Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Дніпровська політехніка"

Електротехнічний
(факультет)

Кафедра *Електропривода*
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
дипломного проекту (роботи)
бакалавр
(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань *0507електротехніка та електромеханіка*
(шифр і назва галузі знань)
напрям підготовки *6.05070204 «Електромеханіка»*
(код і назва напряму підготовки)

освітній рівень *бакалавр*
(назва освітнього рівня)
кваліфікація *фахівець у галузі електромеханіки*
(код і назва кваліфікації)
на тему *Автоматизований електропривод ФПН центрифуги*

Виконавець:
студент *4* **курсу, групи** *ЕМ-14-1*

_____ *Григоренко Д.П.*
(підпис) **(прізвище та ініціали)**

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	*Казачковський М.М.*		
розділів			
Спеціальна частина	*Боровик Р.О.*		
Охорона праці	*Голінько В.І.*		
Економіка	*Тимошенко Л.В.*		
Рецензент			
Нормоконтроль	*Казачковський М.М.*		

Дніпро
2018

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Дніпровська політехніка"

ЗАТВЕРДЖЕНО:
Завідувач кафедри
електропривода
(повна назва)
_____ *Казачковський М.М.*
(підпис) (прізвище, ініціали)
«_29_»_____01_____2018_року

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект
бакалавр
(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

студенту *ЕМ-14-1* *Григоренко Д.П.*
(група) (прізвище та ініціали)

Тема дипломного проекту *Автоматизований електропривод ФПН центрифуги*

затверджена наказом ректора НТУ "Дніпровська політехніка" від __07.05.2018 № 568-л

Розділ	Зміст	Термін виконання
Спеціальний	*Розробка системи електропривода ротора підвісної центрифуги ФПН.*	29.01 –27.05
Охорона праці	*Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, заходи щодо їх усунення та розрахунок штучного освітлення.*	28.05 – 3.06
Економічний	*Розрахунок основних техніко-економічних показників впровадження дипломного проекту.*	4.06 – 10.06

Завдання видав _____ *Казачковський М.М.*
(підпис) (прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання_____ *Григоренко Д.П.*
(підпис) (прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: __29.01.2018_____

Термін подання дипломного проекту до ДЕК ___22.06.2018_____

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 70 с., 24 рис., 6 табл., 12 джерела, 4 аркушів креслень.

Об’єкт розроблення: електропривод ротора ФПН центрифуги.

Мета дипломного проекту: розробка сучасного керованого електропривода ротора центрифуги.

В першому розділі описано процес розділення речовин у відцентрових механізмах, зокрема центрифугах і сепараторах; розглянуто особливості технологічного процесу роботи ротора фільтруючого підвісної центрифуги, розглянуті режими роботи, наведені вимоги до електропривода.

Спеціальна частина проекту містить розрахунок моментів навантаження, моментів інерції; розглянуто системи керування електроприводами відцентрових механізмів, вибрано електричний двигун і виконано його перевірку, вибрано перетворювач частоти. Синтезовано систему векторної системи керування орієнтованої по вектору потокозчеплення ротора, розраховані параметри регуляторів.

У розділі «Дослідження динаміки електропривода» на основі синтезованої системи керування розроблено математичну модель електропривода з векторним керуванням. Виконане дослідження перехідних процесів в електроприводі у відповідності до заданої діаграми швидкості та режимів роботи з використанням пакету MATLAB додатки Simulink.

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» проведено аналіз шкідливих та небезпечних факторів, наведено інженерно-технічні засоби з охорони праці.

У розділі «Техніко-економічне обґрунтування» проведений розрахунок капітальних витрат на реалізацію проекту, розрахунок експлуатаційних витрат.

РОЗДІЛЕННЯ РЕЧОВИН, ВІДЦЕНТРОВИЙ МЕХАНІЗМ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ

ABSTRACT

Explanatory note: 70 pp., 24 fig, 6 tables, 12 sources, 4 sheets of drawings.

The object of development: the electric drive of the rotor FPN centrifuge.

The diploma project aim: the development of a modern controlled electric drive of rotor's centrifuge.

The first section describes the process of separating substances in centrifugal mechanisms, in particular centrifuges and separators; the features of the technological process of the rotor of the filtering hanging centrifuge are considered, the working modes considered, the requirements for the electric drive are given.

The special part of the project includes calculation of load points, moments of inertia; the systems control of electric drives of centrifugal mechanisms were considered, the electric motor was chosen, and its verification was performed, the frequency converter was chosen. The system of the vector control system of the vector-oriented flow-coupling of the rotor is synthesized, parameters of the regulators are calculated.

In the section "Research of dynamics of electric drive" based on the synthesized control system a mathematical model of electric drive with vector control was developed. The research of transients in the electric drive in accordance with the given speed chart and operating modes using the MATLAB package of Simulink application is performed.

In the section "Occupational safety and security in emergency situations" the analysis of harmful and dangerous factors was carried out, engineering and technical means of occupational safety were provided.

In the section "feasibility study", the calculation of capital expenditures for project implementation, calculation of operating costs was carried out.

SEPARATION OF SUBSTANCES, CENTRIFUGAL MECHANISM, ASYNCHRONOUS MOTOR, FREQUENCY CONVERTER, CONTROL SYSTEM, SPEED REGULATION

ЗМІСТ

ВСТУП 7

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА 8

1.1 Область застосування центрифуг 8

1.2 Класифікація, зовнішній вигляд, кінематична схема механізму 9

1.3 Технологічний процес центрифугування вимоги до електропривода центрифуги 11

2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД 16

2.1 Аналіз теплового режиму роботи електродвигуна 16

2.2 Розрахунок і побудова навантажувальної діаграми механізму 16

2.3 Розрахунок моменту інерції електропривода 21

2.4 Розрахунок навантажувальної діаграми 23

2.5 Вибір системи електропривода 26

2.6 Вибір двигуна 28

2.6.1 Перевірка обраного двигуна 30

2.7 Модель двигуна в системі координат, орієнтованої по вектору потокозчеплення ротора 36

2.7.1 Синтез регулятора струму 42

2.7.2 Синтез регулятора потокозчеплення ротора 43

2.7.3 Синтез регулятора швидкості 44

2.8 Вибір перетворювача частоти 46

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА 48

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 56

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів технологічного процесу 56

4.2 Інженерно-технічні заходи з охорони праці 56

4.3 Розрахунок штучного освітлення 58
4.4 Пожежна профілактика 61
4.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях 62
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ 63
Вступ 63
5.1 Капітальні витрати 63
5.2 Експлуатаційні витрати 65
5.2.1 Амортизаційні відрахування 66
5.2.2 Річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт 66
5.2.3 Вартості спожитої електроенергії 67
Висновок 68
ВИСНОВОК 69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 70

ВСТУП

Стрімке зростання цін на енергоносії та ресурси привів до того, що їх частка в сумарних витратах на виробництво кінцевого продукту зростає. Аналіз витрати енергоресурсів на підприємствах показує, що вирішення цього завдання має два напрямки - організаційно-технічні заходи, спрямовані на виключення марного витрачання енергоресурсів, та впровадження енергоефективних технологій та енергозберігаючого обладнання.

Найактуальнішими способами підвищення енергоефективності електромеханічних систем та зниження собівартості продукції є застосування регульованого електроприводу та модернізація існуючих приводів, шляхом правильного вибору потужності двигуна і використання сучасних перетворювачів. І хоча, в деяких випадках, важко розрахувати пряму економію енергетичних ресурсів за рахунок застосування регульованого електроприводу, то використання автоматизованих систем регулювання за технологічними параметрами суттєво впливає на якість кінцевого продукту та його собівартість.

Найбільш поширеним методом поділу різнорідних фракцій є центрифугування, яке реалізується в центрифугах і сепараторах. Основним робочим органом цих машин є ротор, що має, як правило, значний момент інерції і обертається з досить високою швидкістю.

Метою проекту є розробка електроприводу ротора підвісної напівавтоматичної центрифуги типу ФПН з нижнім вивантаженням осаду.

Найбільш широке поширення такі центрифуги отримали в хімічній і харчовій промисловості (це в основному центрифуги з верхнім приводом і нижнім вивантаженням осаду), в інших виробництвах їх використовують при обробці суспензій з нерозчинної твердою фракцією, при обробці продуктів, подрібнення яких небажано. Ці машини широко застосовуються для отримання цукру, кухонної солі, нафталіну, сірки, бури та інших.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Область застосування центрифуг

Одним з найпоширеніших промислових методів розділення різнорідних речовин, що містять рідину є центрифугування, яке реалізується в спеціальних відцентрових машинах – сепараторах. В них здійснюються процеси відстоювання і фільтрації в полі відцентрових сил, через це сепаратори най ефективніші машини для розділення різнорідних рідких систем, ніж відстійники і фільтри. За методом функціонування сепаратори розділяють на відстійні і фільтруючі. Барабани (ротори) відстійних сепараторів мають суцільні, а фільтруючі – перфоровані стінки, які, у свою чергу, покрити фільтрувальною сіткою або тканиною. Фільтруючі сепаратори використовують для розділення крупнодисперсних суспензій кристалічних і аморфних речовин, промивки осадів, які виходять при цьому, а також відділення вологи від штучних речовин. Відстійні сепаратори спеціалізовані для розділення суспензій, що погано фільтруються – емульсій, а також для розділення суспензій за розміром елементів твердої фракції. Відстійні сепаратори, у свою чергу, підрозділяють на безпосередньо відстійні, освітлюючі, концентруючі і розділяючі (або ті, що сепарують).

Сепаратор – це механізм, який приводить ротор в обертання навколо фіксованої осі переважно електричним двигуном, перпендикулярно осі. Сепаратор працює, використовуючи принцип седиментації, де радіальне прискорення використовується для рівномірного розподілу речовини за щільністю.

Робочим органом центрифуг і сепараторів є ротор, в якому здійснюється розділ продуктів за допомогою відцентрових сил. Центрифуги і сепаратори можна віднести до класу апаратів, оскільки вони мають робочі камери, в яких проводиться дія на продукт з метою зміни його властивостей. Проте ці камери знаходяться в обертовому русі з високою частотою обертання. Сепаратори знаходять велике застосування не тільки в цукровій промисловості, але і в крохмало-патокової промисловості для відділення крохмалю від сокової води та інших галузях.

1.2 Класифікація, зовнішній вигляд, кінематична схема механізму

Центрифуги і сепаратори дозволяють використовувати для процесу видалення механічних забруднень високонапружене відцентрово-силове поле. Завдяки цьому можна істотно інтенсифікувати процес очищення і отримати тонкість очищення 1,2 мкм.

Сепаратор (рис. 1.1) є фільтруючою підвісною вертикальною машиною періодичної дії з нижнім вивантаженням продукту через днище ротора, і призначена для розділення суспензій з дрібно та середньозернистою твердою фазою.

Сепаратори виготовляють з вуглецевої сталі і чавуну. Основними вузлами сепаратора є ротор 14, привід 11, кожух 13 з кришкою 12, гальмо 9 і металоконструкція 3.

Сепаратор встановлюється на металоконструкції, що складається з двох опорних стійок і двох подовжніх балок-швелерів №24, сполучених болтами у верхній частині стійкий.

Електродвигун розрахований на роботу при температурі навколишнього середовища до +90°С і відносній вологості 95%. Механічне гальмо 9 центрифуги окрім аварійного гальмування здійснює дозупинку центрифуги після основного електричного рекуперативного гальмування електродвигуна.

Електродвигун сполучений з валом 4 за допомогою еластичної гумової муфти 8; вал закріплений в приводі на шарнірній опорі. Між корпусом

приводу 6 і корпусом підшипників 5 встановлений гумовий амортизатор 10, який при неврівноваженості маси (особливо під час завантаження), що обертається, значно полегшує умови роботи підшипників кочення і валу, приймаючи на себе удари і коливання. Вал, що обертається, може відхилятися від вертикального положення внаслідок деформації гумового амортизатора, що приводить до самоврівноважуванню мас, що обертаються.

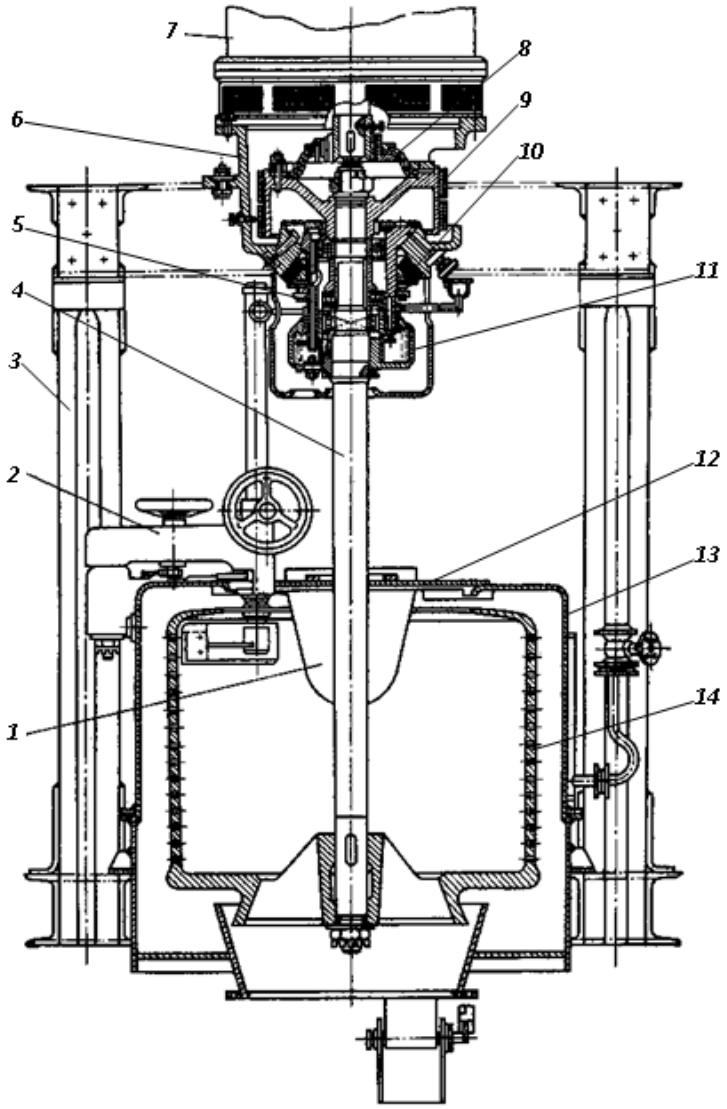

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд фільтруючої підвісної центрифуги

1 – загрузочний лоток; 2 – механізм зрізу осаду; 3 – металоконструкція; 4 – вал; 5 -- корпус підшипників; корпус привода; 7 – електродвигун; 8 – гумова муфта; 9 -- стрічкове гальмо; 10 – гумовий амортизатор; 11 – привод; 12 – кришка кожуха; 13 -- кожух; 14 – ротор.

Ротор центрифуги – циліндричний, з перфорованою обичайкою, підвішений на нижньому кінці валу і викладений усередині фільтруючими ситами. Завантаження проводиться за допомогою спеціального лотка 1, закріпленого на кожусі і такого, що входить всередину ротора. Механізоване вивантаження осаду з ротора (механізм зрізу 2) здійснюється за допомогою ножа спеціальної конструкції, закріпленого на кришці кожуха.

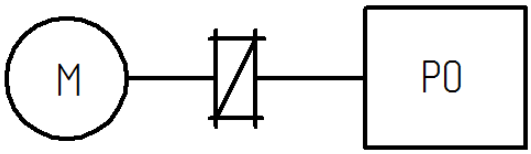

Рисунок 1.2 – Кінематична схема центрифуги

1.3 Технологічний процес центрифугування вимоги до електропривода центрифуги

Центрифугуванням або фугуванням називається розділення неоднорідних систем за допомогою відцентрових сил.

Центрифугування технічних суспензій і шлаків проводиться двома методами. За першим – їх розділення здійснюється завдяки використанню об'ємних сил дисперсної фази, за другим – об'ємних сил дисперсного середовища і частково дисперсної фази. У першому випадку центрифугування виконується в таких роторах, що мають суцільну стінку, в другому – перфоровану.

Розділення в суцільних роторах можна порівняти з відстоюванням в полі тяжіння, хоча особливості відцентрового поля і зумовлюють різницю в протіканні цих процесів.

Центрифугування в перфорованих роторах є своєрідним процесом, окремі елементи якого схожі з процесами фільтрації, пресування шлаків тощо.

Основним показником роботи сепаратора є індекс продуктивності, що характеризує відносну роздільну здатність сепаратора. Його розраховують за формулою:

$$\Sigma = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot F_r$$

де L – довжина ротора сепаратора періодичної дії або циліндрової частини ротора шнекового сепаратора, м;

r – радіус ротора, м;

F_r – фактор розділу

$$F_r = \frac{\omega^2 R}{g}$$

R – радіус обертання;

g – прискорення сили тяжіння.

Друга істотна характеристика сепаратора - індекс продуктивності

$$I = F_r \cdot S, \text{ м}^2$$

де S – робоча поверхня ротора сепаратора.

Чисельно I рівний площі відстійника для очищення суспензії в полі земного тяжіння.

Центрифугування суспензій і шлаків в перфорованих роторах називається відцентровою фільтрацією. У загальному випадку воно складається з наступних трьох процесів, що протікають в результаті дії на оброблюваний продукт відцентрових сил інерції: фільтрації з освітою осаду, тобто відділення частинок, зважених в рідині, при проходженні останньої через проникну стінку ротора центрифуги; віджимання рідини з осаду, що утворився; видалення з осаду рідини, що утримується молекулярними силами.

Відцентрова фільтрація з утворенням осаду протікає подібно до звичайної фільтрації. Наступним етапом відбувається віджимання рідини з осаду, що супроводжується ущільненням останнього. Потім слідує видалення рідини, що утримується в місцях зіткнення частинок і на їх поверхні.

Процес, що складається з віджимання і відділення плівкової і капілярної рідини, називається відцентровим віджиманням. Прикладами цього процесу є центрифугування цукрового утфеля і сульфату амонія.

Підвісні центрифуги з верхнім приводом є машинами періодичної дії. Процес центрифугування в них зазвичай відбувається таким чином. Ротор центрифуги на ходу при неповній або повній швидкості обертання завантажується матеріалом, підметом обробки. Якщо завантаження проведене при неповному обертанні ротора, то після її закінчення швидкість ротора доводять до максимальної. При центрифугуванні в перфорованих роторах тверда фаза до кінця процесу містить мінімальну кількість відокремлюваної рідини, яка утримується на поверхні частинок твердої фази і в місцях їх зіткнення. Щоб позбавитися від залишків рідкої фази, осад промивають іншою рідиною (іноді декількома).

Під дією відцентрового поля промивна рідина віддаляється, і її частка з часом стає мінімальною.

Вивантаження за допомогою механічних ножів здійснюється при обертанні ротора з невеликою швидкістю.

Електроустаткування центрифуг і сепараторів зазвичай працює в умовах хімічно агресивного, невибухонебезпечного середовища з підвищеною відносною вологістю повітря до 95% при температурі до +40 °С. В цьому випадку, при порушенні природного охолодження, виконання електродвигунів повинне бути не менше IP44 або необхідне виконання, що продувається, з підведенням чистого повітря. Найбільшу потужність електродвигунів мають сепаратори періодичної дії, вживані у виробництві цукру. Тому перевантажувальна здатність двигуна повинна бути достатньою для стійкої роботи електроприводу в періоди максимального навантаження. Крім того, апаратура, встановлена на самих центрифугах, повинна працювати в умовах значних вібрацій і трясіння.

Основні вимоги до електроприводу таких механізмів: забезпечити оптимальні динамічні режими при постійному прискоренні і уповільненні ротора і стабілізувати її частоти обертання при завантаженні, вивантаженні і фугуванні.

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

Електропривод ротора сепаратора також повинен забезпечувати можливість плавного регулювання швидкості від "повзучої" швидкості, до максимальної.

Живлення електроприводу здійснюється від цехової мережі змінного струму з напругою 380 В.

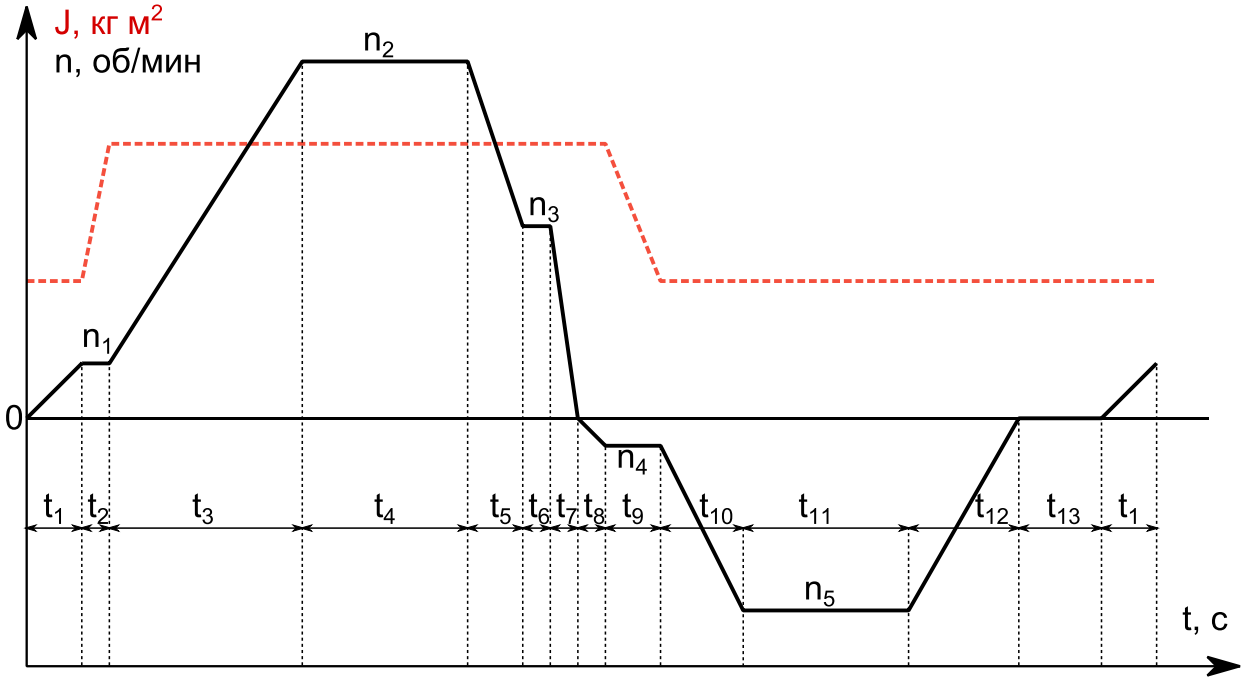

Рисунок 1.3 – Тахограма режимів роботи центрифуги

Електропривод ротора повинен забезпечувати можливість плавного регулювання швидкості в діапазоні від повзучої до максимальної n_2 або n_5 в будь-якому напрямку (n_2, n_5 – значення швидкостей на тахограма рис. 1.3), що містить наступні ділянки:

1) розгін порожнього ротора центрифуги до низької швидкості n_1, (тривалість t_1);

2) завантаження ротора на швидкості n_2 (тривалість t_3);

3) розгін ротора до максимальної швидкості n_2 (тривалість t_3);

4) промивка продукту, фільтрація на швидкості n_2, (тривалість t_4);

5) гальмування ротора до низької швидкості n_3, (тривалість t_5);

6) завершення фільтрації і зливу на швидкості n_3 (тривалість t_6).

7) реверс ротора до швидкості n_4 (тривалість t_7, t_8);

8) опускання ножа, зріз продукту, вивантаження на швидкості n_4 (тривалість t_9);

9) розгін ротора у зворотному напрямку до максимальної швидкості n_5 (тривалість t_{10});

10) промивка сит на швидкості n_5 (тривалість t_{11});

11) гальмування ротора до повної зупинки, накладення механічного гальма (тривалість t_{12});

12) пауза, стан готовності до виконання чергового циклу роботи (тривалість t_{13});

Таблиця 1.1

Вихідні данні

H_1 = 300 мм D_1 = 100 мм H_2 = 120 мм D_2 = 220 мм H_3 = 1000 мм D_3 = 1000 мм $D_{загр.}$ = 700 мм	H_4 = 1050 мм D_4 = 80 мм H_5 = 300 мм H_6 = 35 мм D_6 = 500 мм H_7 = 200 мм $C_м$ = 15 10^6 Н м/рад

Таблиця 1.2

Параметри діаграми режимів роботи

t_1 = 12 с t_2 = 6 с t_3 = 18 с t_4 = 20 с t_5 = 12 с	t_6 = 11 с t_7 = 4 с t_8 = 5 с t_9 = 12 с t_{10} = 14 с	t_{11} = 18 с t_{12} = 11 с t_{13} = 20 с	n_1 = 350 об/хв n_2 = 1500 об/хв n_3 = 200 об/хв n_4 = 600 об/хв n_5 =1500 об/хв

2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

2.1 Аналіз теплового режиму роботи електродвигуна

Визначимо час роботи:

$$t_p = \sum_{i=1}^{n} t_i = 12 + 6 + 18 + 20 + 12 + 11 + 4 + 5 + 12 + 14 + 18 + 11 + 20 = 143, \text{ с} \quad (2.1)$$

Час циклу:

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_{13} = 143 + 20 = 163, \text{ с} \quad (2.2)$$

Фактична тривалість включення:

$$\varepsilon_{\text{ф}} = \frac{t_p}{t_p} \cdot 100 \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{\text{ф}} = \frac{t_p}{t_p} \cdot 100 = 71{,}5. \quad (2.4)$$

Приймаються стандартне значення $\varepsilon_{\text{ст}} = 100$.

Виходячи з тахограми (рис. 1.3) і фактичної тривалості включення, можна зробити висновок, що режим роботи двигуна S8 – режим роботи при періодичному зміні частоти обертання і навантаження. Це послідовність ідентичних робочих циклів, кожен з яких складається з періодів прискорення, роботи при постійному навантаженні, що відповідає заданій частоті обертання, потім одного або декількох періодів роботи при інших постійних значеннях навантаження, що відповідають іншим частотах обертання.

Кваліфікуємо режим роботи як S8 оскільки $\varepsilon_{\text{ф}} > 60$.

2.2 Розрахунок і побудова навантажувальної діаграми механізму

Статичні опори руху в робочих машинах, створюються силами тертя ковзання в підшипниках та тертя об повітря.

По відомій кінематичній схемі рис. 1.3 визначимо моменти опору руху (статичні моменти). Складові статичних моментів на валу механізму розраховуються по формулах:

- момент сил тертя в підшипниках

$$M_{тп} = \frac{m_1 \cdot d_ш \cdot \mu_п \cdot g}{2} \quad (2.5)$$

де m_1 – маса деталей і вузлів, що спираються на підшипники, кг ;

$d_ш$ – діаметр шийки валу або осі, м ;

$\mu_п$ – коефіцієнт тертя ковзання в підшипниках ;

g = 9,81 м/с^2 – прискорення сили тяжіння.

Статичний момент на валу ротора:

$$M_{с.мех} = M_п + M_т \quad (2.6)$$

де $M_п$ – складова статичного моменту, обумовлена тертям ротора сепаратора, що обертає, об повітря;

$M_т$ – момент, що створюється силами тертя валу ротора сепаратора в підшипниках.

На ділянці робочого циклу, відповідній процесу вивантаження осаду, абсолютне значення $M_{с.мех}$ зростає на величину моменту $M_{різ}$, який зумовлений зусиллям різання, що впливає на лезо ножа.

$$M_{різ} = 0{,}6 \cdot M_п \quad (2.7)$$

де $M_п$ – момент сил тертя об повітря:

$$M_п = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot H \cdot D \cdot n^2 \quad (2.8)$$

де H – висота (довжина) ротора, м;

D – діаметр ротора, м;

n – швидкість обертання ротора, об/хв.

Момент сил тертя в підшипниках:

$$M_т = 4{,}9 \cdot f \cdot m_ц \cdot d \quad (2.9)$$

де f – коефіцієнт тертя, що залежить від типу підшипника ($f = 0{,}04$);

$m_ц$ – маса ротора центрифуги з продуктом, кг;

d – діаметр валу на якому укріплений ротор центрифуги, м.

Розрахуємо масу ротора центрифуги з продуктом:

$$m_{\text{ц}} = m_{\text{завнт}} + \sum_{\text{i}} m_{\text{i}} \qquad (2.10)$$

де $m_{\text{завнт}}$ – максимальне завантаження ротора суспензією $m_{\text{завнт}} = 800$ кг;

$\sum_{\text{i}} m_{\text{i}}$ - маса незавантаженого ротора.

$$m_{\text{i}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{i}}^2 \cdot \text{H}_{\text{i}} \qquad (2.11)$$

де D_{i}^2 - діаметр і-тої частини ротора, м;

H_{i} - висота і-тої частини ротора, м;

ρ – щільність сталі (ρ =7900 кг/м^3).

$$\boldsymbol{m_1 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_5^2 - D_9^2\right) \cdot H_5 \cdot \rho} \qquad \text{m}_1 = 37{,}953 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{m_2 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_6^2 - D_5^2\right) \cdot H_5 \cdot \rho} \qquad \text{m}_2 = 390{,}695 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{m_3 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_4^2\right) \cdot H_4 \cdot \rho} \qquad \text{m}_3 = 41{,}674 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{m_4 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_3^2 - D_4^2\right) \cdot H_9 \cdot \rho} \qquad \text{m}_4 = 123{,}236 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{m_5 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_3^2 - D_6^2\right) \cdot H_9 \cdot \rho} \qquad m_5 = 93{,}022 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{\text{m}_6 = \frac{\pi}{4} \cdot \left[\text{D}_3^2 - \left(\text{D}_3 - 2 \cdot \text{H}_{10}\right)^2\right] \cdot \left(\text{H}_3 - 2 \cdot \text{H}_9\right) \cdot \rho} \qquad \text{m}_6 = 235{,}756 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{m_7 = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot H_2 \cdot \rho} \qquad m_7 = 36{,}018 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{m_8 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_7^2 - D_2^2\right) \cdot H_8 \cdot \rho} \qquad \text{m}_8 = 9{,}557 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{m_9 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_7^2 - D_8^2\right) \cdot \left(H_7 - H_8\right) \cdot \rho} \qquad \text{m}_9 = 10{,}487 \text{ кг}$$

$$\boldsymbol{m_{10} = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot H_1 \cdot \rho} \qquad \text{m}_{10} = 18{,}605 \text{ кг}$$

Маса незавантаженого ротора:

$$\sum_{\text{i}} m_{\text{i}} = 37{,}953 + 390{,}695 + 41{,}674 + 123{,}236 + 93{,}022 + 235{,}756 + 36{,}018 + 9{,}557 + 10{,}487 + 18{,}605 = 997{,}003 \text{ кг}$$

Маса ротора з продуктом:

$$m_{\text{ц}} = 800 + 997{,}003 = 1797{,}003 \text{ кг}$$

Момент сил тертя в підшипниках для завантаженого і незавантаженого ротора ($f = 0{,}04$ - підшипники кочення):

$$\text{М}_{\text{т.заван}} = 4{,}9 \cdot f \cdot m_{\text{ц}} \cdot D_4 \quad (2.12)$$

$$\text{М}_{\text{т.не.заван}} = 4{,}9 \cdot f \cdot \sum_{\text{i}} m_{\text{i}} \cdot D_4 \quad (2.13)$$

$$\text{М}_{\text{т.заван}} = 4{,}9 \cdot 0{,}04 \cdot 1797{,}003 \cdot 0{,}08 = 28{,}177 \text{ Нм}$$

$$\text{М}_{\text{т.не.заван}} = 4{,}9 \cdot 0{,}04 \cdot 997{,}003 \cdot 0{,}08 = 15{,}633 \text{ Нм}$$

Розрахуємо швидкість обертання ротора на кожній ділянці робочого циклу:

$n_{p1} = \frac{350}{2} = 175$, об/хв

$n_{p2} = 350$, об/хв

$n_{p3} = \frac{1500-350}{2} + \frac{350}{2} = 750$, об/хв

$n_{p4} = 1500$, об/хв

$n_{p5} = 1500 - \frac{1500-200}{2} = 850$, об/хв

$n_{p6} = 200$, об/хв

$n_{p7} = \frac{200}{2} = 100$, об/хв

$n_{p8} = \frac{-600}{2} = -300$, об/хв

$n_{p9} = -600$, об/хв

$n_{p10} = -600 + \frac{-1500+600}{2} = -1050$, об/хв

$n_{p11} = -1500$, об/хв

$n_{p12} = \frac{-1500}{2} = -750$, об/хв

$n_{p13} = 0$, об/хв.

Визначимо момент сил тертя об повітря на кожній ділянці робочого циклу:

$\text{М}_{\text{п1}} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 175^2 = 0{,}720$, Нм

$\text{М}_{\text{п2}} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 350^2 = 2{,}879$, Нм

$$M_{п3} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 = 13{,}219, \text{ Нм}$$
$$M_{п4} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 1500^2 = 52{,}88, \text{ Нм}$$
$$M_{п5} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 850^2 = 16{,}979, \text{ Нм}$$
$$M_{п6} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2 = 0{,}940, \text{ Нм}$$
$$M_{п7} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2 = 0{,}235, \text{ Нм}$$
$$M_{п8} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (-300)^2 = 2{,}115, \text{ Нм}$$
$$M_{п9} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (-600)^2 = 8{,}46, \text{ Нм}$$
$$M_{п10} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (-1050)^2 = 25{,}909, \text{ Нм}$$
$$M_{п11} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (-1500)^2 = 52{,}875, \text{ Нм}$$
$$M_{п12} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (-750)^2 = 13{,}219, \text{ Нм}$$
$$M_{п13} = 23{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (0)^2 = 0, \text{ Нм}$$

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

$$M_{с.мех1} = M_{п1} + M_{т.не.заван} = 0{,}720 + 15{,}633 = 16{,}353 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех2} = M_{п2} + M_{т.заван} = 2{,}879 + 28{,}177 = 31{,}056 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех3} = M_{п3} + M_{т.заван} = 13{,}219 + 28{,}177 = 41{,}396 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех4} = M_{п4} + M_{т.заван} = 52{,}88 + 28{,}177 = 81{,}052 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех5} = M_{п5} + M_{т.заван} = 16{,}979 + 28{,}177 = 45{,}156 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех6} = M_{п6} + M_{т.заван} = 0{,}940 + 28{,}177 = 29{,}177 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех7} = M_{п7} + M_{т.заван} = 0{,}235 + 28{,}177 = 28{,}412 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех8} = -(M_{п8} + M_{т.заван}) = -(2{,}115 + 28{,}177) = -30{,}292 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех9} = -(M_{п9} + M_{т.заван}) = -(8{,}46 + 28{,}177) = -36{,}637 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех10} = -(M_{п10} + M_{т.не.заван}) = -(25{,}909 + 15{,}633) = -54{,}086 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех11} = -(M_{п11} + M_{т.не.заван}) = -(52{,}875 + 15{,}633) = -81{,}052 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех12} = -(M_{п12} + M_{т.не.заван}) = -(13{,}219 + 15{,}633) = -41{,}396 \text{ Нм}$$
$$M_{с.мех13} = M_{п13} = 0 \text{ Нм}$$

Навантажувальна діаграма $\boldsymbol{M_{с.мех}(t)}$

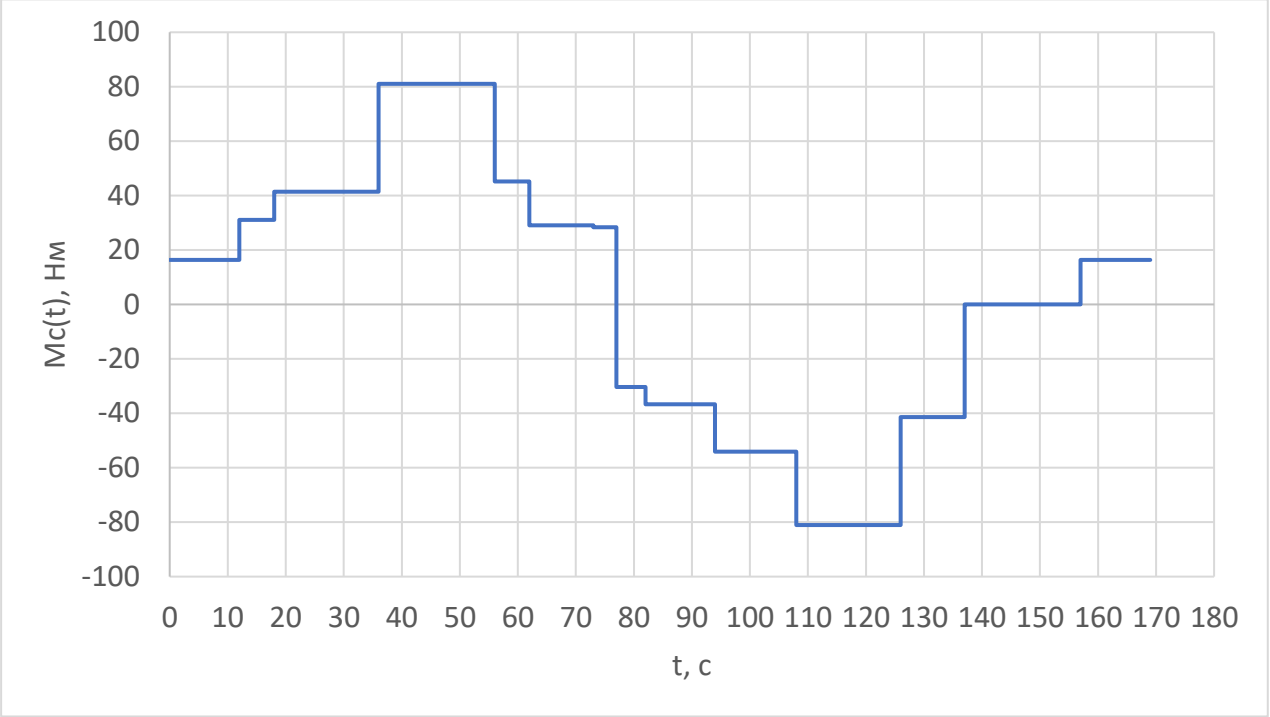

Рисунок 2.1 – Навантажувальна діаграма

2.3 Розрахунок моменту інерції електропривода

На основі розрахункової схеми механічної частини обчислюється сумарний момент інерції приводу J_Σ, приведений до швидкості обертання валу двигуна. При цьому отримуємо два значення J_Σ для ділянки робочого циклу, коли ротор не завантажений і повністю завантажений суспензією.

$$J_\Sigma = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} \tag{2.14}$$

де $J_{\text{дв}}$ - момент інерції ротора двигуна (якоря);

$J_{\text{мех}}$- момент інерції механізму (ротора центрифуги з продуктом).

$$J_{\text{мех}} = \sum J_{\text{мехі}} \tag{2.15}$$

де $J_{\text{мехі}} = \frac{\pi}{32} \cdot \rho \cdot H_i \cdot (D_{\text{н.і}}^4 - D_{\text{в.і}}^4)$

$$\text{J}_1 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot H_5 \cdot (D_5^4 - D_9^4)}{32} = 0{,}283 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\text{J}_2 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot H_6 \cdot (D_6^4 - D_5^4)}{32} = 1{,}652 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\text{J}_3 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot H_4 \cdot D_4^4}{32} = 0{,}033 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_4 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot H_9 \cdot (D_3^4 - D_4^4)}{32} = 15{,}503 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_5 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot H_9 \cdot (D_3^4 - D_6^4)}{32} = 14{,}535 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_6 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot (H_3 - 2 \cdot H_9) \cdot \left(D_3^4 - (D_3^4 - 2 \cdot H_{10})\right)}{32} = 57{,}772 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_7 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot H_2 \cdot D_2^4}{32} = 0{,}218 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_8 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot H_8 \cdot (D_7^4 - D_2^4)}{32} = 13{,}202 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_9 = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot (H_7 - H_8) \cdot (D_7^4 - D_8^4)}{32} = 0{,}516 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{10} = \frac{\pi \cdot 7900 \cdot H_1 \cdot D_1^4}{32} = 0{,}023 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Для того, щоб визначити момент інерції приводу для ділянок робочого циклу, коли ротор повністю завантажений, необхідно визначити момент інерції утфеля.

$$J_{\text{утф}} = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_{\text{утф}} \cdot (1 - 2 \cdot H_9) \cdot [(1 - 2 \cdot H_{10})^2 - D_{\text{заг}}^2] \qquad (2.16)$$

де $\rho_{\text{утф}}$ – густина утфеля ($\rho_{\text{утф}} = 2{,}259 \cdot 10^3 (\text{кг}/\text{м}^3)$).

$$J_{\text{утф}} = \frac{\pi}{4} \cdot 2{,}259 \cdot (1 - 2 \cdot 1{,}1) \cdot [(1 - 2 \cdot 1{,}2)^2 - 0{,}8^2] = 100{,}1, \text{кгм}^2.$$

Тоді:

$$J_{\text{мехі}} = 0{,}283 + 1{,}652 + 0{,}033 + 15{,}503 + 14{,}535 + 57{,}772 + 0{,}218 + 13{,}202 + \\ + 0{,}516 + 0{,}023 = 103{,}737, \text{кгм}^2$$

Момент інерції порожнього ротора

$$J_{\text{пор}} = 103{,}737 + 1{,}7 = 104{,}037, \text{кгм}^2$$

Момент інерції завантаженого ротора

$$J_{\text{заван}} = 104{,}037 + 100{,}1 = 204{,}137, \text{кгм}^2$$

2.4 Розрахунок навантажувальної діаграми

Статичний момент, приведений до швидкості валу двигуна, визначається за формулою:

$$M_c = M_0 + \frac{M_{с.мех}}{i_р} \cdot \eta_р \quad (2.17)$$

де M_0 – момент втрат холостого ходу електродвигуна;

$i_р$ – передаточне число редуктора;

$\eta_р$ – ккд редуктора.

Величиною M_0 нехтуємо, оскільки привод безредукторний, то формула (2.17) набуває вигляду:

$$M_c = M_{с.мех} \quad (2.18)$$

Електромагнітний момент двигуна рівний сумі статичного і динамічного моментів:

$$M_c = M_c + M_{дин} \quad (2.19)$$

де

$$M_{дин} = J_\Sigma \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (2.20)$$

Розрахуємо динамічні моменти:

$$M_{дин1} = 104{,}037 \cdot \frac{\pi \cdot 350}{30 \cdot 12} = 317{,}602, \text{ Нм}$$

$$M_{дин2} = 204{,}137 \cdot \frac{\pi \cdot 0}{30 \cdot 6} = 0, \text{ Нм}$$

$$M_{дин3} = 204{,}137 \cdot \frac{\pi \cdot 1150}{30 \cdot 18} = 1365{,}072, \text{ Нм}$$

$$M_{дин4} = 204{,}137 \cdot \frac{\pi \cdot 0}{30 \cdot 20} = 0, \text{ Нм}$$

$$M_{дин5} = 204{,}137 \cdot \frac{\pi \cdot (-1300)}{30 \cdot 12} = -2{,}315 \cdot 10^3, \text{ Нм}$$

$$M_{дин6} = 204{,}137 \cdot \frac{\pi \cdot 0}{30 \cdot 11} = 0, \text{ Нм}$$

$$M_{дин7} = 204{,}137 \cdot \frac{\pi \cdot (-200)}{30 \cdot 4} = -1068{,}32, \text{ Нм}$$

$$M_{дин8} = 204{,}137 \cdot \frac{\pi \cdot (-600)}{30 \cdot 5} = -2{,}563 \cdot 10^3, \text{ Нм}$$

$$M_{дин9} = 204{,}137 \cdot \frac{\pi \cdot (0)}{30 \cdot 12} = 0, \text{ Нм}$$

$$M_{дин10} = 104{,}037 \cdot \frac{\pi \cdot (-1100)}{30 \cdot 14} = -1373{,}55, \text{ Нм}$$

$$M_{дин11} = 104{,}037 \cdot \frac{\pi \cdot (0)}{30 \cdot 18} = 0, \text{ Нм}$$

$$M_{дин12} = 104{,}037 \cdot \frac{\pi \cdot (1500)}{30 \cdot 11} = 1484{,}89, \text{ Нм}$$

$$M_{дин13} = 104{,}037 \cdot \frac{\pi \cdot 0}{30 \cdot 20} = 0, \text{ Нм}$$

Знаючи статичний і динамічний моменти на кожній ділянці робочого циклу, по формулі (2.19) визначаємо електромагнітний момент:

$$M_1 = M_{с\ мех\ 1} + M_{дин1} = 333{,}955 \text{ Нм}$$

$$M_2 = M_{с\ мех\ 2} + M_{дин2} = 31{,}056 \text{ Нм}$$

$$M_3 = M_{с\ мех\ 3} + M_{дин3} = 1406{,}468 \text{ Нм}$$

$$M_4 = M_{с\ мех\ 4} + M_{дин4} = 81{,}052 \text{ Нм}$$

$$M_5 = M_{с\ мех\ 5} + M_{дин5} = -2{,}359 \cdot 10^3 \text{ Нм}$$

$$M_6 = M_{с\ мех\ 6} + M_{дин6} = 29{,}117 \text{ Нм}$$

$$M_7 = M_{с\ мех\ 7} + M_{дин7} = -1039{,}9 \text{ Нм}$$

$$M_8 = M_{с\ мех\ 8} + M_{дин8} = -2{,}594 \cdot 10^3 \text{ Нм}$$

$$M_9 = M_{с\ мех\ 9} + M_{дин9} = -36{,}637 \text{ Нм}$$

$$M_{10} = M_{с\ мех\ 10} + M_{дин10} = -1427{,}64 \text{ Нм}$$

$$M_{11} = M_{с\ мех\ 11} + M_{дин11} = -81{,}052 \text{ Нм}$$

$$M_{12} = M_{с\ мех\ 12} + M_{дин12} = 1443{,}5 \text{ Нм}$$

$$M_{13} = M_{с\ мех\ 13} + M_{дин13} = 0 \text{ Нм}$$

Діаграми навантажень $M_c(t)$ і $M(t)$ представлені на кресленнях.

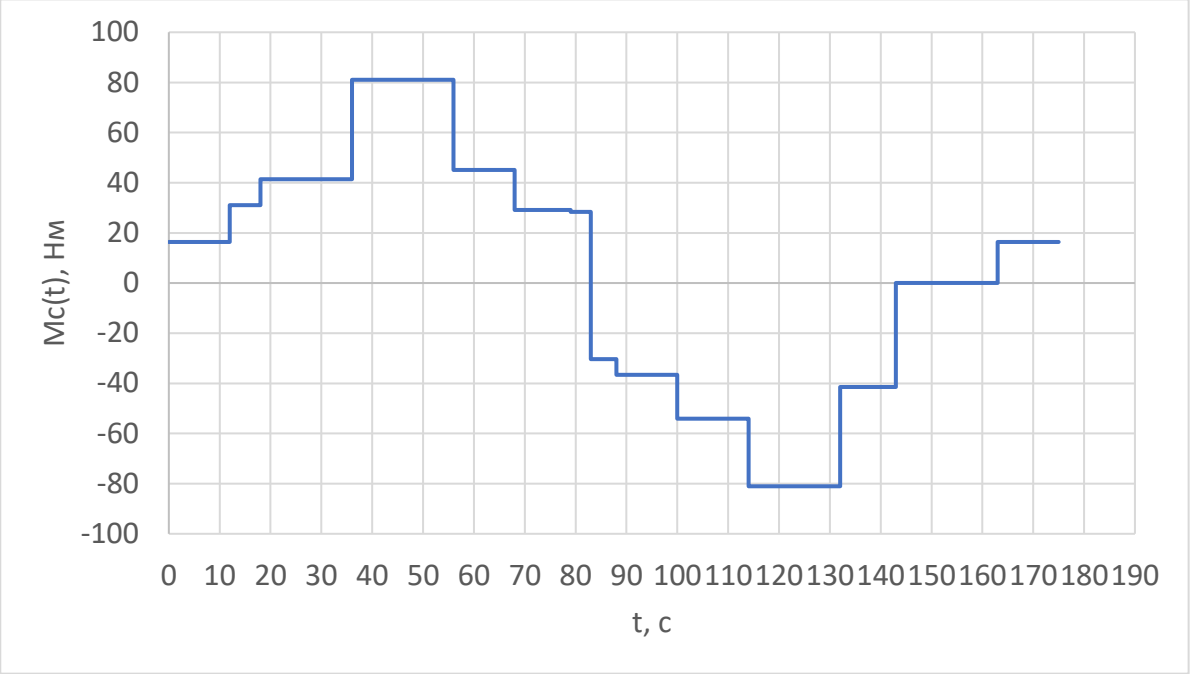

Рисунок 2.2 – Діаграма статичного моменту за цикл роботи

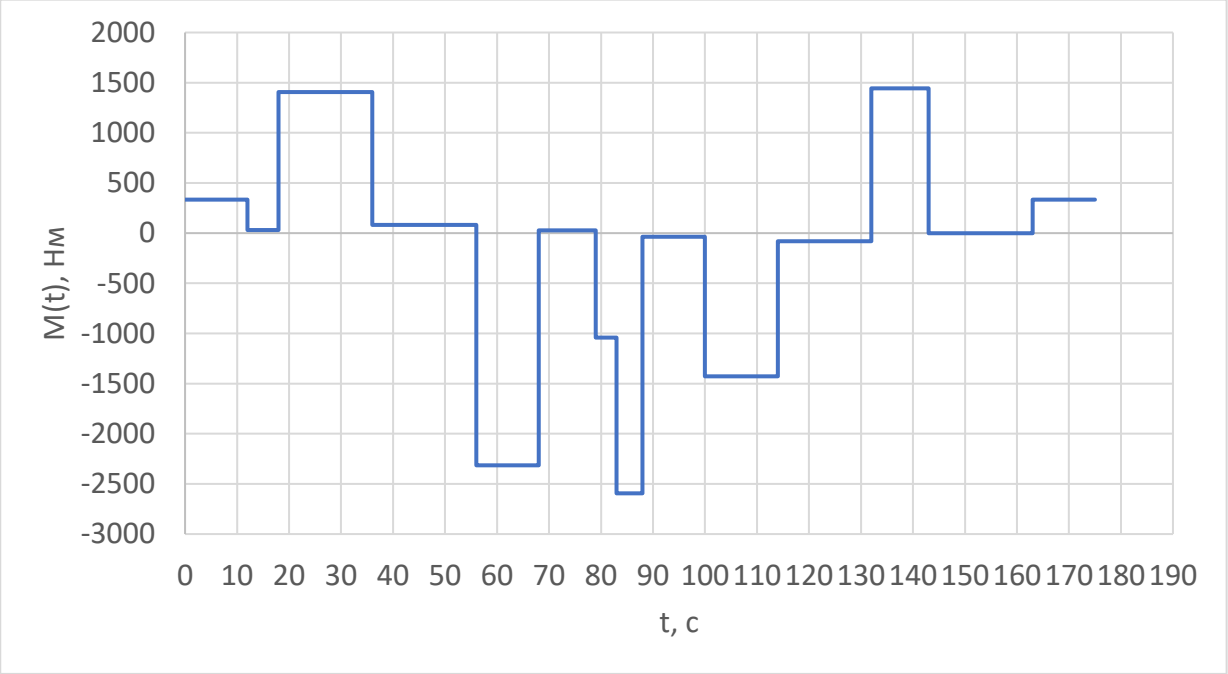

Рисунок 2.3 – Діаграма моменту двигуна за цикл роботи

2.5 Вибір системи електропривода

Регулювання швидкості у відповідності з вимогами технологічного процесу є однією з основних задач автоматизованого електроприводу. Регульований електропривод дозволяє змінювати швидкість виробничого механізму відповідно до керуючої дії, що виробляється системою регулювання або оператором. Регулювання та підтримка швидкості на заданому рівні повинні проводитися незалежно від сил опору, діючих на електромеханічну систему.

Для кількісного визначення вимог, що висуваються до електроприводу, і для зіставлення різних способів регулювання швидкості використовуються узагальнені показники регулювання швидкості. Основні з них: діапазон регулювання, точність і стабільність регулювання, плавність, динамічні показники якості, економічність регулювання та ін.

Зазвичай для привода відцентрових механізмів з великим моментом інерції застосовують двигуни постійного струму, оскільки вони дозволяють керувати швидкістю в широкому діапазоні, легко реалізувати стабілізацію швидкості та реверс. В якості систем керування ДПС використовують декілька систем. По-перше, система генератор-двигун (Г-Д) дозволяє малою потужністю регулювати швидкість в широкому діапазоні, плавність регулювання, реалізовувати двозонне керування, при наявності зворотних зв’язків має значний запас за перевантаженням. Недоліком системи Г-Д є низький ККД; значні капітальні вкладення та габарити; низька надійність; при інтенсивному технологічному процесі часто виникає необхідність обслуговувати колекторні механізми генератора і двигуна.

По-друге, система тиристорний перетворювач – двигун. Вона сучасніша, має велику швидкодію, більший ККД порівняно з Г-Д, широкий діапазон регулювання, можливість формування оптимальних діаграм швидкостей. Недоліком системи є низький коефіцієнт потужності; негативний вплив на мережу; підвищені електричні втрати в електродвигуні.

Електропривод на базі двигунів змінного струму також можуть бути використано для системи, що розглядається. Найкращим варіантом є багатошви-

дкісний асинхронний двигун, бо немає потреби в регулюванні швидкості. Але такі двигуни, останнім часом, «зустрічаються» дуже рідко, та і коштують вони значно дорожче за звичайні.

Єдиний спосіб реалізувати всі необхідні швидкості та режими роботи – використання системи керування.

Система тиристорний регулятор напруги - асинхронний двигун (ТРН-АД), забезпечує плавне регулювання напруги на статорі двигуна і тим самим дозволяє регулювати момент двигуна. Зміна швидкості відбувається в малому діапазоні. Недоліком такої системи є неможливість сформувати максимальний момент більше пускового, низькі енергетичні характеристики при регулювання напруги. Система ТРН-АД випускається серійно як вітчизняними так і зарубіжними виробниками, однак з огляду на зазначених недоліків вона використовується тільки для розгону і гальмування двигуна і не забезпечує тривалої його роботи на швидкостях менше номінальної, що не задовольняє поставлених вимог.

Асинхронно-вентильний каскад (АВК) і дотепер використовують для потужних машин. Така система має високі регулювальні характеристики, відсутність комутаційної апаратури в колі ротора. Недоліками системи є використання двигуна з фазним ротором; необхідність застосування додаткового обладнання; збільшення встановленої потужності електроприводу; низький коефіцієнт потужності; складність в реалізації реверсу.

Останнім часом все більше в якості керованого електропривода застосовується система ПЧ-АД. З розвитком напівпровідникової стало можливим повноцінно керувати швидкістю АД в широкому діапазоні (1:1000). Тепер частота обертання АД не залежить від частоти живильної мережі, двигуни можна розганяти нижче і вище їх номінальної швидкості. Також з'явилася можливість управління моментом асинхронних двигунів. Системи управління рухом з використанням асинхронних двигунів і перетворювачів частоти виходять дешевше і простіше подібних систем з двигунами постійного струму.

Саме ці аргументи привели до того, що на багатьох підприємствах машини постійного струму з тиристорними перетворювачами стали замінюватися на асинхронні двигуни з системами управління, побудованими на ПЧ [6].

Перетворювач частоти має наступні основні переваги:

- оперативне автоматичне або ручне управління швидкістю або параметром, який від цієї швидкості залежить;
- економію електроенергії при заміні інших способів регулювання;
- зниження пускових струмів до мінімально необхідних для реалізації пуску;
- зниження ударних навантажень на механізм при пуску;
- комплексний захист двигуна і механізму.

Істотні переваги АД визначають безсумнівну перспективність системи перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АД). На сьогоднішній день ця система практично є стандартом в задачах де необхідно регулювати швидкість АД як в малих, так і в широких діапазонах, формувати високі пускові моменти, регулювати момент під час роботи тощо. Сучасні ПЧ мають великі можливості по інтеграції в системи управління різної складності, містять різні набори прикладних об'єктно-орієнтованих функцій. Істотним недоліком є висока вартість ПЧ і потреба висококваліфікованого обслуговуючого персоналу.

Не дивлячись на високу вартість перетворювача частоти, застосування системи ПЧ-АД дозволить:

- керувати пуско-гальмівними режимами роботи приводу;
- забезпечити плавне регулювання швидкості двигуна;
- використовувати різні прикладні функції автоматизації, реалізовані в ПЧ;
- підвищити довговічність обладнання і його надійність,
- забезпечить різні види захисту електроприводу в одному пристрої.

2.6 Вибір двигуна

Зазвичай для таких механізмів, як центрифуга та сепаратор, немає сенсу розраховувати необхідну потужність двигуна, оскільки задана тахограма

технологічного циклу вимагає від двигуна значних динамічних моментів. Тому будемо обирати двигун за необхідною швидкістю та максимальним моментом впродовж всього робочого циклу роботи ЕП:

$$M \leq M_{доп}, \quad (2.21)$$

тут M – значення моменту з діаграми навантажень; $M_{доп}$ – максимальний момент двигуна.

Як M беремо максимальний момент за час роботи в робочому циклі.

$$M = M_8 = 2594 \text{ Нм}$$

Відповідно до завдання максимальна швидкість $n = n_2 = n_5 = 1500$ об/хв. Обираємо асинхронний двигун [5] 4А315М4У3

Таблиця 2.1

Параметри двигуна 4А315М4У3

Параметр	**Значення**
Номінальна потужність, кВт	250
Синхронна частота обертання, об/хв	1500
Номінальна напруга живлення, В	380
Номінальний ККД, %	94,5
Номінальний коефіцієнт потужності, в.о.	0,92
Момент інерції ротора, кг м^2	3,6
Номінальне ковзання, %	1,3
Критичне ковзання, %	5%
Максимальний момент Ммакс/Мн, в.о.	1,9
Пусковий струм Іп/Ін, в.о.	7

Таблиця 2.2

Параметри схеми заміщення в номінальному режимі, в.о.

X_μ	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2
4,6	0,013	0,090	0,013	0,13

2.6.1 Перевірка обраного двигуна

Перевірка за пусковим моментом

Сенс цієї перевірки полягає в тому, що перевіряється фізична можливість процесу пуску ЕП з нерухомого стану. Необхідно перевірити виконання умови:

$$\mathrm{M_П} > \mathrm{M_{с.зр}}. \tag{2.22}$$

де $\mathrm{M_П}$ – пусковий момент двигуна;

$\mathrm{M_{с.зр}}$ – значення статичного моменту при рушанні механізму з нерухомого стану (момент зрушення).

Оскільки пуск двигуна здійснюється на холостому ході, то момент $\mathrm{M_{с.зр}}$ має мале значення, тобто можна зробити висновок, що $\mathrm{M_П} > \mathrm{M_{с.зр}}$.

За пусковим моментом двигун підходить. Тепер двигун потрібно перевірити за умовами нагрівання (по температурному режиму).

Перевірка за еквівалентним моментом

У практиці проектування ЕП зі всіх методів перевірки двигунів на нагрів найбільшого поширення набули методи еквівалентного моменту – для випадку однозонного регулювання швидкості і еквівалентного струму – для випадку двозонного регулювання швидкості.

Значення еквівалентного моменту знаходять за формулою:

$$M_\mathrm{e} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \cdots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}} \tag{2.23}$$

де $\mathrm{M}_1, \mathrm{M}_2, \ldots, \mathrm{M}_n$ – значення моментів на ділянках навантажувальної діаграми $\mathrm{M}(t)$ тривалістю $t_1, t_2, \ldots, t_n$ причому сума тривалостей цих ділянок рівна часу циклу

$$\sum_{i=1}^{n} t_i = T_\mathrm{Ц}.$$

Формула еквівалентного моменту справедлива лише у випадках, коли умови охолоджування на всіх ділянках роботи не відрізняються від розрахункових, прийнятих при проектуванні двигуна. Для самовентилюємих двигунів,

тепловіддача яких залежить від частоти обертання, в ці формули слід вводити поправочні коефіцієнти для ділянок, де швидкість двигуна менше номінальної.

$$M_{\text{е}} = \sqrt{\frac{334^2 \cdot 12 + 31{,}06^2 \cdot 6 + 1406{,}5^2 \cdot 18 + 81{,}05^2 \cdot 20 + (-2359)^2 \cdot 12 + 29{,}1^2 \cdot 11 + (-1040)^2 \cdot 4 + (-2594)^2 \cdot 5 + }{12+6+18+20+12+11+4+5+12+14+18+11}}$$

$$\overline{\frac{+(-1427{,}64)^2 \cdot 14 + (-81{,}05)^2 \cdot 18 + 1443{,}5^2 \cdot 11}} = 1163{,}035 \text{ Нм}$$

$$\text{M}_{\text{е}} \leq \text{M}_{\text{н д}}$$

Номінальний момент обраного двигуна

$$\text{M}_{\text{н}} = 9550 \cdot \frac{\text{P}_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 9550 \cdot \frac{250}{1480{,}5} = 1612{,}63 \text{ Нм} \qquad (2.24)$$

Відповідно до заданої умови еквівалентний момент менший за номінальний момент двигуна

$$1163{,}035 \text{ Нм} \leq 1612{,}63 \text{ Нм}.$$

Двигун підходить за еквівалентним моментом.

Перевантажувальна здатність АД за моментом $\text{M}_{\text{макс}}/M_{\text{н}} = 1{,}9$. Тобто $\text{M}_{\text{макс}} = 3064$ Нм. Відповідно до розрахованої діаграми моментів (п. 2.4) найбільший момент маємо на восьмій ділянці $\text{M}_8 = 2594$ Нм.

$$2594 \text{ Нм} \leq 3064 \text{ Нм}.$$

Двигуна має запас по динамічному моменту.

За наведеними даними двигуна побудуємо його механічні характеристики. З огляду на те, що обраний спосіб регулювання швидкості приводного двигуна зміною напруги і частоти на обмотці статора, характеристики будемо будувати для кількох значень частоти напруги живлення. Використовуємо методику, викладену в [7]. Характеристики будемо будувати для випадку зміни співвідношення напруги і частоти за законом U / f = const.

Характеристики будуються на основі Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна. Тому попередньо виконаємо розрахунок її параметрів за параметрами двигуна.

Оскільки параметри схеми заміщення наведено у відносних одиниця, то для розрахунку перейдемо до абсолютних одиниць

$$Z = \frac{z}{I_{\text{фн}} \cdot U_{\text{фн}}}, \text{Ом} \qquad (2.25)$$

$$I_{\text{фн}} = \frac{P_{\text{н}}}{3 \cdot U_{\text{фн}} \cdot \eta \cdot cos\varphi} = 435{,}7 \text{ А}$$

Таблиця 2.3

Параметри схеми заміщення в номінальному режимі, Ом.

X_μ	R_1	X_1	R'_2	X'_2
1,3410	0,0038	0,0262	0,0038	0,0379

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_1 = \frac{X_1}{\omega_C} = \frac{0{,}0262}{314{,}16} = 8{,}34 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$$

де $\omega_C = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314{,}16$ рад/с – номінальна кругова частота напруги живлення ($f = 50$ Гц).

Індуктивність розсіювання обмотки ротора:

$$L'_2 = \frac{X'_2}{\omega_C} = \frac{0{,}0379}{314{,}16} = 12{,}06 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$$

Активний опір контуру намагнічування:

$$R_0 = \frac{\Delta P_{CT}}{3 \cdot I_0^2} = \frac{15406}{3 \cdot 344{,}45} = 0{,}043 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_0 = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{фн}}}{I_{\text{фн}}}\right)^2 - (R_1 + R_0)^2} - X_1 = 0{,}2615 \text{ Ом}$$

Індуктивність контуру намагнічування

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_C} = \frac{1{,}3410}{314{,}16} = 0{,}0043 \text{ Гн}$$

Після визначення параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна, задамо кілька значень частот напруги живлення, для яких будемо будувати механічні характеристики:

$$f = [5, 10, 20, 30, 40, 50, 60] \text{ Гц.}$$

Визначимо відносне значення частоти напруги живлення, розділивши задану частоту на частоту мережі:

$$f^* = [0{,}1\ 0{,}2\ 0{,}4\ 0{,}6\ 0{,}8\ 1\ 1{,}2] \text{ в. о.}$$

Для розрахунків також необхідно визначити коефіцієнт C_F, що характеризує собою відношення напруги фази статора до напруги на затискачах контуру намагнічування при синхронному ході двигуна [7]:

$$C_F = \frac{1}{R_0^2 + X_0^2 f^*}\sqrt{A + B},$$

$$A = [(R_1 + R_0)R_0 + (X_1 + X_0)X_0 f^{*2}]^2,$$

$$B = [(R_1 + R_0)X_0 f^* - (X_1 + X_0)X_0 f^*]^2.$$

Формула розрахунку моменту при різних частотах напруги і ковзаннях для закону управління $U/f = const$ має вигляд:

$$M = \frac{3\frac{R_2'}{s}\left(U_{\text{фн}} f^*\right)^2}{\omega_{0H} f^* \left[\left(R_1 + C_F \frac{R_2'}{s}\right)^2 + f^{*2}(X_1 + C_F X_2')^2\right]}.$$

Частоту обертання двигуна в функції ковзання визначимо як:

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

Розрахуємо механічні характеристики в діапазоні ковзань $s = 0 \ldots 1{,}2$.

Таблиця 2.4

Розрахунок механічних характеристик АД при частотному керуванні

	f=5, Гц		f=10, Гц		f=20, Гц		f=30, Гц		f=40, Гц		f=50, Гц		f=60, Гц	
s	**ω, рад/с**	**M, Нм**	**ω, рад/с**	**M, Нм**	**ω, рад/с**	**M, Нм**	**ω, рад/с**	**M, Нм**	**ω, рад/с**	**M, Нм**	**ω, рад/с**	**M, Нм**	**ω, рад/с**	**M, Нм**
0,001	15,68	11,09	31,37	22,18	62,74	44,36	94,11	66,53	125,47	88,71	156,84	110,88	188,21	133,04
0,05	14,92	505,69	29,83	1000,64	59,66	1919,79	89,49	2696,67	119,32	3301,77	149,15	3734,86	178,98	4015,30
0,082	14,41	780,05	28,83	1518,88	57,65	2747,44	86,48	3554,90	115,30	3975,19	144,13	4115,37	172,95	4081,47
0,15	13,35	1251,25	26,69	2317,95	53,38	3579,85	80,07	3892,09	106,76	3746,20	133,45	3449,35	160,14	3131,21
0,2	12,56	1514,93	25,12	2684,78	50,24	3688,96	75,36	3636,48	100,48	3276,23	125,60	2890,21	150,72	2550,83
0,25	11,78	1721,17	23,55	2910,97	47,10	3599,46	70,65	3299,76	94,20	2848,83	117,75	2450,48	141,30	2129,05
0,3	10,99	1880,02	21,98	3034,10	43,96	3423,95	65,94	2975,18	87,92	2496,48	109,90	2113,40	131,88	1818,65
0,35	10,21	2000,16	20,41	3084,33	40,82	3219,71	61,23	2687,93	81,64	2211,17	102,05	1851,95	122,46	1583,66
0,4	9,42	2088,86	18,84	3084,43	37,68	3013,92	56,52	2440,58	75,36	1979,12	94,20	1645,15	113,04	1400,69
0,45	8,64	2152,20	17,27	3050,92	34,54	2818,61	51,81	2228,99	69,08	1788,29	86,35	1478,34	103,62	1254,68
0,5	7,85	2195,13	15,70	2995,52	31,40	2638,33	47,10	2047,65	62,80	1629,37	78,50	1341,34	94,20	1135,70
0,55	7,07	2221,71	14,13	2926,44	28,26	2474,15	42,39	1891,43	56,52	1495,36	70,65	1227,03	84,78	1037,00
0,6	6,28	2235,24	12,56	2849,36	25,12	2325,52	37,68	1755,96	50,24	1381,08	62,80	1130,33	75,36	953,88
0,65	5,50	2238,36	10,99	2768,17	21,98	2191,21	32,97	1637,66	43,96	1282,59	54,95	1047,52	65,94	882,97
0,7	4,71	2233,25	9,42	2685,52	18,84	2069,80	28,26	1533,64	37,68	1196,92	47,10	975,87	56,52	821,77
0,8	3,14	2204,90	6,28	2522,35	12,56	1860,10	18,84	1359,64	25,12	1055,34	31,40	858,15	37,68	721,56
0,9	1,57	2160,47	3,14	2367,81	6,28	1686,44	9,42	1220,21	12,56	943,32	15,70	765,56	18,84	643,02
1	0,00	2106,63	0,00	2224,91	0,00	1540,95	0,00	1106,20	0,00	852,57	0,00	690,89	0,00	579,82
1,1	-1,57	2047,76	-3,14	2094,28	-6,28	1417,66	-9,42	1011,37	-12,56	777,61	-15,70	629,42	-18,84	527,90
1,2	-3,14	1986,69	-6,28	1975,47	-12,56	1312,04	-18,84	931,32	-25,12	714,68	-31,40	577,95	-37,68	484,48

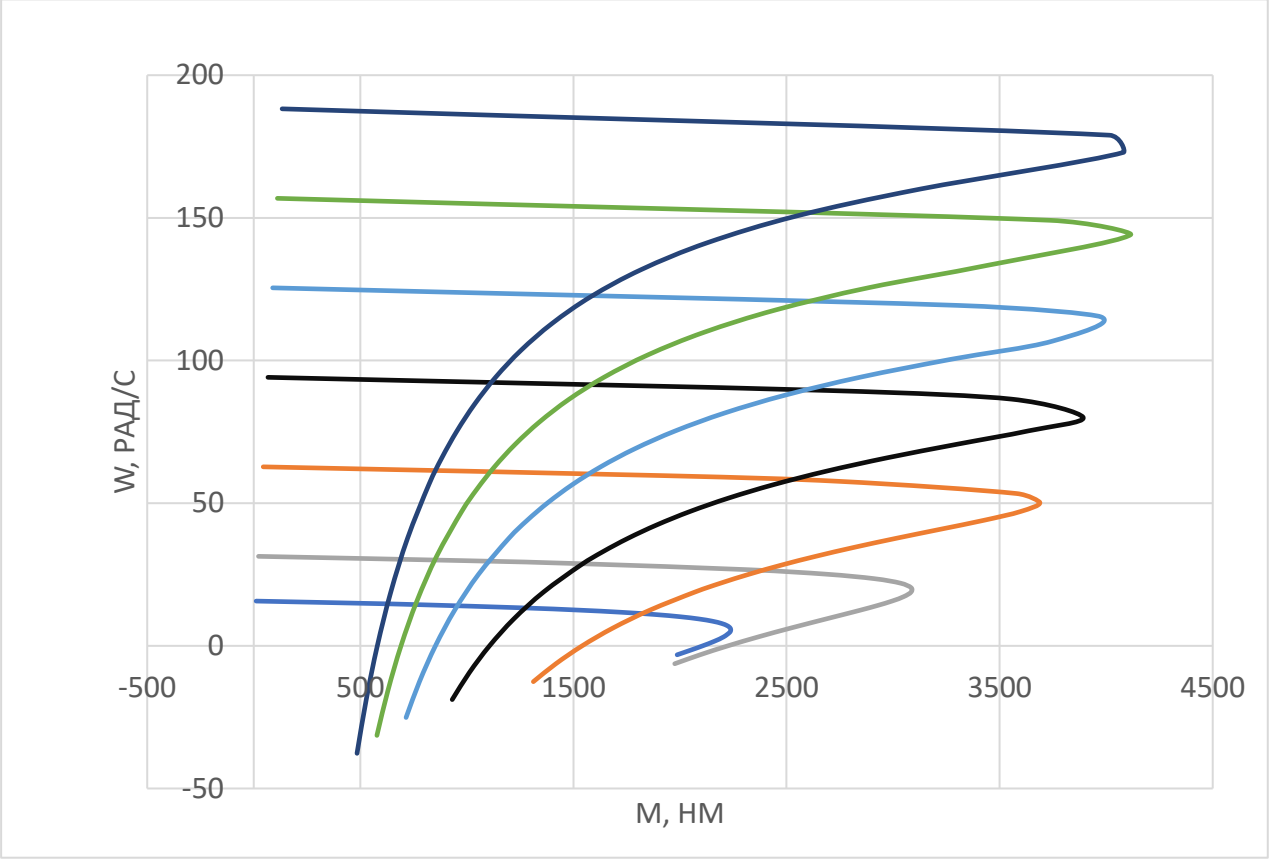

Рисунок 2.4 – Механічні характеристики АД при частотному керуванні.

Як показує аналіз літератури, стабілізацію потокозчеплення і регулювання моменту двигуна забезпечують системи векторного керування координатами електроприводу, побудовані за принципом підлеглого регулювання координат. Системи регулювання потокозчеплення повітряного зазору практично не застосовуються, а широко використовують системи регулювання потокозчеплення ротора. Такі системи забезпечують таке управління асинхронним двигуном, яке дає повну схожість його робочих ділянок механічних характеристик з машиною постійного струму в системі підлеглого регулювання. Система має достатньо жорсткі характеристики, широкий діапазон регулювання і високу перевантажувальну здатність.

Побудова векторної системи регулювання координат АД можлива на математичному уявленні АД в системі координат орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора.

2.7 Модель двигуна в системі координат, орієнтованої по вектору потокозчеплення ротора

Для побудови моделей електричних машин змінного струму та систем регулювання на їх основі використовують системи координат, що обертаються з синхронною швидкістю, системи, що обертаються зі швидкістю ротора і нерухомі системи координат (система α, β). Раціональний вибір кутової швидкості і орієнтації осей системи координат в перехідних режимах також може спростити подання об'єкта і вибір регуляторів САР.

Рівняння асинхронної машини, записані в термінах узагальненого вектора і представлені в системі координат, що обертається зі швидкістю ω_c, мають вигляд:

$$\overline{U}_S = \overline{I}_S R_S + \frac{d\Psi_S}{dt} + j\omega_C \overline{\Psi_S},\ \ \overline{U}_r = \overline{I}_r R_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_C - \omega)\overline{\Psi_r}.$$

$$\overline{\Psi_S} = \overline{I}_S L_S + \overline{I}_r L_m,\ \ \overline{\Psi_r} = \overline{I}_S L_m + \overline{I}_r L_r.$$

де $\overline{U_S}, \overline{I_S}, \overline{\Psi_S}$ – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення статора; $\overline{U_r}, \overline{I_r}, \overline{\Psi_r}$ – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення ротора; R_S, R_r – активні опори статора і ротора; ω_c – швидкість обертання системи координат; ω – швидкість обертання ротора; L_S, L_r, L_m – індуктивність статора, ротора і взаємна індуктивність статора і ротора відповідно; $j = \sqrt{-1}$.

Оскільки результуючі просторові вектори струмів, напруг і потокозчеплення статора і ротора в сталому режимі при синусоїдальній напрузі живлення взаємно нерухомі, будь-яка система координат, прив'язана до одного з цих векторів, придатна для оптимізації [8].

В [9] проведено детальний аналіз шести різних структурних уявлень АД, побудованих системі координат що обертається, прив'язаній дійсною віссю до одного з шести векторів $\overline{U_S}, \overline{I_S}, \overline{\Psi_S}, \overline{U_r}, \overline{I_r}, \overline{\Psi_r}$. Структурні схеми за потокозчепленням $\overline{\Psi_S}$ і $\overline{\Psi_r}$ мають невелику кількість перехресних зв'язків, прості вирази для моменту, порівняно прості вирази для ω_c, нелінійності в прямих каналах регулювання відсутні. Вирішальна перевага цих структур полягає в тому,

що вони містять лише одну складову потокозчеплення, яка найпростішим чином виражається через напругу і струм. Труднощі розв'язки каналів мінімальні, а передавальні функції регуляторів найбільш прості. За складністю структури по $\overline{\Psi_S}$ і $\overline{\Psi_r}$ однакові. Відмінною особливістю є те, що структура $\overline{\Psi_r}$ найбільш придатна для систем регулювання з короткозамкненим АД, а структура $\overline{\Psi_S}$ більше підходить для АД з фазним ротором (машина подвійного живлення). Також слід додати, що динамічні характеристики частотно-регульованого АД з САР, строго орієнтованої за вектором потокозчеплення, подібні характеристикам компенсованого двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

Істотним недоліком таких структур є те, що потрібна висока точність при визначенні просторового положення вектора потокозчеплення. Оскільки для визначення потокозчеплення в основному використовуються непрямі методи, що дозволяє не ускладнювати конструкції асинхронних двигунів, то похибка його вимірювання може призводити до коливальності електромагнітного моменту в динамічних режимах.

Асинхронний електропривод з короткозамкненим двигуном є найбільш поширеним типом приводу. Частка регульованого електроприводу з АД з короткозамкненим ротором постійно зростає. Тому, далі розглядається структурний представлення АД з короткозамкненим ротором в системі координат u, v. Система координат u, v обертається із синхронною швидкістю ω_c і орієнтована за вектором потокозчеплення ротора $\overline{\Psi_r}$. Вісь u є дійсною віссю, а вісь v – уявною.

Отримаємо рівняння для побудови структури.

$$\overline{\Psi_s} = \bar{I}_s\left(\frac{L_S L_r - L_m^2}{L_S L_r}\right) + \overline{\Psi}_r \frac{L_m}{L_r} = \overline{I}_S L'_S + K_r \overline{\Psi}_r,$$

$$\overline{I_r} = K_r\left(\frac{\overline{\Psi_r}}{L_m}\right).$$

де $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постійна часу ротора; $T'_r = \frac{L'_S}{R'}$ – перехідна постійна часу статора, $p = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа, $R' = R_S + K_r^2 R_r$ – перехідний опір статора [9].

Рівняння електромагнітного моменту двигуна:

$$M = \frac{3}{2} Z_p K_r \Psi_{ru} I_{cv}$$

де Z_p – кількість пар полюсів двигуна.

Рівняння руху системи:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_C$$

де J – момент інерції двигуна (або сумарний момент інерції системи, приведений до валу двигуна); M_c – статичний момент на валу двигуна, ω_m – механічна швидкість обертання ротора.

На рис. 2.5 представлена структурна схема АД з короткозамкненим ротором, побудована за отриманими виразами в системі координат, орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора Ψ_r.

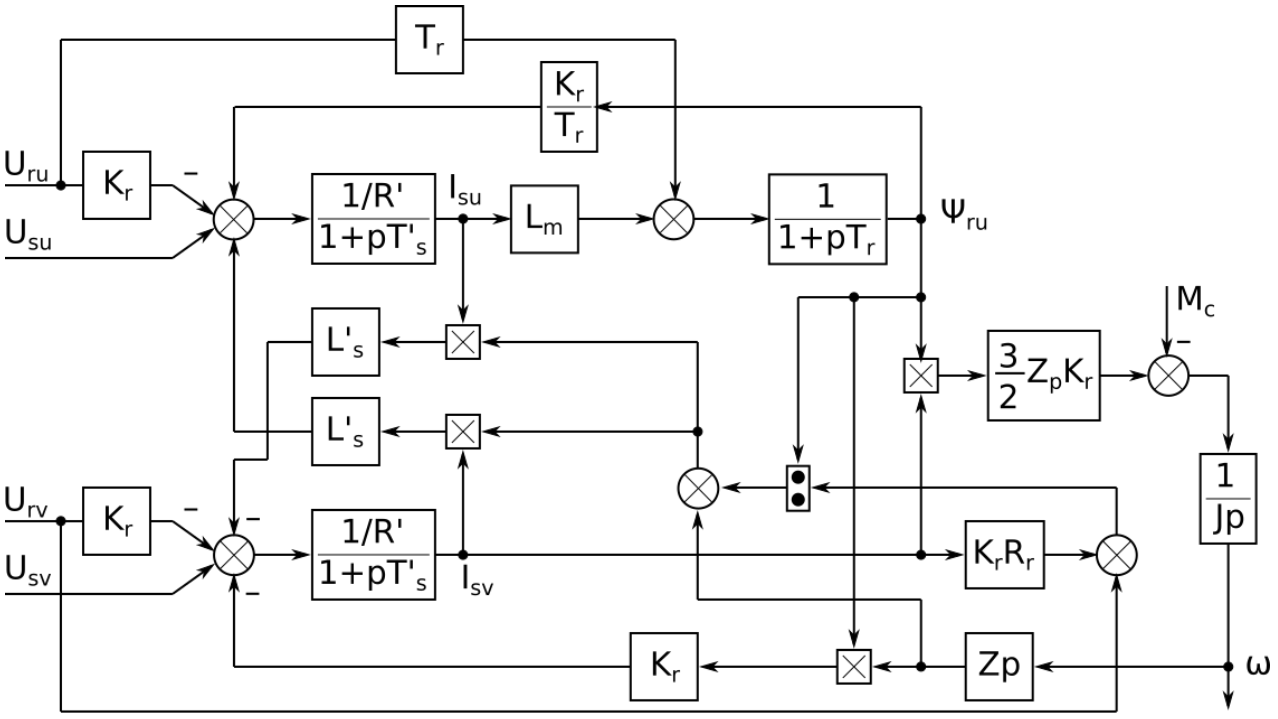

Рисунок 2.5 – Структурна схема АД в системі відліку, пов'язаної з вектором потокозчеплення ротора Ψ_r

Всі сучасні системи регулювання швидкості електродвигунів будуються за принципом підлеглого регулювання координат електроприводу і характери-

зуються каскадним включенням регуляторів, кількість яких дорівнює кількості регульованих координат (струм, потік, момент, швидкість тощо) [10]. На вході регулятора кожного з контурів порівнюються сигнали, пропорційні заданому і дійсному значенням координати даного контуру, а вихідна напруга регулятора служить задає сигналом для подальшого контуру. Одним з достоїнств даних систем є можливість обмежувати будь-яку координату шляхом обмеження сигналу завдання з попереднього зовнішнього регулятора. Серед недоліків слід відзначити зниження швидкодії системи вдвічі при використанні нового зовнішнього контуру регулювання. Синтез регуляторів системи здійснюється зсередини назовні, від внутрішнього контуру до зовнішнього. Серед критеріїв оптимізації, що використовуються для синтезу регуляторів, найбільшого поширення набули модульний і симетричний критерії оптимізації. Вибір критерію залежить від типу передавальних функцій, що входять до складу оптимизуємого контуру, і бажаної перехідної функції контуру. Структурна схема системи автоматичного регулювання (САР) швидкості АД представлена на рис. 2.6.

САР має два канали регулювання. Канал регулювання потокозчеплення ротора складається з контуру потокозчеплення і підлеглого йому контуру потікоутворювальної складової струму статора (складова по осі $u\ Isu$). Канал регулювання швидкості складається з контуру швидкості і підлеглого контуру моментоутворювальної складової струму (складова по осі $v\ Isv$).

До складу контурів струму з боку САР входить регулятор струму і перетворювач частоти ПЧ, представлений аперіодичною ланкою з малої некомпенсовані постійної часу T_μ. Зовнішні контура містять регулятори швидкості і потокозчеплення. Інформація про регульованих координатах надходить від датчиків струму ДС, швидкості ДШ і потокозчеплення ДΨ.

На вході контуру потоку може використовуватися функціональний блок ФБ, який реалізує функціональну залежність потокозчеплення від швидкості для випадку двозонного регулювання.

Для компенсації нелінійностей і перехресних зв'язків, присутніх в об'єкті керування, тобто в двигуні, використовуються ланки W1, W2, W3, W4 вихі-

дні сигнали яких подаються на вхід ПЧ (за аналогією з компенсацією впливу зворотного зв'язку по ЕРС двигуна в системах постійного струму).

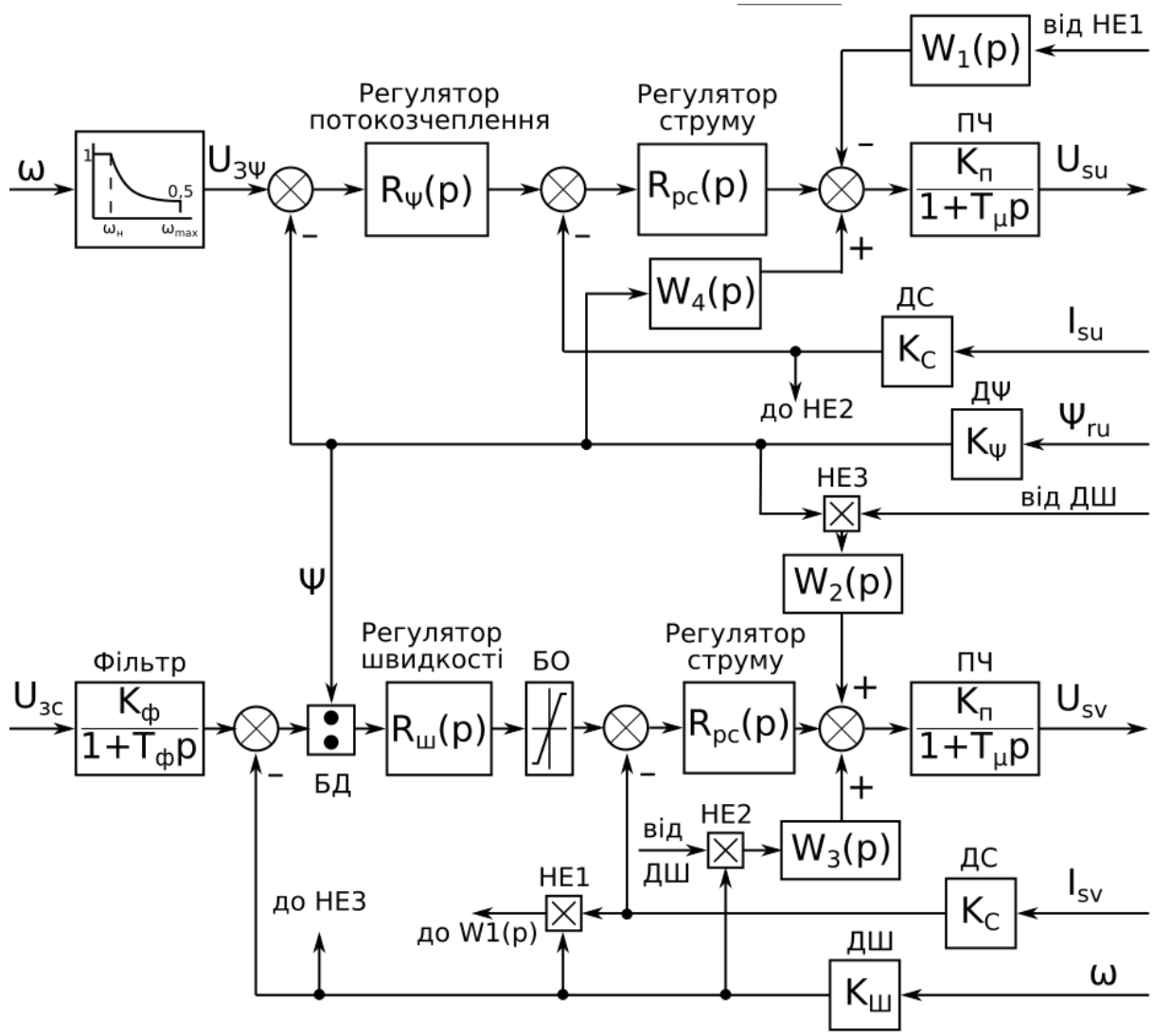

Рисунок 2.6 Система регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в системі координат u-v, орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора Ψ_r.

Для синтезу регуляторів системи регулювання і моделювання цієї системи розрахуємо необхідні параметри за даними схеми заміщення АД.

Повна індуктивність обмотки статора:

$$L_S = L_1 + L_m = 8{,}34 \cdot 10^{-5} + 0{,}0043 = 0{,}0044 \text{ Гн}$$

Повна індуктивність обмотки ротора:

$$L_r = L'_2 + L_m = 12{,}06 \cdot 10^{-5} + 0{,}0043 = 0{,}0087 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт електромагнітного зв'язку

$$K_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0{,}0043}{0{,}0087} = 0{,}49$$

Перехідна індуктивність статора

$$L'_S = L_S - \frac{L_m^2}{L_r} = 2{,}01 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

Перехідний опір статора:

$$R' = R_1 + K_r^2 R'_2 = 0{,}0074 \text{ Ом}$$

Постійна часу ротора:

$$T_r = \frac{L_r}{R'_2} = 1{,}158 \text{ с}$$

Перехідна постійна часу статора:

$$T'_S = \frac{L'_S}{R'} = 0{,}0272 \text{ с}$$

Коефіцієнт датчика струму розрахуємо з урахуванням подвійної перевантаження за струмом і щодо амплітудного значення фазного струму:

$$K_T = \frac{U_{ymax}}{2\sqrt{2} I_{\text{фн}}} = 0{,}0047 \text{ В/А}$$

де U_{ymax} – максимальна робоча напруга системи управління.

Коефіцієнт датчика швидкості розрахуємо з можливості працювати на підвищених швидкостях:

$$K_{\text{Ш}} = \frac{U_{ymax}}{\omega_{\text{н}}} = 0{,}0637 \text{ В/с}$$

Номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\Psi_{\text{н}} = \frac{M_{\text{н}}}{1{,}5\sqrt{2} I_{\text{фн}} Z_p K_r} = 0{,}518 \text{ Вб}$$

Коефіцієнт датчика потокозчеплення:

$$K_{\Psi} = \frac{U_{утах}}{\Psi_{н}} = 19{,}31 \text{ В/Вб}$$

Коефіцієнт посилення перетворювача:

$$K_{П} = \frac{\sqrt{2}U_{фн}}{U_{утах}} = 31{,}11 \text{ В/В}$$

2.7.1 Синтез регулятора струму

Розглянемо контур моментоутворювальної складової струму рис. 2.7.

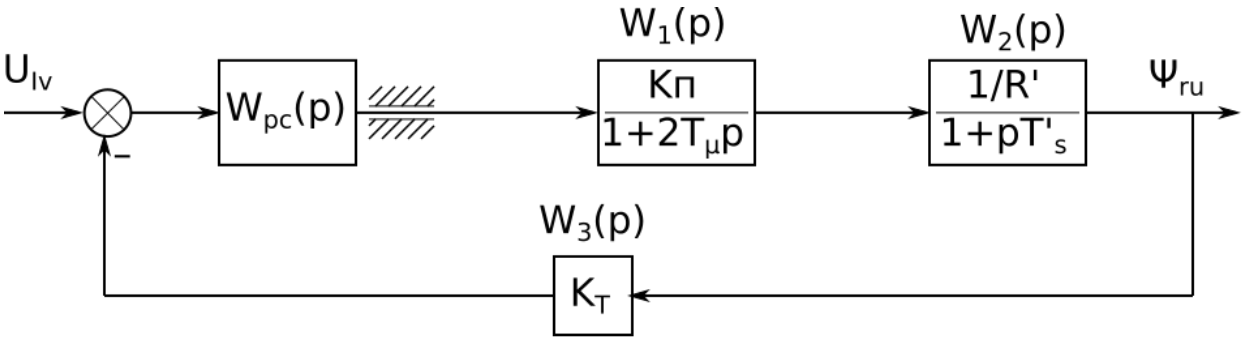

Рисунок 2.7 – Структурна схема контуру регулювання моментоутворювальної складової струму

Представлений контур струму (рис. 2.7) містить дві аперіодичні ланки. При такій структурі контуру він оптимізується за модульним критерієм оптимізації. Передавальна функція модульного оптимуму має вигляд (бажана):

$$W_{мод}(p) = \frac{1}{2T_{μ}p(T_{μ}p + 1)}$$

Мала стала часу контуру струму включає в себе суму інерційностей в системі, що виникають при відпрацюванні керуючого впливу. До таких затримок можна віднести постійні часу фільтрів вхідних сигналів струму і напруги, період дискретизації цифрової системи управління, "мертвий час" силових ключів тощо. При синтезі регулятора швидкості T_{μ} прийнято 0,0005 с.

Передавальну функцію регулятора струму визначимо з виразу:

$$W_{Ж}(p) = W_{рт}(p)W_1(p)W_2(p)W_3(p) = \frac{1}{2T_{μ}p(T_{μ}p + 1)}$$

звідки

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{W_{\text{Ж}}(p)}{W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}\frac{(T_{\mu}p+1)}{K_{\text{П}}}\frac{R'(1+pT'_S)}{K_{\text{Т}}}$$

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{W_{\text{Ж}}(p)}{W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{R'(1+pT'_S)}{2T_{\mu}pK_{\text{П}}K_{\text{Т}}}.$$

В результаті виконаних перетворень ми отримали ПІ-регулятор струму з наступними коефіцієнтами:

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{R'(1+pT'_S)}{2T_{\mu}pK_{\text{П}}K_{\text{Т}}} = \frac{R'\cdot T'_S}{2T_{\mu}K_{\text{П}}K_{\text{Т}}} + \frac{R'}{2T_{\mu}K_{\text{П}}K_{\text{Т}}}\frac{1}{p}.$$

Позначимо

$k_{\text{ртп}} = \frac{R'\cdot T'_S}{2T_{\mu}K_{\text{П}}K_{\text{Т}}}$ – коефіцієнт підсилення пропорційної частини;

$k_{\text{рти}} = \frac{R'}{2T_{\mu}K_{\text{П}}K_{\text{Т}}}$ – коефіцієнт підсилення інтегральної частини.

Замкнутий контур регулювання потікоутворювальної складової струму аналогічний контуру моментоутворювальної складової струму і має такі ж характеристики.

2.7.2 Синтез регулятора потокозчеплення ротора

При синтезі передавальної функції регулятора потокозчеплення передавальну функцію замкнутого контуру струму представимо у вигляді:

$$W_{\text{Т}}(p) = \frac{1/K_{\text{Т}}}{2T_{\mu}p+1}$$

де $K_{\text{Т}}$ – коефіцієнт передачі датчика струму, T_{μ} – мала некомпенсована постійна часу.

Синтез регулятора потокозчеплення здійснюється аналогічно синтезу регулятора струму. Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення ротора має вигляд (рис. 2.8).

Для отримання передавальної функції регулятора потокозчеплення скористаємося модульним критерієм оптимізації, який для контуру потокозчеплення має вигляд:

$$W_{\text{мод}}(p) = \frac{1}{4T_{\mu}p\left(2T_{\mu}p + 1\right)}.$$

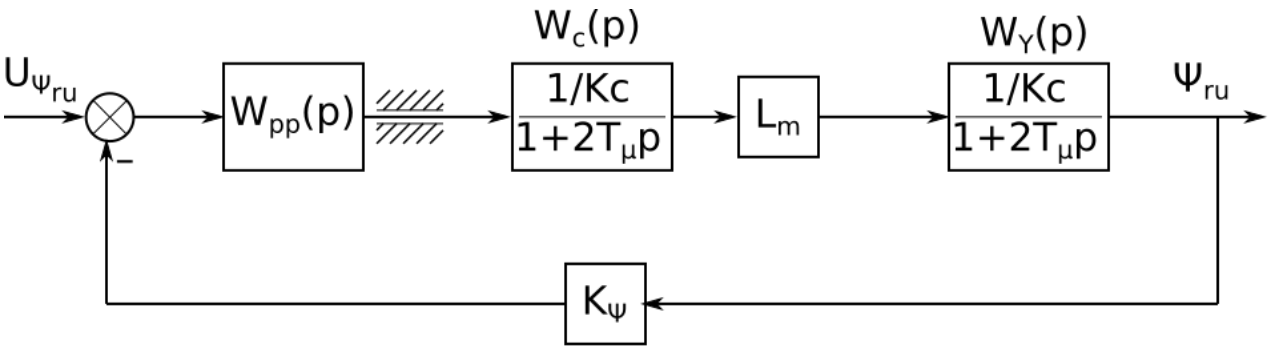

Рисунок 2.8 – Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення

Отримана передатна функція ПІ-регулятора потокозчеплення відповідає виразу:

$$W_{pp}(p) = \frac{K_T(T_r p + 1)}{4T_{\mu}pL_m K_{\Psi}}.$$

Визначимо коефіцієнти регулятора:

$k_{pp\text{п}} = \frac{K_T T_r}{4T_{\mu}L_m K_{\Psi}} =$ – коефіцієнт посилення пропорційної частини;

$k_{pp\text{и}} = \frac{K_T}{4T_{\mu}L_m K_{\Psi}} =$ – коефіцієнт посилення інтегральної частини.

2.7.3 Синтез регулятора швидкості

При синтезі передавальної функції регулятора швидкості передатна функція замкненого контуру струму має вигляд:

$$W_T(p) = \frac{1/K_T}{2T_{\mu}p + 1}$$

Контур регулювання швидкості зображений на рис. 2.9. контур містить аперіодичну і інтегральну ланки. Для отримання передавальної функції ПІ-регулятора швидкості (астатична система) скористаємося симетричним критерієм оптимізації, передавальна функція якого має вигляд:

$$W_{\text{сим}}(p) = \frac{8T_{\mu}p + 1}{32T_{\mu}^2 p^2(2T_{\mu}p + 1)}$$

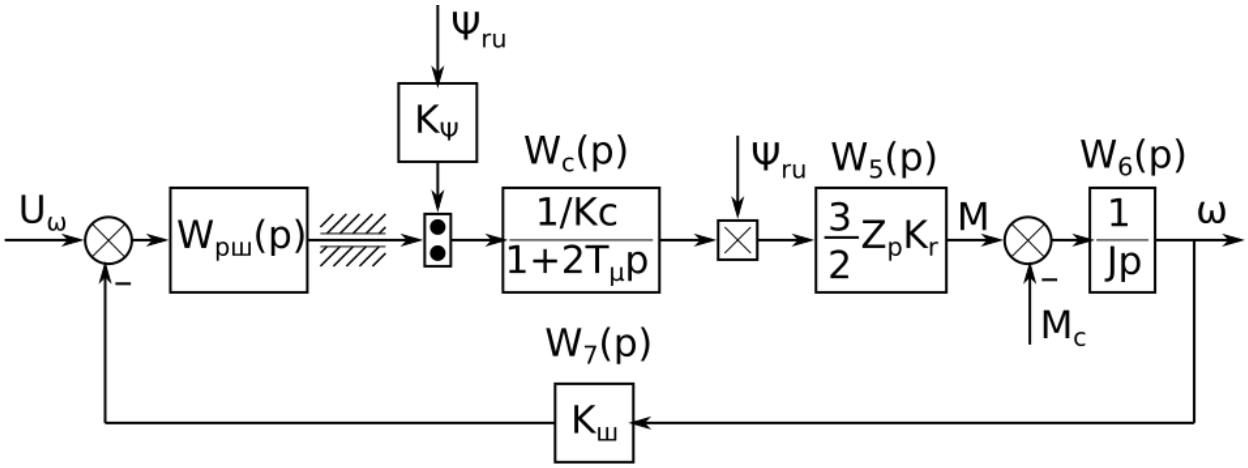

Рисунок 2.9 – Структурна схема контуру регулювання швидкості

Прирівнявши твір всіх ланок розімкнутого контуру швидкості до передавальної функції симетричного оптимуму, знайдемо передавальну функцію ПІ-регулятора швидкості:

$$W_{\text{ж}}(p) = W_{\text{рс}}(p)W_{\text{т}}(p)W_5(p)W_6(p)W_7(p) = \frac{8T_{\mu}p + 1}{32T_{\mu}^2 p^2(2T_{\mu}p + 1)}$$

звідки

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W_{\text{т}}(p)W_5(p)W_6(p)W_7(p)} = \frac{(8T_{\mu}p + 1)}{32T_{\mu}^2 p^2(2T_{\mu}p + 1)} \frac{(2T_{\mu}p + 1)K_T J K_{\Psi}}{Z_p K_r K_c p} \frac{2}{3}$$

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W_{\text{т}}(p)W_5(p)W_6(p)W_7(p)} = \frac{K_T J(8T_{\mu}p + 1)K_{\Psi}}{48T_{\mu}^2 Z_p K_r K_c} \frac{1}{p}$$

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{K_T J 8T_{\mu} K_{\Psi}}{48T_{\mu}^2 Z_p K_r K_c} + \frac{K_T J K_{\Psi}}{48T_{\mu}^2 Z_p K_r K_c} \frac{1}{p}$$

Визначимо коефіцієнти регулятора:

$k_{p\text{шп}} = \frac{K_T J 8T_{\mu} K_{\Psi}}{48T_{\mu}^2 Z_p K_r K_c} =$ – коефіцієнт посилення пропорційної частини;

$k_{p\text{ши}} = \frac{K_T J K_{\Psi}}{48T_{\mu}^2 Z_p K_r K_c} =$ – коефіцієнт посилення інтегральної частини.

2.8 Вибір перетворювача частоти

Оскільки технологічний процес передбачає роботу в режимі двигуна, гальмівному та реверс, то вибираємо комплектний перетворювач частоти Altivar Process ATV980.

Перетворювачі частоти серії ATV980 з рекуперацією енергії дозволяють підвищити ефективність приводу, повертаючи енергію гальмування в мережу живлення. Концепція Schneider Electric передбачає застосування трирівневої технології, що дозволяє підтримувати сумарний коефіцієнт нелінійних викривлень за струмом (THDI) на рівні нижче 5%. В порівнянні з класичною схемою активного випрямляча, трирівнева топологія дозволяє збільшити частоту комутації і одночасно зменшити величину споживаного з мережі струму.

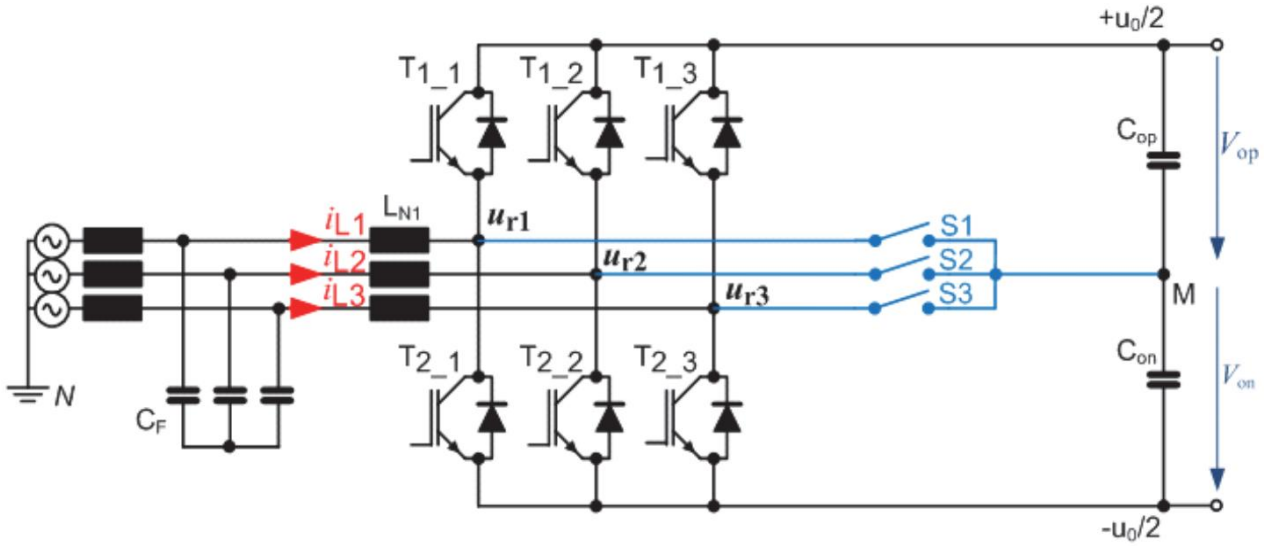

Рисунок 2.10 – Триступеневе перемикання вхідного сигналу

• Три перемикачі (S1, S2, S3) від кожної фази до середньої точки конденсаторної групи

• Три рівня напруги, доступні для формування струму

• Робота в чотирьох квадрантах

• Значна швидкість та точність обертального моменту, з і без датчика зворотного зв'язку

• Відповідає IEEE 519, навіть у несиметричній мережі

• Відмінна продуктивність для всіх типових типів двигунів

Крім того, cos φ завжди дорівнює одиниці незалежно від навантаження, що сприяє зниженню потужності, споживаної з мережі.

При розробці комплектних перетворювачів частоти особлива увага приділяєтьсяя простоті установки і налаштування обладнання. Як результат, система електроприводу готова до використання незалежно від можливого режиму роботи – двигуна або генераторного.

Головна особливість серії ATV980 це те, що робота приводу може відбуватися у всіх чотирьох квадрантах. Модульна структура дозволяє адаптувати систему управління під індивідуальні вимоги споживачів.

Комплектний перетворювач частоти з рекуперацією енергії в мережу в стандартній комплектації містить модулі активного випрямляча і інвертора, фільтри, запобіжники для захисту напівпровідникових пристроїв, роз'єднувач, фільтр dU/dt (в залежності від типорозміру), а також шини для підключення силових кабелів мережі живлення і двигуна.

Оболонкою комплектних перетворювачів частоти є шафа Sarel "Spacial SF", винесений графічний термінал встановлюється на передню панель.

Відповідно до струму обраного двигуна вибираємо перетворювач ATV980C31Q4X1 [11] для номінального режиму роботи.

Параметр	Нормальний режим	Важкий режим
Потужність двигуна, кВт	315	250
Лінійний струм мережі, А	491	389
Повна потужність мережі, кВА	340	270
Максимальний лінійний струм КЗ, кА	50	50
Максимальний усталений струм ПЧ, А	590	477
Максимальний перехідний струм 60с, А	708	716

Додаткового обладнання вибирати немає потреби, оскільки комплектні перетворювачі ATV980 шафного виконання мають у своєму складі все необхідне, і потребують тільки підключення до мережі та електродвигуна.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

В даному розділі проекту досліджується динаміка системи автоматичного регулювання швидкості електроприводу (САР) в характерних для даного електроприводу режимах роботи. Метою досліджень є перевірка якості перехідних процесів. Для реалізації математичної моделі САР використовується математичний пакет MATLAB, додаток Simulink.

Електропривод ротора підвісної центрифуги обертається в обидва боки і має високі динамічні моменти, викликані значним моментом інерції та обмеженими вимогами технологічного процесу ділянками розгону і гальмування. Моментом опору носить реактивний характер.

Електромеханічна система містить пружну муфту, отже є двомасовою, якій відповідає структура кінематичної схеми на рис. 3.1.

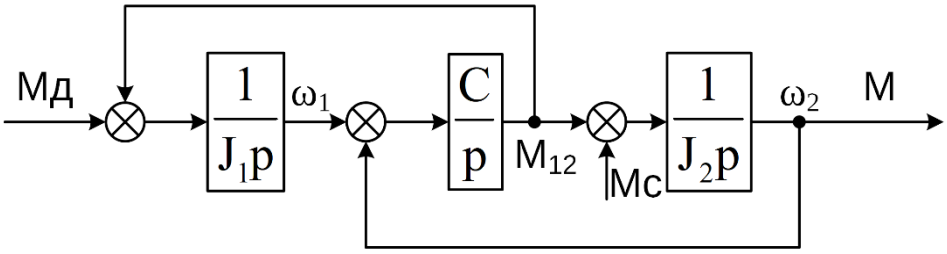

Рисунок 3.1 – Структурна схема двомасової системи

Момент інерції J_1 першої маси – це незмінний момент інерції двигуна, а J_2 – момент інерції другої маси, який змінюється при завантаженні та розвантаженні ротора центрифуги продуктом відповідно до рис. 1.3.

Модель САР швидкості електроприводу ротору представлена на рис. 3.2. Вона складається з підсистем AD, SubSystem.

Підсистема AD реалізує модель асинхронного двигуна в системі координат, орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора і в розгорнутому вигляді представлена на рис. 3.3.

Підсистема SubSystem містить в собі регулятори струму, швидкості та потокозчеплення. Також в ній реалізовані ланки, що описують перетворювач

частоти і датчики регульованих координат. Модель системи представлена на рис. 3.4

Розгорнуті схеми блоків регуляторів представлені на рис. 3.5-3.7. Регулятор швидкості - на рис. 3.5, струму - на рис. 3.6 і потокозчеплення - на рис. 3.7 відповідно.

У підсистемі Wz реалізується завдання на швидкість електроприводу підйому, а в підсистемі Mc момент статичного навантаження. Сигнали формуються в функції часу.

Настройка регуляторів здійснюється незалежно один від одного в послідовності від внутрішнього контуру тиску до зовнішнього контуру швидкості.

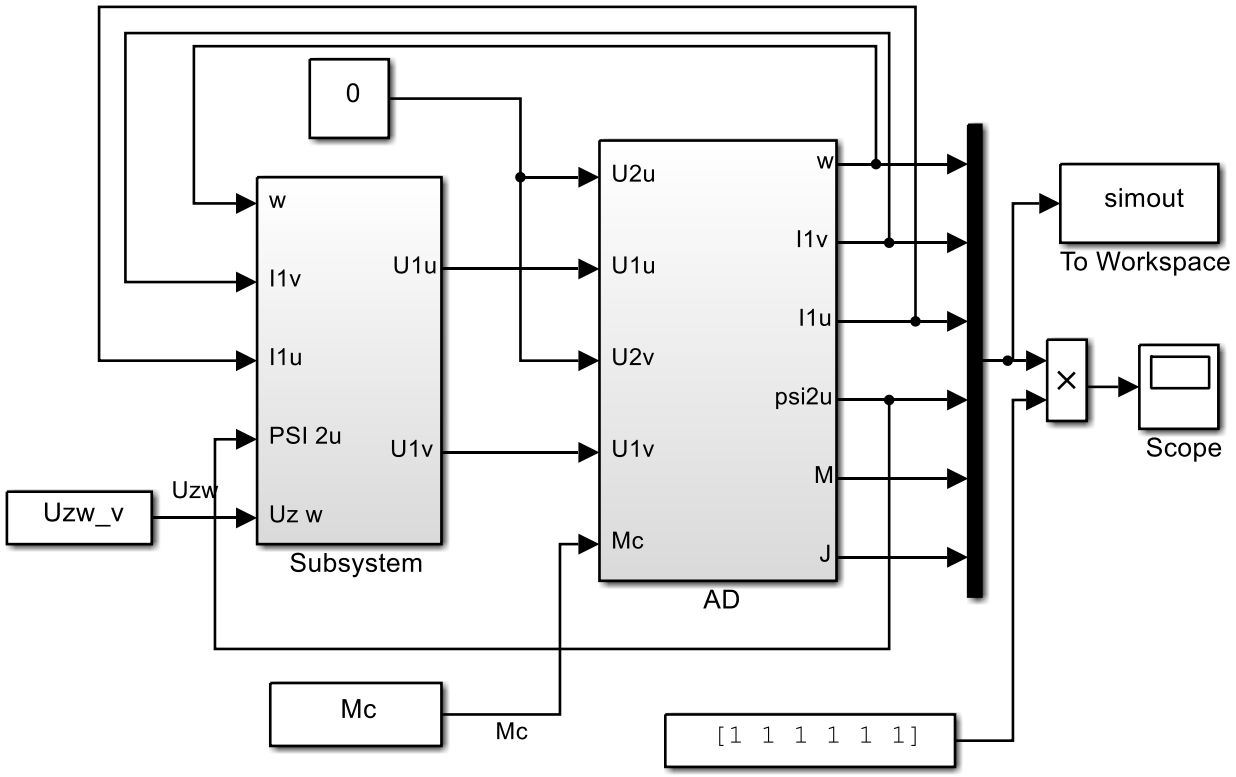

Рисунок 3.2 – Схема моделі САР швидкості двигуна підйому в пакеті Matlab

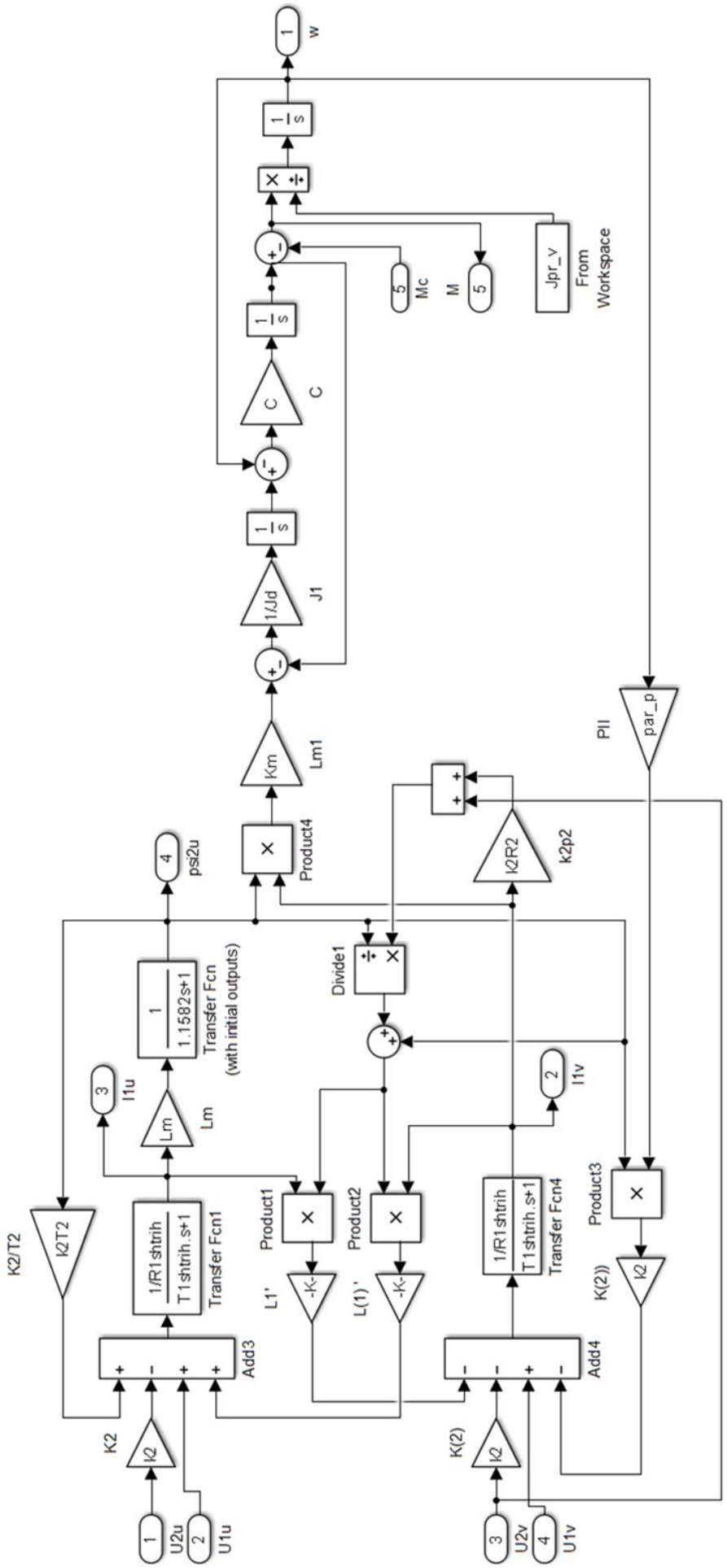

Рисунок 3.3 – Схема моделі асинхронного двигуна в пакеті Matlab. Підсистема AD

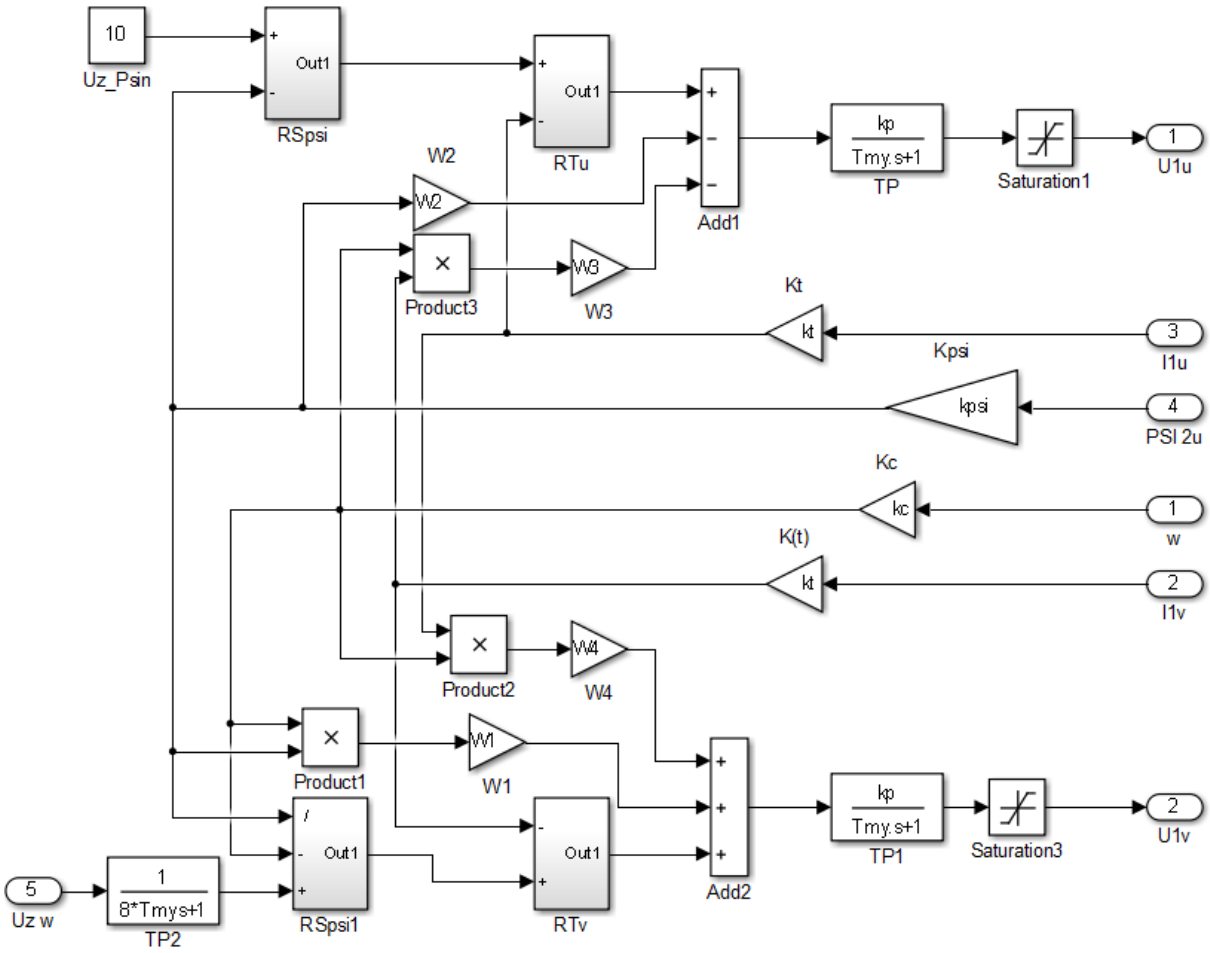

Рисунок 3.4 - Схема моделі САР швидкості в пакеті Matlab. Підсистема SubSystem

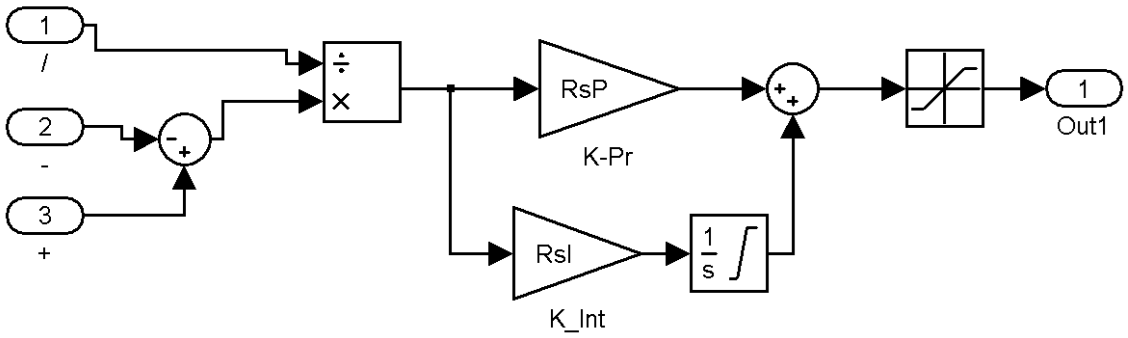

Рисунок 3.5 – Модель регулятора швидкості

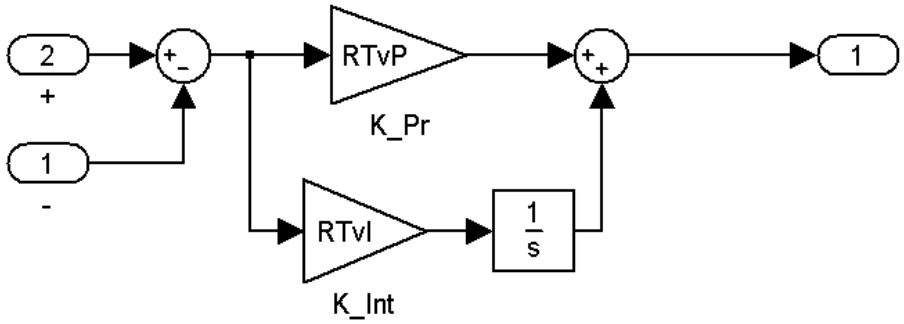

Рисунок 3.6 – Модель регулятора струму

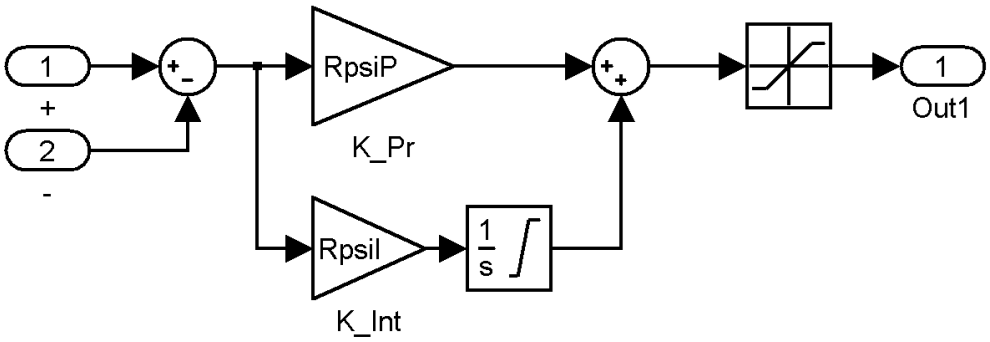

Рисунок 3.7 – Модель регулятора потокозчеплення

При моделюванні досліджувалися режими роботи, які відповідають діаграмі робочого циклу (рис. 1.3).

На початковому етапі роботи здійснюється намагнічування двигуна рис. 3.8. САР відпрацьовує завдання на номінальне потокозчеплення ротора. Після його встановлення подається завдання на рух. Подача статичного моменту здійснюється одночасно з подачею завдання на рух. Таким чином, моделюється процес відпускання гальмівного пристрою і стрибкоподібне поява статичного моменту на валу двигуна.

Результати моделювання роботи циклу центрифугування представлені на рис. 3.9-3.10. На графіку показані сигнали швидкості двигуна w, потікоутворювального I1u і моментоутворювального струмів I1v, моменту двигуна M, статичного моменту навантаження Mc і потокозчеплення ротора Ψr у відносних одиницях.

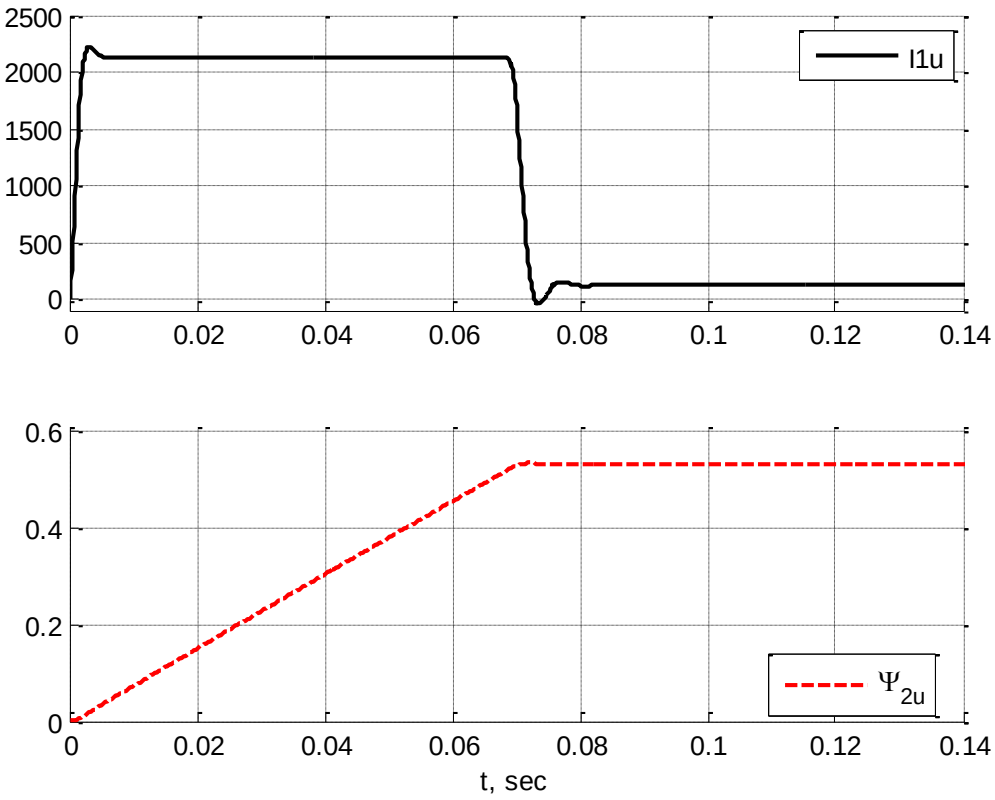

Рисунок 3.8 – Криві перехідного процесу потікоутворювального струму I1u та потокозчеплення ротора Ψr

Модель відпрацьовую режими:

- розгін до зниженої швидкості – після досягнення заданої якої відбувається завантаження ротора продуктом з відповідним зростанням моменту інерції;
- розгін до робочої (високої) швидкості – відбувається віджим рідини з продукту під впливом відцентрових сил;
- гальмування ротора до низької швидкості – завершення фільтрації і злив рідини;
- реверсування – після досягнення заданої швидкості опускається ножі і зрізується тверда фракція продукту, який залишився в роторі барабану та його вивантаження;
- розгін ротора у зворотному напрямку до максимальної швидкості та промиваються сита;
- гальмування ротора до повної зупинки, накладення механічного гальма;
- пауза, стан готовності до виконання чергового циклу роботи.

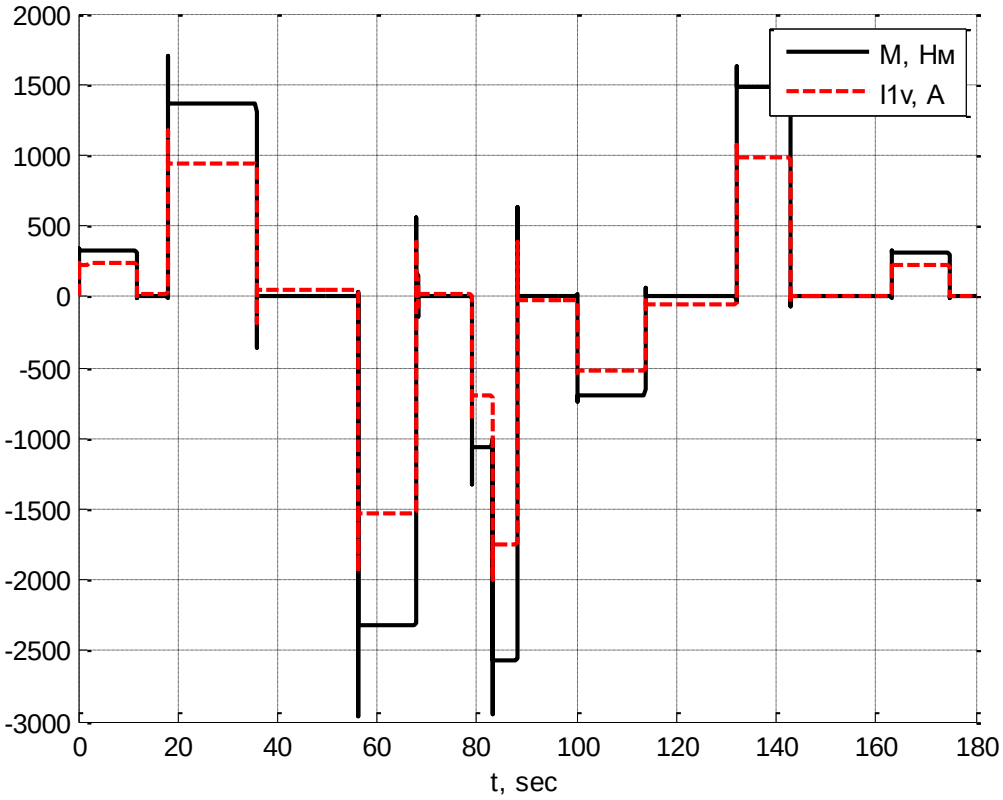

Рисунок 3.9 – Криві перехідного процесу моменту двигуна M та моментоутворювального струму I1v

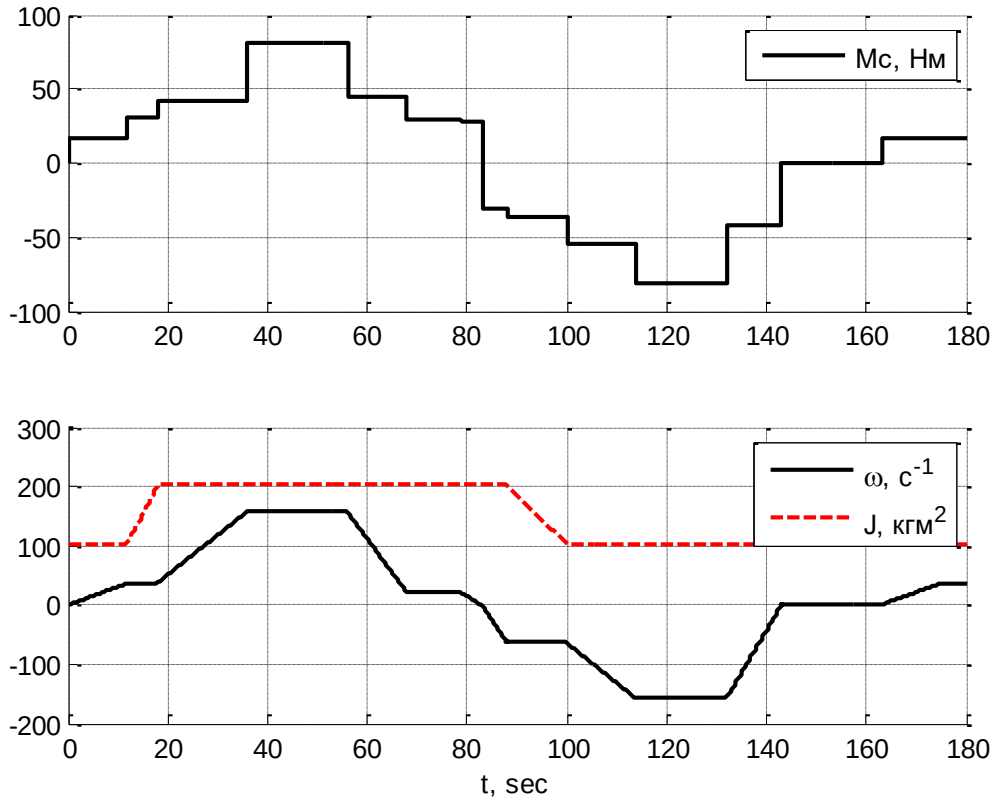

Рисунок 3.10 – Криві зміни статичного моменту Mc, моменту інерції J та швидкості ротора ω

Якість перехідних процесів відповідає прийнятим раніше критеріям оптимізації.

Як видно з отриманих графіків, двигун і обрана система керування повністю реалізує потрібний час розгону механізму до потрібних технологічному процесу швидкостей. Також з отриманих результатів видно, що під час завантаження механізму не має зниження швидкості. Це забезпечується завдяки вибору ПІ-регулятора швидкості.

Сплески струму та моменту (рис. 3.9) окрім зміни завдання та навантаження також обумовленні тим, що електромеханічна система має пружну муфту, що призводить до коливальності. Проте, ці сплески не помітні на кривій швидкості механізму, оскільки момент інерції навантаження значно перевищує момент інерції двигуна, і працює як маховик.

Завдяки застосуванню частотного регулювання струм двигуна не перевищує чотирикратного значення в динамічних режимах при паспортному семикратному перевантаженні, це позитивно впливає як на довговічність обмоток двигуна, так і на стан мережі живлення.

Таким чином, моделювання показало, що обраний двигун і система керування повністю відповідають вимогам технологічного процесу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів технологічного процесу

Сучасні сепаратори є складним виробничим комплексом, оснащеним різноманітним механічним і електричним обладнанням, обслуговування якого вимагає чіткого дотримання правил безпеки та норм виробничої санітарії.

Приміщення, де установлені сепаратори відносяться до небезпечних виробничих об’єктів. Відповідно до пожежної безпеки, відноситься до категорії Г.

Категорія Г – негорючі речовини і матеріали в гарячому, розпеченому або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла і тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо.

Велика частина устаткування сепараторних приміщень має автоматичні і напівавтоматичні системи управління і продовжують працювати незалежно від сформованої виробничої ситуації.

Для приміщень характерна також велика протяжність і розкиданість обслуговуючих механізмів, що мають дистанційне керування і розташованих на висоті і в підвальних приміщеннях, що, зрозуміло знижує видимість і чутність світлової та звукової сигналізації, утрудняє прийом запобіжних сигналів.

4.2 Інженерно-технічні заходи з охорони праці

Технологічні операції відцентрового виробництва супроводжуються утворенням шумів низької і високої частоти при обробці сировини. Метеорологічні умови в лабораторіях визначаються температурою, вологістю, рухливістю повітря. Температура повітря на гарячих ділянках значно перевищує температуру зовнішнього повітря. При високій вологості та підвищеній темпера-

турі створюються умови для перегрівання організму. При низькій вологості збільшується проникнення в легені пилу і мікроорганізмів.

Безпечне обладнання сепаратора його обладнання і пристосувань досягається при дотриманні певних умов.

Всі частини сепаратора та їх обладнання повинні бути розташовані так, щоб був безпечний доступ для огляду і ремонту, а під час роботи повністю виключалася можливість зіткнення робітників з обертовими і пересувними частинами обладнання.

При експлуатації сепаратора можливі наступні види травм: попадання частин одягу обертовими шпинделями і сполучними муфтами, опіки.

Для часткової ліквідації травматизму при обробці сировини необхідно максимально механізувати й автоматизувати обладнання. Щоб уникнути травмування робітників обертовими муфтами або шпинделями, всі сполучні шпиндельні, муфти сепаратора огороджують з боків гратчастими або суцільними щитами і кожухами.

Між сепаратними станами та приміщеннями для двигунів повинна бути обладнана надійно діюча світлова та звукова сигналізація. Пуск, хід і зупинка двигунів виконується лише після відповідних сигналів, причому про пуск двигунів подається строго встановлений сигнал, ясно чутний на всіх робочих місцях. Тільки після перевірки обладнання і видалення людей з небезпечних місць може бути даний сигнал про пуск двигунів.

Для безпечного пересування людей по лабораторії передбачаються спеціальні переходи, надійно захищені. В відповідно до норм проектування природного та штучного освітлення, для освітлення виробничих приміщень використовується природне і штучне освітлення. Правильне освітлення робочих місць має велике значення для створення безпечних умов праці. Незадовільне освітлення при роботах може служити причиною травматизму, впливає на зір робітників, знижує продуктивність праці. Освітленість, створювана денним природним світлом, змінюється в широких межах, протягом декількох хвилин

вона може зменшуватися або збільшуватися в кілька разів. Штучне освітленість всередині будівлі зазвичай набагато менше зовнішньої освітленості.

Крім робочого освітлення в лабораторіях також аварійне освітлення. Воно призначене для безперебійного обслуговування агрегатів та устаткування в разі виходу з ладу робочого освітлення і діє від незалежного джерела електроенергії.

Аварійне освітлення повинно забезпечувати освітленість на робочих поверхнях не менше 10% норм, встановлених для робочого освітлення.

Відповідно до загальних вимог безпеки, агрегати, що створюють сильний шум, розміщують в окремих приміщеннях або будівлях з підвищеною звуковою ізоляцією. Для зменшення впливу шуму необхідно створити звукоізоляційні кабіни дистанційного керування, облицювання поверхонь і внутрішніх поверхонь приміщення звукопоглинальними матеріалами, застосування пристроїв екранів.

Струмопровідні частини двигунів і трансформаторів повинні знаходитися в недоступних для робочих місцях.

Ізоляція повинна бути надійною навіть при можливих перенапруженнях в даній електричної мережі.

Для захисту людей, металеві струмопровідні частини заземлюють. Заземлення підлягають металеві конструкції розподільних пристроїв, кожухи і станини електрообладнання, освітлювальна арматура та апаратура, приводи електричних апаратів, каркаси щитів, оболонки кабелів, труби електропроводок. Електроустановки в приміщеннях з підвищеною небезпекою заземлюють, якщо їх напругу вище 30 В.

4.3 Розрахунок штучного освітлення

Зробимо розрахунок освітлення на ділянці регулювання апаратури, де III розряд, зі світильниками з люмінесцентними лампами.

Розміри приміщення: довжина А = 15 м; ширина В = 10 м; висота Н =4,5 м. Стеля і стіни побілені, мало забруднені. Напруга в основній мережі U =

380 В. Приймаємо систему загального освітлення. Характер роботи на ділянці відповідає III розряду.

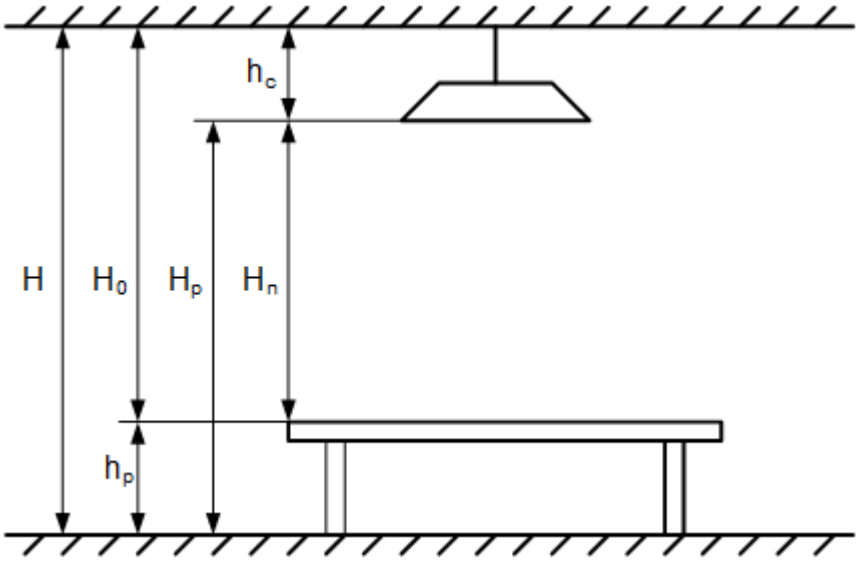

Рисунок 4.1 – Схема для розрахунку освітлення на робочому місці

Норма освітленості на робочому місці відповідає 300 лк. Для освітлення приміщення вибираємо світильники з люмінесцентними лампами типу, де

H - висота приміщення від підлоги до стелі, м;

hp - висота робочої поверхні, м;

$$H_0 = 4,5 – 0,8 = 3,7м$$

Відстань від стелі до світильника:

$$hc= 0,25H_0$$

$$hc = 0,25 \times 3,7 = 0,925м$$

Можлива висота підвісу світильника над освітлюваною поверхнею:

$$Hp = H_0 - hc$$

$$Hp = 3,7 - 0,925 = 2,775м$$

Висота підвісу над підлогою:

$$Hn = 2,775 + 0,8 = 3,575м$$

Для досягнення найбільшої рівномірності освітлення приймаємо відношення:

$$Lp / Hp = 1,4$$

Відстань між рядами світильників:

$$Lp = l,4 \times Hp$$

$$Lp= 1,4 \times 2,775 = 3,885м$$

Приймаємо розташування світильників у три ряди: по центральній поздовжній осі і вздовж стін.

Відстань від крайніх світильників до стін l приймаємо рівним 1,16м (l = 0,3 × Lp). Фактична відстань між рядами:

$$Lp = (B – 2\times l) / 2$$

$$Lp = (10 – 2\times 1,16) / 2 = 3,83 м$$

При довжині світильників 1,25 м встановлюємо в ряду 5 світильників, з відстанню між ними по 1,17 м. Таким чином, приймаємо всього 15 світильників по 2 лампи ЛД у кожному. Загальна кількість ламп N = 30.

Індекс приміщення:

$$i = A \times B / Hp \times (A + B)$$

$$i=15\times 10 / 2,775\times (15+ 10) = 2,162$$

Коефіцієнти відбиття стелі, стін і робочих поверхонь:

$$rn = 70 \%; rc = 50 \%; rp = 10 \%$$

Знаходимо значення h по таблиці 16 [4]

$$h = 56 \%$$

Для виробничих приміщень, з вмістом пилу менше 1 мг / м3 коефіцієнт запасу КЗ = 1,5. Визначимо розрахункове значення світлового потоку для створення нормованої освітленості на робочих аркушах:

$$Фр = Ен \times КЗ \times S\times Z/h \times N$$

де Ен – нормоване значення мінімальної освітленості, лк [70];

Z - поправочний коефіцієнт, що враховує нерівномірність освітлення, Z=1,1.

$$Фр = 300 \times 1,5 \times 150 \times 1,1 / 0,56 \times 30 = 4420 мм$$

Вибираємо лампу ЛБ65-2 зі світловим потоком Фп= 4320.

Зробимо перевірочний розрахунок освітленості:

$$E = Фп \times h \times N / КЗ \times S \times Z$$

$$E = 4320 \times 30 \times 0,56 / 1,5 \times 150 \times 1,1 = 293 \text{ лк}$$

Загальна потужність освітлювальної установки:

$$P0 = Кп \times P \times N$$

де Кп – коефіцієнт, що враховує втрати в пускорегулювальної апаратурі, Кп = 1,25;

Р - потужність лампи, кВт;

$$P0 = 1,25 \times 0,065 \times 30 = 2,43 \text{ кВт}$$

Таким чином, розрахункова освітленість на ділянці налаштування відповідає вимогам.

4.4 Пожежна профілактика

Згідно з нормами пожежної безпеки всі робітники повинні пройти інструктаж з пожежної безпеки знати розташування затверджених планів евакуації та засобів пожежі гасіння.

Пожежна безпека в лабораторіях забезпечується системою запобігання пожеж, системою пожежного захисту та організаційно-технічними заходами. У разі виникнення пожежа використовуються пожежні насосні станції, за допомогою яких можна швидко локалізувати осередки займання.

Що стосується засобів пожежогасіння в кабінах управління і об'єктів управління, то треба враховувати, що ми маємо справу з електрообладнанням яке гасити водою ЗАБОРОНЕНО! Треба використовувати вуглекислотні вогнегасники, наприклад вуглекислотний вогнегасник ОУ-5.

4.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях

У разі повені.

Повінь – це значне затоплення місцевості внаслідок підйому рівня води в річці, що викликається припливом води в період сніготанення або злив, вітрових нагонів води, при заторах льоду на річках, прорив гребель та огороджуючих дамб, завалах річок при землетрусах.

Повені часто супроводжуються людськими жертвами і завдають величезний матеріальний збиток: пошкоджуються і руйнуються житлові та виробничі будівлі, автомобільні і залізні дороги, лінії електропередачі, зв'язку та ін.

Повені можна прогнозувати: встановити час, характер, очікувані його розміри і своєчасно організувати попереджувальні заходи, що значно знижують шкоду, створити сприятливі умови для проведення рятувальних і невідкладних аварійно-відновлювальних робіт.

Про прогнозованому затопленні населення оповіщається заздалегідь.

При раптовій повені необхідно: як найшвидше зайняти найближчим підвищення, і бути готовим до евакуації по воді плавзасобами або пішим порядком вбрід; до прибуття допомоги залишатися на верхніх поверхах, дахах, та інших піднімаються місцях.

Після спаду води слід остерігатися первинних і провислих проводів.

Основний напрям боротьби з повенями полягає в зменшенні максимальної витрати води в річках, шляхом перерозподілу стоку води в часі за допомогою водосховищ, будівництва дамб і відведення води в русла інших річок і водосховища.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Вступ

У даному дипломному проекті розглянуто електропривод ротора підвісної центрифуги ФПН.

Актуальність даного рішення виходить з того, що впровадження сучасного обладнання сприятиме зменшенню споживаної електроенергії, зниженню витрат і часу на поточний ремонт, підвищенню надійності обладнання, що сприятиме зменшенню собівартості продукції.

Метою даного розділу є визначення капітальних та експлуатаційних витрат при впровадженні запропонованого керованого електропривода ротора центрифуги за системою перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АД).

Об’єктом проектування є система електропривода на базі перетворювача частоти ATV980.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні питання:

1. Визначити капітальні витрати.

2. Розрахувати експлуатаційні витрати, а саме:

- амортизаційні відрахування;
- річний фонд заробітної плати обслуговуючого персоналу;
- відрахування на соціальні заходи;
- річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт;
- вартість спожитої електроенергії.

5.1 Капітальні витрати

Капітальні вкладення – це кошти, призначені для створення і придбання основних фондів та нематеріальних активів, що підлягають амортизації. В даному випадку це грошові кошти, призначені для:

- придбання електрообладнання, що підлягає амортизації,
- транспортно-заготівельні і складські витрати,

- монтаж і налагодження системи керування.

$$К = К_{ОБ}(\Sigma_{i=1}^{1}) + З_{ТЗС} + З_{М} + З_{Н} + З_{ПР}$$

де $К_{ОБ}(\Sigma_{i=1}^{1})$ – сумарна вартість комплектуючих виробів;

$З_{ТЗС}$ – транспортно-заготівельні та складські витрати;

$З_{М}$ – витрати на монтажні роботи;

$З_{Н}$– витрати на налагоджувальні роботи;

$З_{ПР}$ – інші одноразові вкладення грошових коштів.

Витрати на придбання технічних засобів або комплектуючих виробів зведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Капітальні витрати

№	Найменування технічних засобів	Кількість	Одиниці, грн Вартість	Вартість, грн
1	Асинхронний двигун 4А315М4У3 1 250кВт	1	132 633	132633
2	Комплектний перетворювач частоти ATV980C31Q4X1	1	2 202 839	2202839
			РАЗОМ:	2335472

Ціни станом на 22/05/2018 взяті з:

https://ventilator.ua/product/elektrodvigatel-air-315-m4/

https://electrical-components.com/schneider/atv980c31q4x1.html

Ціна перевезення устаткування входить у вартість електроустаткування, тому окремо не розраховуємо.

Монтажні та налагоджувальні роботи виконуються на підприємстві штатними електриками чи електромеханіками, і розраховуються як

$$М = \Sigma_{i=1}^{m} (n \cdot t_i \cdot a_i) K_{д} \cdot K_{c} \cdot K_{нр},$$

де $i = 1 \ldots m$ – розряди робочих, які виконують монтажно-налагоджувальні роботи, $i = 3$;

$n = 2$ – кількість працівників і-го розряду, задіяних в монтажних роботах;

$t_i = 16$ год – час на виконання налагоджувальних робіт і;

$K_д = 1$ – коефіцієнт доплат;

$K_c = 1{,}22$ – коефіцієнт, який враховує відрахування на соціальні заходи (ставка єдиного соціального внеску в 2018 р.);

$a_i = 28{,}4$ грн – годинна тарифна ставка робітників (електромонтер 3-го розряду);

$K_{нр} = 1{,}15$ – коефіцієнт, який враховує непередбачувані витрати.

$$М = (2 \cdot 16 \cdot 28{,}4) \cdot 1{,}22 \cdot 1{,}15 \cdot 1 = 1275 \text{ грн.}$$

Оскільки проект передбачає впровадження нового об’єкту, тому демонтажні роботи не розраховуємо.

Таким чином капітальні витрати складають:

$$К = К_{об} + М$$

де $К_{об}$ – вартість обладнання.

$$К = 2335472 + 1275 = 2336747 \text{ грн.}$$

5.2 Експлуатаційні витрати

Експлуатаційні витрати – це поточні витрати на експлуатацію і обслуговування об'єкту проектування за певний період (рік), виражені в грошовій формі.

До основних статей експлуатаційних витрат по електротехнічному устаткуванню відносяться:

- Амортизаційні відрахування;
- Заробітна плата обслуговуючого персоналу;
- Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт устаткування;
- Вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування;

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складуть:

$$С = Са + Сз + Ст + Се$$

Розрахунок експлуатаційних витрат ведеться за обома варіантами паралельно.

5.2.1 Амортизаційні відрахування

Річний фонд амортизаційних відрахувань визначається у відсотках від суми капітальних витрат по видах основних фондів і нематеріальних активів по розділах зведення капітальних витрат. Дані розрахунку занесені до таблиці 5.2

Асинхронний двигун та перетворювач частоти відносяться до четвертої групи інформаційних відрахувань основних фондів, мінімально допустимі строки корисного використання якої – 5 років.

Таким чином норма амортизації розраховується за формулою:

$$\text{Н}_\text{А} = \frac{1}{T_{min}}$$

$$\text{Н}_\text{А} = \frac{1}{5} \cdot 100 = 20$$

Таблиця 5.2

Розрахунок амортизаційних відрахувань

№	Найменування	Капітальні витрати, грн.	Норма амортизації, %	Сума амортизації, грн
1.	Проектний варіант	2336747	20	467349

5.2.2 Річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт

Річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт електротехнічного устаткування включають витрати на матеріали, запасні частини, заробітну плату ремонтним робітникам.

Витрати на поточний ремонт апаратури автоматики і систем автоматизації можна розрахувати за формулою:

$$\text{С}_\text{т} = \Sigma_{i=1}^{n} \left(R_i \cdot t_i \cdot m_i \cdot R_{\Sigma i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_\text{ф} \right)$$

де n – кількість пристроїв автоматики, що підлягають ремонту;

R_i – годинна ставка робочих, виконуючих ремонт, 28,4грн.

t_i – трудомісткість одного ремонту при категорії складності ремонту в одну ремонтну одиницю залежно від виду ремонту, год/од.: (малого – 1,2);

m_i – число ремонтів з рік (малих 2);

$R_{\Sigma i}$ – сумарна категорія складності ремонту залежно від виду електроустаткування: Асинхронний двигун від 240,1 до 280 кВт – 18.

S_i – вартість однотипних замінюваних елементів – 0 грн;

$П_i$ – кількість однотипних замінюваних елементів – 0;

T_i – середній термін служби деталей цього типу, год.;

Кількість циклів спрацювання контактної апаратури 10 млн. При тривалості технологічного циклу 143 с (п. 2.1) маємо 50 вмикань / вимикань на годину. Заявлений термін служби T_i = 10 000 000 / 50 = 200 000 год, при цілодобовій роботі обладнання – 22,8 роки, що більше за термін амортизації.

$T_ф$ – кількість годин роботи апаратури на рік, 4380 год.

Витрати на поточний ремонт

$$С_Т = (28.4 \cdot 1.2 \cdot 2 \cdot 18) = 1227 \text{ грн.}$$

5.2.3 Вартості спожитої електроенергії

Вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування впродовж року, визначається виходячи з його встановленої потужності і річного фонду робочого часу об'єкту проектування по формулі:

$$Се = Wр \cdot Це$$

де Wр – кількість спожитої за рік електроенергії, кВт·год.;

Це – тариф на електроенергію, грн./кВт·год.

Станом на травень 2018 року Це = 1,62912 грн./кВт·год. з ПДВ згідно з тарифами на електроенергію ПАТ "ДТЕК Дніпрообленерго" для бізнесу на II квартал 2018 року. http://doe.com.ua/tarify-dlya-biznesa/

Кількість спожитої за рік електроенергії, кВт·год розраховуємо по формулі:

$$Wp = t_h \cdot t_d \cdot t_m \cdot Pн = 1095000 \text{ кВт год}$$

де Рн – потужність електродвигуна.

$$Ce = Wp \cdot Це = 17838864 \text{ грн.}$$

Таким чином, річні експлуатаційні витрати

$$C = Ca + Ст + Ce = 467349 + 1227 + 17838864 = 18306213 \text{ грн.}$$

Висновок

Відповідно до поставленої мети, розраховані капітальні та експлуатаційні витрати на впровадження запропонованого проекту – електропривод ротора підвісної центрифуги за системою перетворювач частоти – асинхронний двигун.

Проектні капітальні витрати склали 2336747 грн., а експлуатаційні – 18306213 грн.

ВИСНОВОК

Основним механізмом який виконує кристалізацію утфеля на цукровому заводі є центрифуга. В роботі було розроблено електропривод ротора фільтруючої підвісної центрифуги. Розглянуто класифікацію відцентрових пристрої для розділення речовин, загальні принципи функціонування та основні елементи сепараторів і основні режими роботи. Відповідно до заданих габаритних показників підвісної центрифуги, маси вихідного продукту та тахограми робочого циклу розраховано навантаження, моменти інерції. Здійснено розрахунок статичного моменту на валу двигуна, час роботи та побудовано тахограми механізму. Розглянуті існуючі системи керування електроприводами, що можуть бути застосовані до ротора центрифуги, перелічені їх переваги та недоліки, і, з огляду на режими роботи об’єкту, сучасні реалії розвитку приводної техніки та перспективу автоматизації виробництва, обрано систему ПЧ-АД.

Вибрано приводний двигун за максимальним динамічним моментом. Здійснена перевірка правильності вибору електричного двигуна методом еквівалентного моменту. Відповідно до режимів роботи підвісної центрифуги та обраного двигуна, вибрано комплектний перетворювач частоти, що забезпечує необхідну високу динаміку роботи при прямому та реверсному обертанні. Синтезовано систему керування та розраховані параметри регуляторів.

Виконано математичний опис асинхронного двигуна в системі координат, орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора, створено математичну модель запропонованої двомасової електромеханічної системи. Виконано дослідженні її роботи у відповідності до поставлених вимог. Отримані результати підтверджують допустимість прийнятих припущень та правильність розрахунків елементів системи.

Здійснено техніко-економічне обґрунтування вибору системи керування на користь системи: перетворювач частоти – асинхронний двигун.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Соколов В.И. «Центрифугирование». М., Химия, 1976.
2. Ильин И.И. «Интенсификация и повышение качества очистки СОЖ». Инструмент и технологии №8-9 с.36 Санкт-Петербург 1997.
3. Циклер Д. Дипл. инж. «Очистка СОЖ и системы для очистки СОЖ». HKS Maschinenbau, ГМбх. Материалы доклада, С.Петербург, 1987.
4. Соколов В. И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств: Учебник для втузов по специальности «Машины и аппараты пищевых производств».– М: Машиностроение, 1983. – 447 с.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с,
6. Замена двигателей постоянного тока на асинхронные регулируемые двигатели [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://www.nodvig.com/zamenaDPT.pdf
7. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6–е, исправленное. – М.: Энергия, 1977. – 432с.
8. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.
9. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. Изд. 3-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 1976. – 488 с.
10. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – Д., Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.,
11. Преобразователи частоты Altivar Process ATV900. Каталог 2016.
12. Голінько В.І., Чеберячко С.І. Практикум з охорони праці. Навчальний посібник – Д.: Державний ВНЗ «НГУ», 2011. – 270 с.