаються в сепаратор, де відокремлюються залишки буряків.

Після цього вони передаються на стрічковий конвеєр (14) для подальшої обробки.

Дифузійний сік спочатку проходить через фільтр (поз. 17), після чого підігрівається в тепловому пристрої (поз. 28) і надходить у апарати попередньої та основної дефекації (поз. 27). У цих апаратах відбувається очищення соку шляхом коагуляції білкових сполук і барвників, а також осадження деяких аніонів, які утворюють нерозчинні солі з іонами кальцію, що надходять із вапняковим молоком (розчином вапна). Введення вапняного молока в сік здійснюється через спеціальні дозувальні пристрої.

Очищений на стадії дефекації сік потрапляє в котел першої сатурації (поз. 26), де проходить додаткову очистку. На цьому етапі відбувається адсорбція розчинених нецукристих домішок, зокрема фарбувальних речовин, на дрібних частинках осаду кальцій карбонату ( $\text{CaCO}_3$ ), який утворюється при пропущенні вуглекислого газу через сік.

Далі сік подається через підігрівач (поз. 25) до гравітаційного відстійника (поз. 24), де він розділяється на дві частини: освітлений сік, що становить приблизно 80% об'єму, та згущену суспензію, яка прямує на вакуум-фільтри (поз. 23).

Після фільтрації освітлений сік направляється в апарат другої сатурації (поз. 22), де остаточно видаляється залишкове вапно у вигляді осаду карбонату кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ).

Сік другої сатурації надходить на фільтри (поз. 21). У процесі виробництва цукру сік проходить кілька етапів фільтрації. Вибір схеми фільтрування та типу обладнання залежить від конкретних цілей очищення.

Після фільтрації сік з фільтрів (поз. 21) подається в котел сульфитації (поз. 20). Основна мета сульфитації — знизити кольоровість соку за допомогою обробки діоксидом сірки, який утворюється при спалюванні сірки.

Потім сульфитований сік направляють на фільтр станції (поз. 19), після чого він транспортується через підігрівачі до першого корпусу випарної

станції (поз. 18). Випарні установки служать для поетапного згущення очищеного соку у сатураторі, збільшуючи концентрацію сухих речовин у продукті від 14–16% у першому корпусі до 65–70% у кінцевому згущеному сиропі.

Світла пара подається лише до першого корпусу, а інші корпуси обігріваються за рахунок вторинної пари, що утворюється у попередніх корпусах. Загальна площа поверхні нагрівання випарної станції на цукровому заводі з продуктивністю 5000 тонн буряків на добу становить близько 10 000 м<sup>2</sup>.

Отриманий сироп подається до сульфітатора (поз. 29), а потім переходить на фільтраційну станцію (поз. 30). Відфільтрований сироп підігрівається в підігрівачі (поз. 31) і надходить у вакуум-апарати першого продукту (поз. 32).

У вакуум-апаратах сироп уварюється до стану перенасичення, внаслідок чого цукор починає кристалізуватися. Продукт, який утворюється після цього процесу, називають утфелем. Він містить приблизно 7,5% вологи і близько 55% кристалізованого цукру.

Щоб отримати білий цукор із центрифуги, кристали промивають невеликою кількістю гарячої води — цей процес називається відбілюванням. Під час відбілювання частина цукру розчиняється, через що з центрифуги виходить відтік вищої чистоти — другий відтік. Перший і другий відтоки направляють у вакуум-апарат другої (останньої) кристалізації, де утворюється утфель другої кристалізації, який містить близько 50% кристалізованого цукру.

Далі утфель поступово охолоджують до 40 °С, одночасно перемішуючи в утфелемішалках — кристалізаторах. Це сприяє додатковому викристалізовуванню цукру. Нарешті, утфель другої кристалізації подають у центрифуги, де з кристалів відокремлюється меляса — відходи цукрового



виробництва, оскільки подальше отримання цукру з неї шляхом згущення та кристалізації економічно недоцільне.

Жовтий цукор другої кристалізації рафінують за допомогою першого відтоку, після чого отриманий утфель направляють у розподільну мішалку, а потім — у центрифуги. Розчинений цукор повертається назад у виробничу лінію для подальшої обробки.

Білий цукор, який виходить із центрифуг (поз. 34), має температуру близько 70 °С та вологість 0,5% при відбілюванні парою або 1,5% — при відбілюванні водою. Далі його подають на вібруючий конвеєр (поз. 35), звідки він транспортується до сушильно-охолоджувальної установки (поз. 36). Після сушіння цукор-пісок потрапляє на ваговий стрічковий конвеєр (поз. 37) і далі на вібросито (поз. 38), де відокремлюються грудочки цукру. Грудочки розчиняються і повертаються назад у виробничий процес.

Готовий товарний цукор-пісок зберігається у силосних баштах (поз. 39), призначених для тривалого зберігання [1].

Цукрові буряки доставляють гідравлічним транспортером до мийного відділення заводу. Перебуваючи у водяному потоці, коріння частково очищується від землі, а грубі домішки видаляються за допомогою спеціальних пристроїв — каменеуловлювачів, пісколовок та соломоловок. Остаточне миття і очищення буряків від землі та домішок відбувається у мийній машині. Після миття буряк піднімають буряковим елеватором на висоту близько 15 м, звідки він далі рухається самопливом для проведення наступних операцій. Зважений на вагах буряк подається у бурякорізки, де подрібнюється на стружку, з якої методом дифузії добувають сік.

Отриманий дифузійний сік швидко темніє та містить різні нецукрові домішки. Для його очищення сік піддають обробці вапняним молоком (дефекація), насичують вуглекислим газом (сатурація), сірчистим газом (сульфітація) і фільтрують.

Після очищення сік набуває світло-жовтого кольору і містить близько 15–16% сухих речовин, з яких 14–15% складає сахароза. Далі сік згущують до концентрації сухих речовин близько 65% на випарних апаратах у вигляді сиропу. Сироп повторно сульфітують, фільтрують і уварюють у вакуум-апараті під розрідженням до концентрації сухих речовин 92,5–93,0%.

Під час уварювання близько 55–60% цукру кристалізується, утворюючи утфель першої кристалізації — суміш кристалів сахарози та маткового розчину, який містить розчинений цукор і цукрові сиропи. Кристали цукру відділяють від маточного розчину (зеленого відпливу) на центрифугах, промивають гарячою водою, сушать у сушарках до вологості 0,05–0,14% та фасують у пакети або мішки.

Зелений відтік містить значну кількість сахарози — близько 76–78% від маси сухих речовин, тому його повторно уварюють у вакуум-апараті до концентрації сухих речовин 95%, отримуючи утфель другої кристалізації (утфель II). Для збільшення виходу кристалів утфель II охолоджують у кристалізаторах з 80 до 40 °C.

Після центрифугування утфелю II виділяють кристали цукру нижчої якості, відомі як жовтий цукор, та виробничий відхід — мелясу. Жовтий цукор розчиняють (клерують) у соку другої сатурації і додають у сироп, що надходить на сульфитацію та варіння утфелю першої кристалізації.

Таким чином, в результаті процесів уварювання і кристалізації сиропу цукрових буряків утворюється продукт — утфель. Поділ твердої та рідкої фаз утфелю відбувається за допомогою центрифугування. Під час відпливу з центрифуги значна частина міжкристальної рідини виносить із собою дрібні кристали.

У барабані центрифуги залишається лише крупнокристалічна сахароза, на поверхні якої залишається невелика кількість міжкристалевого розчину, що утворює плівку. Саме через це кристали мають жовтуватий відтінок і не досягають високої чистоти.

Для підвищення чистоти кристалів цукру з поверхні їх змивають плівку шляхом подавання у центрифугу невеликої кількості води. Цю операцію називають побілкою. Після побілки з центрифуги відводиться другий відтік, чистота якого значно перевищує чистоту першого відтоку. Саме тому в промисловості ці відтоки мають різні назви: перший — зелена патока, другий — біла патока.

Цукор, який залишається в центрифугі після побілки, вивантажують і направляють на сушіння нагрітим повітрям. Сушіння проводять до вмісту вологи не більше 0,14% для подальшої упаковки в мішки, або до 0,02–0,03% при зберіганні в силосах. Висушений цукор охолоджують, піддають магнітному очищенню та просіюванню для видалення грудок і поділу на фракції.

Кристалізація цукру є фінальним етапом у процесі його виробництва. Саме на цьому етапі із складної багатокомпонентної суміші — сиропу — виділяють чисту сахарозу. У сокоочисному відділенні з дифузійного соку видаляється близько третини нецукрів, тоді як залишкові цукрові речовини разом із сахарозою переходять у продуктовий цех, де більшість сахарози кристалізується у вигляді цукрового піску.

## **1.2. Принципи побудови електроприводів центрифуг**

Центрифугування утфелів є однією з ключових операцій у виробництві цукру-піску, оскільки істотно впливає на вихід продукції та її якість. Саме тому ця операція присутня у всіх технологічних схемах цукрового виробництва. Ефективність центрифугування залежить як від якості сировини, так і від технології виготовлення та поділу утфелю. Крім того, у процесі центрифугування відбувається часткове очищення напівфабрикату завдяки промиванню утфелю. Після центрифугування цукор проходить остаточне сушіння і подрібнення.

Існують два типи центрифугування: відстійне і фільтраційне, проте у цукровій промисловості застосовують виключно фільтраційне. Поділ утфелю відбувається під дією відцентрової сили, яка виникає в перфорованому роторі центрифуги, що обертається зі швидкістю 50–60 м/с. Для кращого відділення міжкристальної рідини та утримання кристалів всередині ротора встановлюють підкладкові та фільтрувальні сита.

Робочим органом центрифуги є ротор (барабан), закріплений на обертовому валу. Ротор має кільцеву кришку, циліндричну або конічну бічну стінку, плоске або опукле днище. За розташуванням валу центрифуги бувають вертикальні і горизонтальні.

Бічні стінки роторів фільтраційних центрифуг перфоровані і можуть бути покриті фільтрувальною тканиною або сіткою. Під впливом відцентрової сили тверді частинки осідають на стінках ротора, а рідина проходить крізь шар осаду, фільтрувальну перегородку і отвори в стінках.

Робочий цикл фільтруючих центрифуг включає операції завантаження суспензії, фільтрування, промивання, осушення та вивантаження осаду. Ефективність центрифуг оцінюється за величиною фактора розподілу, який характеризує перевищення максимального відцентрового прискорення твердих частинок у центрифугі над прискоренням вільного падіння, тобто відцентрове фільтрування порівнюють із фільтруванням під гідростатичним тиском. За величиною фактора розподілу промислові центрифуги поділяють на нормальні з фактором менше 3500 та швидкісні або надцентрифуги з фактором понад 3500. Для порівняння центрифуг за роздільною здатністю іноді використовують індекс продуктивності, який є добутком фактора розподілу на площу робочої поверхні ротора. Класифікація центрифуг, що застосовуються на цукробурякових і рафінових заводах, представлена на відповідному рисунку.



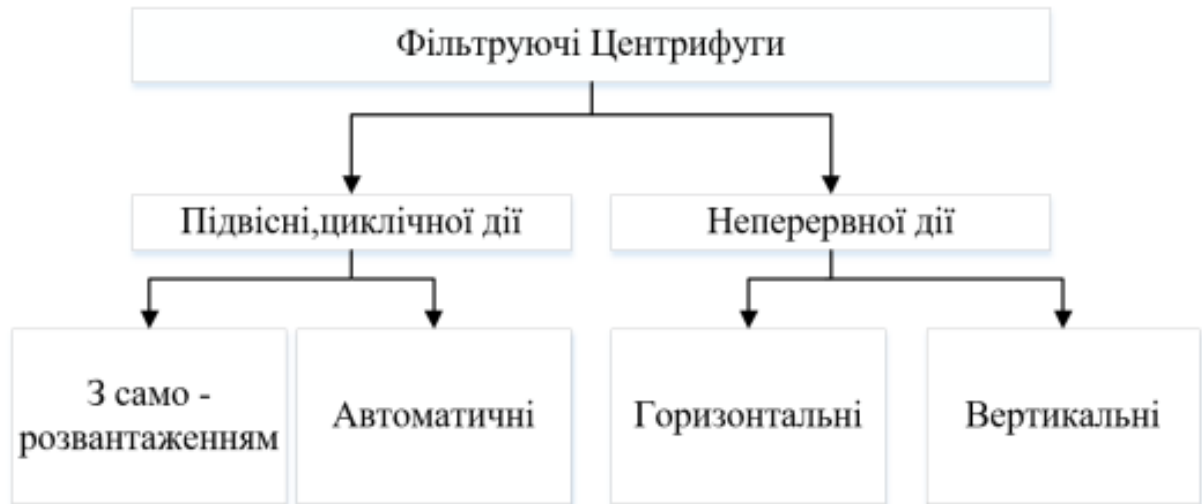


Рисунок 1.3 – Класифікація механізмів центрифуг

Останнім часом на цукрових заводах широкого поширення набули напівавтоматичні саморозвантажувальні центрифуги (рисунок 1.4).

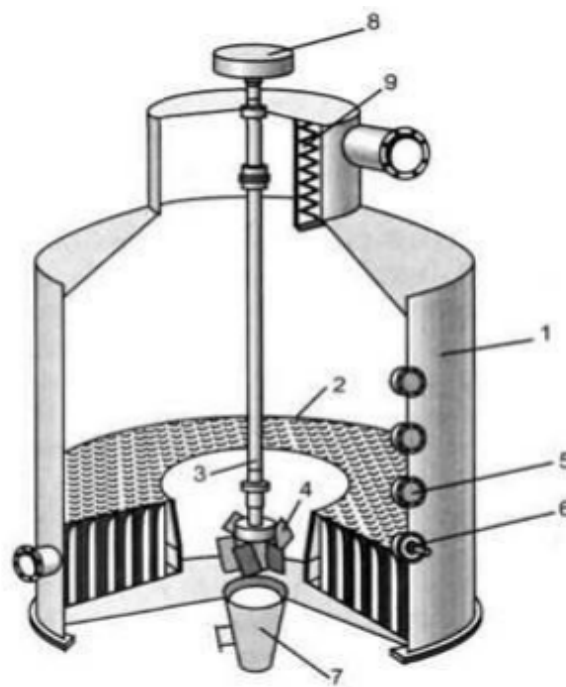


Рисунок 1.4 – Будова центрифуги

На рисунку 1.4 приведені наступні позначення: 1 – Корпус; 2 - Парова камера; 3 – Вал; 4 – Турбіна; 5 - Вікно для огляду; 6 - Тестовий кран; 7 - Затвор для вивантаження утфелю; 8 – Привод; 9 - Сепаратор

### **1.3 Завдання автоматизації технологічного процесу центрифугування та принцип дії центрифуги**

Для центрифуг з періодичною роботою широко використовують багатошвидкісні асинхронні електродвигуни. Зазвичай такі двигуни мають короткозамкнену обмотку ротора, а для зміни кількості пар полюсів застосовується перемикання обмотки статора.

В Україні виробляють як двошвидкісні, так і багатошвидкісні електродвигуни з трьома, чотирма або п'ятьма режимами обертання. Для центрифуги ЛПН-1250 застосовується спеціально створений п'ятишвидкісний двигун МЛ-93-65/75-56 з обертаннями 115, 250, 750, 1000 і 1500 об/хв (при цьому 250, 750 і 1500 об/хв – в одному напрямку, а 115 об/хв – в протилежному). Двигун оснащений двома короткозамкненими роторами, розміщеними на одному валу.

Використання такого двигуна дозволяє спростити систему регульованого електроприводу, але не дає змоги плавно змінювати швидкість обертання залежно від властивостей оброблюваного матеріалу і не забезпечує рівномірного прискорення під час розгону, що необхідно для однорідного розподілу продукту по стінках барабана. Це, в свою чергу, знижує ефективність роботи центрифуги.

Крім того, керування п'ятишвидкісним двигуном потребує використання великої кількості комутаційної апаратури.

Тому пропонується впровадження автоматизованого електроприводу з плавним регулюванням швидкості на основі векторного керування за допомогою системи перетворювача частоти-асинхронного двигуна (ПЧ-АД).

Практика використання векторних приводів базується на тому, що електроенергія, яка утворюється під час гальмування інерційного механізму, передається на гальмівні опори, де перетворюється в тепло. Найбільш поширеним методом гальмування в електроприводах із частотними перетворювачами, як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва, є

гальмування із підключенням зовнішнього резистора. Однак цей метод має ряд недоліків. Гальмівний резистор підключають до кожного перетворювача частоти, що збільшує вартість і погіршує габарити установки. Крім того, більшість гальмівної енергії перетворюється на тепло в резисторі, що викликає його сильне нагрівання і неефективне використання електричної енергії.

Використання сучасних систем автоматизації забезпечує високу надійність технологічного процесу. Кілька років тому на цукрових заводах почали впроваджувати вимірювальні прилади, що працюють в режимі онлайн, наприклад, для контролю різноманітності потоку чи товщини шару, проте потенціал таких пристроїв ще не використаний повністю. Існують пропозиції щодо удосконалень не лише у конструкції машин, але й у сфері автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП). Це дає змогу, наприклад, регулювати подачу пробілкової води в реальному часі залежно від товщини шару.

Крім того, завдяки безперервному вимірюванню якості цукру в потоці одразу виявляються відхилення від заданих параметрів, що дозволяє вносити необхідні корективи ще до початку наступного циклу для підтримання стабільної якості продукції.

Подальше підвищення надійності центрифуги забезпечує сенсорний контроль процесу вивантаження, який пропонується як додаткова опція. При виявленні надмірних навантажень система автоматично регулює режими вивантаження.

Дані, що надходять від сенсорів, дають змогу оцінити загальний хід процесу центрифугування та оперативно його оптимізувати. Нові розробки відзначаються простотою експлуатації та усуненням вузлів, які потребують частого технічного обслуговування.

Також робиться акцент на використання сенсорного обладнання і системи своєчасного оповіщення про стан роботи та необхідність проведення ремонтно-профілактичних заходів.

У новому поколінні центрифуг значно зменшуються витрати на обслуговування та простої обладнання, що позитивно впливає на загальну вартість їх життєвого циклу.

Центрифуга працює наступним чином (рисунок 1.5). Спочатку включають приводний електродвигун.

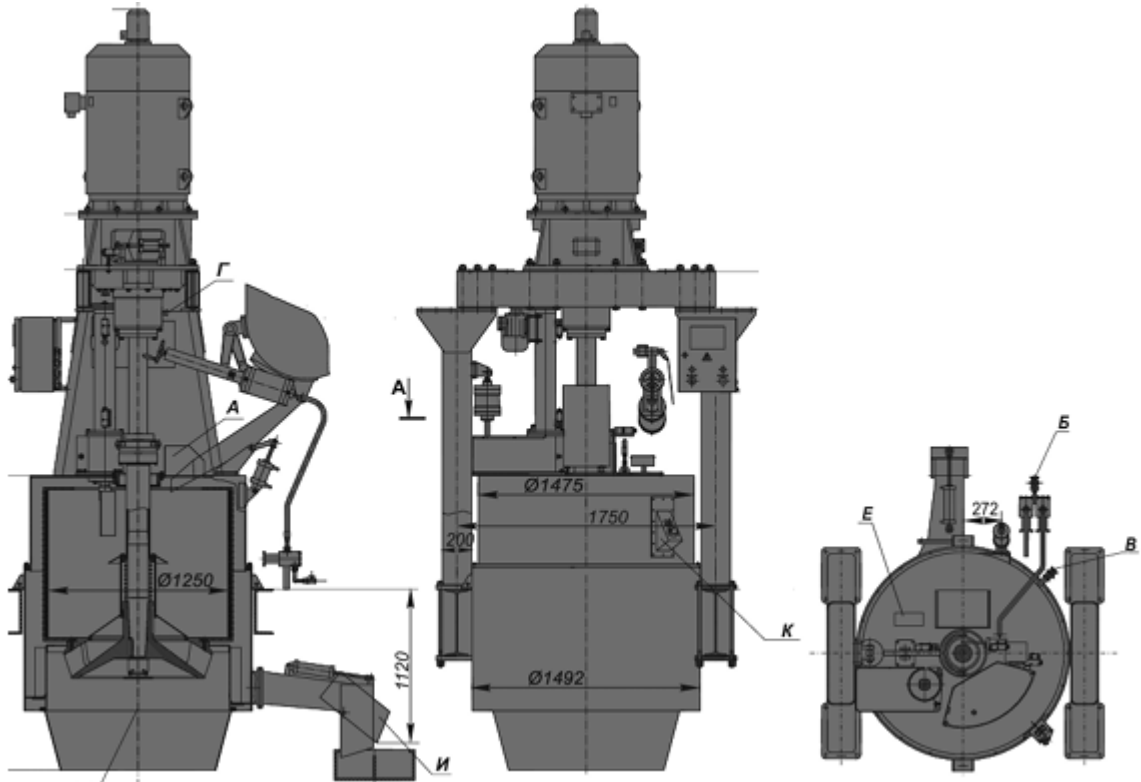


Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд центрифуги в проекціях

Коли частота обертання ротора досягає 230 об/хв, відкривається розподільна засувка, і утфель через лоток надходить до ротора центрифуги. Після заповнення ротора до встановленого обсягу датчик завантаження утфеля дає команду закрити засувку. Потім електродвигун розганяється до максимальної швидкості, при якій відбувається фугування утфеля. Тривалість фугування контролюється за допомогою реле часу, що задає загальний час процесу.

Після завершення фугування через певний проміжок часу вмикається електромагнітний клапан, і до центрифуги подається вода для промивання

шару цукру. Одночасно сегрегатор переключається на відведення білої патоки.

Після промивання і пропарювання цукру двигун зменшує швидкість, і центрифуга починає гальмуватися. Коли ротор зупиняється, двигун переключається на зворотний напрямок обертання. При зниженні частоти обертання ротора до 70–100 об/хв піднімається запірний конус, і за допомогою пневмоциліндра до шару цукру опускається ніж, який вертикально рухається від двигуна.

Після завершення розвантаження механізм зрізу повертається у вихідне положення, а запірний конус опускається. Сита промиваються водою, після чого починається новий робочий цикл. Після підсушування цукру і переключення двигуна на зворотне обертання автоматично активується пристрій для механічного видалення цукру.



## **2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ**

### **2.1 Вимоги до вибору потужності електродвигуна**

Правильний підбір потужності електродвигуна має ключове значення, адже використання двигуна з недостатньою потужністю знижує продуктивність механізму і може призвести до його передчасного виходу з ладу. У таких випадках двигун перегрівається понад допустиму температуру, що значно скорочує термін служби ізоляції обмоток.

Водночас встановлення двигуна із завищеною потужністю є економічно невигідним і погіршує його енергетичні характеристики — знижується коефіцієнт корисної дії (ККД) та коефіцієнт потужності. Крім того, це може викликати підвищений знос або навіть поломку деталей механізму.

Залежно від режиму роботи механізму розрізняють три типи нагрівання електродвигуна:

- тривалий режим, при якому двигун встигає нагрітися до сталого значення температури;
- короткочасний режим, коли двигун під час роботи не досягає сталого нагріву, а між включеннями відпочиває настільки довго, що охолоджується до температури навколишнього середовища;
- повторно-короткочасний режим, при якому двигун за час роботи не нагрівається до сталого стану, а за період паузи не встигає охолонути до температури середовища. Через це з кожним наступним увімкненням початкова температура двигуна трохи вища, ніж при попередньому запуску, доки згодом температура починає коливатися між певними межами.

Саме з урахуванням цих режимів і здійснюється вибір потужності електродвигуна. Для двигунів тривалого режиму у каталогах вказується номінальна потужність без обмежень за часом роботи. Для короткочасних двигунів подаються декілька значень потужності, відповідно до тривалості

роботи. При підборі двигуна необхідно, щоб розрахункова потужність не перевищувала номінальну.

Розрахунок потужності двигуна та подальший вибір електропривода ротора центрифуги здійснюють, враховуючи такі чинники:

- необхідні динамічні властивості при пуску, гальмуванні та зміні навантаження;
- діапазон регулювання швидкостей;
- різновид необхідної механічної характеристики режиму роботи в часі та необхідна точність підтримання заданого режиму;
- частота включень приводного механізму.

## 2.2 Визначення режиму роботи двигуна

З метою розрахунку потужності електродвигуна попередньо задаємося наступними вхідними даними для проведення необхідних розрахунків (див. таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Вхідні дані для розрахунку

| №п\п | Показник                            | Позначення | Величина  |
|------|-------------------------------------|------------|-----------|
| 1.   | Час роботи центрифуги, с            | $t_p$      | 157       |
| 2.   | Час паузи центрифуги, с             | $t_0$      | 30        |
| 3.   | Фактична тривалість включення, °/с  | ТВ         | 84        |
| 4.   | Коефіцієнт тертя °                  | f          | 0,03-0,09 |
| 5.   | Максимальне навантаження ротора, кг | m          | 450       |
| 6.   | Густина сталі, кг/м <sup>3</sup>    | $\rho$     | 7900      |

Параметри частоти обертання ротора, тривалості етапів робочого циклу та конструктивні характеристики центрифуги наведені в таблиці 2.2. Конструктивні розміри ротора центрифуги показані на рисунку 2.1.

Таблиця 2.2 – Параметри тахограми

| Параметр          | Позначення та значення величин |       |       |       |       |       |       |       |       |                  |          |          |          |
|-------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|----------|----------|----------|
| $t, \text{с}$     | $t_1$                          | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | $t_5$ | $t_6$ | $t_7$ | $t_8$ | $t_9$ | $t_{10}$         | $t_{11}$ | $t_{12}$ | $t_{13}$ |
| Значення          | 5                              | 5     | 20    | 30    | 7     | 7     | 7     | 7     | 16    | 13               | 25       | 15       | 30       |
| $n, \text{об/хв}$ | $n_1$                          | $n_2$ | $n_3$ | $n_4$ | $n_5$ | —     | —     | —     | —     | —                | —        | —        | —        |
| Значення          | 200                            | 1500  | 400   | 1000  | 1500  | —     | —     | —     | —     | —                | —        | —        | —        |
| $H, \text{мм}$    | $H_1$                          | $H_2$ | $H_3$ | $H_4$ | $H_5$ | $H_6$ | $H_7$ | $H_8$ | $H_9$ | $H_{10}$         | —        | —        | —        |
| Значення          | 250                            | 100   | 750   | 900   | 250   | 30    | 150   | 10    | 20    | 8                | —        | —        | —        |
| $D, \text{мм}$    | $D_1$                          | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ | $D_5$ | $D_6$ | $D_7$ | $D_8$ | $D_9$ | $D_{\text{зар}}$ | —        | —        | —        |
| Значення          | 80                             | 200   | 650   | 70    | 200   | 450   | 450   | 440   | 140   | 350              | —        | —        | —        |

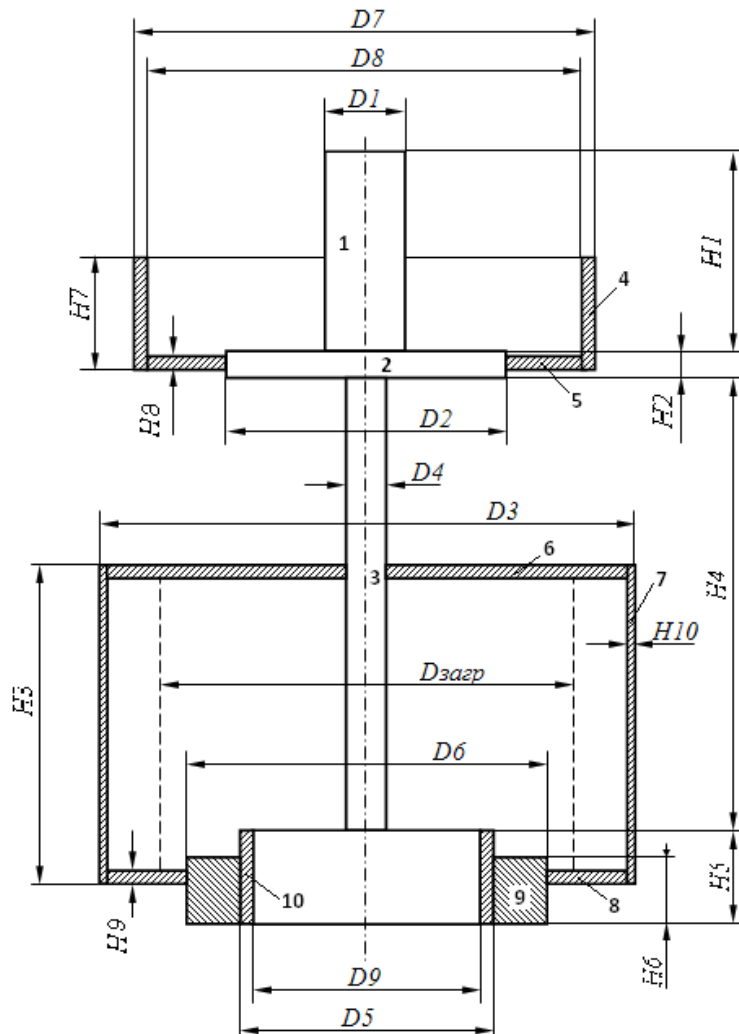


Рисунок 2.1 – Конструктивні розміри ротора центрифуги

Робочий цикл центрифуги характеризується тахограмою роботи привода ротора (див. рисунок 2.2).

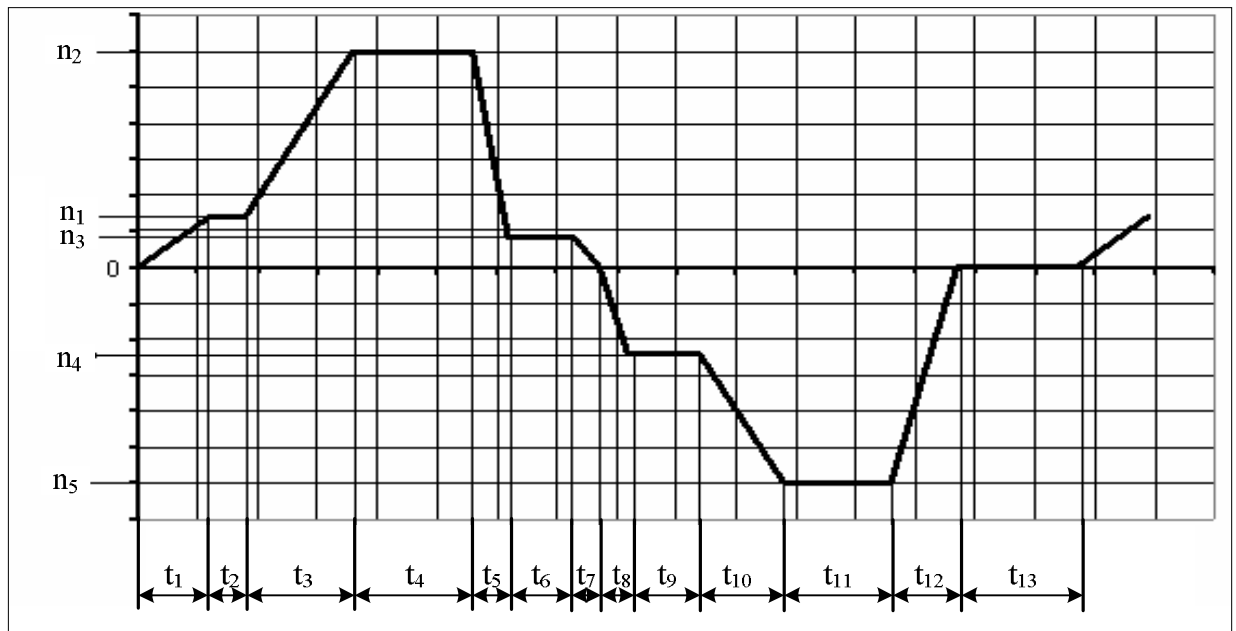


Рисунок 2.2 – Тахограма робочого циклу електропривода ротора

Основні технологічні операції робочого циклу виконуються в наступній послідовності:

- розгін ротора порожньої центрифуги з нерухомого положення до зниженої швидкості  $n$  (тривалість  $t_1$ );
- завантаження центрифуги при швидкості  $n_1$  (тривалість  $t_2$ );
- розгін ротора до максимальної швидкості  $n_2$  (тривалість  $t_3$ );
- промивання продукту та фільтрація на швидкості  $n_2$  (тривалість  $t_4$ );
- гальмування ротора до зниженої швидкості  $n_3$  (тривалість  $t_5$ );
- завершення фільтрації та злив при швидкості  $n_3$  (тривалість  $t_6$ );
- реверс обертання ротора до швидкості  $n_4$  (тривалість  $t_7 + t_8$ );
- опускання ножа, зрізання продукту і вивантаження на швидкості  $n_4$  (тривалість  $t_9$ );
- розгін ротора у зворотному напрямку до максимальної швидкості  $n_5$  (тривалість  $t_{10}$ );
- промивання сит на швидкості  $n_6$  (тривалість  $t_{11}$ );

- гальмування ротора до повної зупинки з накладанням механічного гальма (тривалість  $t_{12}$ );
- пауза у стані готовності до початку нового робочого циклу (тривалість  $t_{13}$ ).

Час роботи центрифуги складає:

$$t_p = \sum_{i=1}^{12} t_i = 157 \text{ с.} \quad (2.1)$$

де  $\sum_{i=1}^{12} t_i$  – сумарна тривалість робочого циклу центрифуги за умовами робочого циклу.

Час циклу:

$$t_{\Sigma} = t_p + t_{0(13)}. \quad (2.2)$$

де  $t_0$  – час паузи за умовами технологічного процесу ( $t_{0(13)} = 30 \text{ с.}$ ).

$$t_{\Sigma} = 157 + 30 = 187 \text{ (с.)}.$$

Фактична тривалість включення електродвигуна:

$$TB = \frac{t_p}{t_{\Sigma}} \cdot 100\% = \frac{157}{187} \cdot 100\% = 84\%. \quad (2.3)$$

Приймаємо стандартне значення тривалості включення

$$TB_{CT} = 100\%.$$

Враховуючи фактичну тривалість роботи двигуна, можна зробити висновок, що його режим роботи відповідає типу S8 — тобто режиму з періодичною зміною частоти обертання та навантаження. Цей режим являє собою послідовність однакових робочих циклів, кожен з яких включає періоди розгону, роботи при сталому навантаженні на заданій частоті обертання, а також один або кілька періодів роботи при інших сталих значеннях навантаження, що відповідають різним частотам обертання.



### 2.3 Розрахунок та побудова навантажувальної діаграми механізму

Діаграма навантаження механізму відображає графік зміни статичного моменту  $M_{с.мех}(t)$  на валу ротора центрифуги впродовж робочого циклу. Потрібно визначити значення статичного моменту для кожного етапу робочого циклу.

Статичний момент на валу ротора центрифуги:

$$M_{с.мех} = M_B + M_T, \quad (2.4)$$

де  $\dot{I}_A$  – складова статичного моменту, обумовлена тертям обертового ротора центрифуги з повітрям;

$\dot{I}_T$  – момент, який створюється силами тертя вала ротора центрифуги в підшипниках.

На ділянці робочого циклу, який відповідає процесу вивантаження осаду, абсолютне значення  $M_{с.мех}$  зростає на величину моменту  $M_{рез}$ , який обумовлений появою зусилля різання, яке діє на лезо ножа ( $M_{рез} = 0,6 \cdot M_B$ ).

Момент сил тертя в повітрі:

$$M_B = 23,5 \cdot 10^{-6} \cdot H \cdot D \cdot n^2, \quad (2.5)$$

де  $H$  – висота (довжина) ротора, м;

$D$  – діаметр ротора, м;

$n$  – швидкість обертання ротора, об/хв.

Момент сил трения в підшипниках:

$$M_T = 4,9 \cdot f \cdot m_p \cdot d, \quad (2.6)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя, який залежить від типу підшипника ( $f = 0,03 - 0,09$ );

$m_p$  – маса ротора з продуктом, кг;

$d$  – діаметр валу, на якому закріплений ротор центрифуги, м.

Розрахуємо масу ротора з продуктом:

$$m_p = m_{\text{зав}} + \sum m_i \quad (2.7)$$

де  $m_{\text{зав}}$  – максимальне завантаження ротора суспенцією ( $m_{\text{зав}} = 450$  кг.)  
 $\sum m_i$  – маса незавантаженого ротора.

$$m_i = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot H_i \cdot \rho, \quad (2.8)$$

де  $D_i^2$  – діаметр  $i$ -ої частини ротора, м;

$H_i$  – висота  $i$ -ої частини ротора, м;

$\rho$  – густина сталі ( $\rho = 7900$  кг/м<sup>3</sup>).

Визначаємо масу незавантаженого ротора шляхом врахування конструктивних параметрів центрифуги та подальшою підстановкою значень з таблиці 2.2:

$$m_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_5^2 - D_9^2) \cdot H_5 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,2^2 - 0,14^2) \cdot 0,25 \cdot 7900 = 31,644 \text{ (кг)}, \quad (2.9)$$

$$m_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_6^2 - D_5^2) \cdot H_6 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,45^2 - 0,2^2) \cdot 0,03 \cdot 7900 = 30,248 \text{ (кг)}, \quad (2.9)$$

$$m_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_6^2 - D_5^2) \cdot H_6 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,45^2 - 0,2^2) \cdot 0,03 \cdot 7900 = 30,248 \text{ (кг)}, \quad (2.10)$$

$$m_3 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_4^2) \cdot H_4 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,07^2) \cdot 0,9 \cdot 7900 = 27,362 \text{ (кг)}, \quad (2.11)$$

$$m_4 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_3^2 - D_4^2) \cdot H_9 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,65^2 - 0,07^2) \cdot 0,02 \cdot 7900 = 51,821 \text{ (кг)}, \quad (2.12)$$

$$m_5 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_3^2 - D_6^2) \cdot H_9 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,65^2 - 0,45^2) \cdot 0,02 \cdot 7900 = 27,3 \text{ (кг)}, \quad (2.13)$$

$$m_6 = \frac{\pi}{4} \cdot [D_3^2 - (D_3 - 2 \cdot H_{10})^2] \cdot (H_3 - 2 \cdot H_9) \cdot \rho =$$

$$= \frac{3,14}{4} \cdot [0,65^2 - (0,65 - 2 \cdot 0,008)^2] \cdot (0,75 - 2 \cdot 0,02) \cdot 7900 = 77,756(\text{кг}),$$

(2.14)

$$m_7 = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot H_2 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,2^2) \cdot 0,1 \cdot 7900 = 24,819 (\text{кг}), \quad (2.15)$$

$$m_8 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_7^2 - D_2^2) \cdot H_8 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,45^2 - 0,2^2) \cdot 0,01 \cdot 7900 = 10,083(\text{кг}),$$

(2.16)

$$m_9 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_7^2 - D_8^2) \cdot (H_7 - H_8) \cdot \rho =$$

$$= \frac{3,14}{4} \cdot (0,45^2 - 0,44^2) \cdot (0,15 - 0,01) \cdot 7900 = 7,731(\text{кг}), \quad (2.17)$$

$$m_{10} = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot H_1 \cdot \rho = \frac{3,14}{4} \cdot (0,08^2) \cdot 0,25 \cdot 7900 = 9,927 (\text{кг}), \quad (2.18)$$

Масса незавантаженого ротора:

$$\sum m_i = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 + m_8 + m_9 + m_{10} = 520,507 \text{ (кг)}$$

(2.19)

Масса ротора с продуктом:

$$m_p = 450 + 520,507 = 970,507 (\text{кг}).$$

Визначимо момент сил тертя в підшипниках для завантаженого та незавантаженого ротора, враховуючи, що коефіцієнт приймає значення  $f = 0,04$ :

$$M_{\text{Тза}} = 4,9 \cdot f \cdot m_p \cdot D_4 = 4,9 \cdot 0,04 \cdot 970,507 \cdot 0,007 = 13,315 (\text{Н} \cdot \text{м}), \quad (2.20)$$

$$M_{\text{Тнеза}} = 4,9 \cdot f \cdot \sum m_i \cdot D_4 = 4,9 \cdot 0,04 \cdot 520,507 \cdot 0,007 = 7,141 (\text{Н} \cdot \text{м}). \quad (2.21)$$

Визначимо швидкості обертання ротора на кожній ділянці робочого циклу:

$$n_{p1} = \frac{n_1}{2} = \frac{200}{2} = 100 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right); n_{p2} = n_1 = 200 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.22)$$

$$n_{p3} = \frac{n_2 - n_1}{2} + \frac{n_1}{2} = \frac{1500 - 200}{2} + \frac{200}{2} = 750 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.23)$$

$$n_{p4} = n_2 = 1500 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.24)$$

$$n_{p5} = n_2 - \frac{n_2 - n_3}{2} = 1500 - \frac{1500 - 400}{2} = 950 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.25)$$

$$n_{p6} = n_3 = 400 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.26)$$

$$n_{p7} = \frac{n_3}{2} = \frac{400}{2} = 200 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right); n_{p8} = -\frac{n_4}{2} = \frac{1000}{2} = -500 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.27)$$

$$n_{p9} = -n_4 = -1000 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.28)$$

$$n_{p10} = n_{p10} = -n_4 + \frac{-n_5 + n_4}{2} = -1000 + \frac{-1500 + 1000}{2} = -1250 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.29)$$

$$n_{p11} = -n_5 = -1500 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right); n_{p12} = -\frac{n_5}{2} = -\frac{1500}{2} = -750 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right), \quad (2.30)$$

$$n_{p13} = 0 \left( \frac{\text{об}}{\text{XB}} \right). \quad (2.31)$$

Визначимо момент сил тертя в повітрі на кожній ділянці робочого циклу:

$$M_{B1} = 23,5 \cdot 10^{-6} \cdot H_3 \cdot D_3 \cdot n_{pl}^2 =$$

$$= 23,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,75 \cdot 0,65 \cdot 100^2 = 1,146 \cdot 10^{-3} \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (2.32)$$

Розрахунок інших значень моменту здійснюється по аналогії із попереднім виразом, значення зведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення моменту сил тертя в повітрі

| Параметр       | Значення моменту      |                       |                       |          |          |                       |                       |                       |          |           |           |                       |           |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------|-----------|-----------------------|-----------|
| $M_{ai}$ , Н·м | $M_{B1}$              | $M_{B2}$              | $M_{B3}$              | $M_{B4}$ | $M_{B5}$ | $M_{B6}$              | $M_{B7}$              | $M_{B8}$              | $M_{B9}$ | $M_{B10}$ | $M_{B11}$ | $M_{B12}$             | $M_{B13}$ |
| Значення       | $1,146 \cdot 10^{-3}$ | $2,291 \cdot 10^{-3}$ | $8,592 \cdot 10^{-3}$ | 0,017    | 0,011    | $4,582 \cdot 10^{-3}$ | $2,291 \cdot 10^{-3}$ | $5,728 \cdot 10^{-3}$ | 0,011    | 0,014     | 0,017     | $8,592 \cdot 10^{-3}$ | 0         |

Визначимо статичний момент на валу ротора центрифуги на кожній ділянці робочого циклу:

$$M_{с.мех1} = M_{B1} + M_{Тнезав.}, \quad (2.33)$$

$$M_{с.мех2} = M_{B2} + M_{Тзав.}, \quad (2.34)$$

$$M_{с.мех3} = M_{B3} + M_{Тзав.}, \quad (2.35)$$

$$M_{с.мех4} = M_{B4} + M_{Тзав.}, \quad (2.36)$$

$$M_{с.мех5} = M_{B5} + M_{Тзав.}, \quad (2.37)$$

$$M_{с.мех6} = M_{B6} + M_{Тзав.}, \quad (2.38)$$

$$M_{с.мех7} = M_{B7} + M_{Тзав.}, \quad (2.39)$$

$$M_{с.мех8} = -(M_{B8} + M_{Тзав.}), \quad (2.40)$$

$$M_{с.мех9} = -(M_{B9} + M_{Тзав.}), \quad (2.41)$$

$$M_{с.мех10} = -(M_{B10} + M_{Тнезав.}), \quad (2.42)$$

$$M_{с.мех11} = -(M_{B11} + M_{Тнезав.}), \quad (2.43)$$

$$M_{с.мex12} = -(M_{в12} + M_{Гнезав.}), \quad (2.44)$$

$$M_{с.мex13} = M_{в13}. \quad (2.45)$$

Результати підстановки у вище приведені формули занесені в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення статичного моменту на валу ротора

| Параметр                        | Значення моменту |            |            |            |            |            |            |            |            |             |             |             |             |
|---------------------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $M_{i\ddot{\alpha}o.i},$<br>Н·м | $M_{mex1}$       | $M_{mex2}$ | $M_{mex3}$ | $M_{mex4}$ | $M_{mex5}$ | $M_{mex6}$ | $M_{mex7}$ | $M_{mex8}$ | $M_{mex9}$ | $M_{mex10}$ | $M_{mex11}$ | $M_{mex12}$ | $M_{mex13}$ |
| Значення                        | 4,099            | 5,138      | 10,281     | 10,289     | 10,283     | 10,277     | 10,274     | -10,278    | -5,147     | -4,112      | -4,115      | -4,107      | 0           |

Виконаємо побудову навантажувальної діаграми ротора центрифуги по результатам виконаних розрахунків. Графік тахограми швидкостей та моменту статичного опору приведені на рисунках 2.3 та 2.4.

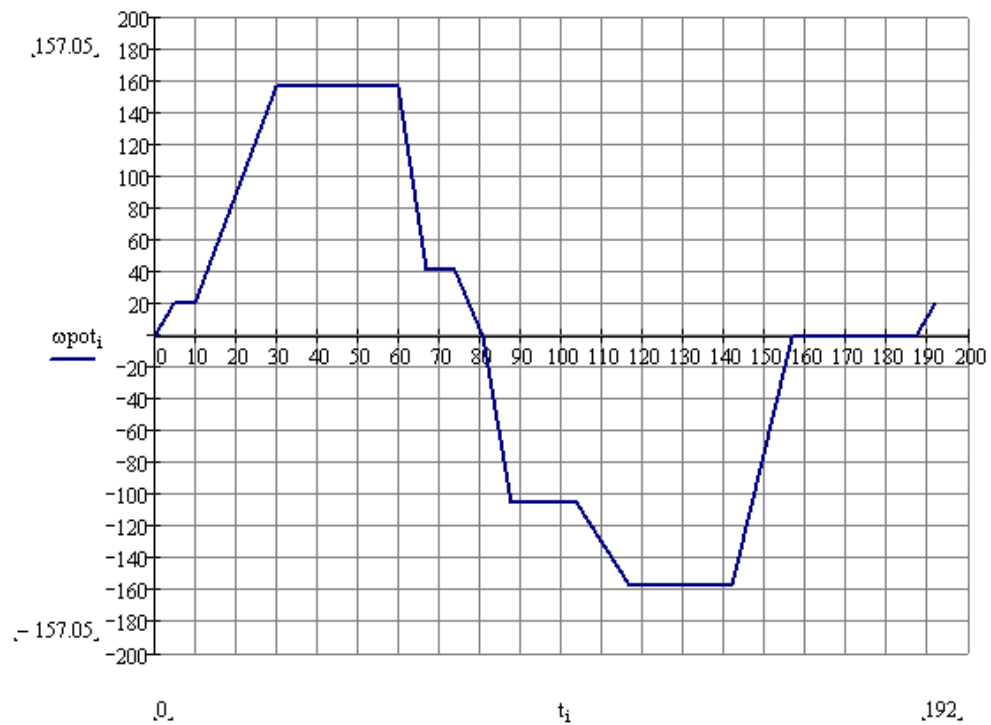


Рисунок 2.3 – Тахограма швидкостей





Рисунок 2.3 – Діаграма моменту статичного опору ротора центрифуги

## 2.4 Розрахунок потужності електродвигуна

Визначаємо частоту обертання ротора на кожній ділянці робочого циклу:

$$\omega_{\text{мех } i} = \frac{\pi \cdot n_{pi}}{30}, \quad (2.46)$$

$$\omega_{\text{мех } 1} = \frac{\pi \cdot n_{p1}}{30} = \frac{3,14 \cdot 100}{30} = 10,47 \left( \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right).$$

Решта розрахункових точок частоти обертання ротора визначається аналогічним чином. Дані розрахунків зведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Розрахунок частот обертання ротора

| Параметр                           | Значення частоти обертання |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $\omega_{i\ddot{a}o.i}$ ,<br>рад/с | $\omega_{mex1}$            | $\omega_{mex2}$ | $\omega_{mex3}$ | $\omega_{mex4}$ | $\omega_{mex5}$ | $\omega_{mex6}$ | $\omega_{mex7}$ | $\omega_{mex8}$ | $\omega_{mex9}$ | $\omega_{mex10}$ | $\omega_{mex11}$ | $\omega_{mex12}$ | $\omega_{mex13}$ |
| Значення                           | 10,47                      | 20,944          | 78,54           | 157,08          | 99,484          | 41,888          | 20,944          | -52,36          | -104,72         | -130,9           | -157,08          | -78,54           | 0                |

Знак мінус задає напрямок обертання валу двигуна (режим реверсу).

Розрахункова потужність електродвигуна знаходиться за формулою:

$$P_{роз.} = K_3 \cdot P_{с.мех.ср} \cdot \sqrt{\frac{T_B}{T_{B_{ст.}}}}, \quad (2.47)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу, який враховує вплив динамічних процесів на температурний режим двигуна та додаткові втрати енергії в ньому;

$P_{с.мех.ср}$  – середнє значення статичної потужності механізму за час  $t_p$  роботи в межах робочого циклу.

Електрообладнання центрифуг зазвичай експлуатується в умовах хімічно агресивного, але невибухонебезпечного середовища з підвищеною відносною вологістю повітря (до 95%) і температурою до +40°C. Центрифуги періодичної дії, які застосовуються у цукровому виробництві, мають найбільшу потужність електродвигунів. Через це двигуни повинні мати достатній запас потужності, щоб забезпечувати надійну роботу електроприводу в моменти максимального навантаження. Крім того, апаратура, встановлена безпосередньо на центрифугах, повинна бути розрахована на роботу в умовах значних вібрацій та трясіння.

Беручи до уваги ці особливості та велику частку перехідних процесів у загальному робочому циклі, рекомендується прийняти коефіцієнт запасу потужності  $K_3 = 1,7$ .

Середня статична потужність за час роботи визначається за виразом:

$$P_{c.mex.cp} = \frac{1}{T_p} \sum_i \int_0^{t_{p,i}} |M_{c.mex} \cdot \omega_{mex}| dt, \quad (2.48)$$

де  $i$  – умовний номер ділянки роботи електропривода (без врахування пауз);

$t_{p,i}$  – тривалість  $i$ -ої ділянки роботи;

$\omega_{mex}$  – частота обертання ротора центрифуги, рад/с.

Підінтегральна функція представляє собою миттєве значення статичної потужності  $P_{c.mex}$  механізму. В даному випадку всі складові статичного моменту мають реактивний характер, тому остання формула спрощується до виду:

$$P_{c.mex.cp} = \frac{1}{T_p} \sum_i \int_0^{t_{p,i}} M_{c.mex} \cdot \omega_{mex} dt, \quad (2.49)$$

Розрахункова потужність розраховується як середньоквадратичне значення статичної потужності за час роботи  $t_p=157$  сек, тобто:

$$P_{c.mex.cp} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \sum_i \int_0^{t_{p,i}} P_{c.mex,i}^2 dt}, \quad (2.50)$$

Тоді:

$$\int_0^{t_{p,i}} P_{c.mex,i}^2 dt = \int_0^{t_i} (M_{c.mex,i} \cdot \omega_{mex,i})^2 dt = (M_{c.mex,i} \cdot \omega_{mex,i})^2 \cdot t_i, \quad (2.51)$$

Для випадку роботи центрифуги на першій ділянці розрахуємо значення потужності:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{p,1}} P_{c.mex,1}^2 dt &= (M_{c.mex,1} \cdot \omega_{mex,1})^2 \cdot t_1 = \\ &= (4,099 \cdot 10,47)^2 \cdot 5 = 9,213 \cdot 10^3 \text{ (Вт}^2 \cdot \text{с)} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Решта значень розраховується аналогічно і занесена в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 – Значення потужності центрифуги

| Параметр                              | Значення потужності |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                   |               |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| $P_{с.мех.i}$ ,<br>Вт <sup>2</sup> ·с | $P_{с.мех1}$        | $P_{с.мех2}$       | $P_{с.мех3}$       | $P_{с.мех4}$       | $P_{с.мех5}$       | $P_{с.мех6}$       | $P_{с.мех7}$       | $P_{с.мех8}$       | $P_{с.мех9}$       | $P_{с.мех10}$      | $P_{с.мех11}$      | $P_{с.мех12}$     | $P_{с.мех13}$ |
| Значення                              | $9,213 \cdot 10^3$  | $5,791 \cdot 10^4$ | $1,304 \cdot 10^7$ | $7,837 \cdot 10^7$ | $7,325 \cdot 10^7$ | $1,297 \cdot 10^6$ | $3,241 \cdot 10^5$ | $2,027 \cdot 10^6$ | $4,649 \cdot 10^6$ | $3,767 \cdot 10^6$ | $1,045 \cdot 10^7$ | $1,56 \cdot 10^6$ | 0             |

$$\sum_0^{t_{p,i}} P_{с.мех.i}^2 dt = 1,888 \cdot 10^8 \text{ (Вт}^2 \cdot \text{с)} \quad (2.53)$$

Середня статична потужність за час роботи:

$$P_{с.мех.ср} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \sum_i \int_0^{t_{p,i}} P_{с.мех.i}^2 dt} = \sqrt{\frac{1,229 \cdot 10^8}{157}} = 1096,61 \text{ (Вт)}.$$

Підставляючи отримані дані в формулу Подставляя полученные значения в формулу (2.47), отримуємо:

$$P_{роз.} = 1,7 \cdot 1096,61 \cdot \sqrt{\frac{84}{100}} = 1709 \text{ (Вт)}.$$

**Висновок:** В результаті наповнення даного розділу було виконано розрахунок потужності електричного двигуна електропривода ротора центрифуги.

### **3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

#### **3.1 Технічне обґрунтування вибору системи електропривода**

Перше, що необхідно зробити для оптимального вибору системи електроприводу – це об'єктивно оцінити варіанти, які пропонуються на ринку регульованих приводів та технічно відповідають вимогам прикладного процесу. Головними критеріями цієї оцінки повинні бути:

1. Загальна вартість закупівлі регульованого приводу і необхідного додаткового устаткування.
2. Поточні експлуатаційні витрати:
  - обслуговування;
  - виробничі витрати, ККД, і т.д;
  - необхідна площа розміщення.
3. Технологічні і інноваційні аспекти:
  - динамічний відгук, час розгону; 4-х квадрантні операції; аварійний стоп, і так далі;
  - масо-габаритні характеристики.
4. Експлуатаційна надійність, придатність приводів:
  - відповідність міжнародним вимогам і стандартам ІЕС, ГОСТ Р, EN, CE-EMC; CSA, UL, і т.д.;
  - умови навколишнього середовища; ступінь захисту корпусу; ремонт "по-місцю".
5. Вплив на зовнішнє середовище:
6. Необхідний простір для перетворювача та двигуна.
7. Відведення тепла.

Основними вимогами до електроприводу центрифуг є наступні: забезпечення оптимальних динамічних режимів при постійному прискоренні та сповільненні центрифуги; стабілізація частоти обертання центрифуги при завантаженні, вивантаженні та фугуванні.

Якщо врахувати великі моменти інерції центрифуг, то питання застосування економічного електроприводу, що забезпечує рекуперацію енергії в мережу при гальмуванні, тут займає важливе місце.

Електропривод ротора центрифуги також повинен забезпечувати можливість плавного регулювання швидкості від "повзучої" швидкості рівної 10 об/хв, до максимальної. Живлення електроприводу здійснюється від цехової мережі змінного струму з напругою 380 В.

Для центрифуг найбільше підходить швидкодіючий реверсивний електропривод постійного струму за системою ТП-Д.

Вибір системи електроприводу для центрифуги залежить, в основному, від технологічного процесу. При цьому необхідно враховувати наступні чинники: частоту процесів реверсу, необхідну швидкодію, капітальні та експлуатаційні витрати, ККД, складність і надійність електроприводу та ін.

Для регульованого приводу центрифуги може бути застосований і електропривод змінного струму по системі ПЧ-АД або електропривод з вентильним двигуном. За техніко-економічними показниками і експлуатаційними характеристиками приводи цих типів мають більшу перевагу на відміну від електроприводів постійного струму.

На сьогоднішній день застосування частотного регулювання швидкості обертання електродвигунів змінного струму стає промисловим стандартом. Це обумовлено досягненням в сфері розробки і виготовлення сучасних перетворювачів частоти, застосування яких полягає в реалізації найбільш економічних алгоритмів управління двигуном для кожного конкретного технологічного процесу. Застосування частотно-регульованих електроприводів дозволяє зекономити від 20 до 50% електроенергії у порівнянні з іншими електроприводами, не оснащеними перетворювачами частоти.

### 3.2 Економічне обґрунтування вибору системи електроприводу

Для порівняння техніко-економічних показників систем електроприводу розглядатимемо такі системи:

- тиристорний перетворювач із двигуном постійного струму (ТП-ДПС);
- широтно-імпульсний перетворювач з двигуном постійного струму (ШП-ДПС);
- перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД).

Розглянемо ці варіанти з економічної точки зору. Використовуємо метод зведених витрат:

$$Z = E_n \cdot K + C, \quad (3.1)$$

де  $E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ( $E_n=0,15$ );

$K$  – капіталовкладення, в які входять вартість двигуна  $D$  та системи керування СК;

$C$  – собівартість.

$$C = C_a + C_0 + C_{\Delta W}, \quad (3.2)$$

де  $C_0$  – витрати на обслуговування і ремонт.

$$C_0 = E_0 \cdot K, \quad (3.3)$$

де  $C_a$  – амортизаційні відрахування.

$$C_a = E_a \cdot \hat{E}, \quad (3.4)$$

де  $E_a$  – коефіцієнт ( $E_a = 0,05$ );

$C_{\Delta W}$  – витрати на електроенергію ( $E_0 = 0,015$ ).

$$C_{\Delta W} = m_0 \cdot \Delta W, \quad (3.5)$$

де  $m_0$  – вартість електроенергії;

$\Delta W$  – кількість втраченої електроенергії за рік.



$$\Delta W = \Delta P \cdot T_p, \quad (3.6)$$

де  $T_p$  – річний час роботи механізму зарік.

Час роботи механізму за рік:

$$T_p = d \cdot z \cdot t, \quad (3.7)$$

де  $d$  – кількість робочих днів ( $d = 250$ );

$z$  – кількість змін ( $z = 2$ );

$t$  – кількість робочих годин в день ( $t = 8$ ).

$$T_p = 250 \cdot 2 \cdot 8 = 4000 \text{ (год)}.$$

Ціна на універсальні послуги для малих непобутових споживачів (Постанова НКРЕКП від 11.12.2018 №1863), електроустановки яких приєднані до електричних мереж АТ «Вінницяобленерго» згідно з класом напруги з ПДВ вираховується: (вартість електроенергії – 6,85грн/(кВт·год) без ПДВ, вартість розподілу – 2,26 грн/(кВт·год) без ПДВ:

$$c = 1,2 \cdot (6,85 + 2,26) = 10,93 \text{ грн/(кВт·год) з ПДВ}$$

Втрати потужності:

$$\Delta P = k_z \cdot P_H \cdot (1 - \eta_d) / \eta_d, \quad (3.8)$$

де  $k_z$  – коефіцієнт завантаження ( $k_z = 0,7$ ).

$\eta_d$  – ККД двигуна ( $\eta_d = 0,82$ ).

Термін окупності:

$$T = K / Z. \quad (3.9)$$

Покажемо приклад розрахунку для системи ПЧ-АД. Результати розрахунків зводимо в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна таблиця економічних показників

| Показник                                    | Системи електропривода |         |         |
|---------------------------------------------|------------------------|---------|---------|
|                                             | ТП-Д                   | ШПП-Д   | ПЧ-АД   |
| Потужність двигунів, кВт                    | 2,2                    | 2,2     | 2,2     |
| Вартість двигунів Д, грн.                   | 6450                   | 6450    | 3860    |
| Вартість системи керування СК, грн.         | 14740                  | 11780   | 12230   |
| Капітальні затрати К, грн.                  | 22382                  | 20198   | 17133   |
| ККД двигуна та системи                      | 0,84                   | 0,9     | 0,92    |
| Тривалість роботи, год/рік                  | 4000                   | 4000    | 4000    |
| Річні капітальні затрати $K_{річні}$ , грн. | 3804,9                 | 3433,7  | 2912,6  |
| Амортизаційні відрахування $C_A$ , грн./рік | 3178,5                 | 2734,5  | 2413,5  |
| Відрахування на ремонт $C_P$ , грн./рік     | 1270                   | 1240    | 1180    |
| Вартість втрат електроенергії, грн/рік      | 18320,8                | 10687,1 | 8363,8  |
| Вартість експлуатації електроприводу, грн   | 43959,3                | 32891,6 | 28047,3 |

При вартості двигуна  $D = 1490$  грн. та системи керування  $СК = 3725$  грн. капіталовкладення становитимуть:

$$K = D + СК, \quad (3.10)$$

$$K = 3860 + 12230 = 17133 \text{ (грн.)}.$$

$$C = C_A + C_P + C_D + C_O, \quad (3.11)$$

де  $C_A$  – амортизаційні відрахування;

$C_P$  – відрахування на ремонт електрообладнання;

$C_d$  – додаткові витрати, що враховують втрати енергії в стаціонарних і перехідних режимах роботи;

$C_0$  – відрахування на обслуговування.

де  $c$  – вартість кВт год електроенергії. Вартість на універсальні послуги для малих непобутових споживачів (Постанова НКРЕКП від 11.12.2018 №1863), електроустановки яких приєднані до електричних мереж АТ «Вінницяобленерго» згідно з класом напруги з ПДВ вираховується: (вартість електроенергії – 6,85грн/(кВт·год) без ПДВ, вартість розподілу – 2,26 грн/(кВт·год) без ПДВ

$$c = 1,2 \cdot (6,85 + 2,26) = 10,93 \text{ грн/(кВт·год) з ПДВ}$$

$\Delta P_\Sigma$  – сумарні втрати потужності в стаціонарних та перехідних режимах роботи.

$$\Delta P_\Sigma = (\Delta P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{перех}}) \cdot k_z \cdot \Phi, \quad (3.12)$$

де  $k_z$  – коефіцієнт завантаження по потужності ( $k_z=0,8$ );

$\Delta P_{\text{ном}}$  – втрати потужності двигуні в номінальному режимі роботи.

$\Delta P_{\text{перех}}$  – додаткові втрати потужності в перехідних режимах роботи (приймаються рівними 10% від номінальних втрат);

$\Phi$  – дійсний фонд часу роботи електропривода за рік.

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (3.13)$$

де  $\eta_{\text{ном}}$  номінальний ККД двигуна ( $\eta_{\text{ном}}=0,9$ );

$$\Delta P = 0,7 \cdot 2,2 \cdot (1 - 0,92) / 0,92 = 0,338 \text{ (кВт)}.$$

$$\Delta P_{\text{перех}} = 0,1 \cdot 0,338 = 0,034 \text{ (кВт)}.$$

$$\Phi = \varepsilon \cdot Z_{\text{р.д.}} \cdot Z_{\text{р.з.}} \cdot t, \quad (3.14)$$

де  $\varepsilon$  – відносна тривалість ввімкнення ( $\varepsilon=0,95$ );

$Z_{р.д.}$  – кількість робочих днів за рік ( $Z_{р.д.}=250$ );

$Z_{р.з.}$  – кількість робочих змін ( $Z_{р.з.}=2$ );

$t$  – тривалість робочої зміни ( $t=8$  год.).

Для систем ТП-Д, ШП-Д, ПЧ-АД проведені аналогічні розрахунки. Результати занесені до таблиці 3.1.

### **Висновок:**

Аналізуючи показники таблиці 3.1, можна зробити висновок, що найбільш вигідними з точки зору економічних показників є системи змінного струму. Першу позицію посідає система ПЧ-АД. З точки зору енергозбереження, надійності функціонування та динамічних характеристик електропривода кращою є система ПЧ-АД.

Оскільки в нашому випадку важливим критерієм у виборі системи електроприводу є рівень спожитої електроенергії, тому вибираємо систему ПЧ-АД. Використання плавного частотного пуску забезпечить:

- обмеження пускових струмів двигуна, виключення великих коливань по формі механічних моментів при прямому пуску електродвигуна від мережі, що підвищує довговічність двигуна і механічної частини;
- зниження теплових ударних навантажень при прямому пуску ;
- виключення підвищених електродинамічних зусиль в обмотках двигуна, що призводить до механічного руйнування ізоляції обмоток;
- виключення великих пускових струмів в мережах, що особливо важливо для районів з недостатньою потужністю електроенергетичних систем на шляху проходження газопроводів.

## 4 МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ

### 4.1 Вибір приводного двигуна та побудова статичних характеристик

Відповідно до проведених розрахунків та техніко-економічного обґрунтування обираємо двигун за потужністю та швидкістю обертання [8]:

$$\begin{cases} P_{\text{дв.н}} \geq P_{\text{роз}}, \\ \omega_{\text{дв.н}} \geq \omega_{\text{роз}}, \end{cases} \quad (4.1)$$

де  $P_{\text{дв.н}}$  – номінальна потужність двигуна, кВт;

$P_{\text{роз}}$  – розрахункова потужність двигуна, кВт;

$\omega_{\text{дв.н}}$  – номінальна кутова швидкість двигуна,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\omega_{\text{роз}}$  – розрахункова кутова швидкість,  $\text{с}^{-1}$ .

Знаходимо розрахункову швидкість:

$$\omega_{\text{роз}} = \frac{2 \cdot V \cdot i}{D}, \quad (4.2)$$

де  $D$  – діаметр виконавчого органа ( $D = 0,21\text{м}$ );

$i$  – передаточне число редуктора ( $i = 100$ ).

$$\omega_{\text{роз}} = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 100}{0,21} = 95,2 (\text{рад} / \text{с}). \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} 2,2 \geq 2,1, \\ 99,4 \geq 95,2, \end{cases}$$

Виходячи з даної умови, обираємо приводний двигун 4A100L6. Паспортні дані двигуна наведені в таблиці 3.2 [8].

Таблиця 4.1 – Паспортні дані приводного двигуна

|                                                                     |         |
|---------------------------------------------------------------------|---------|
| Тип двигуна                                                         | 4A100L6 |
| Номінальна потужність $P_{\text{дв.н}}$ , кВт                       | 2,2     |
| Номінальна кутова швидкість $n_{\text{дв.н}}$ , об/хв               | 949     |
| Номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi$                     | 0,73    |
| Номінальний коефіцієнт корисної дії $\eta_{\text{дв.н}}$ , %        | 81      |
| Кратність критичного моменту приводного двигуна $\lambda_k$         | 2,2     |
| Кратність пускового моменту приводного двигуна $\lambda_{\text{п}}$ | 2,0     |
| Пусковий струм $I_{\text{пуск}}$ , А                                | 22,5    |
| Момент інерції $J_p$ , кг·м <sup>2</sup>                            | 0,013   |
| Номінальний струм обмотки статора $I_{\text{дв.н}}$ , А             | 5,64    |
| Струм холостого ходу $I_{\text{хх}}$ , А                            | 3,8     |
| Активний опір обмотки статора $R_1$ , Ом                            | 3,51    |
| Індуктивний опір розсіювання обмотки статора $X_1$ , Ом             | 4,29    |
| Приведений активний опір обмотки ротора $R'2$ , Ом                  | 2,6     |
| Приведений індуктивний опір розсіювання обмотки $X'2$ , Ом          | 8,2     |

Синхронна кутова швидкість приводного двигуна [8]:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{z_p}, \quad (4.4)$$

де  $f$  – частота напруги живлення двигуна ( $f=50$  Гц);

$z_p$  – кількість пар полюсів статора ( $z_p=3$ ).

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7(\text{с}^{-1}).$$

Номінальна кутова швидкість приводного двигуна [8]:

$$\omega_{\text{дв.н}} = \frac{2\pi}{60} n_{\text{дв.н}}, \quad (4.5)$$

$$\omega_{\text{дв.н}} = \frac{2 \cdot 3,14}{60} 949 = 99,4(\text{с}^{-1}).$$

Номінальний момент приводного двигуна [8]:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{дв.н}}}, \quad (4.6)$$

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{2200}{99,4} = 22,1(\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Номінальне ковзання [8]:

$$s_{\text{ном}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{дв.н}}}{\omega_0}, \quad (4.7)$$

$$s_{\text{ном}} = \frac{104,7 - 99,4}{104,7} = 0,051.$$

Критичне ковзання [8]:

$$s_{\text{к}} = s_{\text{ном}} (\lambda_{\text{к}} + \sqrt{\lambda_{\text{к}}^2 - 1}), \quad (4.8)$$

$$s_{\text{к}} = 0,08 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,21.$$

Кутова швидкість приводного двигуна, при критичному ковзанні [8]:

$$\omega_{\text{к}} = \omega_0 (1 - s_{\text{кр}}), \quad (4.9)$$

$$\omega_{\text{к}} = 104,7(1 - 0,21) = 82,5(\text{с}^{-1}).$$

Номінальна напруга при схемі з'єднання обмоток «зіркою» [8]:

$$U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \quad (4.10)$$

де  $U_{\text{л}}$  – номінальна лінійна напруга ( $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ ).

$$U_{\text{ф}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,4(\text{В}).$$

Рівняння, що пов'язує кутову швидкість двигуна з ковзанням  $s$  [8]:

$$\omega(s) = \omega_0 (1 - s). \quad (4.11)$$

Приведений струм ротора [8]:

$$I_2'(\omega) = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (4.12)$$

Побудуємо електромеханічну характеристику  $\omega=f(I_2')$  при зміні кутової швидкості від 0 до  $\omega_0$ . Зовнішній вигляд характеристики представлений на рисунку 3.5.

Критичний момент двигуна [8]:

$$M_K = \lambda_K \cdot M_{дв.н} \quad (4.13)$$

$$M_K = 2,2 \cdot 22,1 = 48,68 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Критичне ковзання двигуна [8]:

$$s_K = s_{ном} \cdot (\lambda_K + \sqrt{\lambda_K^2 - 1}), \quad (3.43)$$

$$s_K = 0,08 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,27.$$

Момент двигуна за формулою Клоса [8]:

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_K (1 + a \cdot s_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2 \cdot a \cdot s_K}, \quad (4.14)$$

$$a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{3,51}{2,6} = 1,35. \quad (4.15)$$

Побудуємо механічну характеристику  $\omega=f(M)$  при зміні кутової швидкості від 0 до  $\omega_0$  за формулою Клоса. Зовнішній вигляд характеристики представлений на рисунку 3.5 [8].

Момент двигуна за формулою Чекунова:



$$M(s) = M_k \cdot \frac{2 + (s^2 + s_k^2) \cdot K_s}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (4.16)$$

$$K_s = \frac{\frac{\lambda_{II}}{\lambda_K} \left( \frac{1}{s_k} + s_k \right) - 2}{1 - s_k^2}, \quad (4.17)$$

$$K_s = \frac{\frac{2,0}{2,2} \left( \frac{1}{0,21} + 0,21 \right) - 2}{1 - 0,27^2} = 0,56.$$

Побудуємо механічну характеристику  $\omega=f(M)$  при зміні кутової швидкості від 0 до  $\omega_0$  за формулою Чекунова. Зовнішній вигляд характеристики представлений на рисунку 3.5.

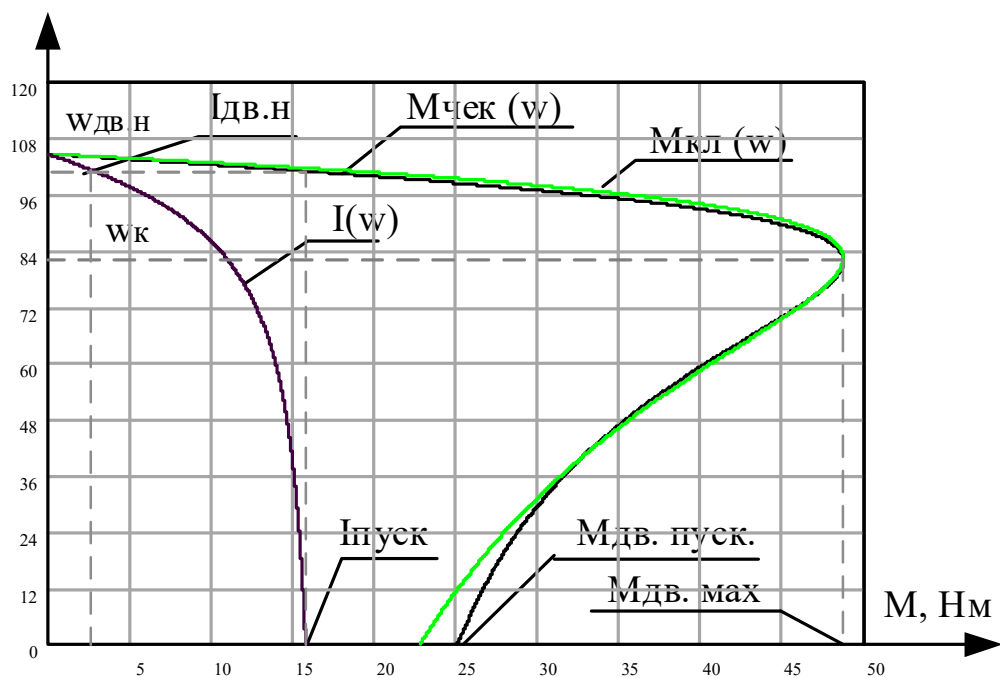


Рисунок 4.1 – Електромеханічна та механічні характеристики двигуна

З отриманих графіків видно, що механічна характеристика, побудована за формулою Чекунова, більш точно відповідає характеристиці приводного двигуна. Тому для побудови регульовальних механічних характеристик буде використана саме ця формула.

Для забезпечення надійного запуску приводного двигуна необхідно провести перевірку умов пуску, враховуючи можливе зниження напруги в мережі під час запуску, відповідно до умови [8]:

$$k_u^2 \cdot M_{\text{дв.п}} \geq 1,5 + M_c, \quad (4.18)$$

де  $k_u$  – коефіцієнт, що враховує зниження напруги мережі при пуску ( $k_u=0,9$ );

$M_{\text{дв.п}}$  – пусковий момент приводного двигуна, Н·м;

$M_c$  – момент опору механізму, Н·м;

$$M_{\text{дв.п}} = \lambda_{\text{п}} \cdot M_{\text{дв.н}}, \quad (4.19)$$

$$M_{\text{дв.п}} = 2,0 \cdot 22,1 = 44,2 (\text{Н} \cdot \text{м})$$

Розрахуємо момент опору механізму [8]:

$$M_c = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{роз}}} = \frac{F_t \cdot V}{\eta \cdot \omega_{\text{роз}}}, \quad (4.20)$$

Розраховуємо статичний момент [8]:

$$M_c = \frac{14836 \cdot 0,1}{0,8 \cdot 95,2} = 19,48 (\text{Н} \cdot \text{м})$$

$$(0,9)^2 \cdot 44,2 \geq 1,5 \cdot 19,48,$$

$$35,8 \geq 29,22.$$

Виходячи з проведених розрахунків умови пуску двигуна виконуються, двигун вибрано правильно.

## 4.2 Типова система електропривода ротора центрифуги

Типова електрична структурна схема проектного електроприводу центрифуги наведена на рисунку 4.2. Вона складається з набору пристроїв та блоків, кожен із яких відповідає за виконання певних функцій.

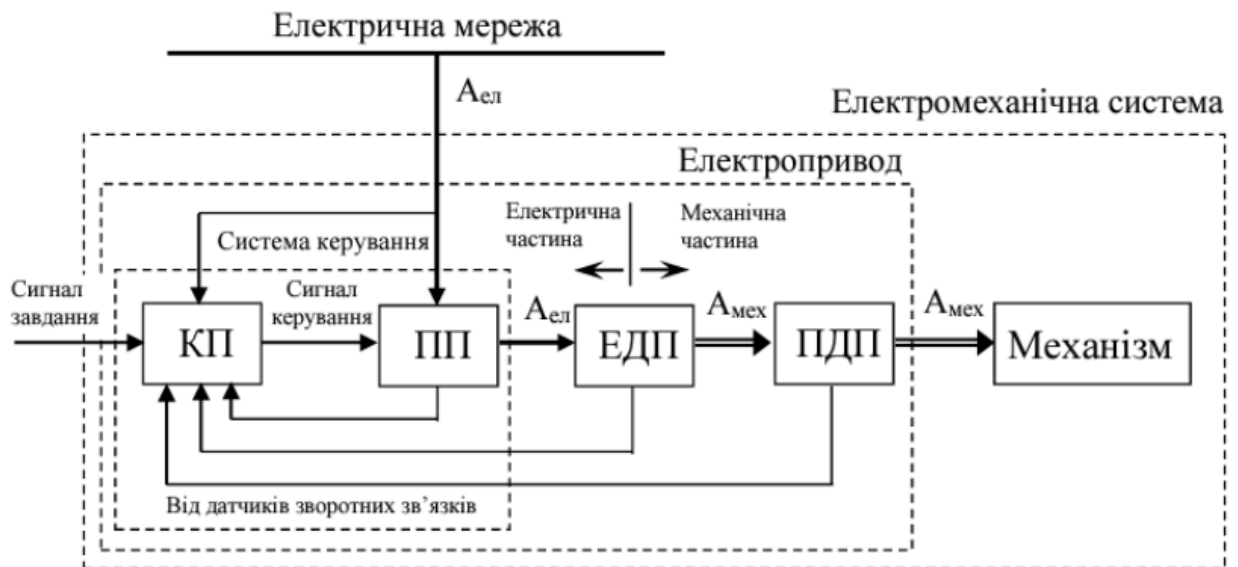


Рисунок 4.2 – Функціональна схема системи керування ЕП центрифуги

Силова частина складається з перетворювача та трифазного інвертора. Перетворювальний пристрій (ПП) отримує нерегульовану напругу мережі і подає регульовану постійну напругу на інвертор, який за допомогою широтно-імпульсної модуляції та заданої послідовності комутації IGBT-транзисторів перетворює цю постійну напругу в трифазну змінну напругу з регульованою амплітудою і частотою. Транзистори забезпечують високу швидкість перемикання з частотою до 10 кГц. На рисунку 4.2 наведені такі позначення: передавальний пристрій (ПДП), який передає механічну енергію від двигуна до механізму, та електродвигунний пристрій (ЕДП), що є електричним двигуном і виконує функцію електромеханічного перетворювача енергії, виробляючи механічну енергію за рахунок споживаної електричної.

Предбачено застосування зворотного зв'язку за струмом, а зворотний зв'язок за швидкістю реалізовано через датчик швидкості. Інформація зі зворотних зв'язків надходить на мікроконтролер (керуючий пристрій), де вона

обробляється, після чого відповідно до заданої програми формується сигнал на блок управління, який керує ключами інвертора. Впровадження автоматизованого частотно-керованого електроприводу з програмованим логічним контролером забезпечить низку переваг у порівнянні з існуючими схемами електроприводів центрифуг.

- Забезпечення роботи установки з продуктивністю до 8 тонн на годину;
- Досягнення швидкості обертання центрифуги 25 обертів на хвилину та відповідної швидкості двигуна;
- Підключення до мережі живлення з параметрами 380 В і 50 Гц для стабільної роботи центрифуги;
- Можливість налаштування швидкості в межах заданого діапазону за вимогою;
- Підтримка стабільної швидкості з необхідною точністю при зовнішніх впливах, наприклад, при зміні навантаження на вал двигуна;
- Регулювання крутного моменту двигуна у динамічних режимах, а також контроль прискорення і уповільнення приводу;
- Забезпечення точної зміни швидкості протягом часу з підтримкою стабільності статичних і динамічних характеристик електроприводу;
- Заміна дорогих багатошвидкісних асинхронних двигунів більш доступними одношвидкісними електродвигунами;
- Відмова від системи тиристорного керування двигунами постійного струму;
- Плавне регулювання швидкості обертання барабана для рівномірного розподілу продукту по його стінках;
- Підвищення продуктивності центрифуги;
- Скорочення кількості контактної апаратури;
- Енергозбереження завдяки керованому електроприводу;
- Розробка автоматизованої системи управління на базі програмованого логічного контролера відповідно до заданого алгоритму роботи.

Метою цієї роботи, на основі проведеного аналізу, є створення автоматизованого електроприводу центрифуги з частотним керуванням та розробка системи його автоматизації.

### 4.3 Розробка функціональної схеми САЕП та розрахунок її параметрів

Згідно поставлених задач проектування розроблено функціональну схему яка зображена на рисунку 4.3 [13].

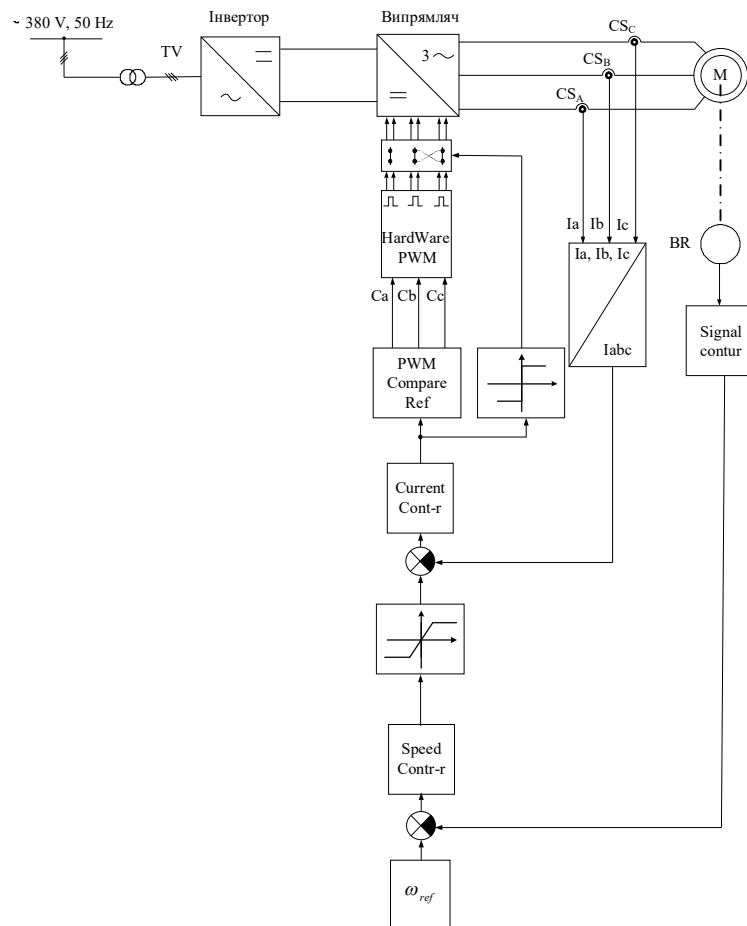


Рисунок 4.3 – Функціональна схема електропривода

В даній функціональній схемі передбачено контури зворотніх зв'язків, а саме по струму та швидкості.

Лінеаризована модель АД описується рівнянням [13]:

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{s_k} \cdot s = \frac{2 \cdot M_k}{s_k} \cdot \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right) = \frac{2 \cdot M_k}{s_k \cdot \omega_0} \cdot (\omega_0 - \omega) = \beta \cdot (\omega_0 - \omega), \quad (4.21)$$

де  $\beta$  – модуль жорсткості лінеаризованої статичної механічної характеристики АД.

Відповідно до рівняння (4.21) структурна схема лінеаризованої моделі АД зображена на рисунку 4.4 [13].

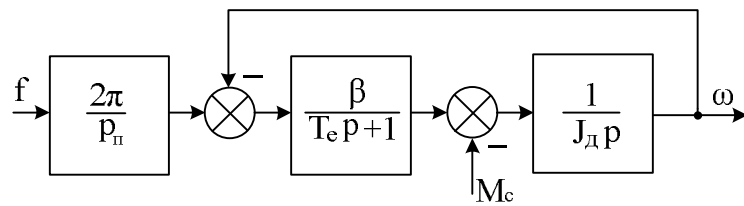


Рисунок 4.4 – Структурна схема лінеаризованої моделі АД

Модуль жорсткості лінеаризованої статичної механічної характеристики АД [13]:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_0 \cdot s_k}, \quad (4.22)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 41,8}{104,7 \cdot 0,21} = 3,77.$$

Електромагнітна стала часу АД [13]:

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k}, \quad (4.23)$$

$$T_e = \frac{1}{104,7 \cdot 0,21} = 0,045(\text{с}).$$

Передаточна функція лінеаризованої моделі АД [13]:

$$W_{\text{АД}}(p) = \frac{\beta}{T_e \cdot p + 1}, \quad (4.24)$$

$$W_{\text{АД}}(p) = \frac{3,77}{0,045 \cdot p + 1}.$$

Передаточна функція механічної частини АД [13]:

$$W_{\text{АД мех}}(p) = \frac{1}{J_{\text{пр}} \cdot p}, \quad (4.25)$$

де  $J_{\text{пр}}$  – приведення значення моменту інерції привода,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ,

$$W_{\text{АД мех}}(p) = \frac{1}{0,013 \cdot p}.$$

Структурна схема двоконтурної системи електроприводу типу ПЧ-АД із внутрішнім зворотним зв'язком за моментом, оскільки сигнал струму в моделі явно не представлений, а швидкість – наведена на рисунку 4.5.

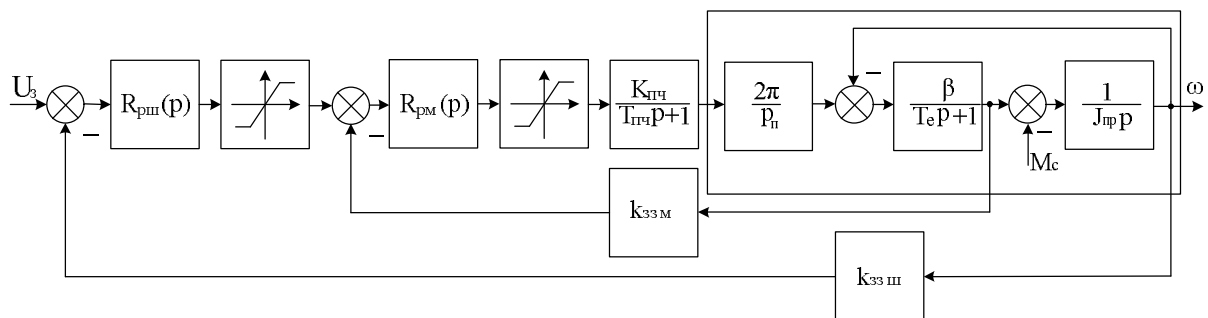


Рисунок 4.5 – Структурна схема електропривода за системою ПЧ-АД

Коефіцієнт підсилення перетворювача частоти [13]:

$$K_{\text{пч}} = \frac{f_{\text{max}}}{U_{\text{max}}}, \quad (4.26)$$

де  $f_{\text{max}}$  – максимальна частота ( $f_{\text{max}} = 50 \text{ Гц}$ );

$U_{\text{max}}$  – максимальна напруга за датчика інтенсивності ( $U_{\text{max}} = 10 \text{ В}$ ),

$$K_{\text{пч}} = \frac{50}{10} = 5.$$

Передаточна функція перетворювача частоти [13]:

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{K_{\text{пч}}}{T_{\text{пч}} \cdot p + 1}, \quad (4.27)$$

де  $T_{\text{пч}}$  – стала часу перетворювача частоти ( $T_{\text{пч}} = 0,005$  с),

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{5}{0,005 \cdot p + 1}.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю [13]:

$$k_{\text{зз ш}} = \frac{U_{\text{max}}}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (4.28)$$

$$k_{\text{зз ш}} = \frac{10}{99,4} = 0,1.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за моментом [13]:

$$k_{\text{зз м}} = \frac{U_{\text{max}}}{M_k}, \quad (4.29)$$

де  $M_k$  – максимальний момент двигуна,

$$k_{\text{зз м}} = \frac{10}{48,68} = 0,24.$$

Розглянемо окремо внутрішній контур струму та зовнішній контур швидкості.

Розглянемо внутрішній контур регулювання моменту (рисунок 4.6).

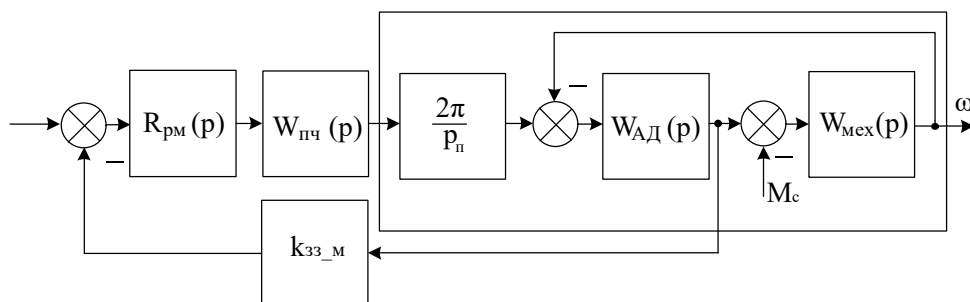


Рисунок 4.6 – Структурна схема внутрішнього контура моменту



Зведемо внутрішній контур моменту до одиничного зворотного зв'язку (рисунок 4.7) [13].

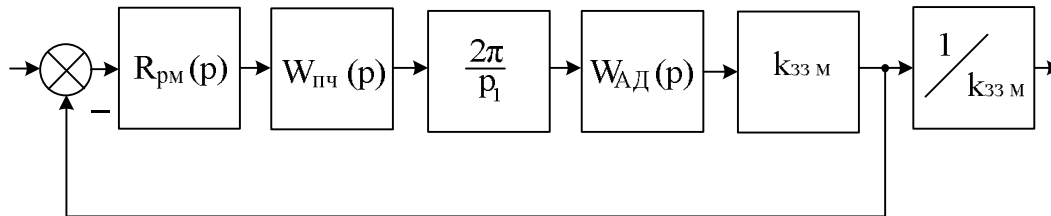


Рисунок 4.7 – Структурна схема внутрішнього контура моменту зведеного до одиничного зворотного зв'язку

Передаточна функція об'єкта регулювання внутрішнього контура моменту [13]:

$$W_m(p) = W_{пч}(p) \cdot \frac{2\pi}{p_1} \cdot W_{АД}(p) \cdot k_{зз_м}, \quad (4.30)$$

$$W_m(p) = \frac{9,42}{(0,005 \cdot p + 1) \cdot (0,045 \cdot p + 1)},$$

Загальна передаточна функція контура моменту [13]:

$$G_m(p) = R_{рм}(p) \cdot W_m(p), \quad (4.31)$$

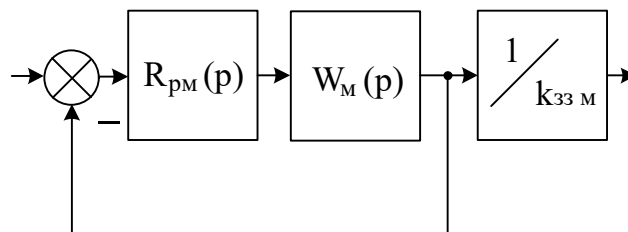


Рисунок 4.8 – Структурна схема внутрішнього контура моменту зведеного до одиничного зворотного зв'язку

Згідно модульного критерію оптимізації [13]:

$$G_M(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{0M} \cdot p \cdot (T_{0M} \cdot p + 1)}, \quad (4.32)$$

де  $T_{0M}$  – мала некомпенсована стала часу контуру моменту (приймаємо сталу часу перетворювача частоти  $T_{0M} = T_{пч} = 0,005$  с, оскільки вона є найменшою),

$$G_M(p) = \frac{100}{p \cdot (0,005 \cdot p + 1)}.$$

Передаточна функція регулятора моменту [13]:

$$R_{pm}(p) = \frac{G_M(p)}{W_M(p)}, \quad (4.33)$$

$$R_{pm}(p) = \frac{0,48 \cdot p + 10,6}{p}.$$

Як випливає з отриманої передаточної функції, в якості регулятора моменту буде ІІІ-регулятор.

Розглянемо зовнішній контур регулювання швидкості.

Зведемо зовнішній контур швидкості до одиничного зворотного зв'язку (рисунок 4.9) [13].

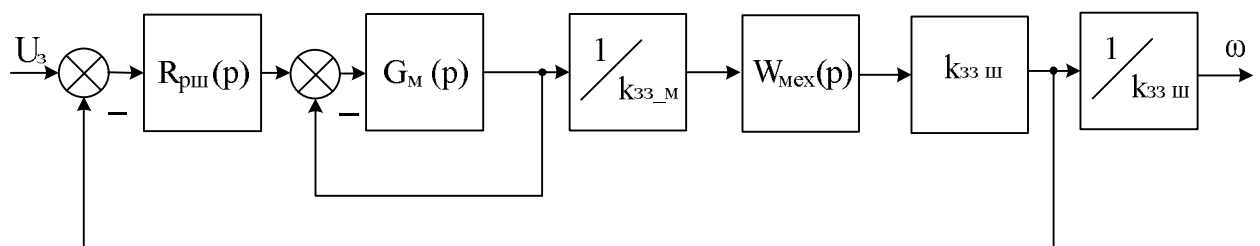


Рисунок 4.9 – Структурна схема зовнішнього контура швидкості  
зведеного до одиничного зворотного зв'язку

Передаточна функція контура регулювання моменту зведеного до одиничного зворотного зв'язку:

$$W_{\text{мм}}(p) = \frac{G_{\text{м}}(p)}{1 + G_{\text{м}}(p)}, \quad (4.34)$$

$$W_{\text{мм}}(p) = \frac{100}{p \cdot (0,005 \cdot p + 1) \cdot \left[ \frac{100}{p \cdot (0,005 \cdot p + 1)} + 1 \right]}.$$

Передаточна функція об'єкта регулювання зовнішнього контура швидкості:

$$W_{\text{ш}}(p) = W_{\text{мм}}(p) \cdot \frac{1}{k_{\text{зз м}}} \cdot W_{\text{мех}}(p) \cdot k_{\text{зз ш}}, \quad (4.35)$$

$$W_{\text{ш}}(p) = \frac{3237,7}{p^2 \cdot \left[ \frac{100}{p \cdot (0,005 \cdot p + 1)} + 1 \right] \cdot (0,005 \cdot p + 1)}.$$

Загальна передаточна функція контура швидкості [13]:

$$G_{\text{ш}}(p) = R_{\text{рш}}(p) \cdot W_{\text{ш}}(p), \quad (4.36)$$

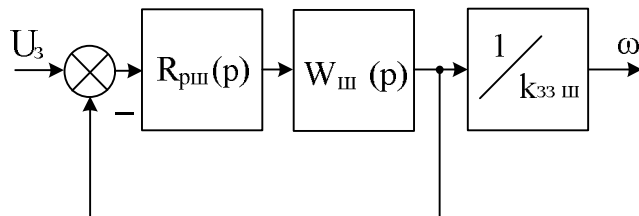


Рисунок 4.9 – Структурна схема зовнішнього контура швидкості зведеного до одиничного зворотного зв'язку

Згідно модульного критерію оптимізації:

$$G_{\text{ш}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{0\text{ш}} \cdot p \cdot (T_{0\text{ш}} \cdot p + 1)}, \quad (4.37)$$

де  $T_{0\text{м}}$  – мала некомпенсована стала часу контура швидкості (приймаємо сталу часу перетворювача частоти  $T_{0\text{ш}} = T_{\text{пч}} = 0,005$  с, оскільки вона є найменшою),

$$G_{\text{ш}}(p) = \frac{100}{p \cdot (0,005 \cdot p + 1)}.$$

Передаточна функцію регулятора швидкості [13]:

$$R_{\text{рш}}(p) = \frac{G_{\text{ш}}(p)}{W_{\text{ш}}(p)}, \quad (4.38)$$

$$R_{\text{рш}}(p) = 0,031 \cdot p \cdot \left[ \frac{100}{p \cdot (0,005 \cdot p + 1)} \right].$$

Як впливає з отриманої передаточної функції, в якості регулятора швидкості буде ПІ-регулятор.

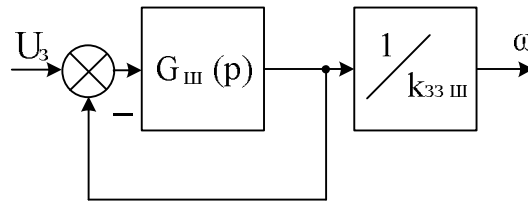


Рисунок 4.10 – Структурна схема зовнішнього контура швидкості зведеного до одиничного зворотного зв'язку

Передаточна функція контура регулювання швидкості зведеного до одиничного зворотного зв'язку:

$$W_{\text{шш}}(p) = \frac{G_{\text{ш}}(p)}{1 + G_{\text{ш}}(p)}, \quad (4.39)$$

$$W_{\text{шш}}(p) = \frac{100}{p \cdot (0,005 \cdot p + 1) \cdot \left[ \frac{100}{p \cdot (0,005 \cdot p + 1)} + 1 \right]},$$

Загальна передаточна функція системи електричного привода [13]:

$$W(p) = W_{\text{шш}}(p) \cdot \frac{1}{k_{\text{ш33}}}, \quad (4.40)$$

$$W(p) = \frac{993,7}{p \cdot (0,005 + 1) \cdot \left[ \frac{100}{p \cdot (0,005 + 1)} + 1 \right]}.$$

Розрахуємо задавач інтенсивності, структура якого зображена на рисунку 4.11.

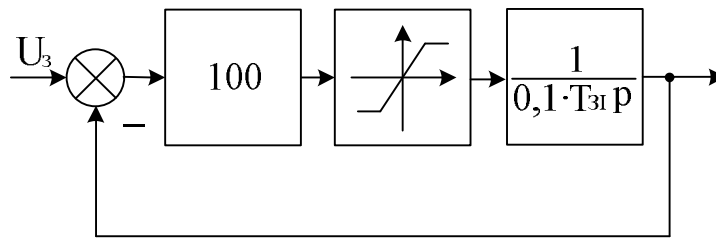


Рисунок 4.11 – Структурна схема задавача інтенсивності

Постійна часу задавача інтенсивності [13]:

$$T_{зи} = \frac{J_{нав} \cdot \omega_{ном}}{M_{ном}}, \quad (4.41)$$

$$T_{зи} = \frac{0,013 \cdot 99,4}{22,1} = 0,058(\text{с}).$$

#### 4.4 Вибір засобів автоматизації технологічного механізму

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена вивченню системи електроприводу ротора центрифуги. З огляду на необхідність автоматизації цього технологічного процесу було прийнято рішення оновити електричну принципову схему з урахуванням можливостей сучасного програмованого контролера.

Спочатку зосередимося на виборі сучасного частотного перетворювача.

Основні умови вибору частотного перетворювача наведені у джерелі [10]:

$$\begin{cases} P_{ПЧ} \geq P_{дв.сп}, \\ I_{ПЧ} \geq I_{дв.н}, \end{cases} \quad (4.42)$$

$P_{дв.сп}$  – споживана приводним двигуном потужність в номінальному режимі, кВт;

$I_{дв.н}$  – номінальний струм приводного двигуна, А.

$$P_{\text{дв.сп}} = \frac{k \cdot P_{\text{дв.н}}}{\eta_{\text{дв.н}}}, \quad (4.43)$$

де  $k$  - коефіцієнт спотворення струму на вході перетворювача ( $k=0,95$ ).

$$P_{\text{дв.сп}} = \frac{0,95 \cdot 2,2}{0,81} = 2,6(\text{кВт}).$$

Додатково перевіряємо перетворювач частоти за такою умовою [10]:

$$P_{\text{ПЧ}} \geq \frac{P_{\text{дв.пуск}}}{\lambda_{\text{ПЧ}}}, \quad (4.44)$$

де  $P_{\text{дв.пуск}}$  – пускова потужність приводного двигуна, кВт;

$\lambda_{\text{ПЧ}}$  – перевантажувальна здатність перетворювача ( $\lambda_{\text{ПЧ}}=1,7$ ).

$$P_{\text{ПЧ}} \geq \frac{4,3}{1,7},$$

$$P_{\text{ПЧ}} \geq 2,5(\text{кВт}).$$

Пускова потужність приводного двигуна [10]:

$$P_{\text{дв.пуск}} = \frac{k \cdot n}{9550 \cdot \eta_{\text{дв.н}} \cdot \cos\varphi} \cdot (M_{\text{cl}} + M_{\text{д}}), \quad (4.45)$$

$$P_{\text{дв.пуск}} = \frac{0,95 \cdot 949}{9550 \cdot 0,81 \cdot 0,73} \cdot (22,1 + 6,1) = 4,3(\text{кВт}).$$

Додатково перевіряємо перетворювач частоти за такою умовою [10]:

$$I_{\text{ПЧ.пуск}} \geq \frac{k \cdot n}{9,55 \cdot \eta_{\text{дв.н}} \cdot \cos\varphi \cdot U_{\phi} \cdot \sqrt{3}} \cdot (M_{\text{cl}} + M_{\text{д}}), \quad (4.46)$$

$$I_{\text{ПЧ.пуск}} \geq \frac{0,95 \cdot 949}{9,55 \cdot 0,81 \cdot 0,73 \cdot 219,4 \cdot \sqrt{3}} \cdot (22,1 + 6,1),$$

$$I_{\text{ПЧ.пуск}} \geq 11,8(\text{А}).$$

Виходячи з даних умов, обираємо перетворювач частоти Siemens Micromaster 440 6SE6440-2AB23-0CA1. Паспортні дані перетворювача частоти наведені в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Паспортні дані перетворювача частоти

|                                                       |                                               |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Тип перетворювача частоти                             | Siemens Micromaster 440<br>6SE6440-2AB23-0CA1 |
| Номінальна потужність $P_{ПЧ}$ , кВт                  | 3                                             |
| Розрахунковий вхідний струм $I_{ПЧ.пуск}$ , А         | 20                                            |
| Розрахунковий вихідний струм $I_{ПЧ}$ , А             | 24                                            |
| Номінальний коефіцієнт потужності $\cos\phi$          | 0,95                                          |
| Номінальний коефіцієнт корисної дії $\eta_{дв.н}$ , % | 97                                            |
| Напруга мережі, В                                     | 3 АС 200÷240 ± 10%                            |
| Частота мережі, Гц                                    | 47÷63                                         |
| Перевантажувальна здатність $\lambda_{ПЧ}$            | 1,7                                           |

Зовнішній вигляд перетворювача частоти Micromaster 440 зображено на рисунку 4.12.



Рисунок 4.12 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти Micromaster

Підключення до мережі Profibus здійснюється за допомогою спеціального модуля зв'язку PROFIBUS (рисунок 4.13)



Рисунок 4.13 – Зовнішній вигляд додаткового модуля зв'язку PROFIBUS

Micromaster 440 може застосовуватися як індивідуально, так і інтегруватися в автоматизовані системи (обмін даними здійснюється по мережі Profibus) [12].

Живлення модуля зв'язку PROFIBUS може бути:

- внутрішнє  $6,5 \text{ В} \pm 5 \%$  від перетворювача частоти (через роз'єм);
- зовнішнє  $24 \text{ В} \pm 10 \%$ . У цьому випадку живлення модуля зв'язку та електроніки перетворювача буде незалежним від перетворювача частоти, тобто зберігається можливість зв'язку навіть при відключенні перетворювача від мережі живлення [12].

Адреса перетворювача в мережі PROFIBUS може встановлюватися двома способами:

1) апаратним – адреса встановлюється за допомогою DIP-перемикачів PROFIBUS (рис. 4.15, табл.4.3);





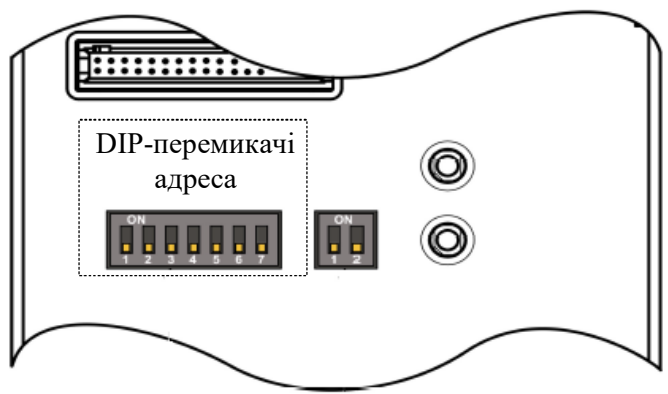


Рисунок 4.15 – DIP-перемикачі адреса PROFIBUS

Таблиця 4.3 – Вибір адреси за допомогою DIP-перемикачів

|                                           |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Номер перемикача, n                       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |
| Додати до значення адреса, 2 <sup>n</sup> | 1   | 2   | 4   | 8   | 6   | 2   | 4   |
| Приклади:                                 |     |     |     |     |     |     |     |
| адрес = 3 = 1+2                           | on  | on  | off | off | off | off | off |
| адрес = 88 = 8+16+64                      | off | off | off | on  | on  | off | on  |

Апаратно встановлений адрес має пріоритет, тому для установки адреса за допомогою параметра P0918 всі DIP-перемикачі повинні бути встановлені в нижнє положення [12].

Деякі адреси мають особливе значення (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Значення адресів PROFIBUS

|          |                                              |
|----------|----------------------------------------------|
| Адреса   | Значення                                     |
| 0        | Адрес PROFIBUS визначається параметром P0918 |
| 1...125  | Дійсний адрес PROFIBUS                       |
| 126, 127 | Недійсний адрес PROFIBUS                     |

Установку адреси за допомогою DIP-перемикачів слід виконувати лише при вимкненому перетворювачі (без напруги) на вже встановленому модулі

PROFIBUS. Зміни положення перемикачів набувають чинності тільки після повторного запуску модуля зв'язку. Повторний запуск здійснюється шляхом вимкнення та ввімкнення живлення, як у випадку живлення модуля від перетворювача, так і при живленні від зовнішнього блоку живлення 24 В.

Для модернізації електричної принципової схеми було прийнято рішення застосувати сучасні мікропроцесорні рішення. Для інтеграції всіх необхідних функцій у двох автоматизованих пристроях обрано програмоване логічне реле LOGO! 12/24RC (див. рисунок 4.16) виробництва Siemens.



Рисунок 4.16 – Програмоване логічне реле LOGO! 12/24RC

**LOGO! 12/24RC.** LOGO!– це універсальний логічний модуль фірми Siemens.

LOGO включає в себе:

- пристрій керування;
- панель керування та індикації з фоновою підсвіткою;
- блок живлення;
- інтерфейс для модулів розширення;
- інтерфейс для програмного модуля і кабелю PC;
- готові стандартні функції, часто використовуємі на практиці, наприклад, функції затримки ввімкнення та вимкнення, імпульсного реле і програмована клавіша;

- часовий вимикач;
- цифрові та аналогові флаги;
- входи та виходи в відповідності з типом приладу.

Таблиця 4.5 – Характеристики базового пристрою та цифрового модуля розширення LOGO

| Найменування характеристики                              | Базовий пристрій LOGO 12/24 RC | Цифровий модуль LOGO DM8 12/24 R |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| <b>Блок живлення</b>                                     |                                |                                  |
| Вхідна напруга                                           | 12/24 В                        | 12/24 В                          |
| Допустимий діапазон                                      | 10.8...28.8 В                  | 10.8...28.8 В                    |
| Захист від зворотної полярності                          | Так                            | Так                              |
| Споживання струму 24 В постійного струму                 | 20...75 мА                     | 20...75 мА                       |
| Буферизація при зникненні напруги 24 В постійного струму | 2 мс                           | 2 мс                             |
| Потужність втрат 24 В постійного струму                  | 0.4...1.8 Вт                   | 0.4...1.8 Вт                     |
| <b>Цифрові входи</b>                                     |                                |                                  |
| Кількість                                                | 8                              | 4                                |
| Гальванічна розв'язка                                    | Ні                             | Ні                               |

Кожний базовий пристрій LOGO Basic може бути розширений за допомогою модулів розширення: цифрових або аналогових.

Максимальна кількість підключених цифрових модулів розширення – 4. LOGO Basic незалежно від кількості підключених модулів розширення дозволяє використати такі входи і виходи :

- цифрові входи I1 – I5; - цифрові виходи Q1 – Q9;
- 4 клавіші керування курсором.

Таблиця 4.5 – Характеристики базового пристрою та цифрового модуля розширення LOGO

| <b>Найменування характеристики</b>                       | <b>Базовий пристрій LOGO 12/24 RC</b>                                           | <b>Цифровий модуль LOGO DM8 12/24 R</b>      |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Вхідна напруга<br>сигнал 0<br><br>сигнал 1               | <5 В змінного струму<br><br>>8 В змінного струму                                | <5 В змінного струму<br>>8 В змінного струму |
| Вхідний струм при<br>сигнал 0<br><br>сигнал 1            | <1.0 мА (I1...I3)<br><0.05 мА (I4, I5)<br>>1.5 мА (I1...I3)<br>>0.1 мА (I4, I5) | <1.0 мА<br><br>>1.5 мА                       |
| Давжина лінії                                            | 10 м                                                                            | 10 м                                         |
| <b>Цифрові виходи</b>                                    |                                                                                 |                                              |
| кількість                                                | 4                                                                               | 4                                            |
| Типи виходів                                             | Релейні виходи                                                                  | Релейні виходи                               |
| Керування цифровим входом                                | Так                                                                             | Так                                          |
| Довготривалий струм                                      | 10 А на реле                                                                    | 10 А на реле                                 |
| Паралельне підключення виходів для підвищення потужності | Не дозволяється                                                                 | Не дозволяється                              |

Робота системи автоматизації технологічного механізму базується на заміні аналогових компонентів — таких як часові реле, контактори та елементи захисту, що формують логіку релейно-контакторної схеми — одним мікроконтролером SIEMENS LOGO.

LOGO здійснює керування котушками контакторів КМ у заданій послідовності включення, аналогічно функціонуванню часових реле.

Програмне забезпечення LOGO Soft Comfort включає такі можливості:

- графічний інтерфейс для створення комутаційної програми в offline-режимі у вигляді логічної схеми (контактний план / комутаційна схема) або функціональної блок-схеми (функціональний план);
- імітація комутаційної програми на комп'ютері, генерація та друк блок-схем;
- збереження програм на жорсткому диску або інших носіях;
- порівняння різних версій комутаційних програм;
- зручна параметризація блоків і передача програми між LOGO та ПК;
- зчитування лічильника робочого часу;
- тестування в режимі online із відображенням станів і поточних значень змінних у LOGO під час виконання (режим RUN): стани всіх цифрових входів і виходів, прапорів, бітів зсуву, клавіш управління, а також значення аналогових входів, виходів, прапорів і результати роботи блоків;
- можливість зупинки виконання програми з ПК (команда STOP).
- Особливо корисними для користувача є такі функції:
- імітація програми в offline-режимі;
- одночасне відображення станів декількох спеціальних функцій;
- розширене документування програми;
- відображення станів і фактичних значень змінних LOGO у режимі RUN.

**Панель НМІ** (інтерфейс «людина-машина») — це компактний обчислювальний пристрій з вбудованим рідкокристалічним дисплеєм, призначений для відображення параметрів технологічного процесу (об'єкта) та забезпечення операторського управління. Для ролі операційної панелі було обрано пристрій типу ОР 170В (див. рисунок 4.17).

Для реалізації функцій керування панелі комплектуються кнопковими блоками або сенсорними екранами (touch screens).

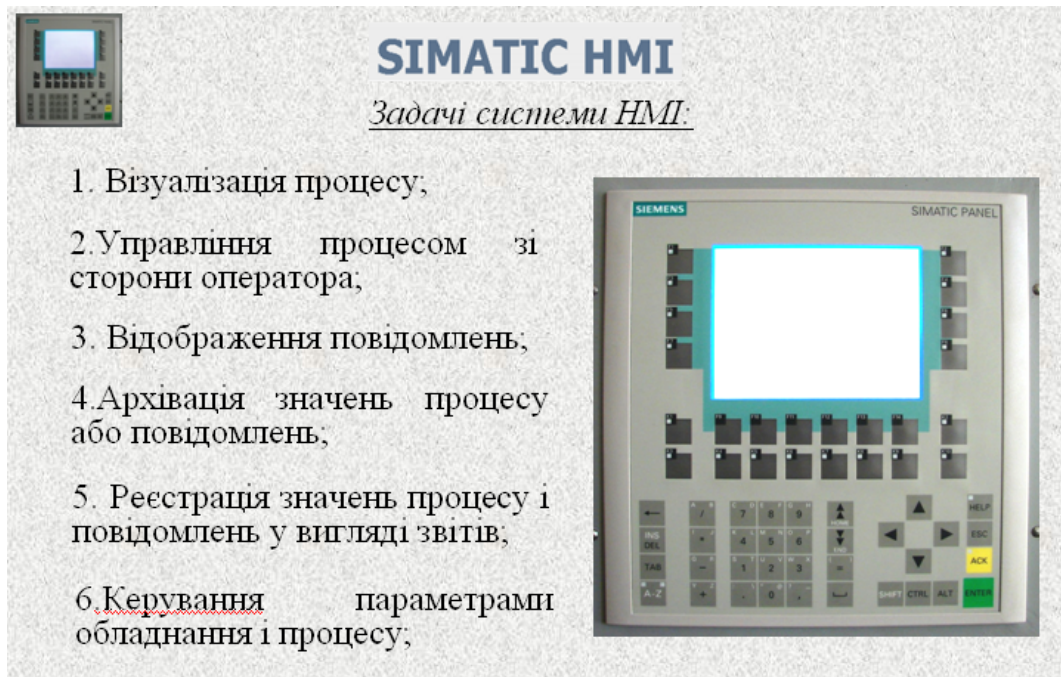


Рисунок 4.17 – Задачі системи людино-машинного інтерфейсу

Типова панель забезпечує користувачу такі можливості:

1. Відображення параметрів технологічного процесу (або об'єкта) у текстовому або графічному форматі;
2. Управління та обробка аварійних повідомлень із фіксацією часу та дати їх виникнення;
3. Ручне керування за допомогою функціональних кнопок або сенсорного екрану;
4. Можливість гнучкого програмування графічного інтерфейсу та налаштування функціональних кнопок;
5. Побудова діаграм і трендів, а також відображення зведених звітів.

У графічному режимі візуалізація процесу здійснюється за допомогою інтерактивних мнемосхем, які створюються в програмному середовищі WinCC flexible. Це середовище призначене для розробки та редагування проектів у системах із застосуванням пристроїв людино-машинного інтерфейсу. Функціонал WinCC flexible у робочому середовищі складається з кількох складових, деякі з яких пов'язані з певними редакторами (див. рисунок 4.18).

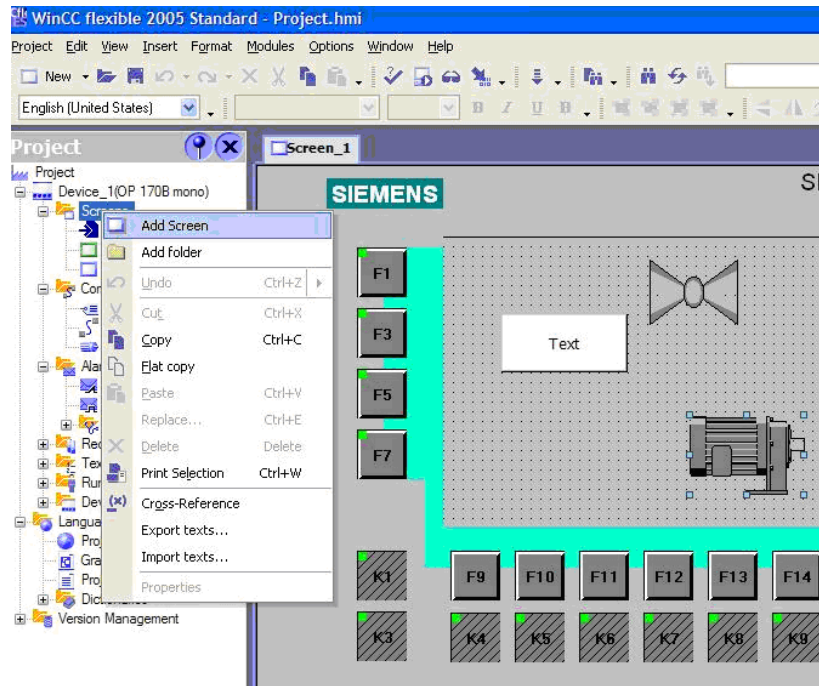


Рисунок 4.18 – Середовище програмування WinCC flexible

WinCC flexible пропонує спеціалізовані редактори для виконання різних завдань проектування. Наприклад, графічний інтерфейс користувача (GUI) будь-якого пристрою HMI створюється і налаштовується у редакторі «Screens» (Екрани) (див. рисунок 4.14). Для конфігурації дискретних повідомлень можна використовувати редактор «Discrete Alarms» (Дискретні повідомлення). У редакторі екранів відображається весь вміст папки «Screens» проекту, який наразі відкритий у вікні проекту.

Табличні редактори, такі як редактор «Tags» (Теги), показують лише об'єкти, що знаходяться у робочій області. Ці об'єкти представлені у вигляді таблиці, і їх можна редагувати безпосередньо в таблиці або через вікно властивостей.



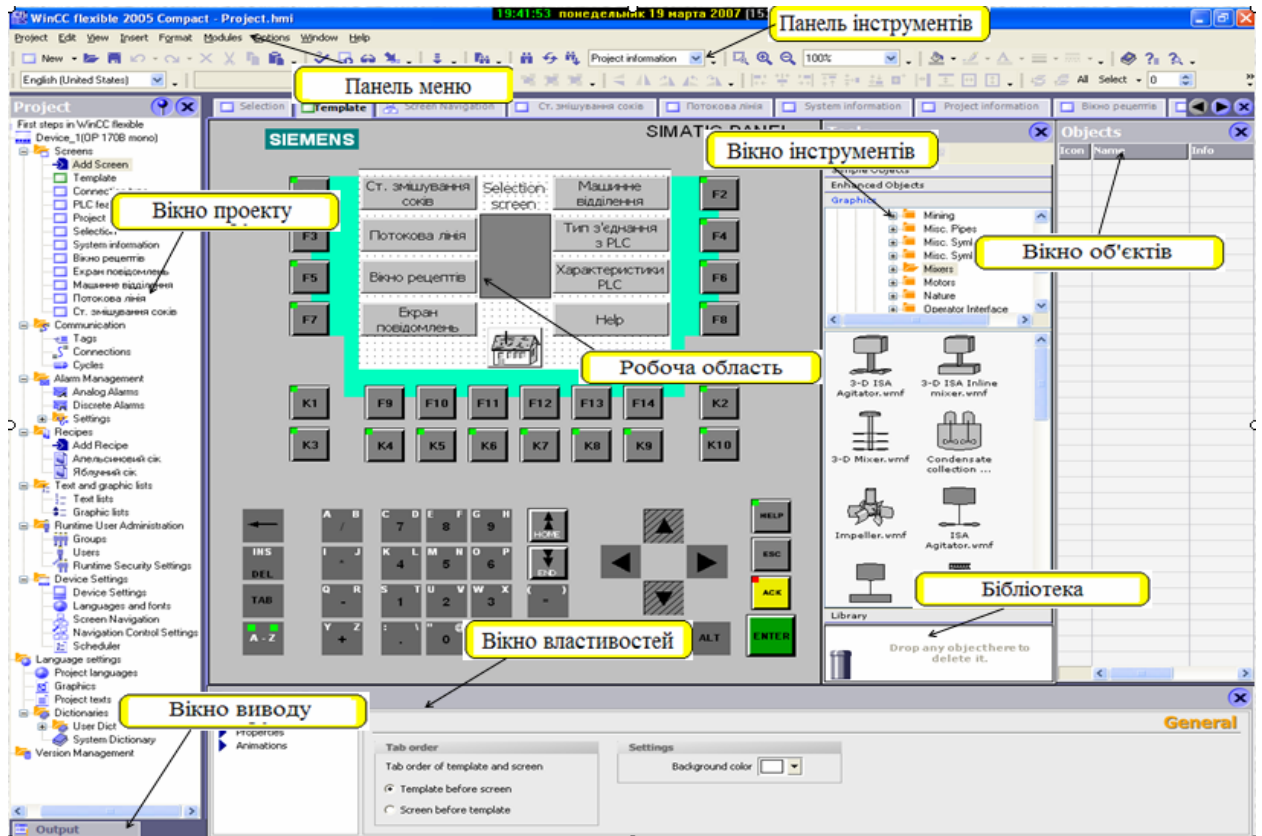


Рисунок 4.19 – Середовище створення інтерактивних мнемосхем

#### 4.5 Розробка схеми електричної принципової з використанням засобів автоматизації

Сучасна приладобудівна промисловість пропонує широкий асортимент засобів автоматизації, які відповідають вимогам цукрової промисловості. Водночас у цукровому виробництві розробляються та успішно впроваджуються спеціалізовані прилади й пристрої, необхідність використання яких обумовлена унікальними властивостями продуктів.

Ефективність впровадження автоматизації в цукровій промисловості значною мірою залежить від правильного вибору типів та розміщення датчиків і виконавчих механізмів.

Далі розглянемо роботу схеми центрифуги утфелю, яка наведена на рисунку 4.20.

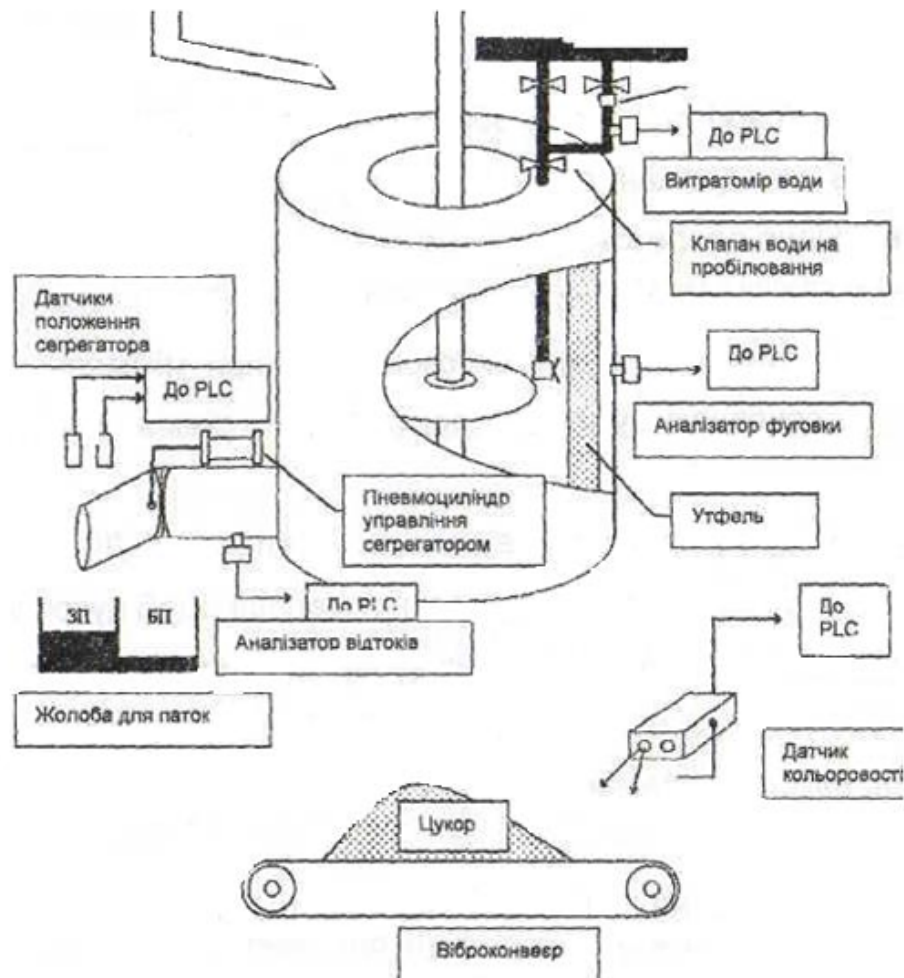


Рисунок 4.20 – Технологічна схема центрифуги

Для розробки системи автоматичного керування центрифугою необхідно описати відповідні операції в автономному режимі (див. рисунок 4.21):

- Для початку циклу натискається кнопка SB1, яка подає сигнал на запуск приводного двигуна, що розганяється до частоти обертання ротора центрифуги 230 об/хв;
- Відкривається розподільна засувка, і утфель подається до ротора центрифуги до спрацьовування датчика завантаження SQ1;
- Після отримання сигналу від датчика завантаження розподільна засувка закривається;
- Далі двигун розвиває максимальну швидкість для фугування утфелю;

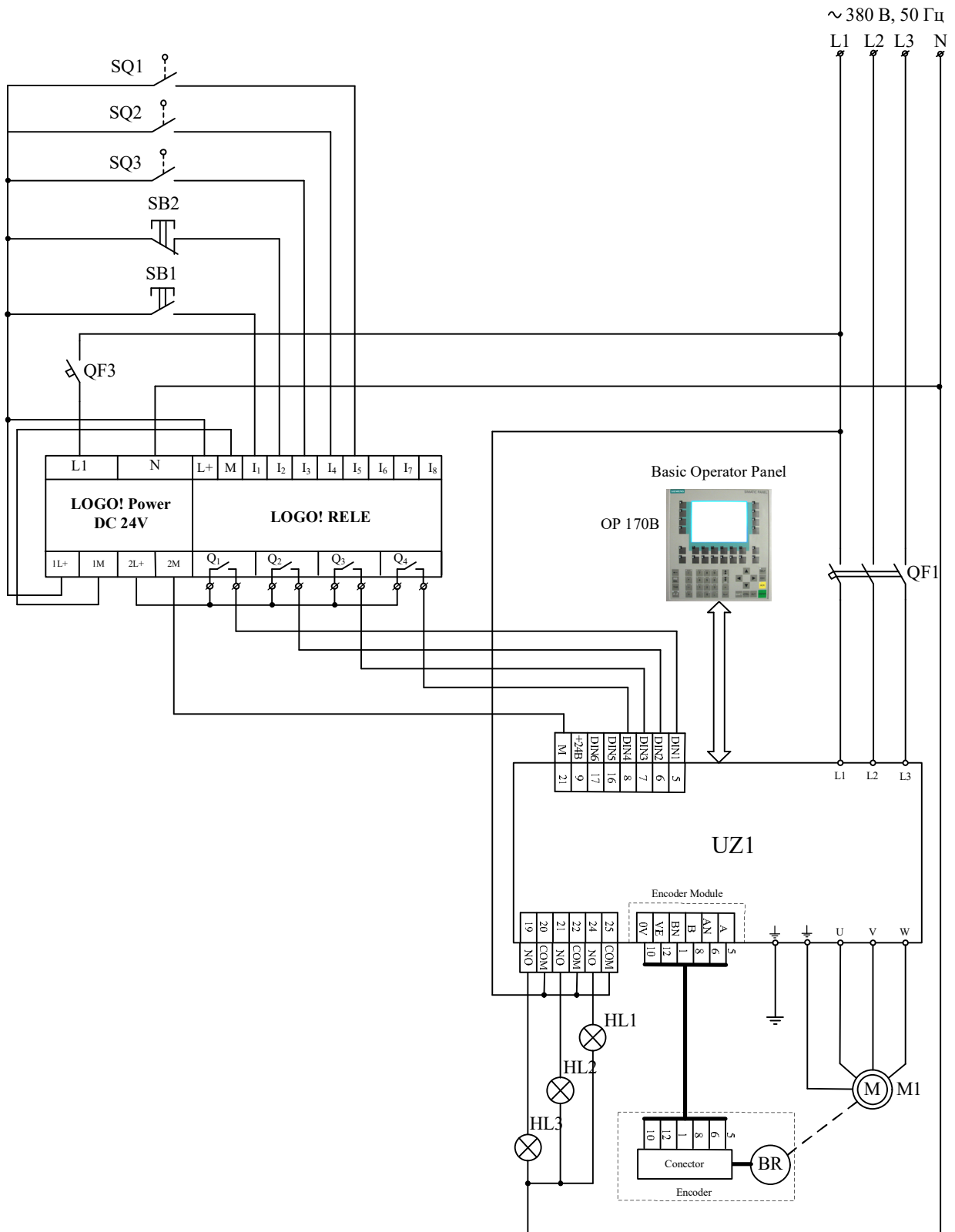


Рисунок 4.21 – Схема електрична принципова автоматизації

- після надходження сигналу від аналізатора фугування SQ2 подається промивна вода, одночасно спрацьовує датчик кольоровості що SQ3 що подає

сигнал на пневмоциліндр сегрегатора і з ротора центрифуги відводиться біла патока;

- коли матеріал досягне відповідної консистенції, приходить сигнал від аналізатора фугування SQ2 і двигун зупиняється;

- далі за допомогою пневмоциліндра підводиться ніж, спрацьовує засув для вивантаження утфелю і двигун починає обертатися в протилежному напрямку розвантажуючи утфель;

- після надходження сигналу від датчика завантаження SQ1, двигун зупиняється і відкривається засув подачі промивної води, що промиває ротор центрифуги до поки датчик відтоків SQ4 подасть сигнал про закриття подачі промивної води. Далі центрифуга готова до нового надходження утфелю для обробки.

- після надходження сигналу від аналізатора фугування SQ2 подається промивна вода, одночасно спрацьовує датчик кольоровості SQ3, який подає сигнал на пневмоциліндр сегрегатора, і з ротора центрифуги відводиться біла патока;

- коли матеріал досягає необхідної консистенції, аналізатор фугування SQ2 подає сигнал, і двигун зупиняється;

Потім за допомогою пневмоциліндра підводиться ніж, спрацьовує засув для вивантаження утфелю, а двигун починає обертатися у зворотному напрямку, розвантажуючи утфель;

Після отримання сигналу від датчика завантаження SQ1 двигун зупиняється, відкривається засув подачі промивної води, що промиває ротор центрифуги до моменту, поки датчик відтоків SQ4 не подасть сигнал на закриття подачі промивної води. Після цього центрифуга готова до нового циклу обробки утфелю.

**Висновок:** розроблено схеми електричну функціональну системи електроприводата її опис, виконано вибір засобів автоматизації технологічного процесу та розробку системи керування та вибір елементів кола керування. Обрано ПЛК для автоматизації технологічного процесу, складені і мінімізовані рівняння для вихідних змінних, а також виведені рівняння для програмування контролера.

## 5 РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Перехідний, або динамічний, режим роботи електропривода — це стан, коли привод здійснює перехід з одного стабільного режиму функціонування в інший. Такі перехідні стани виникають під час запуску двигуна, його гальмування, зміни напрямку обертання (реверсування), а також при скиданні або підключенні навантаження. У цей період відбуваються значні зміни електрорушійної сили, кутової швидкості ротора, моменту двигуна і струму, що проходить через систему [18]. Ці зміни характеризують складний фізичний процес, який потребує детального аналізу для забезпечення надійної та ефективної роботи електропривода.

Вивчення перехідних процесів є надзвичайно важливим, оскільки дозволяє правильно визначити потужність приводного двигуна, розробити оптимальну систему керування приводом, а також оцінити, як робота електропривода впливає на продуктивність і якість роботи механізмів, що ним керуються. Зокрема, це дозволяє запобігти пошкодженням, забезпечити плавність запуску та зупинки, а також підвищити загальну ефективність виробничих процесів [18].

Для дослідження перехідних процесів у роботі електропривода використовується програмний пакет Matlab Simulink. Ця платформа дозволяє створювати точні та надійні моделі електричних систем і систем промислового електропривода, забезпечуючи зручність налаштувань та аналізу. В середовищі Matlab Simulink можна моделювати різні сценарії роботи привода, оцінювати вплив змін навантаження, відпрацьовувати алгоритми керування та прогнозувати поведінку системи при різних режимах експлуатації.

На рисунку 5.1 наведена модель системи частотного перетворювача з асинхронним двигуном (ПЧ – АД). На рисунках 5.2 та 5.3 показані результати моделювання перехідних процесів, таких як запуск двигуна, скидання навантаження та накид навантаження, з аналізом змін швидкості обертання двигуна та електромеханічного моменту [15]. Ці графіки демонструють динамічну реакцію системи на різні режими роботи, що є основою для подальшої оптимізації та вдосконалення системи керування.

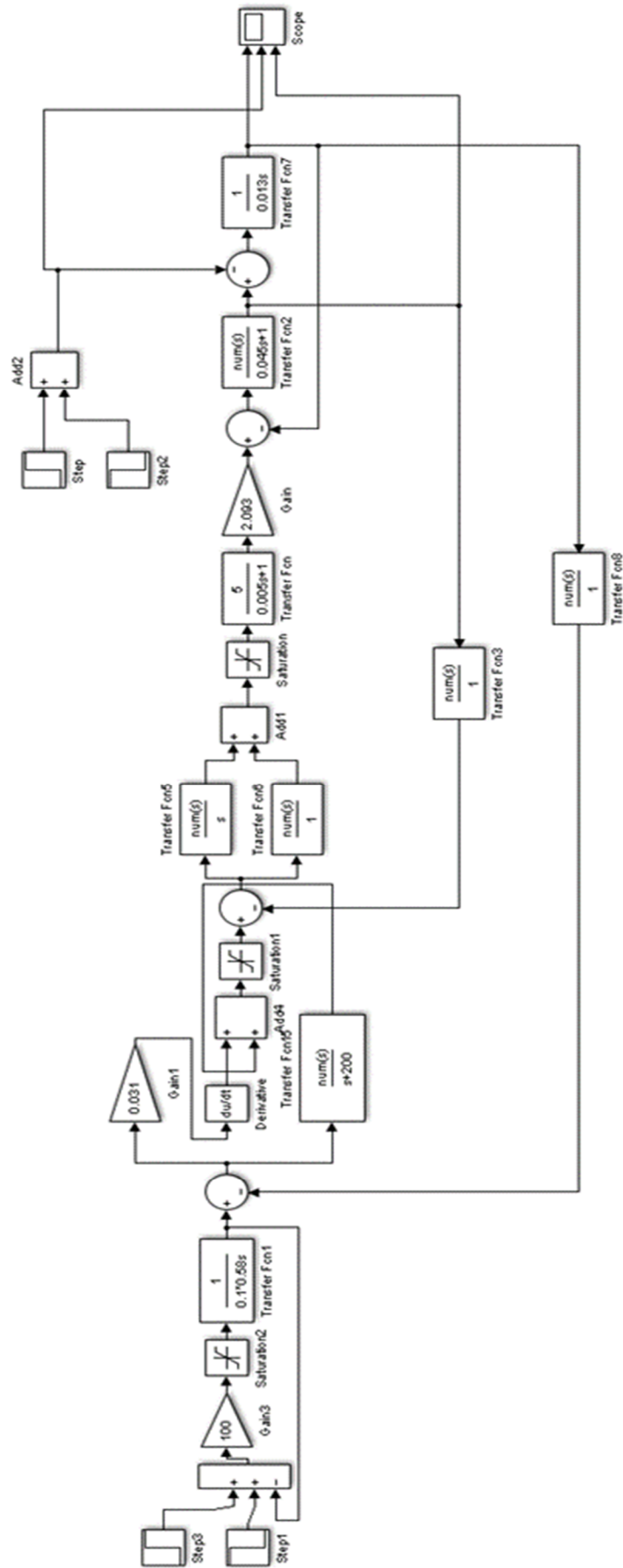


Рисунок 5.1 – Модель системи ПЧ – АД

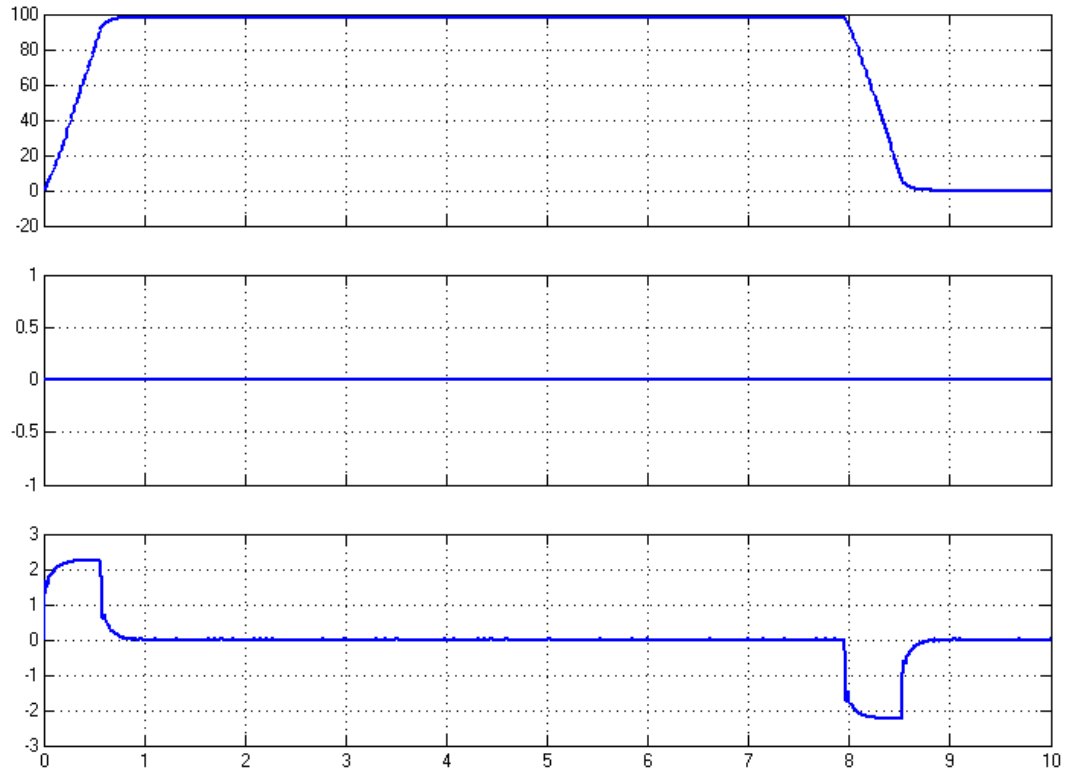


Рисунок 5.3 – Перехідні процеси системи без навантаження

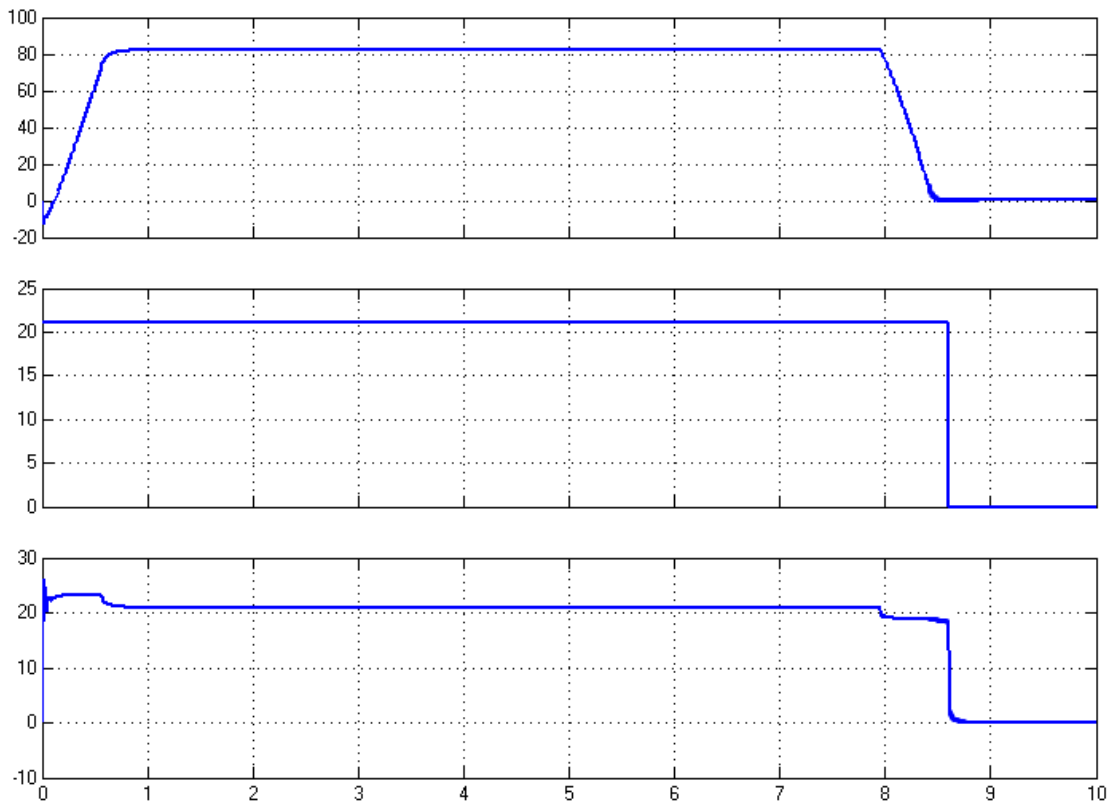


Рисунок 5.4 – Перехідні процеси навантаженої системи номінальним  
МОМЕНТОМ

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 6.1 Загальні положення

У випусковій бакалаврській роботі розглядається питання модернізації електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру. У ремонтно-механічному цеху підприємства, крім токарних верстатів, встановлено велику кількість обладнання з різними виробничими потужностями, умовами експлуатації, та характером виробничого середовища. Підприємство відноситься до I категорії електропостачання, живлення здійснюється від двох підстанцій 10/0,4 кВ, які знаходяться на відстані 0,4 км.

На електромонтерів з обслуговування технологічного обладнання ремонтно-механічного цеху впливають за ГОСТ 12.0.003-74 такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

а) фізичні:

- рухомі машини і механізми;
- рухомі частини виробничого обладнання;
- вироби, заготовки, матеріали, що пересуваються;
- підвищена та знижена температура поверхонь обладнання;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена та знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та знижена рухомість повітря;
- підвищена та знижена вологість повітря;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- небезпечне значення напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини;
- підвищений рівень інфрачервоної радіації;
- нестача природного освітлення;



- недостатнє освітлення робочої зони;
- гострі кромки, задирки та шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів та обладнання;
- в) психофізіологічні:
  - фізичні перевантаження (динамічні)
  - нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

## **6.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта**

Живлення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. У приміщенні цеху використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у робочому приміщенні є струмопровідною.

В якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

В установках напругою до 1 кВ огороження роблять суцільними. Безпечні відстані між огороженнями і не ізольованими струмоведучими частинами регламентується ПУЕ і в установках до 1 кВ із суцільними огороженнями – 5 см. Висота розміщення не огорожених струмоведучих частин залежить від значення напруги і рівня підготовки людей, що працюють з електроустаткуванням. Струмоведучі частини напругою до 1 кВ у місцях, де

працюють люди, висота розміщення повинна бути не менше 3,5 м. Постійний контроль за ізоляцією, тому що протягом часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробію і створити небезпеку при дотику людини до ізольованих проводів. Використовують наступні кольори для маркування ізоляції: чорна - для силових ланцюгів; червона - для ланцюгів керування.

Обов'язкова установка захисного заземлення та захисного відключення. При роботі з електроустаткуванням використовують основні і додаткові електрозахисні засоби. До основних відносяться: ізолюючі штанги; ізолюючі і струмовимірювальні кліщі; слюсарно-монтажні інструменти з ізолюючим руків'ям. До додаткових відносяться: діелектричні рукавички; переносне заземлення; огорожуючі пристосування; плакати та знаки безпеки.

На ключах керування і приводах роз'єднувачів віддільників і вимикачах навантаження, а також на підставках запобіжників, за допомогою яких може бути подана напруга до місця робіт, вивішують плакат: "Не включати - працюють люди". На вентилях, що закривають доступ повітря в пневматичні приводи таких апаратів, вивішується плакат: "Не відкривати - працюють люди".

Передбачена проектом апаратура повинна експлуатуватися у відповідності з паспортними значеннями номінального струму та напруги. В процесі експлуатації слід постійно контролювати стан контактних сполучень та ізоляції апаратури, відсутність слідів дуги та оплавлення ошинування, опір ізоляції силових та освітлювальних мереж, правильність підключення. На всіх підготовлених місцях роботи після накладається заземлення вивішується плакат "Працювати тут".

Зону обробки універсальних верстатів, призначених для обробки заготовок діаметром до 630 мм включно, необхідно обгороджувати захисним пристроєм (екраном). З боку, протилежного робочому місцю, у цій зоні також повинен бути екран. Затискні патрони універсальних токарних та токарно-револьверних верстатів повинні мати огороження, яке можна легко

відводити убік під час установлювання та знімання заготовок, не обмежуючи технологічні можливості верстатів.

Забороняється згвинчувати патрон (планшайбу) раптовим гальмуванням шпинделя. Згвинчувати патрон (планшайбу) ударами кулачків об підставку допускається тільки у разі його ручного обертання; в цьому випадку повинні застосовуватись підставки з довгими ручками.

Допускається закріплювати в кулачковому патроні без підпирання центром задньої бабки тільки короткі, завдовжки не більше двох діаметрів, зрівноважені деталі; в іншому разі для підпирання необхідно використовувати задню бабку. Для обробки в центрах деталей завдовжки 12 діаметрів і більше, а також у разі швидкісного та силового різання деталей завдовжки 8 діаметрів і більше необхідно застосовувати додаткові опори (люнети). Перед обробкою деталей в центрах спочатку необхідно перевірити закріплення задньої бабки і тільки після встановлення деталі змастити центр; задній центр під час виконання робіт також повинен періодично змащуватись, а у разі обробки довгомірних деталей – повинен перевірятись також осьовий затискач.

Пруткові токарні автомати та пруткові револьверні верстати повинні мати по всій довжині прутків огороження, оснащене шумопоглинальним пристроєм. У разі застосування огороження у вигляді напрямних труб, що обертаються разом із прутками (або коли прутки із заднього боку виступають за межі огорожі), прутковий магазин повинен мати кругове огороження по всій довжині. Розміщений зовні верстата пристрій для подавання прутків повинен мати огороження, яке не перешкоджає доступу до цього пристрою. Універсальні верстати у разі використання їх для обробки прутків повинні бути, за необхідності, оснащені пристроєм, який обгороджує пруток з боку задньої частини шпинделя. Пруток не повинен виступати за відгороджувальний пристрій.

Різці необхідно закріплювати з мінімально можливим вильотом з різцетримача (виліт різця не повинен перевищувати більше ніж у 1,5 раза висоту державки) і не менше ніж двома болтами. Різальна кромка різця повинна виставлятися по осі оброблюваної деталі. Для правильного установалення різців відносно осі центрів та підвищення надійності закріплення їх у супорті необхідно застосовувати шліфовані прокладки. Прокладки повинні відповідати лінійним опорам частини державки різців.

Для обробки в'язких металів (сталей), що дають зливну стрічкову стружку, необхідно застосовувати різці з викружками, накладним і стружколамачами або стружкозавивачами. Для обробки крихких металів (чавуну, бронзи тощо) з утворенням мілко-подрібненої сталеві стружки необхідно застосовувати захисні пристрої: спеціальні стружковідвідники, прозорі екрани або індивідуальні щитки для захисту обличчя.

У разі замінювання супорта, під час установалювання або знімання деталей та інструмента, ручної обробки деталі (зачищення, шліфування), усунення биття револьверну головку та супорт з інструментом необхідно відводити на безпечну відстань. Для зачищення виробів на верстаті шкуркою або порошком необхідно застосовувати притискні колодки.

Забороняється під час виконання робіт на металообробних верстатах токарної групи:

- користуватись затискними патронами, – якщо спрацьовані робочі площини кулачків;
- працювати з необертним центром задньої бабки – у разі швидкісного різання;
- працювати без закріплення патрона сухарями – для запобігання самовідвертанню у разі реверсування;
- гальмувати обертання шпинделя натискуванням руки на обертіві частини верстата або деталі;
- залишати в револьверній головці інструмент, який не використовується

для обробки даної деталі;

- перебувати між деталлю та верстатом – під час установаження деталі на верстат;

- притримувати руками кінець важкої деталі або заготовки, що відрізається;

- класти деталі, інструмент та інші предмети на станину верстата та кришку передньої бабки;

- закладати та подавати рукою у шпиндель оброблюваний пруток – у разі ввімкненого верстата;

- вимірювати оброблювану деталь скобою, калібром, масштабною лінійкою, штангенциркулем, мікрометром тощо – до повного зупинення верстата, відведення супорта та револьверної головки на безпечну відстань;

- заточувати короткі різці без застосування відповідної оправки.

### **6.3 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії**

#### **6.3.1 Мікроклімат**

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [20 ].

Мікроклімат цеху характеризується наступними чинниками: температурою повітря, відносною вологістю повітря, швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового випромінювання.

Роботи по обслуговуванню технологічного обладнання відносяться до категорії Па по важкості праці.

Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Допустимі норми параметрів повітря на непостійних робочих місцях

| Період року | Категорія робіт | Температура, °С |       | Відносна вологість | Швидкість руху, X |
|-------------|-----------------|-----------------|-------|--------------------|-------------------|
| Холодний    | Іа              | 20-24           | 15-24 | 75                 | не більше 0,3     |
| Теплий      |                 | 21-28           | 17-29 | 65 при 26 °С       | 0,2-0,4           |

### 6.3.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично-допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м<sup>3</sup>.

При металообробці виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [18] наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери, в робочій зоні верстатника

| Назва речовини  | ГДК, мг/м <sup>3</sup> |                 | Клас небезпечності |
|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|
|                 | Максимально разова     | Середньо добова |                    |
| Пил нетоксичний | 0,5                    | 0,15            | 4                  |

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачені наступні рішення:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановленні безпосередньо на дільницях біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;
- необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у

приміщенні;

- застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

### **6.3.3 Виробниче освітлення**

Робота токарних верстатів найчастіше відбувається в приміщеннях з штучним освітленням, яке повинно забезпечувати правильну роботу очей і наближати до оптимальних умов зорове сприйняття, яке буває при природному сонячному освітленні.

У тих випадках, коли одного природного освітлення не вистачає, встановлюється суміщене освітлення. При цьому додаткове штучне освітлення застосовується не тільки в темний, але і в світлий час доби.

Штучне освітлення по характеру виконуваних завдань ділиться на робоче, аварійне, евакуаційне.

Людина має як центральний (колбочковий), так і периферійне (палочковий) зір. Перше – для сприйняття кольорів і об'єктів малих розмірів, друге - для сприйняття навколишнього фону і великих об'єктів. Центральний зір вимагає великої яскравості, а палочкове діє у сутінках або напівтемряві. Враховуючи, що при роботі з дисплеями задіяно саме центральний зір, стає зрозумілою необхідність достатнього освітлення приміщення, де знаходиться комп'ютер. Самі загальні правила організації освітлення полягають у наступному:

1) слід уникати великого контрасту між яскравістю екрану і навколишнього простору. Оптимальним вважається їх вирівнювання.

2) забороняється робота з комп'ютером в темному або напівтемному приміщенні, Освітлення в приміщеннях з ПК повинно бути змішаним: природним - за рахунок сонячного світла - і штучним.

В якості джерел загального штучного освітлення краще всього використовувати освітлювальні прилади, які створюють рівномірну освітленість шляхом розсіяного або відбитого світлорозподілу (світло від ламп падає безпосередньо на стелю) і виключають відблиски. Відповідно до санітарних норм, це мають бути переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ з

розсіювачами або екрануючими ґратами. Пульсації світла люмінесцентних ламп діють дратівливо на зір і нервову систему операторів, тому для зменшення коефіцієнта пульсації використовуйте лампи, укомплектовані високочастотними пускорегулюючими апаратами. Слід зазначити, що існують спеціальні люмінесцентні лампи, наприклад, фірми «VitaLight R», які випромінюють світло різного «якості», імітуючи, таким чином, повний спектр природного сонячного світла. Ці лампи менше дратують, ніж будь-які інші лампи штучного освітлення.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018, роботи з токарними верстатами, потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи III, підрозряд «в».

Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

| Харак-ка зорової роботи | Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм | Розряд зорової роботи | Під-розряд зорової роботи | Контраст об'єкта з фоном | Характеристика фону     | Штучне при системі комбінованого освітлення |                        | Природне Ен пр | Сумісне Е сум |
|-------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|------------------------|----------------|---------------|
|                         |                                                            |                       |                           |                          |                         | всього                                      | у т. ч. від загального |                |               |
| Середньої точності      | Від 0,3 до 0,5 включно                                     | III                   | в                         | малий середній великий   | світлий середній темний | 600                                         | 200                    | -              | 3,0           |

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином, світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу



кольорів). Разом з тим необхідно врахувати і недоліки цих ламп: висока пульсація світлого потоку та пов'язана з цим можливість стробоскопічного ефекту; для запалювання та горіння лампи необхідно включення послідовно з ним пускорегулюючих апаратів; працездатність ламп залежить від температури оточуючого середовища, до кінця часу роботи світловий потік зменшується більш ніж на половину від номінального.

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

#### **6.4 Виробничий шум**

На підприємстві джерелом шуму є обладнання, машини, механізми та верстати – механічний шум.

Шум – це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину.

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки - дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має кумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини. Процес нервово-психічних захворювань вищий серед осіб, що працюють у гомінких умовах, ніж у людей, що працюють у нормальних звукових умовах.

При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи:

- нормування за гранично допустимим спектром шуму;
- нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра.

За характером спектру шум - широкосмуговий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою постійний; за походженням - гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами СН 32.23-85 і наведені в таблиці 6.4.

Для зменшення рівня шуму до допустимого в цеху двигуни виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 6.4 – Допустимі рівні звукового тиску

| Робоче місце                                                                      | Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      | Рівні звукового тиску, ДБА |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|----------------------------|
|                                                                                   | 31,5                                                                         | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |                            |
| На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства | 107                                                                          | 95 | 87  | 82  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   | 80                         |

## 6.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають механічні коливання пружних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сидниці).

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

| Вид вібрації                                         | Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц |                   |                   |                  |                  |                  |     |     |     |      |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-----|-----|-----|------|
|                                                      | 2                                                  | 4                 | 8                 | 16               | 31,5             | 63               | 125 | 250 | 500 | 1000 |
| Загальна вібрація:                                   | $\frac{1,3}{108}$                                  | $\frac{0,45}{99}$ | $\frac{0,22}{93}$ | $\frac{0,2}{92}$ | $\frac{0,2}{92}$ | $\frac{0,2}{92}$ | -   | -   | -   | -    |
| На постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях |                                                    |                   |                   |                  |                  |                  |     |     |     |      |

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с  $10^{-2}$ , знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого

## 6.6 Пожежна безпека

Пожежна безпека – стан об’єкта, при якому з регламентованою ймовірністю виключається можливість виникнення та розвиток пожежі і впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

Причинами пожеж та вибухів на підприємстві є порушення правил і норм пожежної безпеки, невиконання Закону "Про пожежну безпеку".

Небезпечними факторами пожежі і вибуху, які можуть призвести до травми, отруєння, загибелі або матеріальних збитків є відкритий вогонь, іскри, підвищена температура, токсичні продукти горіння, дим, низький вміст кисню, обвалення будинків і споруд.

За стан пожежної безпеки на підприємстві відповідають її керівники, начальники цехів, майстри та інші керівники.

Приміщення механічного цеху згідно (ОНТП 24) відноситься до категорії Г з зонами П-ІІІ (зони за межами приміщення, в якому використовуються горючі рідини з температурою спалаху  $> 61^{\circ}\text{C}$  або тверді горючі речовини, горючий пи́л, волокна). До категорії Г відносяться негорючі речовини і матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променевої теплоти, іскор та полум'я, а також горючі гази, рідини і тверді речовини, які спалюються або утилізуються у вигляді палива.

Механічний цех розташований у будівлі ІІ ступеня вогнестійкості.

До ІІ ступеня вогнестійкості відносяться будівлі з несучими і огорожувальними конструкціями з природних та штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону із застосуванням листових та плиткових негорючих матеріалів. В покриттях будівель допускається застосовувати незахищені сталеві конструкції. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

| Ступінь вогнестійкості і будинків | Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см) |             |                       |                                     |          |                                                                 |                                                              |                              |                          |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|-------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
|                                   | стіни                                                                                                              |             |                       |                                     | коло-ни  | сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток | пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищні та над підва-лами | елементи суміщених покриттів |                          |
|                                   | несучі та сходових кліток                                                                                          | само-несучі | зов-ніш-ні не-несу-чі | внут-рішні не-несучі (пере-город-ки |          |                                                                 |                                                              | пли-ти, насти-ли, прого-ни   | балки, ферми, арки, рами |
| ІІ                                | REI 120 M0                                                                                                         | REI 60 M0   | E 15 M0               | EI 15 M0                            | R 120 M0 | R 60 M0                                                         | REI 45 M0                                                    | RE 15 M0                     | R 30 M0                  |

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості

| Протипожежні перешкоди | Типи протипожежних перешкод або їх елементів | Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах) | Тип заповнення прорізів, не нижче | Тип протипожежного тамбуршлюзу, не нижче |
|------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| Стіни                  | 2                                            | REI 60                                                              | 2                                 | 1                                        |
| Перегородки            | 2                                            | EI 15                                                               | 3                                 | 2                                        |
| Перекриття             | 3                                            | REI 45                                                              | 2                                 | 1                                        |

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі – не нормується.

В таблиці 6.8 наведена допустима кількість поверхів і площа поверху в межах пожежного відсіку будівлі відповідно до ступеня вогнестійкості.

Таблиця 6.8 – Допустима кількість поверхів і площа поверху в межах пожежного відсіку будівлі.

| Категорія будівлі (пожежних відсіків) | Допустима кількість поверхів | Ступінь вогнестійкості будівлі | Площа поверху в межах пожежного відсіку, м <sup>2</sup> , будівель |                  |                    |
|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|
|                                       |                              |                                | Одноповерхових                                                     | багатоповерхових |                    |
|                                       |                              |                                |                                                                    | 2 поверхи        | 3 поверхи і більше |
| Г                                     | 1                            | II                             | не обмежується                                                     |                  |                    |
|                                       |                              |                                | 5200                                                               | -                | -                  |

Мінімальні відстані між будівлями і спорудами відповідно до II ступеня вогнестійкості становлять 9 м.

У випадку виникнення пожежі робітники повинні: прийняти всі заходи по ліквідації вогню; місце, яке загорілось слід гасити вогнегасником; при загоранні електропроводів слід відключити лінію, а ізоляцію електропроводів

необхідно гасити тільки вуглекислотним вогнегасником або піском; зупинити обладнання.

На території підприємства розташований 1 пожежний щит (стенд), до комплексу засобів пожежогасіння, які розміщені на ньому, включені: вогнегасники ВП-5 – 3 шт., ящик з піском – 1 шт., покривало з негорючого теплоізоляційного матеріалу або повсті розміром 2 м х 2 м – 1 шт., гаки – 3 шт., лопати – 2 шт., лом – 2 шт., сокири – 2 шт.

Ящик для піску має місткість 1,0 м<sup>3</sup> та бути укомплектований совковою лопатою. Конструкція ящика повинна забезпечувати зручність діставання піску та виключати попадання опадів.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему «Модернізація електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру» була розроблена система керування електроприводом подовжньої подачі токарно-гвинторізного верстата.

У роботі проведено аналіз особливостей та режимів роботи центрифуги, виконано розрахунок потужності електродвигуна та обрано його тип. Після проведення техніко-економічного порівняння, системою електроприводу для центрифуги вибрано варіант типу ПЧ-АД, який є найбільш оптимальним з точки зору поєднання технічних і економічних показників експлуатації.

В процесі роботи проведено розрахунок та підбір елементів силового кола, комутаційної апаратури та сенсорів з визначенням їхніх номінальних параметрів. Враховуючи отримані результати, розраховано передаточні коефіцієнти і часові константи системних елементів, проведено дослідження стійкості та якості роботи системи. Також було обрано елементи регуляторів та зворотних зв'язків, які інтегровані в синтезовану структурну схему системи управління.

У розділі з охорони праці розроблено основні положення, спрямовані на безпечну і ефективну експлуатацію об'єкта, а також забезпечення відповідних умов праці для обслуговуючого персоналу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сиромятніков І.А. Режими робота асинхронних і синхронних двигунів. – М.: Вища школа, 2006.
2. Особливості діяльності цукрових заводів - офіційний сайт «Sophus»  
URL:[http://sophus.at.ua/publ/2014\\_04\\_17\\_18\\_kampodilsk/sekcija\\_2\\_2014\\_04\\_17\\_18/osoblivosti\\_obliku\\_zapasiv\\_na\\_cukrovikh\\_zavodakh/52-1-0-887](http://sophus.at.ua/publ/2014_04_17_18_kampodilsk/sekcija_2_2014_04_17_18/osoblivosti_obliku_zapasiv_na_cukrovikh_zavodakh/52-1-0-887)
3. Перспективи розвитку бурякоцукрового виробництва - Офіційний сайт «economy.-nayka.com.ua» URL: - <http://www.economy.-nayka.com.ua/?op=1&z=791>
4. Центрифуга ФПН, ФПІ для поділу утфелів на виробництві цукру - офіційний сайт «Iren» URL:- <https://iren.sumy.ua/centrifuga-fpn-fpi-dlya-podiluutfeliv-na-virobnictvi-cukru/>
5. Порівняння варіантів і вибір економічно доцільної схеми мережі - офіційний сайт «Studfile» URL: - <https://studfile.net/-preview/3910654/page:6/>
6. Розробка функціональної схеми лабораторного стенду для дослідження електромеханічних систем на основі двигуна постійного струму з незалежним збудженням Ковбаса С.М., к.т.н.; Приступа Д.Л., Воронко А.Б., магістранти.
7. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За редакцією М.Г.Поповича та О.Ю.Лозинського / Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом „Електромеханіка”. –К.: Либідь, 2005. -680 с.
8. Автоматизація технологічних процесів, установок і комплексів – 1: Методичні вказівки до виконання домашньої контрольної роботи для студентів денної форми навчання напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка", спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" денної форми навчання/ Уклад. С.О. Бур'ян – К.: НТУУ "КПІ", 2016. – 62 с.



9. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів та технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. Видавництво: М.: Видавничий центр «Академія» 2007

10. Розподілені мікропроцесорні системи: конспект лекцій [Електронний ресурс]: для підготовки докторів філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікація за спеціальністю 171 Електроніка за спеціалізацією «Електронні системи» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. О. Терещенко – Електронні текстові данні (1 файл: 5544 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 192 с.

11. Програмувальні інтелектуальні реле [Електрон. ресурс] – Режим доступу: <http://muromremont.ru/639-post>

12. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів / Д. М. Кислий. – Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2016, № 1 (61). – С. 71 – 84.

13. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003.-226 с.

14. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. - 404 с.

15. Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук, 2001. – 376 с.

16. Воронов Р.В – Дисертація: «Тягові електромеханічні системи з живленням двох двигунів від одного інвертора», Харків 2020 1-97с.

17. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003 – 226 с.

18. Zagirnyak M., Romashykhina Zh., and Kalinov A., (2013), Improved Reliability of Diagnostics of Induction Motor Broken Rotor Bars, Proceedings of

the XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronics Engineering, Ohrid, Macedonia, 2 – 14th September.

19. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу охорона праці в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей. – Вінниця 2003. – 46 с. управління моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4.

20. Модернізація системи керування електропривода транспортної лінії припортового заводу / О.А. Паянок, М.М. Матевосян – Матеріали конференції «LII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету», Вінниця, 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/17445/14518> – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 3 с.

21. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

22. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv>.

23. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL:

1. [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=48644](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644).



## Додаток А

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КЕМСК

К.Т.Н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

“ 4 ” березня 2025 р.

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу

### МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРУ

БДР.008.00.000 ТЗ

Керівник роботи

К.Т.Н., доц.

Олена НАНАКА

4 березня 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-216

Даніель КОБЗИСТИЙ

4 березня 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025



## **1. Загальні відомості**

Повне найменування розробки – «Модернізація електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру».

Скорочене найменування розробки – «Модернізація електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру».

Замовник – Кафедра компютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

## **Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем бакалаврських кваліфікаційних робіт.

## **3. Призначення розробки і галузь використання**

Центрифуга є підвісною вертикальною машиною періодичної дії з нижнім ручним вивантаженням продукту через днище ротора, призначену для розділення суспензій із дрібно- та середньозернистою твердою фазою.

## **4. Вимоги до розробки**

Основними вимогами до електроприводу центрифуг є наступні: забезпечення оптимальних динамічних режимів при постійному прискоренні та сповільненні центрифуги; стабілізація частоти обертання центрифуги при завантаженні, вивантаженні та фугуванні.

## **5. Комплектація розробки**

Центрифуга містить завантажувальний лоток, механізм зрізу осаду, металоконструкцію, вал, корпус підшипників, корпус приводу, електродвигун, гумову муфту, стрічкове гальмо, гумовий амортизатор, привод, кришку кожуха, кожух та ротор.

## 6. Елементна база

Двигун, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т.п. виробництва України, країн близького зарубіжжя та Європи.

## 7. Конструктивне виконання

Електропривод виготовляється окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

## 8. Технічні характеристики

Таблиця 1 – Технічні характеристики

| №п\п | Показник                            | Позначення | Величина  |
|------|-------------------------------------|------------|-----------|
| 1.   | Час роботи центрифуги, с            | $t_p$      | 157       |
| 2.   | Час паузи центрифуги, с             | $t_0$      | 30        |
| 3.   | Фактична тривалість включення, °/с  | ТВ         | 84        |
| 4.   | Коефіцієнт тертя °                  | f          | 0,03-0,09 |
| 5.   | Максимальне завантаження ротора, кг | m          | 450       |
| 6.   | Густина сталі, кг/м <sup>3</sup>    | $\rho$     | 7900      |

## 9. Показники технологічності

Електропривод ротора центрифуги – двигун, апарати керування і захисту, провідники, кабелі тощо. Виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

## 10. Джерела розробки

1. Сиромятніков І.А. Режими робота асинхронних і синхронних двигунів. – М .: Вища школа, 2006.

2. Особливості діяльності цукрових заводів - офіційний сайт «Sophus»  
 URL:[http://sophus.at.ua/publ/2014\\_04\\_17\\_18\\_kampodilsk/sekcija\\_2\\_2014\\_04\\_17\\_18/osoblivosti\\_obliku\\_zapasiv\\_na\\_cukrovikh\\_zavodakh/52-1-0-887](http://sophus.at.ua/publ/2014_04_17_18_kampodilsk/sekcija_2_2014_04_17_18/osoblivosti_obliku_zapasiv_na_cukrovikh_zavodakh/52-1-0-887)

3. Перспективи розвитку бурякоцукрового виробництва - Офіційний сайт «economy.-nayka.com.ua» URL: - <http://www.economy.-nayka.com.ua/?op=1&z=791>

4. Центрифуга ФПН, ФПІ для поділу утфелів на виробництві цукру - офіційний сайт «Iren» URL:- <https://iren.sumy.ua/centrifuga-fpn-fpi-dlya-podiluutfeliv-na-virobnictvi-cukru/>

### **11. Технічне обслуговування і ремонт**

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється мінімум один раз на місяць. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

### **12 Живлення електропривода**

Живлення електропривода повинно бути виконане напругою 380 В від силової мережі підприємства.

### **13. Порядок контролю та прийняття**

Виконання етапів графічної та розрахункової документації бакалаврської роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

#### **14. Матеріали, що подаються до захисту БКР**

Пояснювальна записка БКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту БКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук рецензента, протоколи складання державних іспитів, анотації до БКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення БКР діючим вимогам.

#### **15. Вимоги до оформлення БКР**

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи у Вінницькому національному технічному університеті (БКР, МКР)», 2024 р.

**Додаток Б**  
**(обов'язковий)**

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ**  
**ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРУ**



## **Об'єкт, предмет, мета та завдання дослідження**

**Об'єктом дослідження в роботі** є процеси перетворення енергії, які протікають в електротехнічній системі електропривода ротора центрифуги.

**Предметом дослідження** є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити ефективність електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру.

**Метою** бакалаврської кваліфікаційної роботи є модернізація регульованої системи електропривода ротора центрифуги для забезпечення ресурсозберігаючої та економічної її роботи відповідно до інтенсивності завантаження механізму. Пропонована автоматизація досліджуваного механізму досягає високого ступеня і забезпечує мінімальні втручання людини в процес виробництва, що призводить до зниження собівартості виробленої продукції за рахунок підвищення ефективності виробництва.

В процесі виконання поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати режими роботи та привести основні характеристики центрифуги технологічного процесу виробництва цукру;
- виконати розрахунок та вибір потужності електродвигуна центрифуги технологічного процесу виробництва цукру;
- виконати техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода;
- здійснити розрахунок, вибір та побудову структурної, функціональної та електричної принципової схем керування електроприводу;
- для вибраної системи електроприводу виконати розрахунок механічних характеристик електродвигуна, моделювання перехідних процесів та розрахунок динаміки електропривода;
- сформулювати комплекс заходів для забезпечення належних умов праці обслуговуючого персоналу та безпечної експлуатації центрифуги.

## Загальна характеристика технологічного процесу

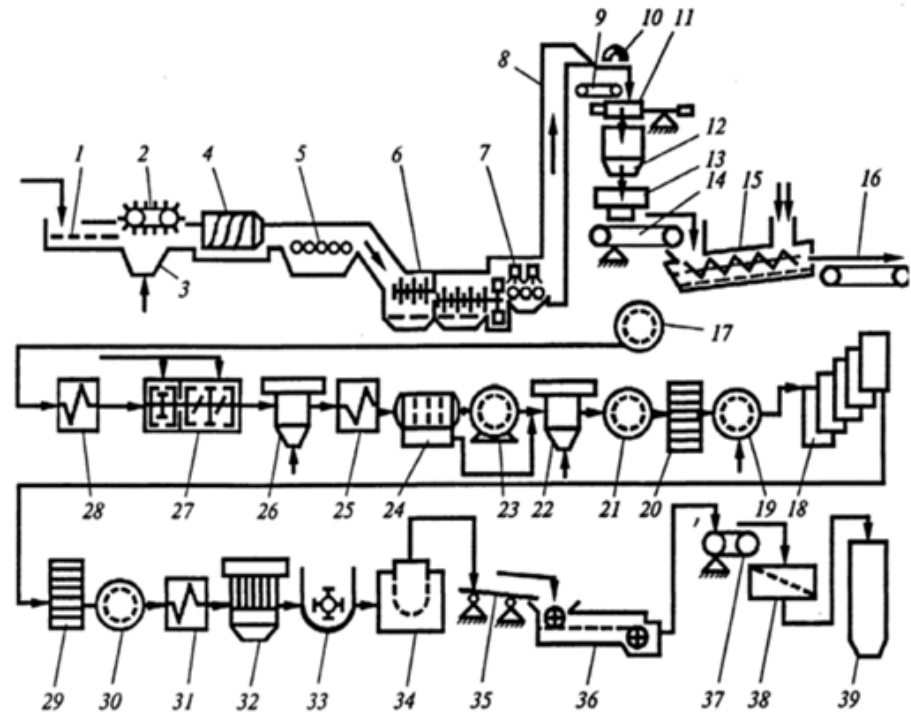
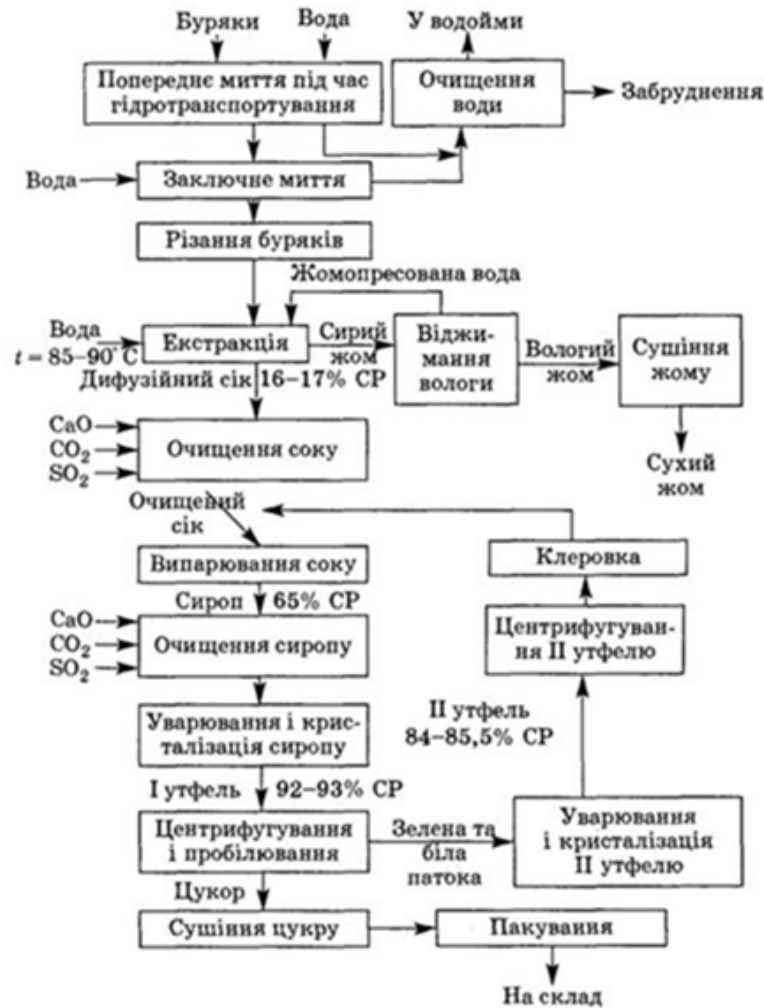


Рисунок 2 – Машино-апаратна схема виробництва цукру із цукрового буряка

Рисунок 1 – Схема технологічного процесу виробництва цукру

## Характеристики технологічного механізму



Рисунок 3 – Класифікація механізмів центрифуг

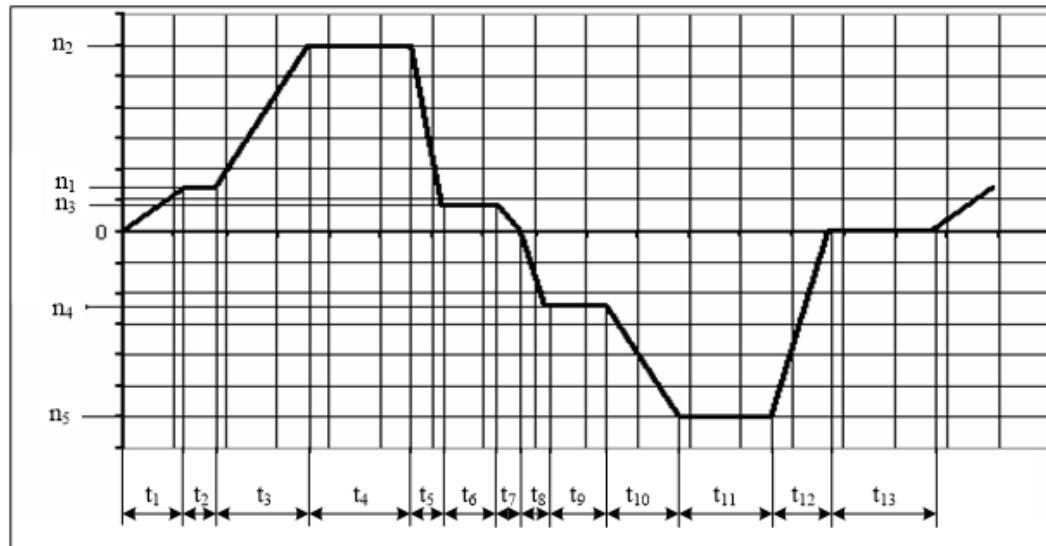


Рисунок 4 – Кінематична схема механізму

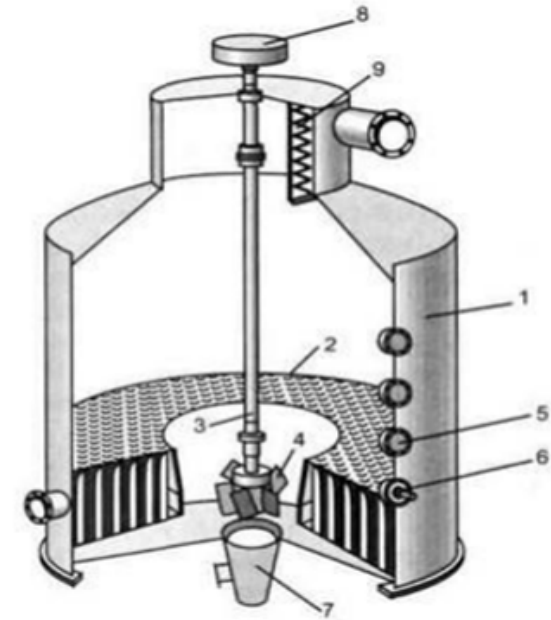


Рисунок 5 – Будова центрифуги

На рисунку приведені наступні позначення: 1 – Корпус; 2 – Парова камера; 3 – Вал; 4 – Турбіна; 5 – Вікно для огляду; 6 – Тестовий кран; 7 – Затвор для вивантаження утфелю; 8 – Привод; 9 – Сепаратор

# Розрахунок потужності приводного двигуна

Таблиця 3.1 – Порівняльна таблиця економічних показників

| Показник                                    | Системи електропривода |         |         |
|---------------------------------------------|------------------------|---------|---------|
|                                             | ТП-Д                   | ШП-Д    | ПЧ-АД   |
| Потужність двигунів, кВт                    | 2,2                    | 2,2     | 2,2     |
| Вартість двигунів Д, грн.                   | 6450                   | 6450    | 3860    |
| Вартість системи керування СК, грн.         | 14740                  | 11780   | 12230   |
| Капітальні затрати К, грн.                  | 22382                  | 20198   | 17133   |
| ККД двигуна та системи                      | 0,84                   | 0,9     | 0,92    |
| Тривалість роботи, год/рік                  | 4000                   | 4000    | 4000    |
| Річні капітальні затрати $K_{річні}$ , грн. | 3804,9                 | 3433,7  | 2912,6  |
| Амортизаційні відрахування $C_A$ , грн./рік | 3178,5                 | 2734,5  | 2413,5  |
| Відрахування на ремонт $C_p$ , грн./рік     | 1270                   | 1240    | 1180    |
| Вартість втрат електроенергії, грн/рік      | 18320,8                | 10687,1 | 8363,8  |
| Вартість експлуатації електроприводу, грн   | 43959,3                | 32891,6 | 28047,3 |

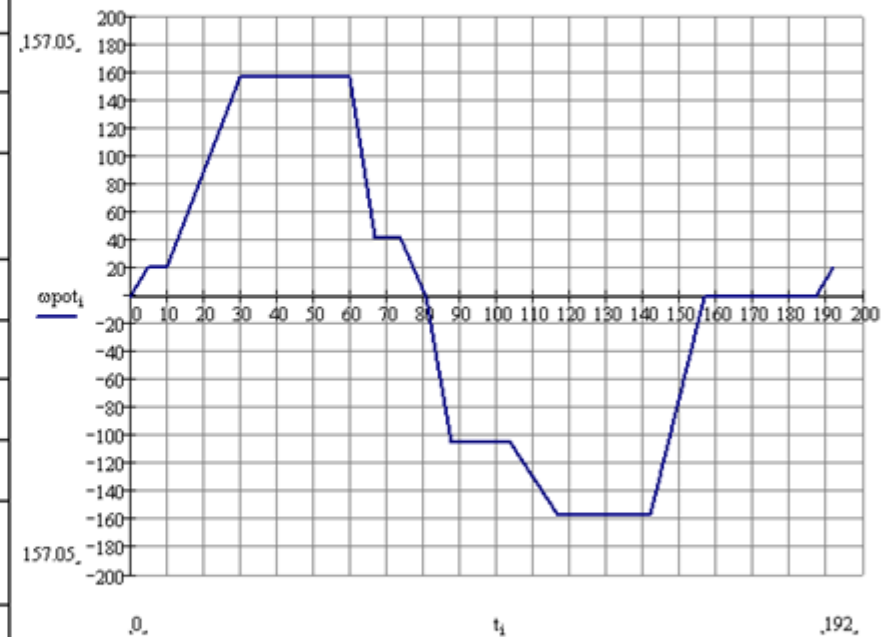


Рисунок 6 – Тахограма швидкостей

## Вибір електродвигуна та розрахунок характеристик

Таблиця 4.1 – Паспортні дані приводного двигуна

|                                                               |         |
|---------------------------------------------------------------|---------|
| Тип двигуна                                                   | 4A100L6 |
| Номинальна потужність $P_{дв.н.}$ кВт                         | 2,2     |
| Номинальна кутова швидкість $n_{дв.н.}$ об/хв                 | 949     |
| Номинальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi$               | 0,73    |
| Номинальний коефіцієнт корисної дії $\eta_{дв.н.}$ %          | 81      |
| Кратність критичного моменту приводного двигуна $\lambda_k$   | 2,2     |
| Кратність пускового моменту приводного двигуна $\lambda_{п.}$ | 2,0     |
| Пусковий струм $I_{пвск.}$ А                                  | 22,5    |
| Момент інерції $J_p$ , кг·м <sup>2</sup>                      | 0,013   |
| Номинальний струм обмотки статора $I_{дв.н.}$ А               | 5,64    |
| Струм холостого ходу $I_{хх.}$ А                              | 3,8     |
| Активний опір обмотки статора $R_1$ , Ом                      | 3,51    |
| Індуктивний опір розсіювання обмотки статора $X_1$ , Ом       | 4,29    |
| Приведений активний опір обмотки ротора $R'_2$ , Ом           | 2,6     |
| Приведений індуктивний опір розсіювання обмотки $X'_2$ , Ом   | 8,2     |

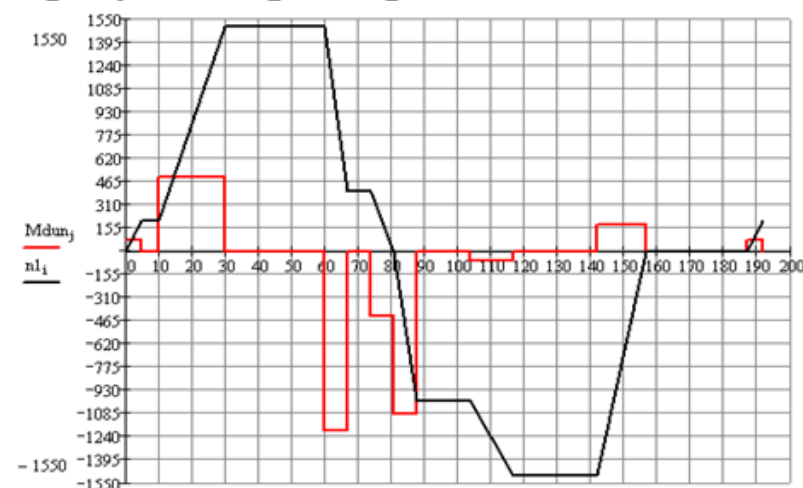


Рисунок 7 – Навантажувальна діаграма ЕП

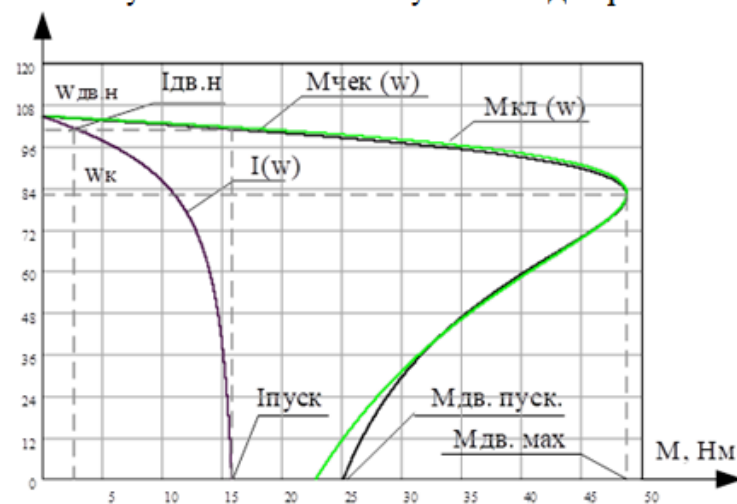


Рисунок 8 – Електромеханічна та механічні характеристики двигуна



## Типова система електропривода ротора центрифуги



Рисунок 9 – Структурна схема системи керування ЕП центрифуги

ПП – перетворювальний пристрій, на який подається нерегульована напруга мережі; ПДП – передавальний пристрій, передає механічну енергію від двигуна до механізму; ЕДП – електродвигунний пристрій, (електричний двигун), який виробляє механічну енергію за рахунок споживаної електричної енергії, тобто, є електромеханічним перетворювачем енергії.

## Розробка схеми електричної функціональної САЕП

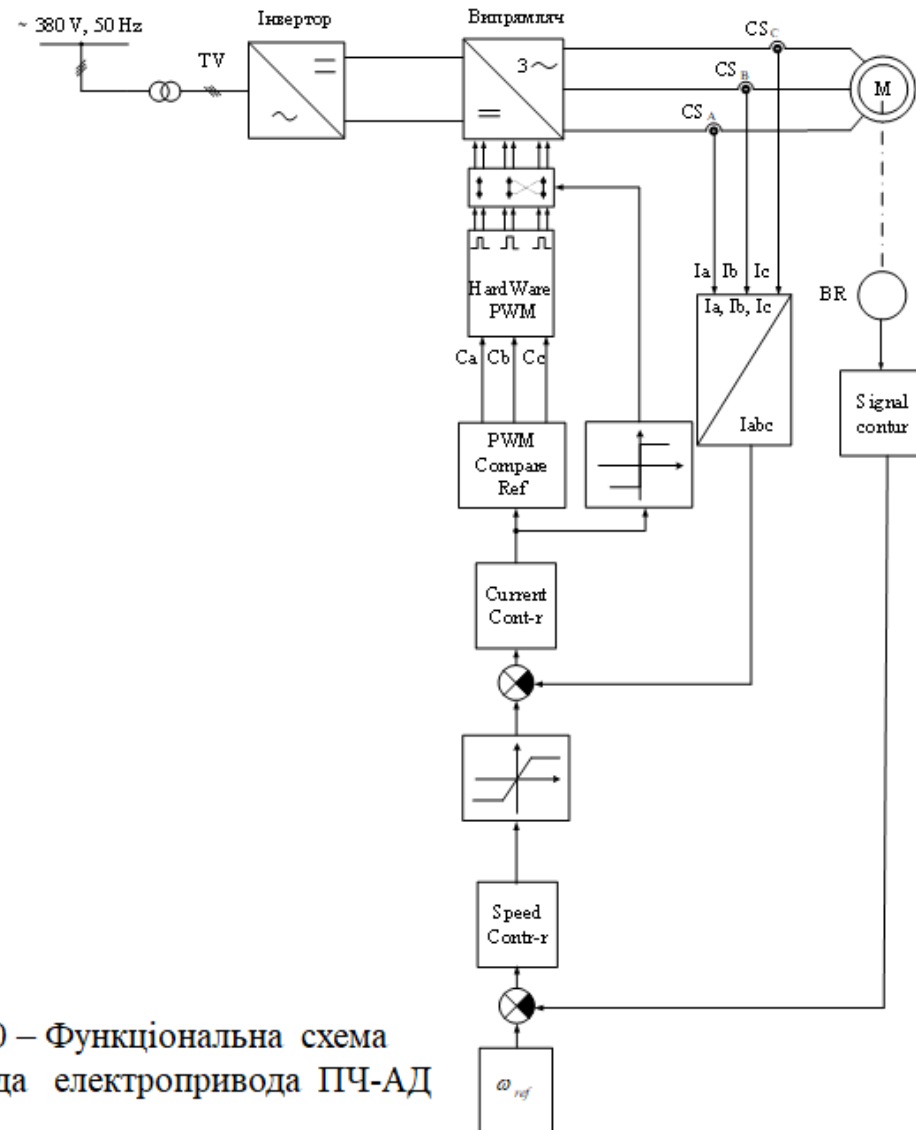


Рисунок 10 – Функціональна схема електропривода електропривода ПЧ-АД

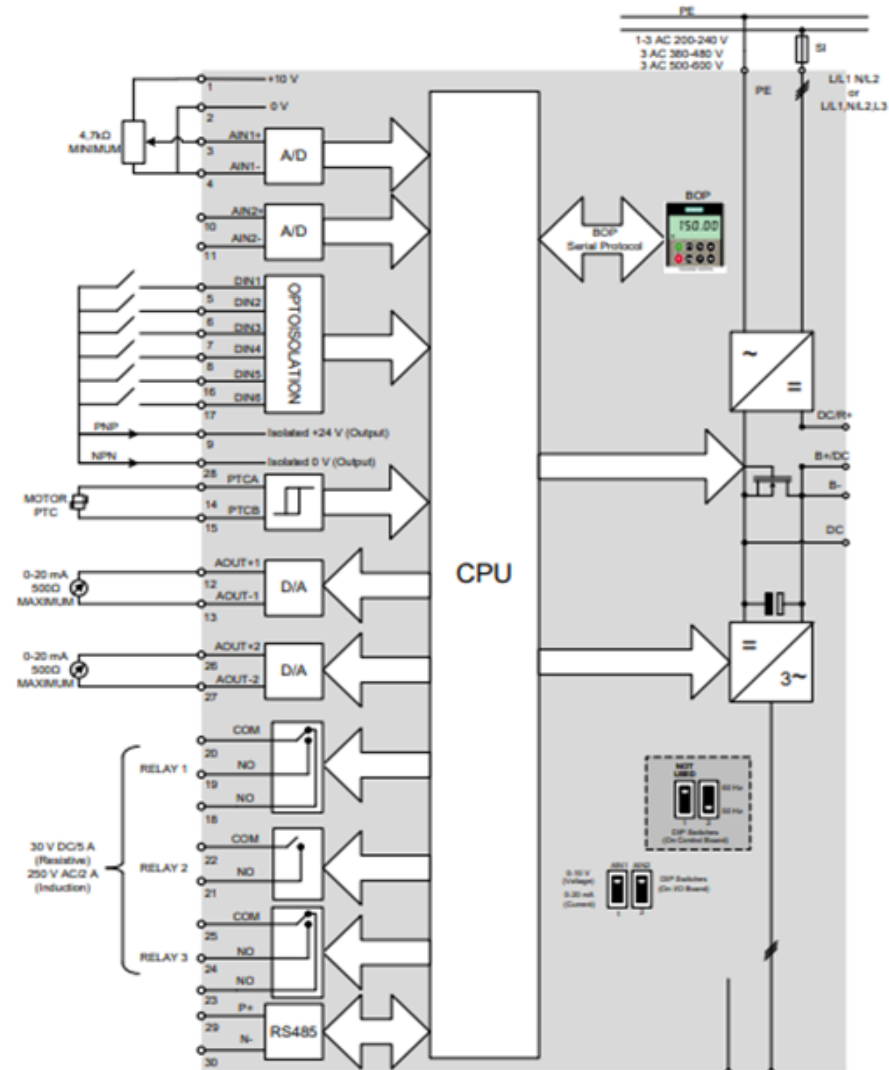
## Розробка системи керування та вибір елементів кола керування



Рисунок 11 – Помисловий ПЧ  
Micromaster 440

Таблиця 7.1 – Технічні характеристики перетворювача частоти  
Micromaster 440

| Найменування параметра        | Значення        |                      |
|-------------------------------|-----------------|----------------------|
| Виробник                      | Siemens         |                      |
| Серія                         | Micromaster 440 |                      |
| Потужність, кВт               | кВт             | 30,0                 |
| Лінійний струм (при 380 В)    | А               | 62                   |
| Напруга                       | В               | 380- 480, $\pm 10\%$ |
| Частота напруги живлення      | Гц              | 47- 63 Гц            |
| Кількість фаз                 | м               | 3                    |
| Перевантажувальна здатність   |                 | 150% протягом 60 с   |
| Струм на протязі 1 хв.        | А               | 93                   |
| Максимальна частота на виході | Гц              | 650                  |
| Габарити                      | мм              | 650x275x245          |

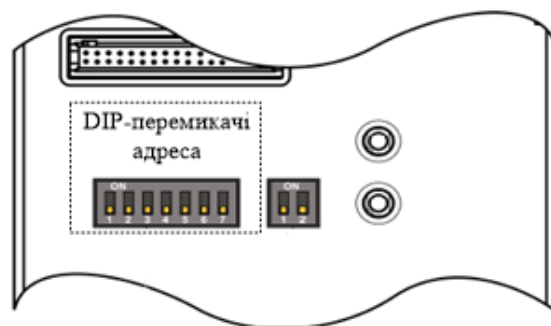




## Розробка системи керування та вибір елементів кола керування



Рисунок 12 – Програмоване логічне реле LOGO! 12/24 RC



Таблиця 7.2 – Характеристики базового пристрою та цифрового модуля розширення LOGO

| Найменування характеристики                              | Базовий пристрій LOGO 12/24 RC | Цифровий модуль LOGO DM8 12/24 R |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| <b>Блок живлення</b>                                     |                                |                                  |
| Вхідна напруга                                           | 12/24 В                        | 12/24 В                          |
| Допустимий діапазон                                      | 10.8...28.8 В                  | 10.8...28.8 В                    |
| Захист від зворотної полярності                          | Так                            | Так                              |
| Споживання струму 24 В постійного струму                 | 20...75 мА                     | 20...75 мА                       |
| Буферизація при зникненні напруги 24 В постійного струму | 2 мс                           | 2 мс                             |
| Потужність втрат 24 В постійного струму                  | 0.4...1.8 Вт                   | 0.4...1.8 Вт                     |
| <b>Цифрові входи</b>                                     |                                |                                  |
| Кількість                                                | 8                              | 4                                |
| Гальванічна розв'язка                                    | Ні                             | Ні                               |

Рисунок 13 – DIP-перемикачі адреса PROFIBUS

## Розробка системи керування. Застосування HMI



Рисунок 14 – Задачі системи людино-машинного інтерфейсу

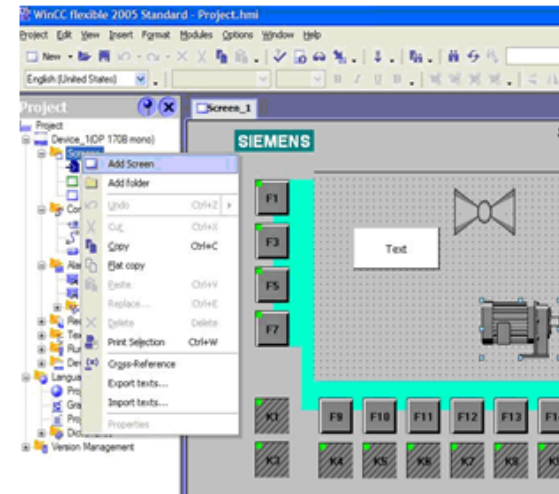


Рисунок 15 – Середовище програмування WinCC flexible

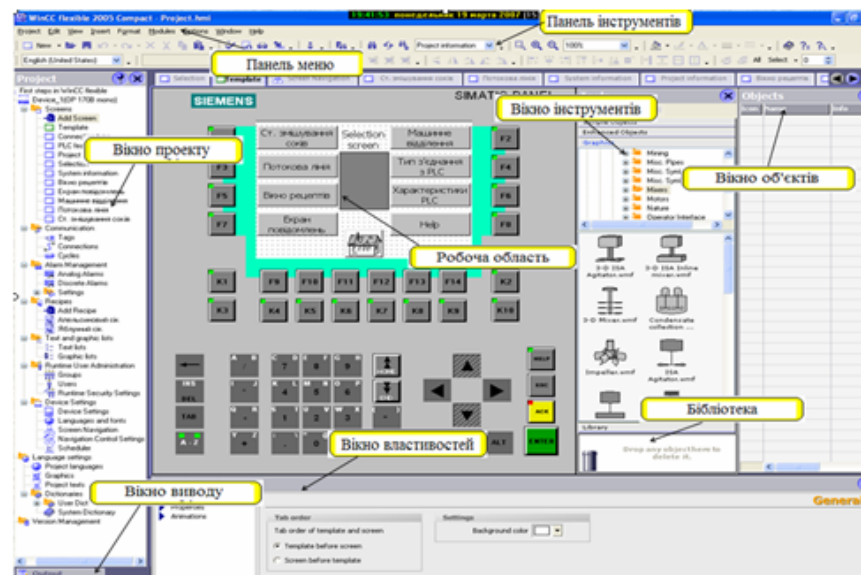


Рисунок 16 – Середовище створення інтерактивних мнемосхем

## Розробка схеми електричної принципової

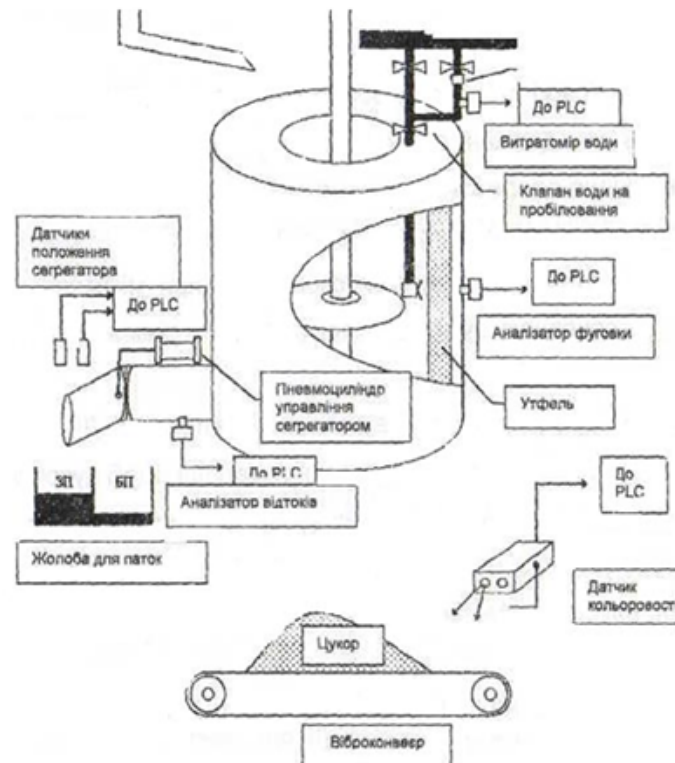


Рисунок 17 – Технологічна схема центрифуги

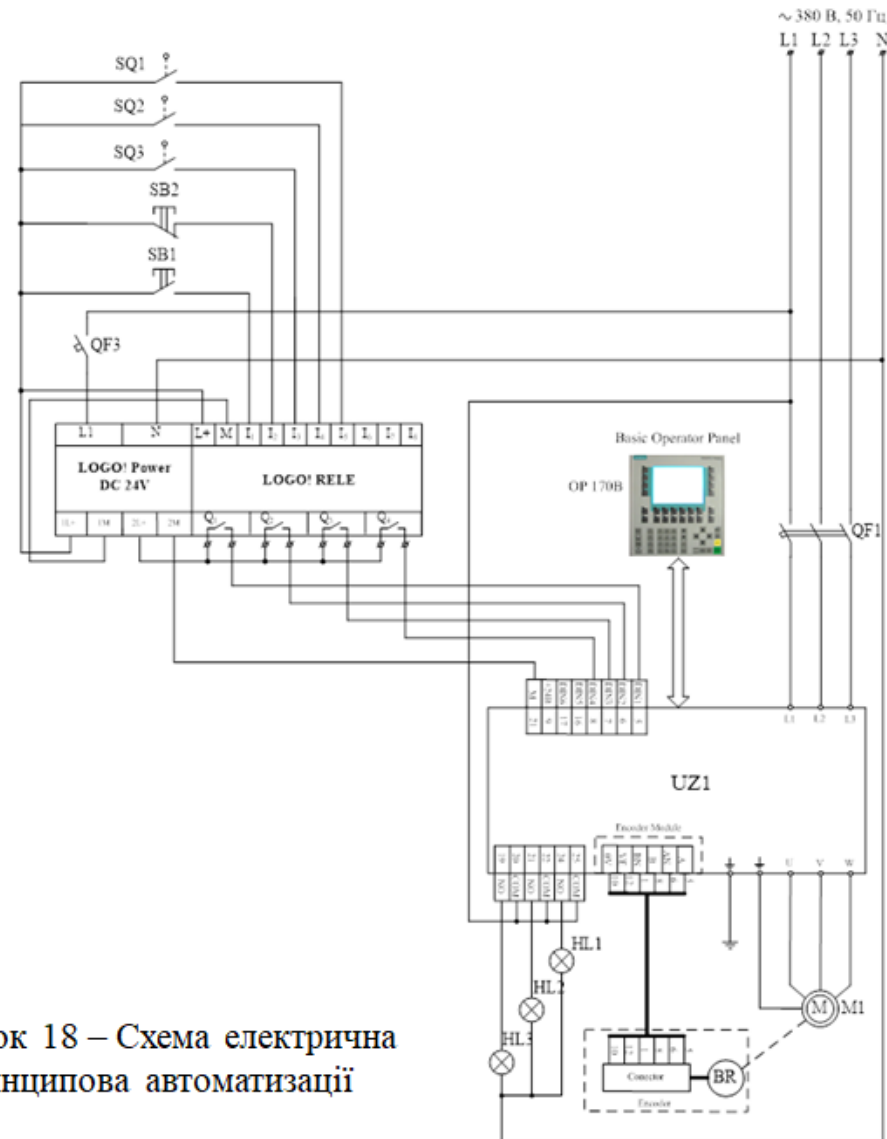


Рисунок 18 – Схема електрична принципова автоматизації

## Модельовання та оцінювання динамічних характеристик САЕС

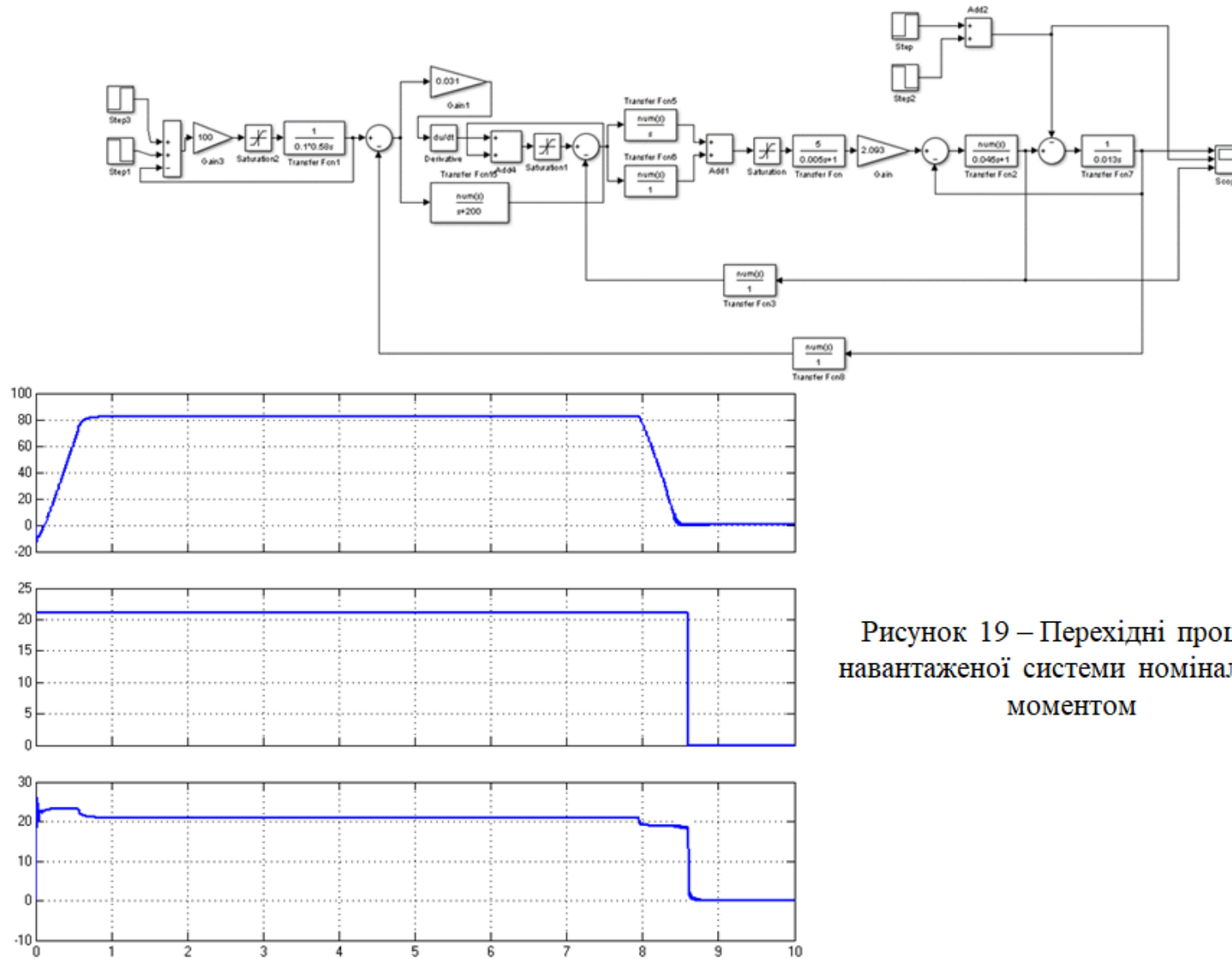


Рисунок 19 – Перехідні процеси навантаженої системи номінальним моментом

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему «Модернізація електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру» була розроблена система управління електроприводом подовжньої подачі токарно-гвинторізного верстата.

В даній кваліфікаційній роботі виконано аналіз особливостей та режимів роботи центрифуги, здійснений розрахунок потужності електродвигуна із подальшим вибором його типу. Після ретельно виконаного техніко-економічного порівняння в якості системи електроприводу для центрифуги обрано систему типу ПЧ-АД, яка є найбільш оптимальним варіантом, в поєднанні економічних та технічних показників експлуатації. В процесі роботи було розраховано та вибрано елементи силового кола, комутуючі елементи та сенсори, визначено їх номінальні дані.

Приймаючи до уваги результати розрахунків, було розраховано передаточні коефіцієнти та постійні часу елементів системи, а також досліджено її на стійкість та якість; вибрано елементи регуляторів та зворотних зв'язків, які були поєднанні в синтезованій структурній схемі системи керування.

В розділі охорони праці розроблено основні положення щодо безпечної та оптимальної експлуатації об'єкта дослідження та створення належних умов праці для обслуговуючого персоналу.



## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Модернізація електропривода ротора центрифуги технологічного процесу виробництва цукру

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 30,09 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Нанак О.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Кобзистий Д.В.

(прізвище, ініціали)



|                  |      |                     |                       |       |                                                                                                 |                    |         |         |
|------------------|------|---------------------|-----------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|
|                  |      |                     |                       |       | 08-24.БДР.008.00.000                                                                            |                    |         |         |
| Зм.              | Арк. | № докумен.          | Підпис                | Дата  | Модернізація електропривода<br>ротора центрифуги<br>технологічного процесу<br>виробництва цукру | Літ.               | Маса    | Масштаб |
| Розробив:        |      | Кобзистий Д.В.      | <i>Д.В. Кобзистий</i> | 10.05 |                                                                                                 |                    |         |         |
| Перевірів        |      | Нанака О.М.         | <i>О.М. Нанака</i>    | 10.05 |                                                                                                 |                    |         |         |
| Т. контр.        |      |                     |                       |       |                                                                                                 |                    |         |         |
|                  |      |                     |                       |       |                                                                                                 | Аркуш              | Аркушів |         |
| <i>Результат</i> |      | <i>Відхилено</i>    | <i>В.В. [підпис]</i>  | 10.06 |                                                                                                 | ВНТУ, гр. ЕМСА-216 |         |         |
| Норм.кон.        |      | <i>Пасенко О.К.</i> | <i>О.К. Пасенко</i>   | 03.06 |                                                                                                 |                    |         |         |
| Затверд.         |      | Мошноріз М.М.       | <i>М.М. Мошноріз</i>  | 03.06 |                                                                                                 |                    |         |         |