

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 0507 електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва галузі знань)

напрямок підготовки 6.05070204 «Електромеханіка»

(код і назва напрямку підготовки)

освітній рівень

бакалавр

(назва освітнього рівня)

кваліфікація фахівець у галузі електромеханіки

(код і назва кваліфікації)

на тему Електропривод ізложиці машини відцентрового лиття з консольним приводом

Виконавець:

студент 4 курсу, групи ЕМ-14-1

(підпис)

Донець В.В.
(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

(група)

Донець В.В.

(прізвище та ініціали)

Тема дипломного проекту Електропривод ізложиці машини відцентрового
лиття з консольним приводом

затверджена наказом ректора НТУ "Дніпровська політехніка" від

07.05.2018 № 568-л

Розділ	Зміст	Термін виконання
Спеціальний	Вибір електродвигуна, розрахунок системи керування, моделювання роботи електропривода	29.01 – 27.05
Охорона праці	Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, заходи щодо їх усунення, розрахунок штучного освітлення.	28.05 – 3.06
Економічний	Розрахунок основних техніко-економічних показників впровадження дипломного проекту.	4.06 – 10.06

Завдання видав

(підпис)

Казачковський М.М.

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Донець В.В.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: 29.01.2018

Термін подання дипломного проекту до ДЕК 22.06.2018

ABSTRACT

Explanation message: 65 pages, 6 tables, 20 pictures, 13 sources.

Task project: calculation and choice of the electric drive of the casting mold of the cantilever spin casting machine.

The description of the centrifugal casting process, cantilever spin casting machine and its technical characteristics is provided in the first part of the project.

In the section 2 "The Automated Electric Drive" calculation of the electric motor power, also calculation of speed regulation system of the induction motor with the frequency converter. The frequency converter gets out.

In the section 3 the method of mathematical modeling investigated dynamics of the offered electric drive system.

In the section 5 dangerous production factors are analyzed, technical actions for protection of the service personnel at crane operation are developed.

Economic efficiency of introduction of the offered system of electric drive is expected in the section 7.

CANTILEVER SPIN CASTING MACHINE, CASTING MOLD, FREQUENCY ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, SIMULATION.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		4

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	8
1.1 Суть та властивості відцентрового лиття. Загальна характеристика технологічного процесу.....	8
1.2 Кінематична схема установки відцентрового лиття. Параметри устаткування та режими його роботи.	12
1.3 Вимоги до системи електроприводу установки відцентрового лиття... ..	14
2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД.....	16
2.1 Вибір типу електропривода.....	16
2.2 Розрахунок навантажувальних діаграм та вибір двигуна	17
2.3 Модель асинхронного короткозамкненого двигуна в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора.....	28
2.4 Синтез системи регулювання швидкості асинхронного двигуна	31
2.4.1 Синтез регулятора струму	35
2.4.2 Синтез регулятора потокозчеплення ротора	36
2.4.3. Синтез регулятора швидкості	38
2.5 Вибір комплектного перетворювача частоти і додаткового устаткування	40
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	42
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	50
4.1 Аналіз шкідливих виробничих факторів	50
4.2 Загальні вимоги техніки безпеки при роботі на машинах відцентрового лиття.....	50
4.3 Розробка заходів з електробезпеки.....	52
4.4 Пожежна безпека	53
4.5 Розрахунок штучного освітлення	53
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	57
5.1 Розрахунок капітальних витрат	57

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		5

5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	59
5.2.1 Розрахунок амортизаційних відчислень	60
5.2.2 Розрахунок вартості спожитої електроенергії.....	61
5.2.3 Витрати на технічне обслуговування и текучий ремонт.....	62
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	65

Інв. № подл.	Підп. і дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		6

ВСТУП

Відцентрове лиття являє собою різновид технології литва. Відрізняється воно тим, що під час заливки металу та його твердінні форма з металом обертається і знаходиться під дією відцентрових сил. Відцентрове лиття має певні переваги перед іншими способами литва. За допомогою нього можна виготовляти порожнисті циліндри без використання стрижнів, двошарові та багат шарові вироби. Під час литва можна здійснювати динамічний вплив на кристалізацію та структуру відливок, інтенсивно відчищати відливки від неметалевих включень. Виливки, отримані відцентровим литтям, за механічними властивостями не поступаються або близькі до поковок, а в деяких випадках і перевищують їх.

Високі техніко-економічні показники відцентрового способу лиття досягаються за рахунок економії металу, електроенергії, витрат праці, скорочення капіталовкладень та тривалості виробничого циклу. Найбільший техніко-економічний ефект досягається при виготовленні виробів у вигляді тіл обертання: труб з різних металів та сплавів, гільз, втулок для двигунів внутрішнього згорання, великогабаритних виливок, кілець підшипників та інше.

Оскільки відцентрова сила залежить від швидкості обертання $F = m \omega^2 r$ (m - вага матеріалу, $\omega^2 r$ - прискорення елемента ваги, що обертається рівномірно), а формування структури від прискорення при виході на робочий режим, важливою задачею є розробка системи електропривода. Саме сучасної надійної системи електропривода, яка забезпечить і швидкісний режим роботи для різних видів металів, необхідні динамічні прискорення і підвищить енергетичну ефективність системи.

Задачею дипломного проекту є модернізація установки відцентрового лиття з горизонтальною віссю обертання шляхом застосування сучасного частотно-керованого електроприводу.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		7

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Суть та властивості відцентрового лиття.

Загальна характеристика технологічного процесу.

Відцентровим литтям називається спосіб отримання виливків у металевих формах, при якому розплавлений метал, піддаючись дії відцентрових сил, відкидається до стінок форми і твердне, утворюючи виливок.

В даний час цей спосіб застосовують переважно при виготовленні виливків, що представляють собою тіла обертання (втулки, труби, вінці зубчасті колеса). Для отримання внутрішньої порожнини в циліндричних виливках не потрібно використання стрижнів.

Відцентровий спосіб застосовують також для отримання фасонних виливків, що не мають форми тіл обертання. В останньому випадку - вісь обертання форми не збігається з віссю симетрії виливки. Порожнини, що утворюють виливки, розташовуються симетрично по краях планшайби, що обертається. Метал подається в порожнини форми по литніковій системі, що обертається разом з формою. Литнікова система складається з стояка з ливниковою лійкою і з радіальних тангенціальних живильників. Центр виливків з ливникової системою повинен знаходитися на вісі обертання з тим, щоб не порушувалася рівновага. На рис. 1.1 наведені три можливі схеми відцентрового лиття.

При будь-якій схемі вісь обертання може бути горизонтальною, вертикальною або похилою. Найбільш поширена схема з горизонтальною віссю.

Схему з горизонтальною віссю (рис. 1.1, а) застосовують для виробництва довгомірних тіл обертання, у яких величини відношення довжини L до діаметру D більше двох ($L/D > 2$). Вільна поверхня виливки є циліндр.

На машинах з вертикальною віссю обертання (рис. 1.1, б) відливають короткі тіла обертання, так як вільна поверхня у них є парабола обертання, внаслідок чого товщина виливків різна по висоті. Третю схему, при якій немає вільної поверхні,

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		8

застосовують рідше, в тих випадках, коли відцентрові сили використовуються для підвищення щільності виливків або для поліпшення заповнення тонкостінних виливків.

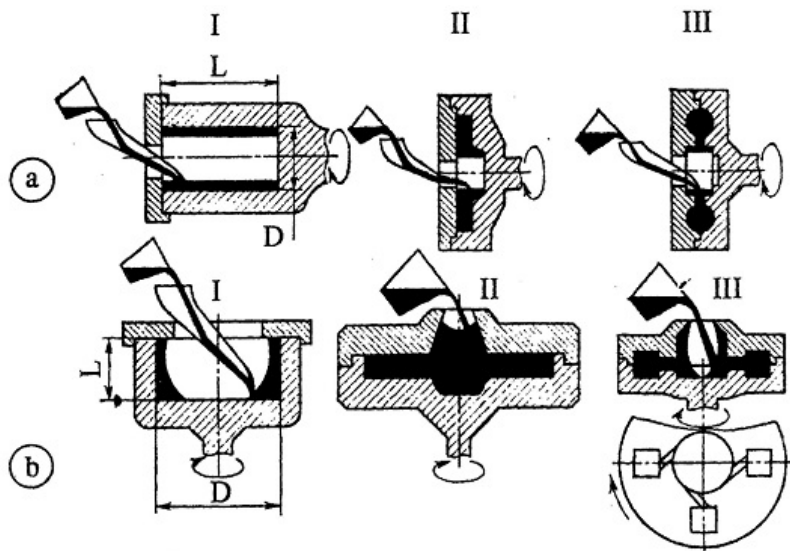


Рисунок 1.1 - Схеми відцентрового лиття: а - горизонтальне відцентрове лиття, б - вертикальне відцентрове лиття (I - у виливки є вільна поверхня, вісі обертання виливки і машини збігаються; II - у виливки немає вільної поверхні, вісі обертання виливки і машини збігаються; III - у виливки немає вільної поверхні, вісі обертання виливки і машини не збігаються).

Особливості відцентрового лиття:

- при відцентровому литті на кожен частинку сплаву діють дві сили - гравітаційна і відцентрова. В окремих випадках співвідношення цих сил може досягати 100 од.;

- охолодження металу в формі відбувається з двох сторін - з зовнішньої тепло відводиться металевою формою, з вільної поверхні тепло випромінюється в повітря; в зв'язку з цим в процесі заповнення форми безперервно відбувається конвекція - перенесення теплоти в рідкому металі шляхом перемішування самої речовини;

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-------	----------	-------	------

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

- вільна поверхня виливки твердне останньою, тому всі включення виносяться на цю поверхню.

Перевагами відцентрового лиття є:

- велика продуктивність, процес можна автоматизувати;
- висока щільність, відсутність пористості, шлакових включень, так як за рахунок відцентрової сили вони відтісняються до внутрішньої поверхні виливки;
- високі механічні властивості металу за рахунок нагрівання і швидкого затвердіння виливки, освіту дрібнозернистої структури;
- можливість отримання тонкостінних виливків зі сплавів з низькою текучістю рідкого металу.

Недоліки способу:

- при збільшенні частоти обертання форми понад оптимальної зростає ізоляція (хімічна неоднорідність) в товстостінних виливках, тобто компоненти сплаву з більш високою щільністю витісняються на зовнішню поверхню, близько внутрішньої вільної поверхні спостерігають скупчення найбільш легких фаз.

Кожна відцентрова машина має наступні основні елементи:

- а) виливницю з кришками і опорними пристроями;
- б) привід;
- в) заливальний пристрій;
- г) пристрій для охолодження;
- д) огорожувальні пристрої.

Короткі виливниці зазвичай консольно монтують на валу (шпинделі) машини або кріплять до планшайби.

При виготовленні виливків з вільною поверхнею розплав охолоджується в виливниці нерівномірно за обсягом. Частина теплоти відводиться від розплаву в стінку виливниці і її кришку, інша частина - конвекцією і випромінюванням з боку вільної поверхні. Кількість теплоти, що віддається повітрю вільною поверхнею виливка, достатньо велика.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		10

Охолодження виливниці передбачає можливість подачі як великої кількості води і утворення ванни, так і охолодження окропленням з великої кількості поздовжньо розташованих трубок.

Найбільш поширеним способом є лиття пустотілих циліндричних виливків в обертових металевих формах з горизонтальною віссю обертання. За цим способом (рис. 1.2) вилівок формується в полі відцентрових сил з вільною циліндричною поверхнею, а формотворною поверхнею служить внутрішня поверхня виливниці. Розплав з ковша 3 заливають у обертову форму 5 через заливний жолоб 2. Розплав 1 розтікається по внутрішній поверхні форми, утворюючи під дією поля відцентрових сил порожнистий циліндр. Після затвердіння металу і зупинки форми відбувається вилучення виливки 4. Такий спосіб характеризується найбільш високим технологічним виходом придатного металу (ТВГ ~ 100%), так як метал не витрачається на литникову систему.

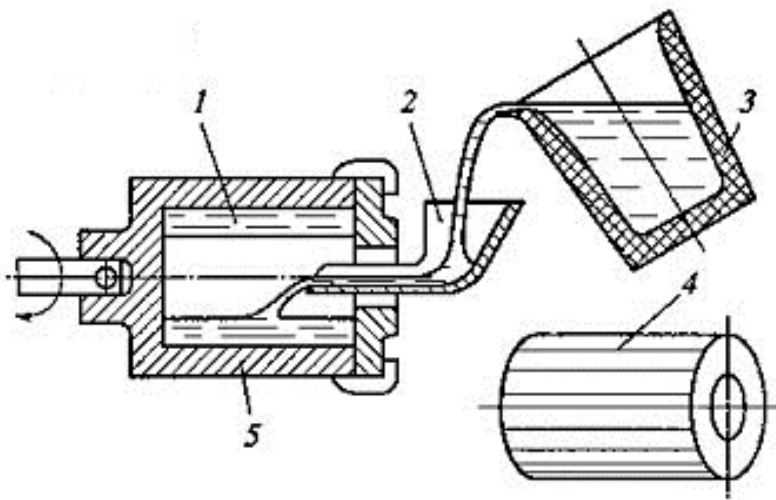


Рисунок 1.2 - Литво з горизонтальною віссю обертання

Підготовка машини до відливання складається з наступних операцій [2]:

- підготовка ковша;
- підготовка жолоба;
- підготовка стрижнів;
- нагрівання виливниці.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-------	----------	-------	------

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

11

Перед початком роботи виливницю підігрівають литтям однієї-двох одиниць виробу, які мають недоліки. Метал заливають в суху виливницю.

1.2 Кінематична схема установки відцентрового лиття.

Параметри устаткування та режими його роботи.

Кінематична схема установки відцентрового лиття (УВЛ) представлена на рис. 1.3. УВЛ складається з виливниці, яка пов'язана з валом. Вал закріплено консольно у двох підшипникових опорах. На кінці валу виливниці, як і валу двигуна насаджено шків. Обертання від двигуна M передається через клино-ремінну передачу.

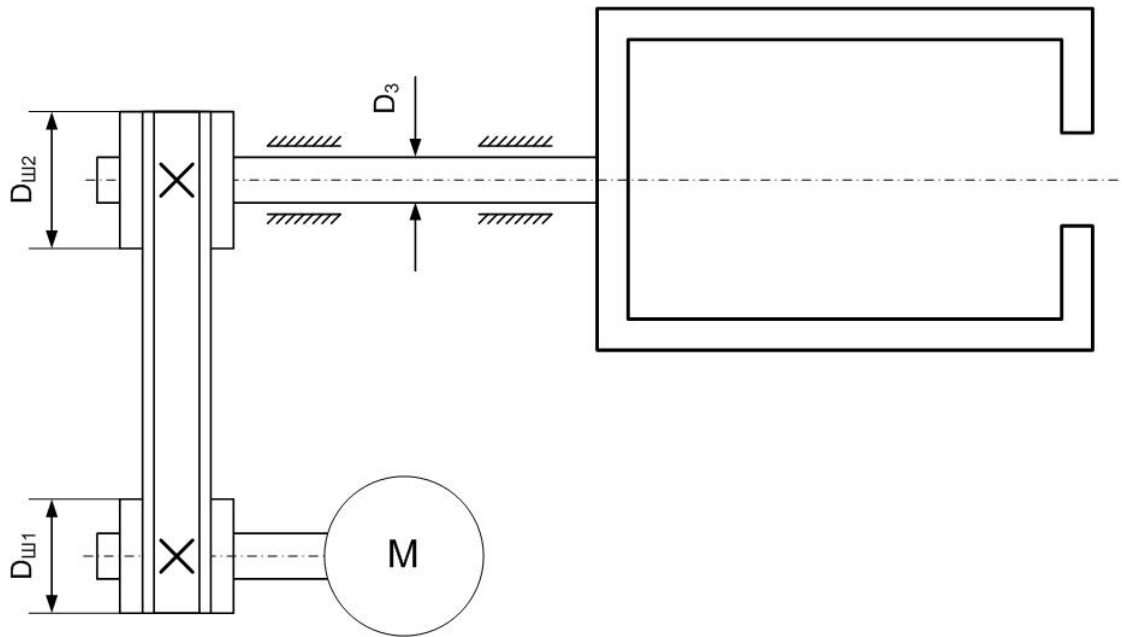


Рисунок 1.3 – Кінематична схема установки відцентрового лиття

На рис. 1.4 наведена тахограма роботи виливниці. На початковому етапі технологічного процесу електродвигун розганяє виливницю до пониженої швидкості n_1 , при якій здійснюється заливка металу, що забезпечує його рівномірний розподіл. При цьому загальний момент інерції зростає. Таким чином, двигун повинен забезпечити постійну швидкість виливниці під час заливки t_2 . Після заливки металу слідує розгін до максимальної швидкості n_2 . Двигун повинен

Інв. № подл.	Підп. і дата
Зам. Інв. №	Інв. № дубл.
Підп. і дата	Підп. і дата

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-------	----------	-------	------

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

12

забезпечити розгін за доволі короткий час t_3 . Завершальним етапом, після охолодження деталі, є гальмування (t_5).

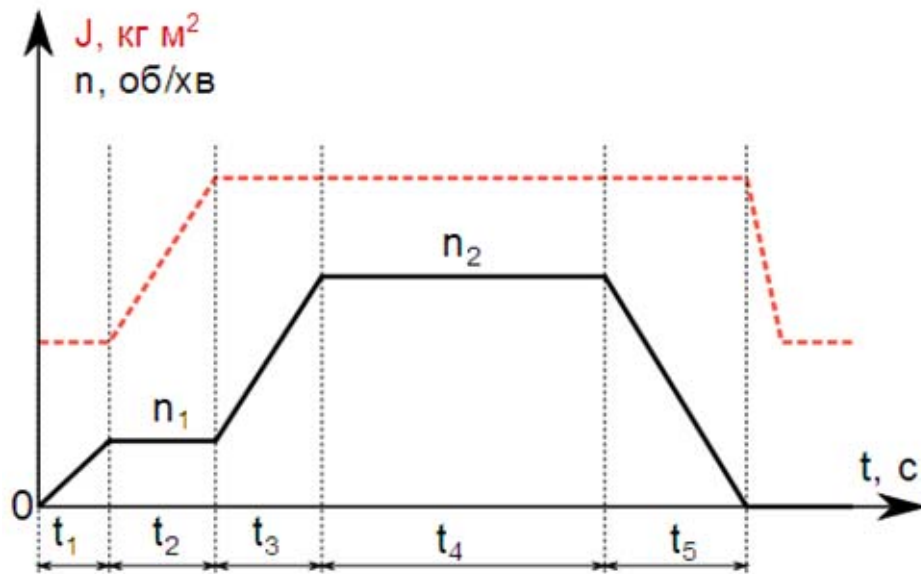


Рисунок 1.4 – Тахограма робочого циклу електропривода виливниці та зміна її моменту інерції

На рис. 1.5 наведено креслення виливниці, параметри устаткування та технологічного процесу надано в □абл.. 1.1.

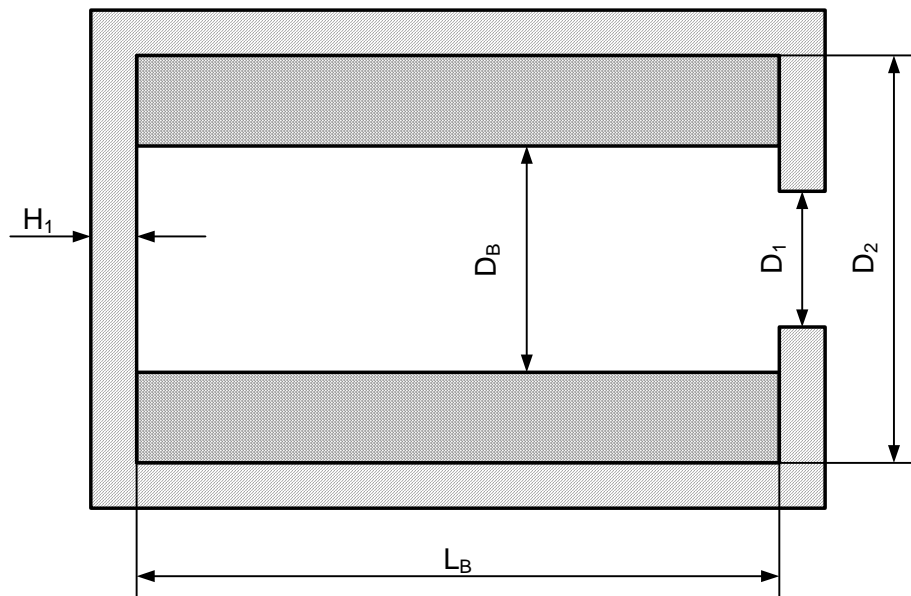


Рисунок 1.5 – Виливниця. Габаритні креслення.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-------	----------	-------	------

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

13

Таблиця 1.1

Параметри установки відцентрового лиття

Найменування	Позначення	Значення
Внутрішній діаметр виливниці, м	D_2	0,145
Внутрішня довжина виливниці (довжина деталі в завантаженні), м	L_B	0,32
Внутрішній діаметр деталі, м	D_B	0,115
Товщина стінки виливниці, м	H_1	0,05
Діаметр отвору для заливки, м	D_1	0,08
Діаметр консольного валу виливниці, м	D_3	0,04
Діаметр шківів вала виливниці, м	$D_{ш2}$	0,112
Діаметр шківів вала двигуна, м	$D_{ш1}$	0,112
Середня ширина шківів, м	$B_{ш}$	0,03
Час розгону до швидкості заливки, с	t_1	3
Час заливки метала, с	t_2	6
Час розгону до робочої швидкості, с	t_3	5
Час твердіння металу, с	t_4	35
Час зупинки, с	t_5	8
Тривалість робочого циклу, с	$T_{ц}$	300
Завантажувальна швидкість обертання виливниці, об/хв	n_1	500
Робоча швидкість обертання при твердінні металу, об/хв	n_2	1000
Момент інерції виливниці з валом, кгм ²	J_1	1,05

1.3 Вимоги до системи електроприводу установки відцентрового лиття

З урахуванням вище зазначених особливостей технології відцентрового лиття до електроприводу УВЛ можна сформулювати наступні вимоги.

1. Перетворювач повинен забезпечувати достатню перевантажувальну здатність за моментом і струмом (не менше ніж 1,5 від номінального значення)

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-------	----------	-------	------

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

14

для забезпечення прискорень під час розгону та гальмування у відповідності до технологічних вимог. При цьому розгін та гальмування повинні бути плавними.

2. Так як виливниця з виливкою і всі інші частини УВЛ, що обертаються, мають достатньо великий момент інерції в них накопичується велика кількість кінетичної енергії. При гальмуванні електропривод обертання виливниці працює в генераторному режимі і доцільним є передати енергію мас, що обертаються, в мережу живлення. Для цього необхідний перетворювач частоти, що забезпечує передачу енергії в двох напрямках або працює в парі з будь-яким пристроєм рекуперації. Іншим варіантом для розсіювання енергії гальмування є її скидання на гальмівний резистор відповідної потужності.

3. Забезпечити регулювання швидкості у діапазоні до 100:1.

4. Режим роботи в основному повторно-короткочасний.

5. Оскільки робоча швидкість електропривода може змінюватись в залежності від технологічних вимог та виду вихідного матеріалу (сталь, бронза, чавун та інш.) двигун повинен мати незалежне охолодження.

6. Бажано мати двигун з вбудованими датчиками температури.

7. Враховуючи умови навколишнього середовища навколо УВЛ (пил, підвищена температура, бризки крапель гарячого металу) електрообладнання повинно мати ступінь захисту не нижче IP54 або розміщуватись у шафах з ступенем захисту не нижче IP54.

8. Всі електричні проводки повинні бути виконані у металевих трубах.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		15

2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

2.1 Вибір типу електропривода.

Для визначення напрямків модернізації електропривода установки відцентрового лиття (УВЛ) проведемо порівняльний аналіз існуючих систем електропривода УВЛ.

В [1, 2] зазначено що для УВЛ найчастіше використовувались наступні системи електропривода: асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (АД КЗР), асинхронний двигун з фазним ротором (АД ФР) та двигун постійного струму з тиристорним перетворювачем (ДПС ТП).

Система АД КЗР використовується в основному на установках малої потужності. Для регулювання швидкості на вали двигуна та виливниці встановлювали декілька шківів різного діаметру. Тим самим могли як підвищувати, так і зменшувати швидкість.

Система АД ФР використовувалась на більш потужних УВЛ так само, як і система АД КР. Але за рахунок додаткових опорів у фазному роторі можна було змінювати прискорення та змінювати перевантажувальну здатність системи.

Для керування такими системами найбільш розповсюдженими є релейно-контакторні схеми керування. Вони достатньо прості та доволі надійні. Даний спосіб регулювання швидкості та моменту двигуна має низьку точність та низький діапазон регулювання, малу плавність і зниження ККД при зменшенні навантаження на двигун.

Електропривод за системою ДПС ТП використовується на УВЛ великої потужності. Ця система дозволяє регулювати швидкість у достатньо великому діапазоні (1000:1), регулювати (обмежувати) момент двигуна, реалізовувати різні тахограми розгону. Обмежуючим фактором в такій системі є саме двигун постійного струму. Не зважаючи на його високу надійність, в жорстких умовах експлуатації він потребує постійного догляду. Із зменшенням потужності системи

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		16

також зменшується ККД. Ну і вартість всієї системи в цілому залишається достатньо високою.

Простота та надійність АД с КЗР визначили беззаперечну перспективність системи перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (ПЧ-АД). На теперішній день ця система де-факто є стандартом в задачах де необхідно регулювати швидкість та момент АД як в малих, так и в широких діапазонах (до 1000:1). Сучасні ПЧ мають великі можливості по інтеграції в системи керування різної складності, мають набір прикладних об'єктно-орієнтованих функцій. Суттєвим недоліком є висока вартість ПЧ, хоча вона може бути і менше ніж вартість системи ДПС ТП з аналогічними властивостями.

Сформулюємо вимоги до системи автоматизованого електропривода УВЛ:

- обладнання повинно бути надійним;
- мати оптимальне співвідношення ціна / якість;
- задовольняти заданим технічним характеристикам;
- легко доступно на ринку України;

Виходячи з вище наведеного аналізу, вихідних даних та вимог, визначених в розділі 1, вибираємо електропривод по системі ПЧ-АД.

Не зважаючи на високу вартість перетворювача частоти, використання системи ПЧ-АД дозволить:

- керувати пуско-гальмівними режимами привода;
- забезпечити плавність регулювання швидкості двигуна;
- використати різні прикладні функції автоматизації, реалізовані в ПЧ;
- підвищити довговічність та надійність обладнання,
- забезпечити різні види захисту електропривода в одному пристрої.

2.2 Розрахунок навантажувальних діаграм та вибір двигуна

Для визначення потужності привідного двигуна розрахуємо статичні та динамічні моменти на валу двигуна під час відпрацювання робочої тахограми.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		17

Для розрахунку скористаємося даними з розділу 1 табл. 1.1.

Під час роботи в статичному режимі (при сталій швидкості) двигун буде навантажений моментами опору від сил тертя в підшипниках і сил тертя о повітря. В динамічних режимах, при розгоні та гальмуванні, двигун додатково навантажується моментом, необхідним для зміни запасу кінетичної енергії системи за заданий час. Для розрахунку всіх моментів необхідно визначити масу елементів системи та її момент інерції.

Розрахунок почнемо з визначення моментів інерції. Момент інерції виливниці приведений в табл. 1.1 і складає $J_I=1,05 \text{ кгм}^2$. Момент інерції заливки (деталі) знайдемо як момент інерції полого циліндру за відомою формулою:

$$J_D = \rho \frac{\pi}{32} L_B [D_2^4 - D_B^4] = 7800 \times \frac{\pi}{32} \times 0,32 \times [0,145^4 - 0,115^4] = 0,065 \text{ кгм}^2$$

де ρ - щільність матеріалу деталі (для сталі, чавуну складає 7800 кг/м^3).

Момент інерції шківів знайдемо аналогічним способом. При розрахунку моменту інерції шківів двигуна попередньо вважатимемо, що діаметр валу дорівнює $D_D = 22 \text{ мм}$ ($0,022 \text{ м}$) [6, 8]. Матеріал шківів – сталь.

Шків виливниці:

$$J_{Ш2} = \rho \frac{\pi}{32} B_{Ш} [D_{Ш2}^4 - D_3^4] = 7800 \times \frac{\pi}{32} \times 0,03 \times [0,112^4 - 0,04^4] = 0,0035 \text{ кгм}^2$$

Шків двигуна:

$$J_{Ш1} = \rho \frac{\pi}{32} B_{Ш} [D_{Ш1}^4 - D_D^4] = 7800 \times \frac{\pi}{32} \times 0,03 \times [0,112^4 - 0,022^4] = 0,0036 \text{ кгм}^2$$

При розрахунку зведеного до валу загального моменту інерції будемо вважати, що момент інерції двигуна для двигунів з вихідним кінцем валу 22 мм дорівнює $J_M = 0,003 \text{ кгм}^2$ [8].

Передатне число i ремінної передачі визначимо через відношення діаметрів шківів:

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		18

$$i = \frac{D_{Ш2}}{D_{Ш1}} = \frac{0,112}{0,112} = 1$$

В даному випадку шків використовується лише для забезпечення зчеплення гнучкою передачею.

Загальний момент інерції навантаження визначиться як сума моментів інерції:

- при роботі без заливки

$$J_{N1} = \left(\frac{J_I + J_{Ш2}}{i^2} \right) + (J_M + J_{Ш1}) = \left(\frac{1,05 + 0,0035}{1^2} \right) + (0,0036 + 0,003) = 1,06 \text{ кгм}^2$$

- при залитій виливниці

$$J_{N2} = \left(\frac{J_I + J_{Ш2} + J_D}{i^2} \right) + (J_M + J_{Ш1}) = \left(\frac{1,05 + 0,0035 + 0,065}{1^2} \right) + (0,0036 + 0,003) = 1,125 \text{ кгм}^2.$$

Оскільки отримані значення зведеного до валу двигуна моменту інерції майже однакові, різниця складає 5-6 %, при подальших розрахунках будемо використовувати більше значення J_{N2} .

Визначимо масу виливниці. Масу будемо визначати як суму окремих частин.

Маса основи:

$$m_{OS} = \rho \frac{\pi}{4} L_B \left[(D_2 + 2H_1)^2 - (D_2)^2 \right] = 7800 \times \frac{\pi}{4} \times 0,32 \times \left[(0,145 + 2 \times 0,05)^2 - (0,145)^2 \right] = 76,45 \text{ кг}$$

задня стінка:

$$m_{ZS} = \rho \frac{\pi}{4} H_1 (D_2 + 2H_1)^2 = 7800 \times \frac{\pi}{4} \times 0,05 \times (0,145 + 2 \times 0,05)^2 = 18,4 \text{ кг}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		19

передня стінка:

$$m_{PS} = \rho \frac{\pi}{4} H_1 [(D_2 + 2H_1)^2 - (D_1)^2] =$$
$$= 7800 \times \frac{\pi}{4} \times 0,05 \times [(0,145 + 2 \times 0,05)^2 - 0,08^2] = 16,43 \text{ кг}$$

Повна маса виливниці:

$$m_I = m_{PS} + m_{ZS} + m_{OS} = 16,43 + 18,4 + 76,45 = 111,26 \text{ кг}$$

Маса (залівки) деталі:

$$m_D = \rho \frac{\pi}{4} L_B [(D_2)^2 - (D_B)^2] = 7800 \times \frac{\pi}{4} \times 0,32 \times [(0,145)^2 - (0,115)^2] = 15,3 \text{ кг}$$

Розрахуємо моменти статичного опору на ділянках усталеного режиму (періоди часу t_2 , t_4 відповідно до тахограми на рис. 1.4).

Моменти опору сил тертя о повітря розраховується за наступною формулою:

$$M_A = 23,5 \times 10^{-6} \times H \times D \times n^2,$$

де H – довжина (висота) виливниці, м;

D – діаметр виливниці, м;

n – швидкість обертання виливниці, об/хв.

При роботі на завантажувальній швидкості, інтервал часу t_2 :

$$M_{A2} = 23,5 \times 10^{-6} [L_B + 2H_1] \times [D_2 + 2H_1] n_1^2 =$$
$$= 23,5 \times 10^{-6} \times [0,32 + 2 \times 0,05] \times [0,145 + 2 \times 0,05] \times 500^2 = 0,61 \text{ Нм}$$

При роботі на завантажувальній швидкості, інтервал часу t_4 :

$$M_{A4} = 23,5 \times 10^{-6} [L_B + 2H_1] \times [D_2 + 2H_1] n_2^2 =$$
$$= 23,5 \times 10^{-6} \times [0,32 + 2 \times 0,05] \times [0,145 + 2 \times 0,05] \times 1000^2 = 2,42 \text{ Нм}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

20

Моменти опору сил тертя в підшипниках визначимо за наступною формулою:

$$M_T = 4,9 \times f \times m \times d ,$$

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

d – діаметр валу на якому укріплена виливниця, м;

m – маса, яка обертається, кг.

Момент статичного опору при обертанні пустої виливниці:

$$M_{T1} = 4,9 \times f \times m_I \times D_3 = 4,9 \times 0,09 \times 111,26 \times 0,04 = 1,96 \text{ Нм}$$

Момент статичного опору при обертанні виливниці з заливкою:

$$M_{T2} = 4,9 \times f \times (m_I + m_D) \times D_3 = 4,9 \times 0,09 \times (111,26 + 15,3) \times 0,04 = 2,23 \text{ Нм}$$

Зведення моментів опору до валу двигуна не виконуємо, оскільки передатне число дорівнює $i=1$.

Визначимо динамічні моменти, необхідні для розгону виливниці до заданої швидкості. Динамічний момент визначимо з відомого рівняння руху електромеханічної системи:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_D - M_C ,$$

де M_D – динамічний момент двигуна;

M_C – момент статичного опору;

dt – час за який необхідно розігнатися;

$d\omega$ – зміна швидкості .

Динамічний момент, необхідний для розгону пустої виливниці до швидкості n_1 на інтервалі часу t_1 :

$$M_{D1} = J_{N2} \times \frac{d\omega}{dt} + (M_{A2} + M_{T1}) = J_{\Sigma 1} \times \frac{\pi n_1}{30} \frac{1}{t_1} + (M_{A2} + M_{T1})$$

$$M_{D1} = 1,125 \times \frac{\pi \times 500}{30} \frac{1}{3} + (0,61 + 1,96) = 22,2 \text{ Нм}$$

Підп. і дата	
Инв. № дубл.	
Зам. Инв. №	
Підп. і дата	
Инв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		21

Динамічний момент, необхідний для розгону заповненої виливниці від швидкості n_1 до швидкості n_2 на інтервалі часу t_3 :

$$M_{Д2} = J_{N2} \times \frac{d\omega}{dt} + (M_{A4} + M_{T2}) = J_{N2} \times \frac{\pi(n_2 - n_1)}{30} \frac{1}{t_3} + (M_{A4} + M_{T2})$$

$$M_{Д2} = 1,125 \times \frac{\pi \times (1000 - 500)}{30} \frac{1}{5} + (2,42 + 2,23) = 16,46$$

Динамічний момент, необхідний для гальмування виливниці після твердіння металу (інтервал часу t_5):

$$M_{Д3} = -J_{N2} \times \frac{d\omega}{dt} + (M_{ACP} + M_{T2}) = -J_{N2} \times \frac{\pi n_2}{30} \frac{1}{t_5} + (M_{ACP} + M_{T2}),$$

де M_{ACP} – середній за час гальмування момент опору сил тертя о повітря.

Оскільки момент опору сил тертя о повітря має квадратичну (нелінійну) залежність від швидкості обертання і в такому вигляді незручний для розрахунків, використаємо його середнє значення. Будемо вважати, що гальмування, як і розгін, відбувається за лінійним законом. Розрахунок ведемо за формулою:

$$M_{ACP} = 23,5 \times 10^{-6} \times H \times D \times \frac{n^2}{3}$$

$$M_{ACP} = 23,5 \times 10^{-6} [L_B + 2H_1] \times [D_2 + 2H_1] \frac{n_2^2}{3} =$$

$$= 23,5 \times 10^{-6} \times [0,32 + 2 \times 0,05] \times [0,145 + 2 \times 0,05] \times \frac{1000^2}{3} = 0,8 \text{ Нм}$$

В такому разі динамічний момент при гальмуванні дорівнює:

$$M_{Д3} = -1,125 \times \frac{\pi 1000}{30} \times \frac{1}{t_5} + (0,8 + 2,23) = -13,92 \text{ Нм}$$

Навантажувальна діаграма двигуна виливниці представлена на рис. 2.1.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		22

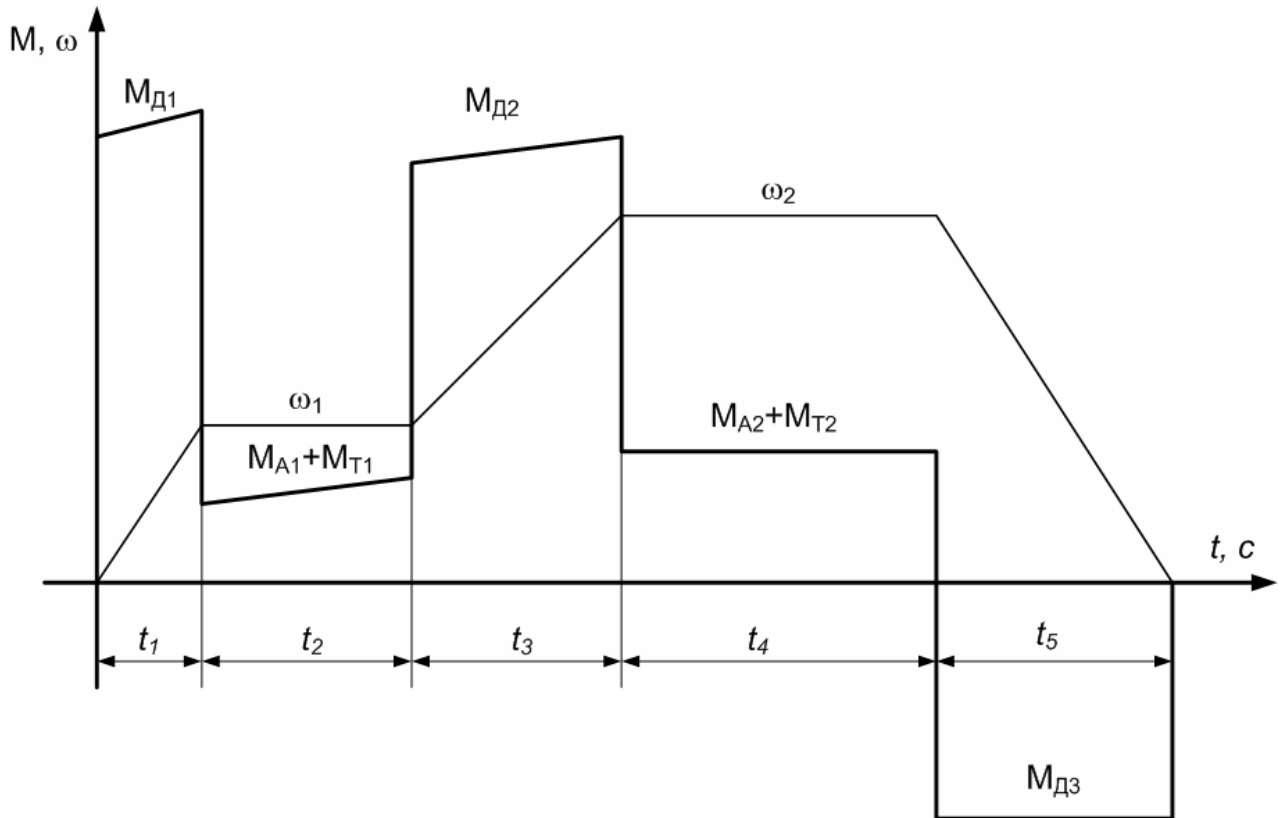


Рисунок 2.1 - Навантажувальна діаграма двигуна виливниці.

За табл. 1.1 тривалість робочого циклу складає $T_y = 300$ с. Визначимо тривалість вмикання двигуна ПВ. Попередньо розрахуємо час роботи

$$T_{роб} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = 3 + 6 + 5 + 35 + 8 = 57 \text{ с}$$

$$ПВ = \frac{T_{роб}}{T_y} \times 100\% = \frac{57}{300} \times 100\% = 19\%$$

Розрахунок еквівалентного моменту M_E виконаємо з урахуванням приведення отриманого ПВ робочого циклу до стандартного $ПВ_D$ двигуна 40% за [5, 6, 11]:

$$M_E = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{T_{роб}} \frac{ПВ}{ПВ_D}}$$

$$M_E = \sqrt{\frac{t_1 M_{д1}^2 + t_2 (M_{A2} + M_{T1})^2 + t_3 M_{д2}^2 + t_4 (M_{A4} + M_{T2})^2 + t_5 M_{д3}^2}{T_{роб}} \frac{ПВ}{ПВ_D}}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-------	----------	-------	------

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

23

$$M_E = \sqrt{\frac{3 \times 22,2^2 + 6 \times (1,96 + 0,61)^2 + 5 \times 16,46^2 + 35 \times (2,42 + 2,23)^2 + 8 \times 13,92^2}{300}} \cdot \frac{19}{40} = 2,86 \text{ Нм}$$

Еквівалентна потужність двигуна:

$$P_E = M_E \cdot \frac{\pi n_2}{30} \cdot k_3 = 2,86 \times \frac{\pi \times 1000}{30} \times 1,15 = 345,8 \text{ Вт,}$$

де $k_3 = 1,15$ – коефіцієнт запасу.

За даними розрахунку еквівалентної потужності обираємо стандартний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором потужністю 370 Вт та швидкістю обертання 1000 об/хв., наприклад 4AA71A6 [8]. Номінальний момент $M_{ДН}$ двигуна дорівнює:

$$M_{ДН} = \frac{30 P_{ДН}}{\pi n_H} = \frac{30 \times 370}{\pi \times 910} = 3,9 \text{ Нм}$$

За даними [8] максимальна перевантажувальна здатність (відносно значення критичного моменту) вибраного двигуна складає $m_K = 2,2$. В такому випадку при частотному керуванні двигун при ідеальних умовах розвиватиме максимальний динамічний момент що дорівнює 7,8 Нм. Цього значення недостатньо для здійснення розгону виливниці, бо потрібен момент майже втричі більший $M_{Д1} = 22,2 \text{ Нм}$.

Тому вирішальним при виборі двигуна, по-перше, буде саме можливість формувати необхідний динамічний момент при розгоні виливниці. По-друге, при роботі на пониженій швидкості умови охолодження двигуна погіршуються, тому двигун потрібен мати незалежну від швидкості примусову вентиляцію. Перевантажувальну здатність закладемо на рівні $\lambda = 2,0$. Тоді необхідний номінальний момент двигуна буде дорівнювати:

$$M_{ДН} = \frac{M_{Д1}}{\lambda} = \frac{22,2}{2} = 11,1 \text{ Нм}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		24

Розрахункова номінальна потужність двигуна:

$$P_H = M_{дн} \cdot \frac{\pi n}{30} = 11,1 \times \frac{\pi \times 1000}{30} = 1057,8 \text{ Вт}$$

За [8] обираємо двигун типу 4А80В6У3 дані якого наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані асинхронного двигуна

Тип двигуна	4А80В6У3
Номінальна потужність P_H , кВт	1,1
Номінальна фазна напруга $U_{фн}$, В	220
Номінальний ККД η_H	0,74
Номінальний $\cos \varphi_H$	0,74
Момент інерції J , кг*м ²	0,0046
Число пар полюсів Z_p	3
Номінальне ковзання s_H	0,08
Критичне ковзання s_K	0,38
Кратність пускового моменту $M_{п*}$, в.о.	2,0
Кратність максимального моменту $M_{кр*}$, в.о.	2,2
Параметри схеми заміщення у відносних одиницях	
Активний опір статора R_s^* , в.о.	0,12
Зведений активний опір ротора R_r^* , в.о.	0,11
Індуктивний опір статора X_s^* , в.о.	0,11
Зведений індуктивний опір ротора X_r^* , в.о.	0,19
Індуктивний опір повітряного зазору X_μ^* , в.о.	1,6

Номінальна швидкість обертання двигуна n_H дорівнює, об/хв:

$$n_H = n_C(1 - s_H) = 100 \times (1 - 0,08) = 920 \text{ об/хв.}$$

Номінальна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \times n_H}{30} = \frac{3,1415 \times 920}{30} = 96,34 \text{ рад/с.}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата	ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
						25

Номінальний момент двигуна визначимо за формулою:

$$M_n = \frac{9,55 \cdot P_n}{n_C \cdot (1 - s_n)} = \frac{9,55 \cdot 1100}{1000 \cdot (1 - 0,08)} = 11,41 \text{ Нм}$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна; Вт; n_C – синхронна швидкість поля статора, об/хв; s_n – номінальне ковзання електродвигуна.

Номінальний фазний струм статора:

$$I_{\phi n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{\phi n} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{1100}{3 \cdot 220 \cdot 0,74 \cdot 0,74} = 3,04 \text{ А,}$$

де $U_{\phi n}$ – номінальна фазна напруга двигуна; В; η_n – номінальний ККД двигуна; $\cos \varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності двигуна.

Для переводу опорів з відносних одиниць в абсолютні скористаємося виразом:

$$Z = Z^* \cdot Z_B = Z^* \cdot \frac{U_{\phi n}}{I_{\phi n}}$$

де $Z_B = \frac{U_{\phi n}}{I_{\phi n}}$ – базовий опір; Ом; Z^* – опір у відносних одиницях; Z – шуканий опір, Ом.

Визначимо базовий опір:

$$Z_b = \frac{U_{\phi n}}{I_{\phi n}} = \frac{220}{3,04} = 72,36 \text{ Ом}$$

Активний опір статора:

$$R_1 = 0,12 \times 72,36 = 8,68 \text{ Ом}$$

Активний опір ротора:

$$R_2 = 0,11 \times 72,36 = 7,96 \text{ Ом}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		26

Індуктивний опір статора:

$$X_1 = 0,11 \times 72,36 = 7,96 \text{ Ом},$$

Індуктивний опір ротора:

$$X_2 = 0,19 \times 20,09 = 13,74 \text{ Ом},$$

Індуктивний опір кола намагнічування:

$$X_\mu = 1,6 \times 72,36 = 115,78 \text{ Ом},$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_K = X_1 + X_2 = 7,96 + 13,74 = 21,7 \text{ Ом}.$$

Частота живлячої мережі:

$$\omega_0 = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 314,159 \text{ с}^{-1}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{s\sigma} = X_s / \omega_0 = 7,96 / 314,159 = 0,025,$$

де $\omega_0 = 2\pi f$ – кутова частота живлячої мережі, рад/с; $f = 50 \text{ Гц}$ – номінальна частота живлячої мережі.

Індуктивність розсіювання обмотки ротора:

$$L_{r\sigma} = X'_r / \omega_0 = 13,74 / 314,159 = 0,043 \text{ Гн}.$$

Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора и ротора:

$$L_m = X_\mu / \omega_0 = 115,78 / 314,159 = 0,368 \text{ Гн}.$$

Повна індуктивність обмотки статора:

$$L_{1s} = L_{s\sigma} + L_m = 0,025 + 0,368 = 0,393 \text{ Гн}.$$

Повна індуктивність обмотки ротора:

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m = 0,043 + 0,368 = 0,411 \text{ Гн}.$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		27

Розраховані параметри двигуна та абсолютні значення параметрів схеми заміщення зведені до табл. 2.2

Таблиця 2.2 – Параметри двигуна 4А80В6У3

Активний опір статора R_s , Ом	8,68
Зведений активний опір ротора R_r , Ом	7,96
Індуктивність обмотки статора L_s , Гн	0,393
Індуктивність обмотки ротора L_r , Гн	0,411
Індуктивність намагнічування L_m , Гн	0,368
Номінальний момент M_n , Нм	11,4
Номінальний фазний струм I_{fn} , А	3,04
Номінальна частота обертання ω_n , рад/с	96,34

Як показує аналіз літератури [3, 10, 11, 13] регулювання моменту та швидкості асинхронного двигуна забезпечують системи векторного керування координатами електропривода, побудовані за принципами підлеглого керування. Побудова векторної системи керування можлива, якщо асинхронний двигун представити у обертовій системі координат, що пов'язана з потокозчепленням ротора.

2.3 Модель асинхронного короткозамкненого двигуна в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора

Рівняння асинхронної машини, записані у термінах узагальненого вектора і представлені в координатній системі, що обертається зі ω_c , мають вид [9]:

$$\bar{U}_s = \bar{I}_s R_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_c \bar{\Psi}_s,$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		28

$$\bar{U}_r = \bar{I}_r R_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega)\bar{\Psi}_r.$$

$$\bar{\Psi}_s = \bar{I}_s L_s + \bar{I}_r L_m,$$

$$\bar{\Psi}_r = \bar{I}_s L_m + \bar{I}_r L_r,$$

де $\bar{U}_s, \bar{I}_s, \bar{\Psi}_s$ – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення статора; $\bar{U}_r, \bar{I}_r, \bar{\Psi}_r$ – 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; $j = \sqrt{-1}$.

Для виводу рівнянь, за якими будується структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, використаємо систему координат u, v , яка обертається з синхронною швидкістю ω_c та орієнтована за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$. Вісь u є дійсною віссю, а вісь v – уявною.

З двох останніх рівнянь системи виразимо вектори потокозчеплення статора $\bar{\Psi}_s$ та струму ротора \bar{I}_r :

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

$$\bar{I}_r = K_r \left(\frac{\bar{\Psi}_r}{L_m} - \bar{I}_s \right),$$

де $K_r = \frac{L_m}{L_r}$ – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора; $L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$ – перехідна індуктивність статора [14].

Виконуючи ряд подальших перетворень, представлених в [4] отримаємо дві системи рівнянь, що описують асинхронний двигун в координатній системі u, v :

Підп. і дата	
Инв. № дубл.	
Зам. інв. №	
Підп. і дата	
Инв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		29

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{ru} &= \frac{U_{ru}T_r + I_{su}L_m}{1 + pT_r} \\ \omega_c &= \omega + \frac{U_{rv} + K_r R_r I_{sv}}{\Psi_{ru}} \end{aligned} \right\},$$

$$\left. \begin{aligned} U_{su} - K_r U_{ru} &= I_{su} R'(1 + pT'_s) - \omega_c L'_s I_{sv} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{ru} \\ U_{sv} - K_r U_{rv} &= I_{sv} R'(1 + pT'_s) + \omega_c L'_s I_{su} + \omega K_r \Psi_{ru} \end{aligned} \right\},$$

де $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – стала часу ротора; $T'_s = \frac{L'_s}{R'}$ – перехідна стала часу статора [1],

$p = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа, де $R' = R_s + K_r^2 R_r$ – перехідний опір статора [4].

Рівняння електромагнітного моменту двигуна:

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

де Z_p – число 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, зведений до валу двигуна); M_c – статичний момент на валу двигуна, ω_m – механічна швидкість обертання ротора.

На рис. 2.2 представлена структурна схема АД з короткозамкнутим ротором, побудована за отриманими виразами системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		30

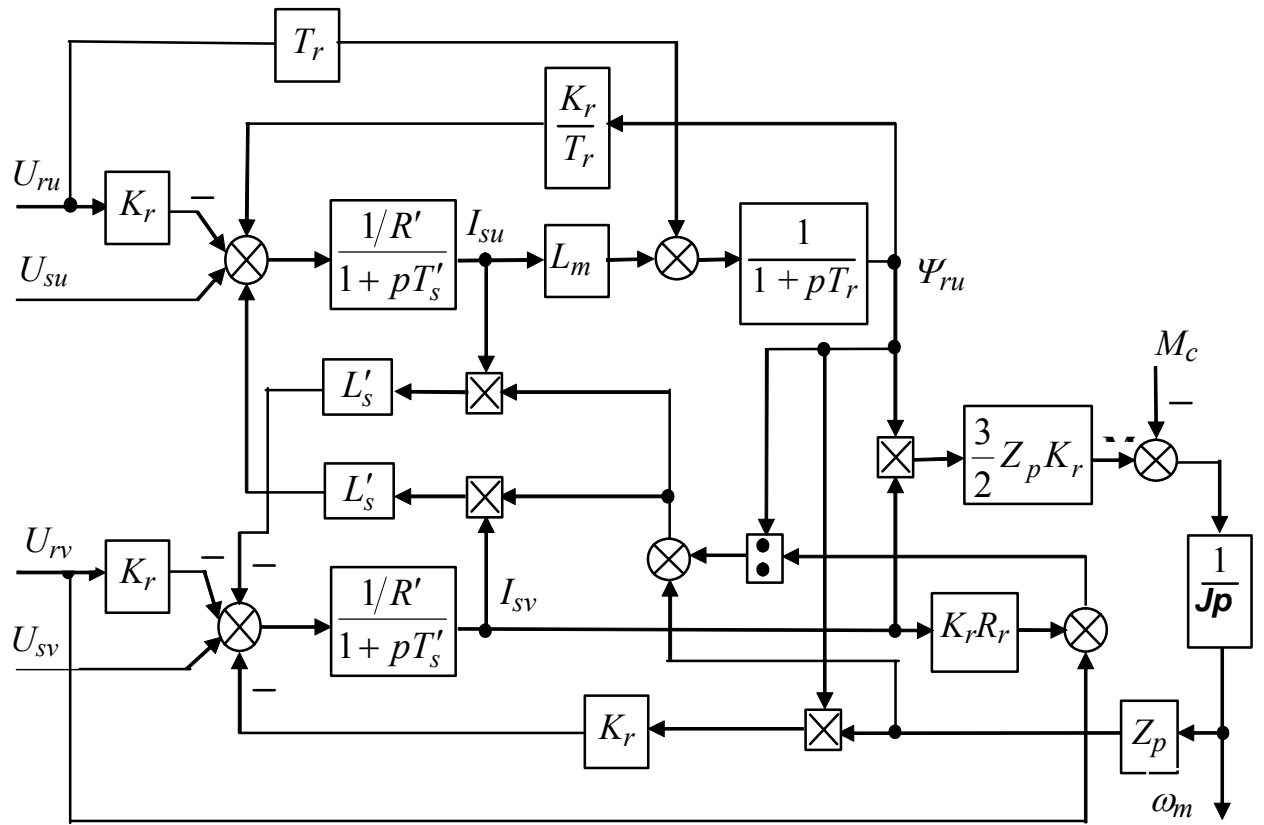


Рисунок 2.2 – Структурна схема АД в системі координат, зв'язаній з вектором потокозчеплення ротора Ψ_r

2.4 Синтез системи регулювання швидкості асинхронного двигуна

Всі сучасні системи регулювання швидкості електродвигунів будуються за принципами підлеглого регулювання координат електропривода і характеризуються каскадним розташуванням регуляторів. Кількість регуляторів визначається кількістю регульованих координат (швидкість, струм, момент, положення і т.і.) [5, 10, 11].

На вході регулятора кожного з контурів порівнюються сигнали, пропорційні заданому та дійсному значенню координати контуру, а вихідна напруга регулятора є сигналом завдання для наступного контуру.

Однією з переваг системи є можливість доволі просто обмежувати регульовану координату шляхом обмеження сигналу завдання з виходу

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Зам. Інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

попереднього регулятора. Серед недоліків – зниження швидкодії системі з кожним новим контуром вдвічі.

Синтез регуляторів системи здійснюється з середини, від внутрішнього регулятора до зовнішнього. Серед критеріїв оптимізації регуляторів використовують в основному модульний та симетричний критерії оптимізації. Вибір критерію залежить від типу передавальних функцій, що входять до складу контуру, та бажаної перехідної функції контуру.

Структурна схема системи автоматичного регулювання (САР) швидкості АД представлена на рис. 2.3.

САР має два канали регулювання. Канал регулювання потокозчеплення ротора складається з контуру потокозчеплення і підлеглого йому контуру потокоутворюючої складової струму статора (складова I_{su} за віссю u). Канал регулювання швидкості складається з контуру швидкості і підлеглого йому контуру моментоутворюючої складової струму статора (складова I_{sv} за віссю v).

До складу контурів струму зі сторони САР входять регулятор струму та перетворювач частоти ПЧ, представлений аперіодичною ланкою з малою некомпенсованою сталою часу T_{μ} . Зовнішні контури складаються з регуляторів швидкості та потокозчеплення відповідно. Інформація о регульованих координатах поступає з датчиків струму $ДТ$, швидкості $ДС$ та потокозчеплення $Д\psi$.

На вході контуру потоку може використовуватись функціональний блок $\PhiБ$, реалізуючий функціональну залежність потокозчеплення від швидкості для випадку двозонного регулювання швидкості.

Підп. і дата	
Инв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Инв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		32

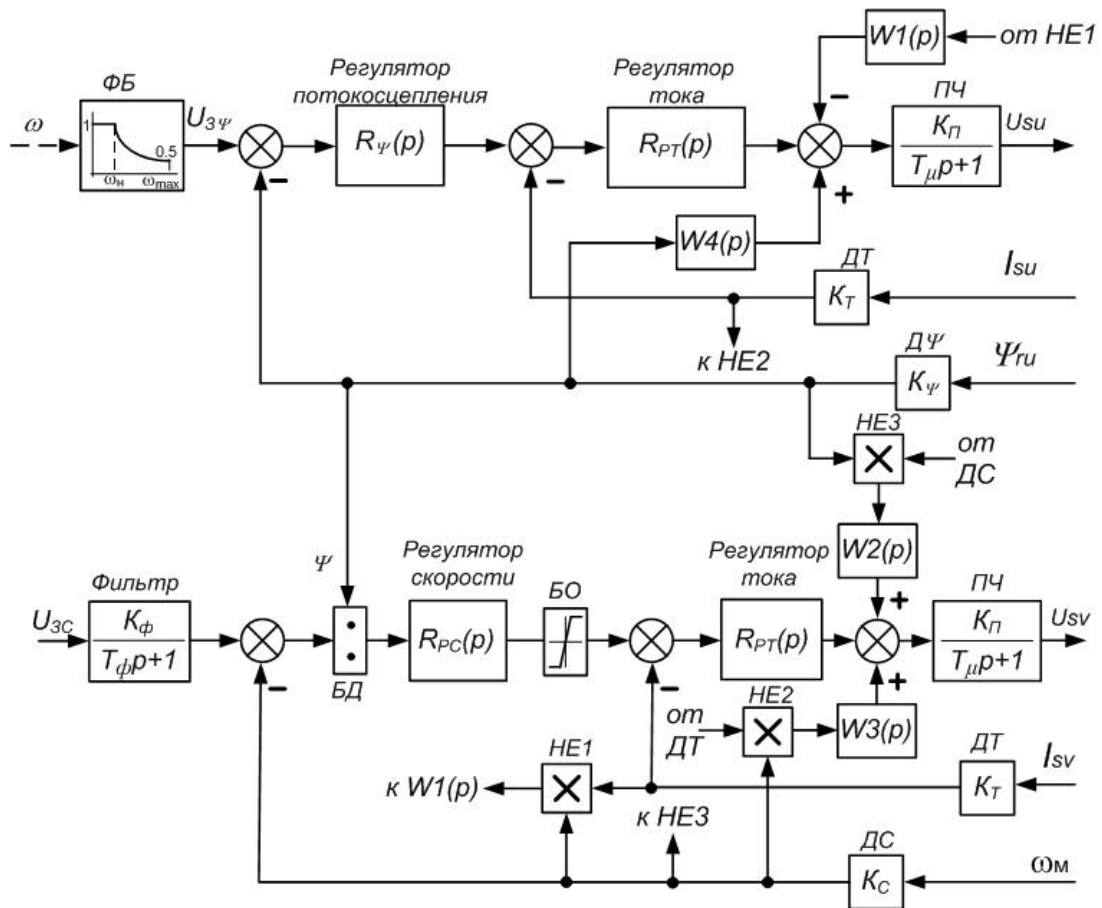


Рисунок 2.3 - Система регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в системі координат $u-v$, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$.

Для компенсації нелінійностей та перехресних зв'язків, присутніх в об'єкті керування, в двигуні, використовуються ланки $W1, W2, W3, W4$ вихідні сигнали яких подаються на вхід ПЧ (за аналогією з компенсацією впливу зворотного зв'язку за ЕРС двигуна в системах постійного струму).

Для синтезу регуляторів визначимо відсутні параметри.

Коефіцієнт електромагнітного зв'язку:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0,368}{0,411} = 0,895$$

Перехідна індуктивність статора:

Підп. і дата
Инв. № дубл.
Зам. Инв. №
Підп. і дата
Инв. № подл.

$$L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} = 0,393 - \frac{0,368^2}{0,411} = 0,0635 \text{ Гн}$$

Перехідний опір статора:

$$R' = R_1 + K_r^2 R_2' = 8,68 + 0,895^2 \times 7,96 = 15,06 \text{ Ом}$$

Стала часу ротора:

$$T_r = \frac{L_r}{R_2'} = \frac{0,411}{7,96} = 0,051 \text{ с}$$

Перехідна стала часу статора:

$$T'_s = \frac{L'_s}{R'} = \frac{0,0635}{15,06} = 0,0042 \text{ с}$$

Коефіцієнт датчика струму розраховуємо з урахуванням подвійного перевантаження за струмом та відносно амплітудного значення фазного струму:

$$K_T = \frac{U_{y \max}}{2\sqrt{2}I_{\phi n}} = \frac{10}{2\sqrt{2} \times 3,04} = 1,163 \text{ В/А}$$

де $U_{y \max}$ – максимальна робоча напруга системи керування.

Коефіцієнт датчика швидкості:

$$K_C = \frac{U_{y \max}}{\omega_n} = \frac{10}{96,34} = 0,103 \text{ Вс/рад}$$

Номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\Psi_n = \frac{M_n}{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\phi n} \cdot Z_p \cdot K_r} = \frac{11,4}{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,04 \cdot 3 \cdot 0,895} = 0,658 \text{ Вб}$$

Коефіцієнт датчика потокозчеплення:

$$K_\Psi = \frac{U_{y \max}}{\Psi_n} = \frac{10}{0,712} = 15,19 \text{ В/Вб}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		34

Коефіцієнт підсилення перетворювача:

$$K_{\Pi} = \frac{\sqrt{2}U_{\Phi H}}{U_{y \max}} = \frac{\sqrt{2} \times 220}{10} = 31$$

2.4.1 Синтез регулятора струму

Замкнений контур регулювання моментоутворюючої складової струму представлений на рис. 2.4

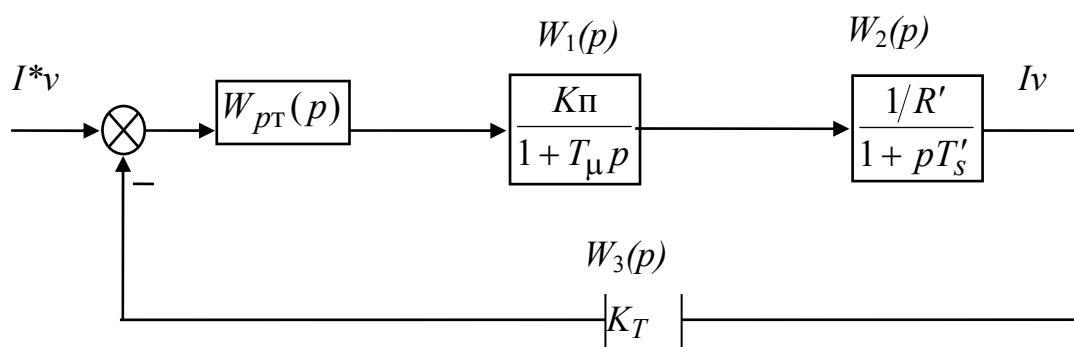


Рисунок 2.4 – Структурна схема контуру регулювання моментоутворюючої складової струму

У складі контуру дві аперіодичні ланки. При такій структурі контур оптимізується за модульним критерієм оптимізації. Передаточна функція модульного оптимуму має вид (бажана):

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

Мала стала часу контуру струму включає в себе суму інерційностей в системі, виникаючих при відпрацюванні завдання. До таких затримок відносять сталі часу фільтрів вхідних сигналів струму та напруги, період дискретизації цифрової системи керування, «мертвий час» в роботі силових ключів і т.і. При синтезі регулятора струму T_{μ} прийнято рівною $T_{\mu} = 0,0005$ с.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-------	----------	-------	------

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

35

Передаточну функцію регулятора струму визначимо з виразу:

$$W_{ж}(p) = W_{рТ}(p)W_1(p)W_2(p)W_3(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)},$$

Звідки

$$W_{pm}(p) = \frac{W_{жс}(p)}{W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \frac{(T_{\mu}p + 1)}{K_{\Pi}} \frac{R'(1 + pT'_s)}{K_T},$$

$$W_{pm}(p) = \frac{W_{жс}(p)}{W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{R'(1 + pT'_s)}{2T_{\mu}pK_{\Pi}K_T}$$

В результаті зроблених перетворень отримано ПІ-регулятор струму з такими коефіцієнтами:

$$W_{pm}(p) = \frac{R'T'_s}{2T_{\mu}K_{\Pi}K_T} + \frac{R'}{2T_{\mu}pK_{\Pi}K_T} = \frac{15,06 \cdot 0,0042}{2 \cdot 0,0005 \cdot 31 \cdot 1,163} + \frac{15,06}{2 \cdot 0,0005 \cdot 31 \cdot 1,16}$$

$$W_{pm}(p) = k_{pmn} + k_{pmi} \frac{1}{p} = 1,76 + 418,8 \frac{1}{p}$$

Замкнений контур регулювання потокоутворюючої складової струму аналогічний контуру моментоутворюючої складової струму і має такі ж самі характеристики.

2.4.2 Синтез регулятора потокозчеплення ротора

При синтезі передаточної функції регулятора потокозчеплення передаточну функцію замкненого контуру струму подамо у вигляді:

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

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		36

де K_T – коефіцієнт передачі датчика струму, T_μ – мала некомпенсована стала часу.

Синтез регулятора потокозчеплення здійснюємо аналогічно синтезу регулятора струму. Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення ротора має вид (рис. 2.5):

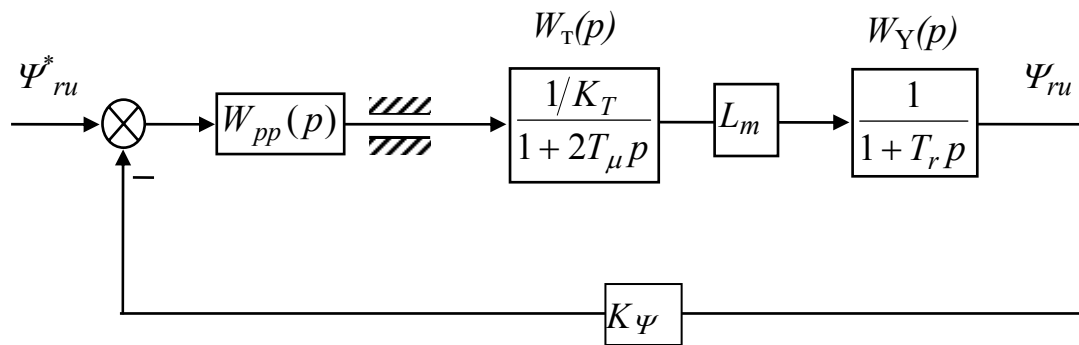


Рисунок 2.5 – Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення ротора

Для отримання передаточної функції регулятора потокозчеплення скористаємося модульним критерієм оптимізації, який для контуру потокозчеплення має вид [5, 11]:

$$W_{mod}(p) = \frac{1}{4T_\mu p(2T_\mu p + 1)}$$

Отримана передаточна функція ПІ-регулятора потокозчеплення відповідає виразу:

$$W_{pp}(p) = \frac{K_T(T_r p + 1)}{4T_\mu p L_m K_\psi}$$

Визначимо коефіцієнти регулятора:

$$W_{pp}(p) = \frac{K_T(T_r p + 1)}{4T_\mu p L_m K_\psi p} = \frac{K_T T_r}{4T_\mu L_m K_\psi} + \frac{K_T}{4T_\mu L_m K_\psi} \frac{1}{p}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

$$W_{pp}(p) = \frac{1,163 \cdot 0,051}{4 \cdot 0,0005 \cdot 15,19 \cdot 0,368} + \frac{1,163}{4 \cdot 0,0005 \cdot 15,19 \cdot 0,368} \frac{1}{p} = 5,3 + 104,02 \frac{1}{p}$$

2.4.3. Синтез регулятора швидкості

При синтезі передаточної функції регулятора швидкості передаточна функція замкнутого контуру струму має вид:

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

Контур регулювання швидкості зображено на рис. 2.6. Контур складається з аперіодичної та інтегральної ланки. Для отримання передаточної функції ПІ-регулятора швидкості (астатична система) скористуємося симетричним критерієм оптимізації, передаточна функція якого має вид [5, 11]:

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

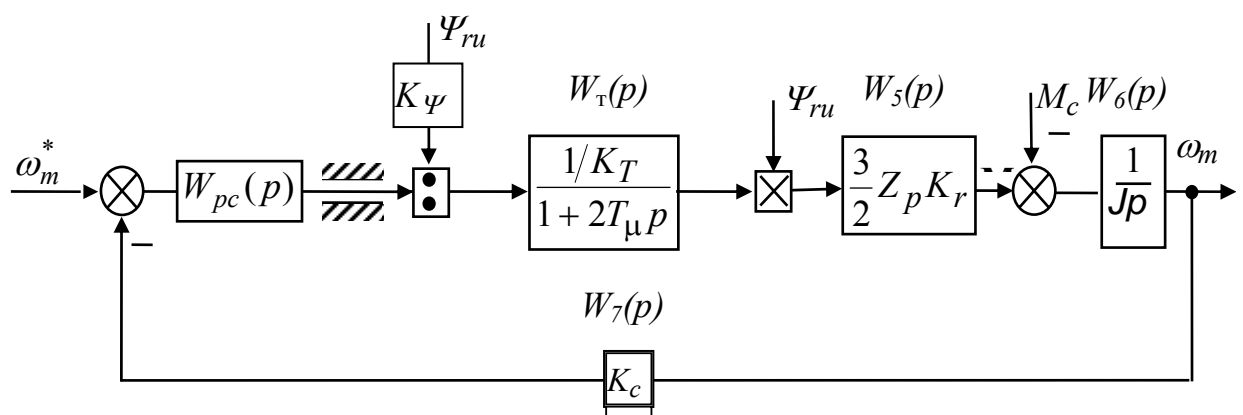


Рисунок 2.6 – Структурна схема контуру регулювання швидкості

Прирівняв добуток всіх ланок розімкненого контуру швидкості до передаточної функції симетричного оптимуму, знайдемо передаточну функцію ПІ-регулятора швидкості:

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

$$W_{ж}(p) = W_{pc}(p)W_T(p)W_5(p)W_6(p)W_7(p) = \frac{(8T_{\mu}p + 1)}{32T_{\mu}^2 p^2 (2T_{\mu}p + 1)},$$

Звідки

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

$$W_{pc}(p) = \frac{W_{ж}(p)}{W_m(p)W_5(p)W_6(p)W_7(p)} = \frac{J_{N1} K_T (8T_{\mu}p + 1) K_{\Psi}}{48T_{\mu}^2 p Z_p K_r K_c},$$

$$W_{pc}(p) = \frac{J_{N1} K_T 8T_{\mu} K_{\Psi}}{48T_{\mu}^2 Z_p K_r K_c} + \frac{J_{N1} K_T K_{\Psi}}{48T_{\mu}^2 Z_p K_r K_c} \frac{1}{p}.$$

При розрахунку коефіцієнтів регулятора швидкості необхідно пам'ятати, що при роботі установки відцентрового лиття моменти інерції можуть змінюватись. Тому для збереження стійкості системи настрійку регулятора будемо виконувати при меншому значенні моменту інерції (для пустої виливниці). Це дозволить контурному коефіцієнту не збільшуватись, але система збереже стійкість, хоча дещо втратить в швидкодії при великих моментах інерції (робота залитої виливниці).

$$W_{pc}(p) = \frac{1,06 \cdot 1,163 \cdot 8 \cdot 0,0005 \cdot 15,19}{48 \cdot 0,0005^2 \cdot 3 \cdot 0,103 \cdot 0,895} + \frac{1,06 \cdot 1,163 \cdot 15,19}{48 \cdot 0,0005^2 \cdot 3 \cdot 0,103 \cdot 0,895} \frac{1}{p}$$

$$W_{pc}(p) = 22570,5 + 5642617,26 \frac{1}{p}.$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		39

2.5 Вибір комплектного перетворювача частоти і додаткового устаткування

Для живлення двигуна вибираємо перетворювач частоти серії АЛТИВАР 930 компанії Schneider Electric

Даний перетворювач має ряд переваг, а саме:

- просте та зручне меню для налаштувань, як за допомогою графічного терміналу, так і за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення;
- широкий діапазон потужностей;
- набір спеціалізованих прикладних функцій;
- наявність зручних інструкцій з експлуатації та рекомендацій з використання.

По даними двигуна(за номінальним струмом та напругою) з [12] вибираємо перетворювач частоти з наступними характеристиками (табл. 2.4), а також додаткове обладнання:

Таблиця 2.4

Номінальні дані перетворювача частоти сери АЛТИВАР 930

Тип ПЧ	ATV930HU22N4
Номінальна напруга $U_{ПЧ}$, В	380-480
Максимальний вихідний струм в усталеному режимі (при 380 В), А	4
Максимальний вихідний струм протягом 60 с, А	6
Вхідний мережений струм, А	3,1
Повна потужність (при 380 В), кВА	2,4
Перевантажувальна здатність за моментом 60 с (2 с), %	150 (180)
Вимикач автоматичний	GV2L10
Контактор	LC1D09M7
Гальмівний резистор, 100 Ом, P = 1,7 кВт	VW3A7750
Запобіжник швидкодіючий (3 шт.), ЕТІ	UQ CH 10×38, 8А
Тримач запобіжника триполюсний, ЕТІ	EFD 10

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

40

Перелічимо основні функції ПЧ АЛТИВАР 930 для використання в електроприводі установки відцентрового лиття:

- керування гальмом;
- задатчик (тип кривої розгону та гальмування);
- різні способи зупинки;
- оптимізація регулятора частоти;
- попередньо задані швидкості;
- попереднє намагнічування;
- векторне керування у замкненій / розімкненій системі та інш.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

У 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.

Для електроприводу виливниці найбільш важким режимом є розгін. Так само відмінною особливістю є робота завжди з реактивним моментом опору і спільно з гальмівним пристроєм.

Модель САР швидкості двигуна виливниці представлена на рис. 3.1. Вона складається з підсистем **Wz, Mc, AD, Control System**.

Підсистема **AD** реалізує модель асинхронного двигуна в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора і в розгорнутому вигляді представлена на рис. 3.2.

Підсистема **Control System** 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. 3.3

Розгорнуті схеми блоків регуляторів представлені на рис. 3.4-3.6. Регулятор швидкості - на рис. 3.4, струму - на рис. 3.5 і потокозчеплення - на рис. 3.6 відповідно.

У підсистемі **Wz** реалізується завдання на швидкість електроприводу виливниці, а в підсистемі **Mc** момент статичного навантаження. Сигнали формуються в функції часу і відповідають розрахованій раніше діаграмі.

При моделюванні досліджувалися режими роботи, відповідно до діаграми робочого циклу – розгін порожньої виливниці, заливка, розгін заповненої виливниці, усталена робота, гальмування.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		42

Інв. № подл.	Підп. і дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

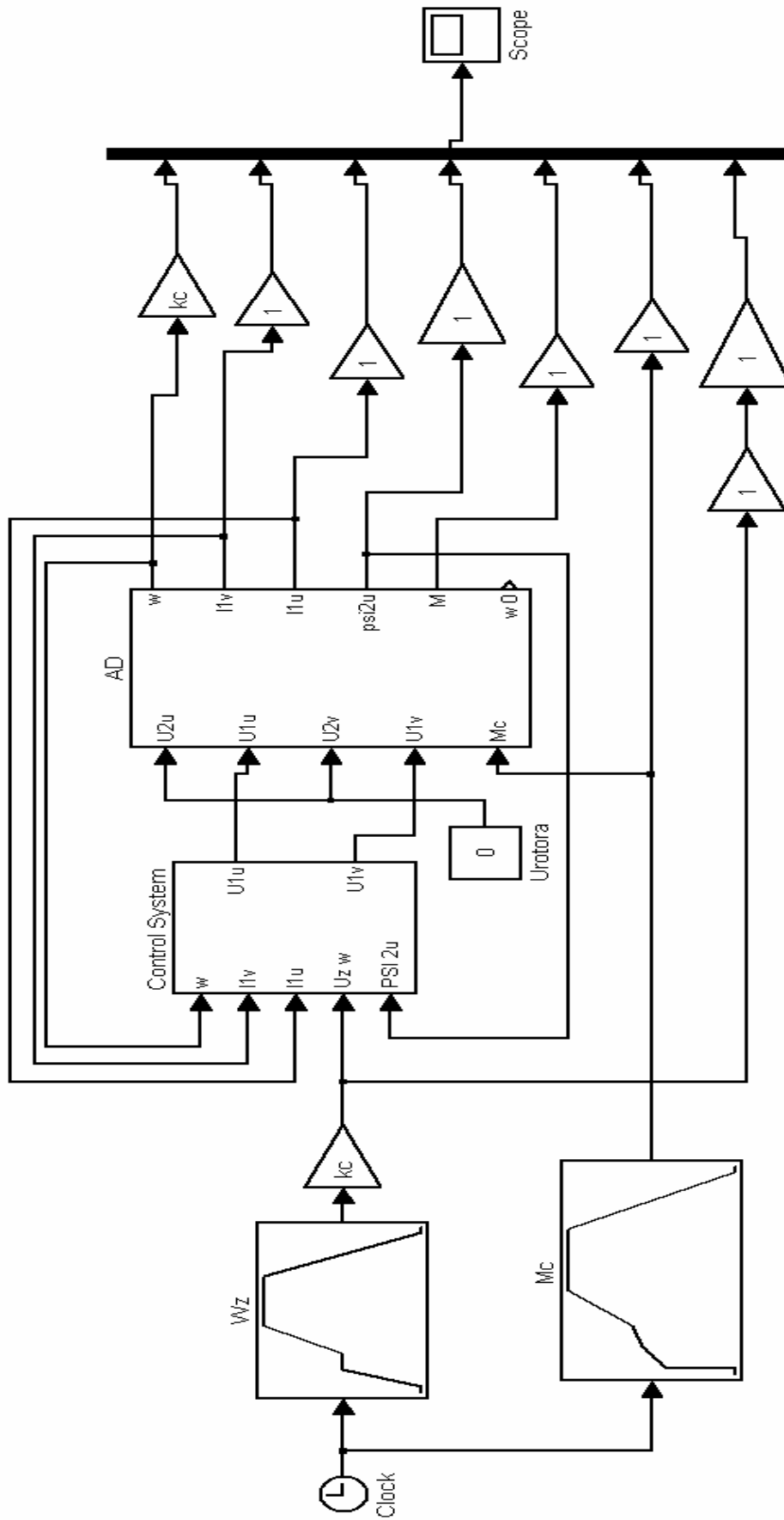


Рисунок 3.1 – Схема моделі САР швидкості двигуна виливниці в пакеті МАТЛАБ

Інв. № подл.	Підп. і дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

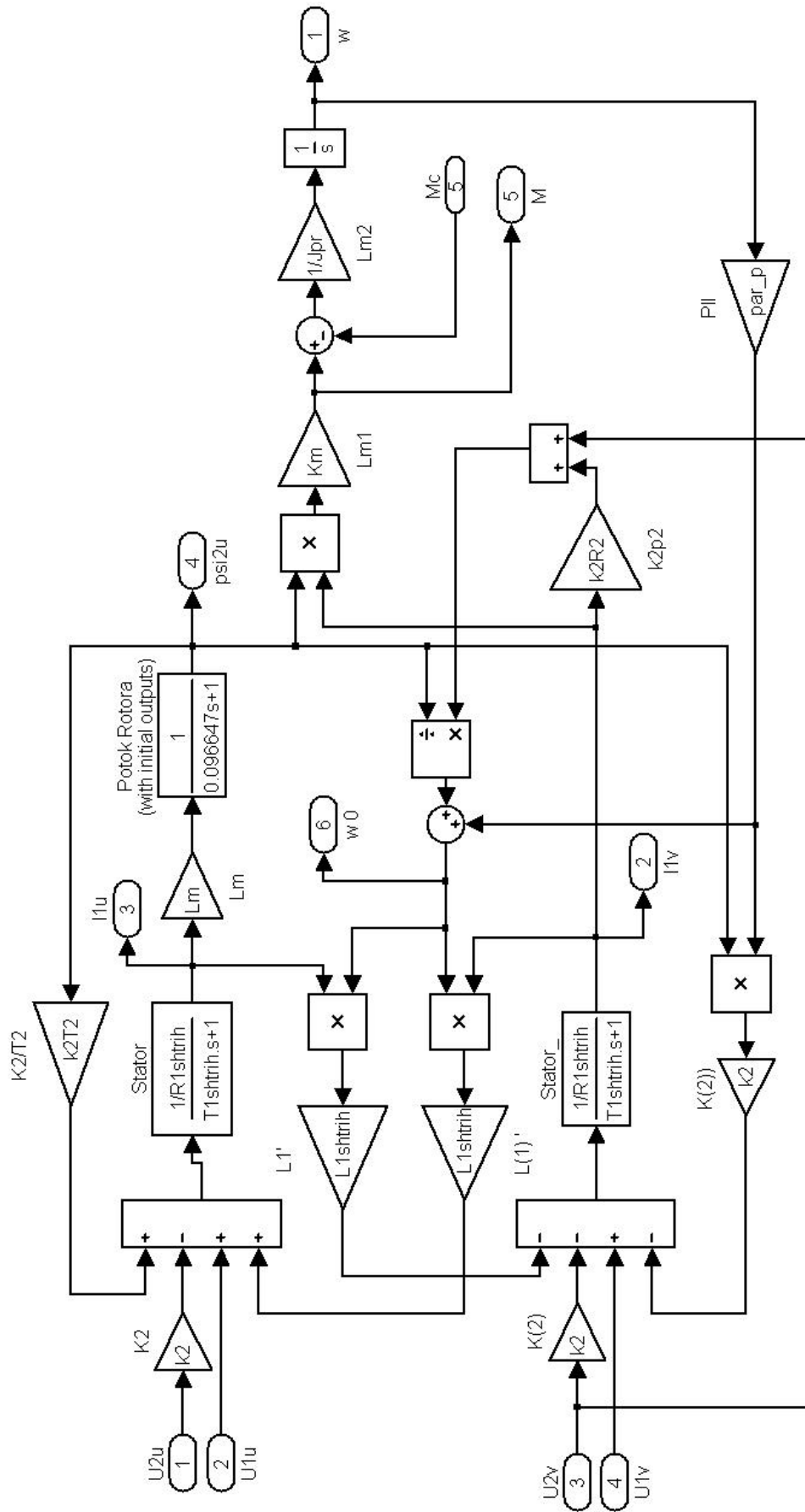


Рисунок 3.2 – Схема моделі асинхронного двигуна в пакеті МАТЛАБ. Підсистема АД.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

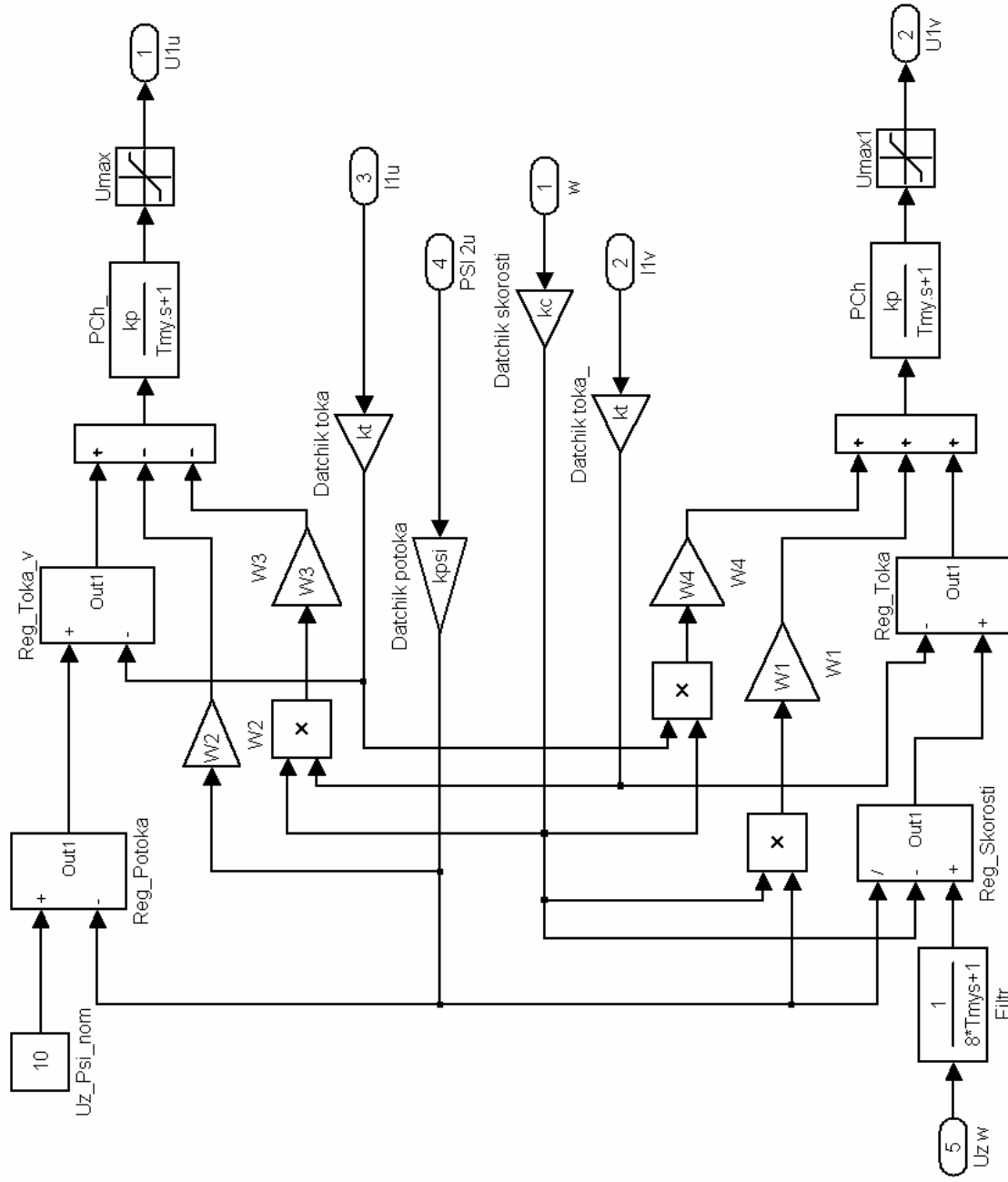


Рисунок 3.3 – Схема моделі САР швидкості в пакеті МАТЛАБ. Підсистема Control System.

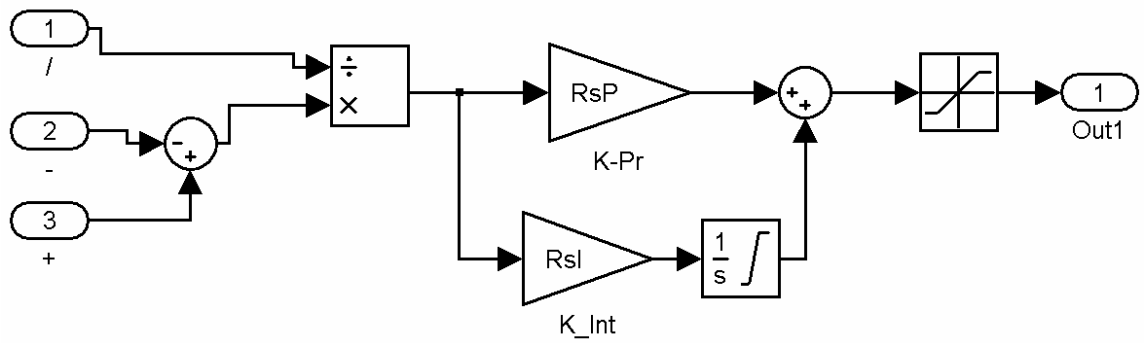


Рисунок 3.4 – Модель регулятора швидкості

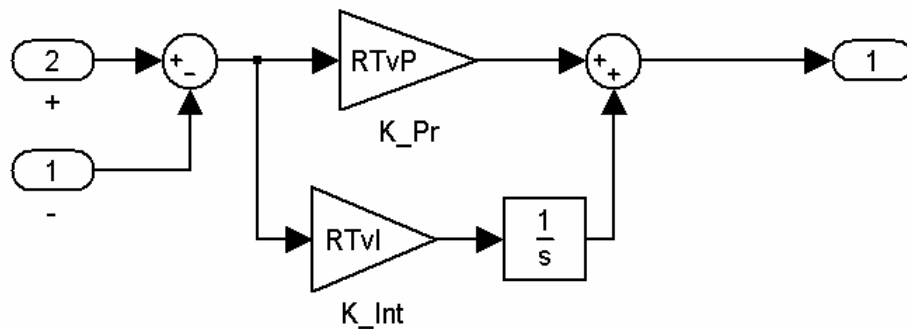


Рисунок 3.5 – Модель регулятора струму

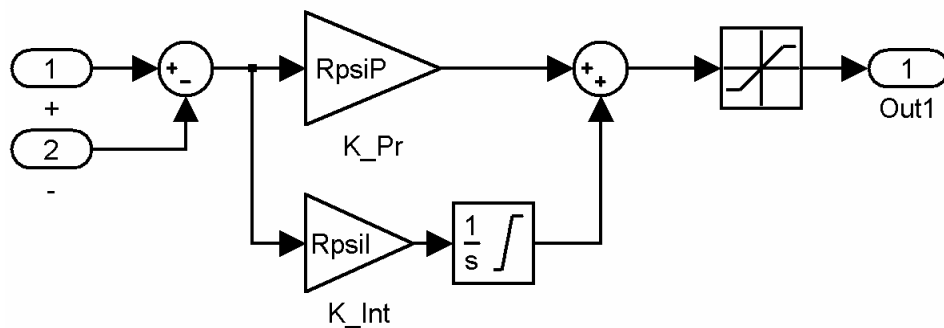


Рисунок 3.6 – Модель регулятора потокозчеплення

Результати моделювання роботи електроприводу виливниці представлені на рис. 3.7. та рис. 3.8. На графіках представлені сигнали швидкості двигуна ω , потокоутворюючого I_u і моментуутворюючого I_v струмів, моменту двигуна M_{dv} , статичного моменту навантаження M_c і потокозчеплення ротора Ψ .

На початковому етапі роботи здійснюється намагнічування двигуна. САР відпрацьовує завдання на номінальне потокозчеплення ротора. Після встановлення

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

потокозчеплення подається завдання на рух вперед (момент часу 1 с.). Подача статичного моменту здійснюється спільно з подачею команди на рух. Таким чином, моделюється процес відпускання гальмівного пристрою і стрибкоподібне поява статичного моменту на валу двигуна. Система розганяється під дією задатчика інтенсивності. Розгін від задатчика інтенсивності дозволяє знизити динамічні навантаження в приводі, обмежити прискорення на заданому рівні. Після досягнення швидкості заливки виливниця рухається з постійною швидкістю. Починається заливка (період часу від 4 до 7 с.). Після закінчення заливки починається розгін до робочої швидкості (період часу від 7 до 12 с.). Далі відбувається робота з усталеною швидкістю. В момент часу 21 с. починається гальмування.

Результати моделювання цілком відповідають розрахунковим даним. Момент опору завжди реактивний (обумовлений силами тертя) і має той же знак що і швидкість. Динамічний момент двигуна в максимальному значенні дещо змінюється. Це відповідає зміні моменту статичного навантаження при зміні маси виливниці при заливці та збільшені моменту сил опору тертя о повітря.

Якість перехідних процесів відповідає прийнятим раніше критеріям оптимізації.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		47

№ в. № подл.	Підп. і дата	Зам. № в. №	№ в. № дубл.	Підп. і дата
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

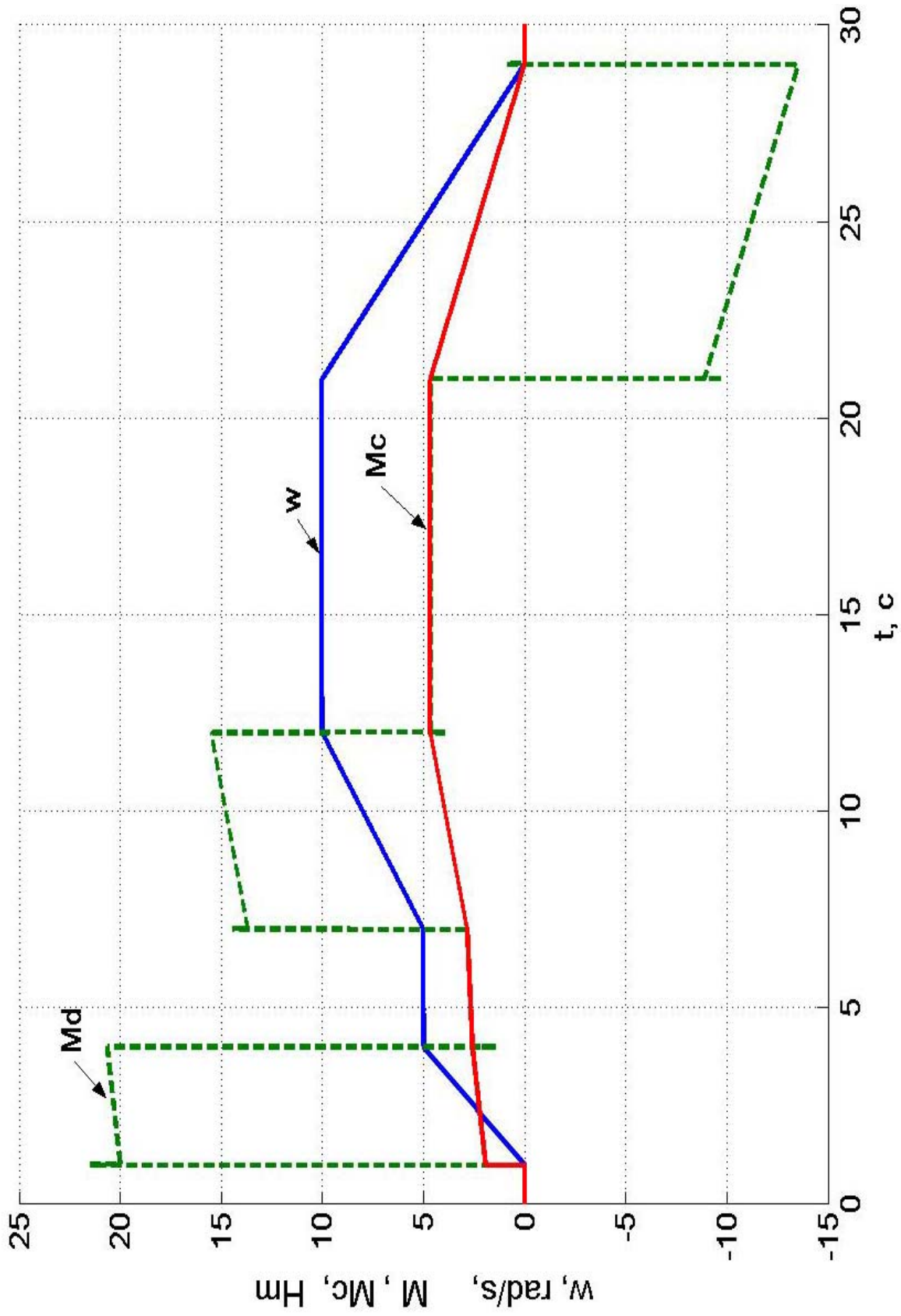


Рисунок 3.7 – Графіки перехідних процесів

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Інв. № подл.	Підп. і дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

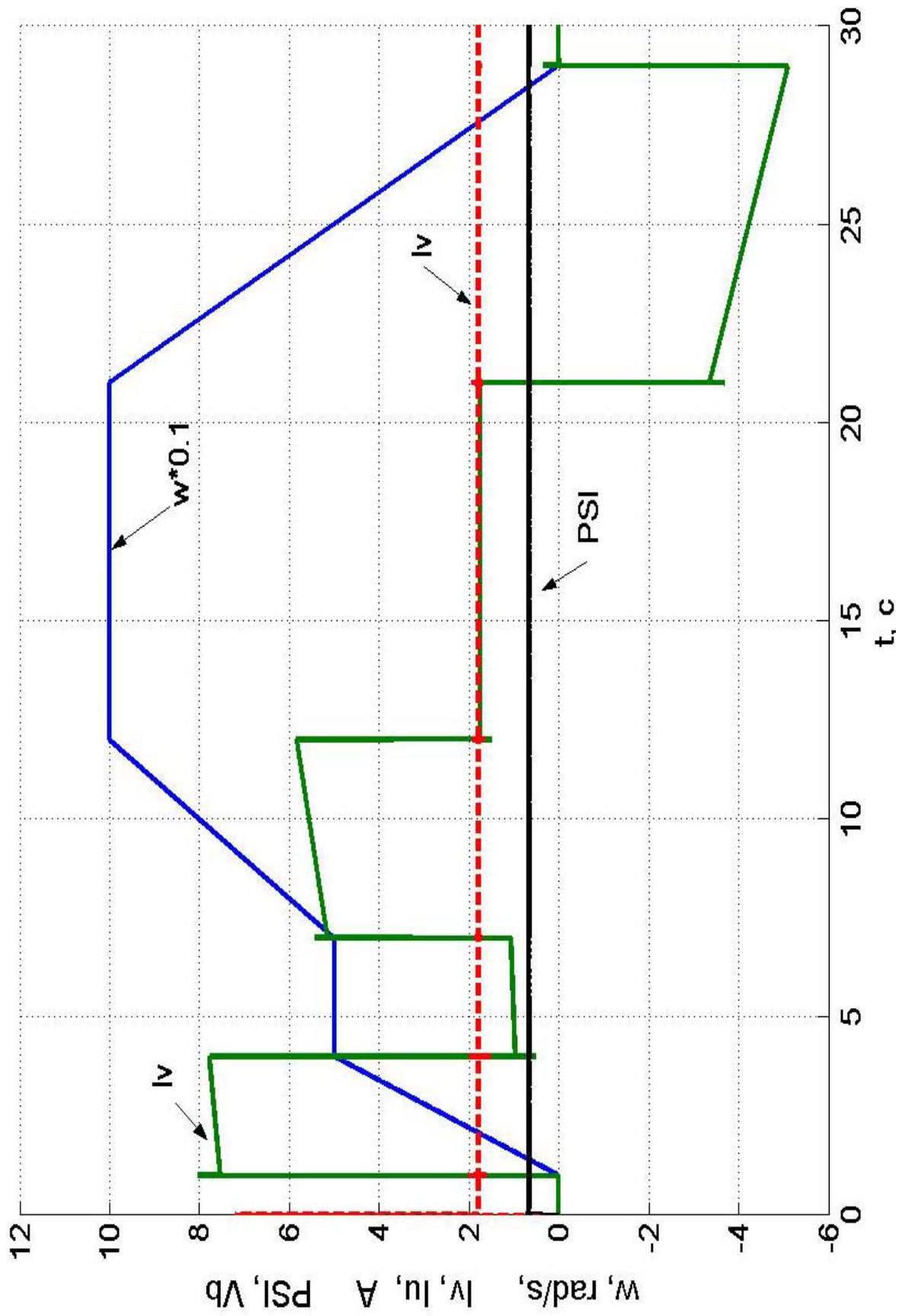


Рисунок 3.8 – Графіки перехідних процесів

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз шкідливих виробничих факторів

До шкідливих та небезпечних виробничих факторів у цехах з установками відцентрового лиття можна віднести наступні:

- наявність рідких, розплавлених металів, нагрітих до високої температури (1500-1600⁰C), потрапляння на тіло та легко займисті матеріали яких може спричиняти серйозні опіки та пожежі;

- наявність металевих частин, що обертаються з великою швидкістю. При торканні або випадковому відриві частин устаткування можливі механічні травми (переломи), руйнування обладнання;

- наявність високої концентрації пилу у місцях розташування машин відцентрового лиття, особливо під час здійснення операцій заливки рідкого металу у машину;

- наявність устаткування, що рухається та переміщує вантажі на висоті (мостові крани, кран-балки тощо);

- наявність в системі охолодження машин відцентрового лиття рідини під високим тиском;

- наявність електричної напруги та металевих конструкцій, що можуть опинитися під дією електричного струму.

4.2 Загальні вимоги техніки безпеки при роботі на машинах відцентрового лиття

Роботу на машинах відцентрового лиття необхідно здійснювати при дотриманні всіх необхідних правил безпеки.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		50

Машину повинні обслуговувати підготовлені та навчені співробітники у необхідній кількості: машиніст, формувальники, заливальники. Кожен чітко виконує свої дії в чітко зазначеній послідовності.

Обслуговуючий персонал повинен проходити періодичну перевірку знань з техніки безпеки.

Машиніст та обслуговуючий персонал повинні дотримуватись Правил внутрішнього трудового розпорядку і не допускати вживання алкогольних, наркотичних та токсичних речовин.

Обслуговуючий персонал повинен відповідати за наступне:

- зберігання робочої машини та допоміжного обладнання у робочому стані;
- своєчасно доповідати відповідальному про поломки та несправності обладнання;
- зберігати та забезпечувати чистоту на робочому місці;
- здійснювати постійний контроль за правильністю встановлення та кріплення форм для заливки металу;
- дотримуватись технології лиття.

Перед початком роботи машиніст повинен здійснити зовнішній огляд установки та зробити випробування на холостому ході. Про помічені зауваження негайно докласти відповідальному і припинити роботу до повного усунення всіх зауважень.

Під час роботи на ділянці відцентрового лиття не повинні знаходитись сторонні особи.

Ділянка відцентрового лиття повинна мати достатнє освітлення.

Машина відцентрового лиття повинна мати надійно огорожу та відповідні блокування в схемі керування обладнанням при порушенні цілісності огорожі.

При роботі машини забороняється порушувати огорожу, притулятися до частин, що обертаються.

Під час роботи машини машиніст повинен весь час знаходитись за пультом керування, вести спостереження і чітко реагувати на виникаючі ситуації.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		51

Якщо машиніст помітив ненормальну роботу устаткування під час роботи необхідно негайно зупинити машину. Тому кнопки СТОП повинні знаходитись у легко доступних місцях.

Обслуговуючий персонал завжди повинен працювати в спеціальному робочому одязі. Довжина одягу повинна бути достатньою, щоб закривати відкриті ділянки тіла. Забороняється працювати в одязі з коротким рукавом.

При роботі обов'язково необхідно користуватись захисними рукавицями, окулярами, масками на обличчя, касками.

Взуття повинно бути зручним та мати у передній частині металеві вставки для захисту кінцівок ніг від падіння важких предметів.

Одяг повинен бути з матеріалу достатньої щільності тканини і слабо займистим, наприклад брезент.

Робітники повинні мати і користуватись індивідуальними засобами захисту органів дихання від потрапляння пилу – респіраторами, захисними пов'язками.

4.3 Розробка заходів з електробезпеки

До обслуговування електроустаткування напругою до 1000В допускаються спеціально навчений технічний персонал, що має допуск до обслуговування електроустановок напругою до 1000В. Група допуску електромонтерів повинна бути не нижче III. Персонал повинен знати та виконувати діючі правила ПТЕ и ПТБ, а також будову і принципи роботи електрообладнання.

Обслуговуючий персонал повинен бути забезпечений необхідним спеціалізованим інструментом для роботи в діючих електроустановках (діелектричні рукавички, килимки або калоші та інш.). Інструмент повинен пройти чергову перевірку на цілісність ізоляції і мати відповідні підтверджуючі документи.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		52

Виконання електрообладнання повинно відповідати (електродвигунів, апаратів, шаф і т. п.) умовам навколишньої середовища.

Рекомендована напруга електродвигунів змінного та постійного струму, перетворювальних агрегатів (статичних або тих що обертаються) повинна бути не вище 1 кВ.

Електрообладнання повинно розміщатися у спеціальних шафах, в окремому місці і мати обмежений доступ.

Всі металеві частини обладнання, які можуть опинитися під дією електричного струму повинні бути заземлені або занулені. Виконання захисних з'єднань повинно бути надійним, доступним для швидкої перевірки.

4.4 Пожежна безпека

Обслуговуючий персонал повинен пройти і мати підготовку з Правил пожежної безпеки. Знати і розуміти можливі шляхи виникнення пожеж на робочому місці. Вміти користуватись засобами пожежегасіння. Бути ознайомленим з планами ліквідації пожеж на робочому місці та правилами поведінки у разі виникнення пожежі.

Установки відцентрового лиття повинні бути обладнані первинними засобами пожежегасіння – ящик с сухим піском та ручні вуглекислотні вогнегасники типів ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8. Такі вогнегасники призначені для гасіння невеликих спалахів всіх видів.

4.5 Розрахунок штучного освітлення

Мета даного розрахунку полягає в наступному: вибрати систему освітлення, джерело світла і світильник, визначити кількість світильників для забезпечення нормованої освітленості і розташувати їх на плані приміщення.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		53

Вихідні дані: висота приміщення $H = 10$ м, довжина приміщення $A = 40$ м, ширина приміщення $B = 24$ м. Цех відноситься до виробничих приміщень з повітряним простором, яке містить в робочій зоні 1 мг/м^3 пилу, диму, кіптяви.

Розрахунок освітлення виконаємо методом коефіцієнта використання світлового потоку.

Дане приміщення має бічні вікна, відноситься до 4 розряду із зоровою роботою - середньої точності, розмір об'єкта розрізнення більше $0,5$ мм. При малому контрасті і темному тлі необхідна освітленість при загальному освітленні - 100 лк.

Як джерело світла вибираємо газорозрядні лампи. Будемо використовувати світильники з дугорозрядними лампами РСП05 / Г03.

Розрахунок освітлення методом коефіцієнта використання виконується за формулою:

$$F = \frac{E \cdot S \cdot k \cdot z}{N \cdot \eta},$$

де: F – необхідний світловий потік ламп в кожному світильнику, лм;

E – нормована мінімальна освітленість, лк;

S – освітлювана площа, м^2 ;

k – коефіцієнт запасу (для ламп типу ДРЛ, ДРІ $k = 1,3$);

z – коефіцієнт мінімальної освітленості (при оптимальних відносинах відстані між світильниками до розрахункової висоті для ДРЛ $z = 1,15$);

N – число світильників в приміщенні;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Приймаються наступні значення: $E = 100$ лк; $k = 1,3$; $z = 1,15$, при загальному освітленні. Освітлювану площу приміщення визначимо за формулою:

$$S = A \cdot B,$$

де: S – освітлювальна площа, м^2 ;

$A = 40$ – довжина приміщення, м;

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		54

$B = 24$ – ширина приміщення, м;

$$S = 40 \cdot 24 = 960 \text{ м}^2.$$

Розрахункова висота підвісу h світильників зазвичай задається розмірами приміщення. Найбільш вигідне співвідношення λ відстані між світильниками L до розрахункової висоти підвісу h приймається в залежності від типової кривої сили світла світильника. В даному випадку для світильників з газорозрядними лампами рекомендоване значення $\lambda = 1$ (при глибокій типовій кривій).

Визначимо розрахункову висоту підвісу за формулою:

$$h = H - h_{ce} - h_{pn},$$

де: h – розрахункова висота підвісу, м;

$H = 10$ – висота приміщення, м;

$h_{ce} = 1$ – висота звису світильника (від перекриття), м;

$h_{pn} = 0,8$ – висота робочої поверхні над підлогою, м.

$$h = 10 - 1 - 0,8 = 8,2 \text{ м};$$

Відстань між рядами світильників визначаємо з формули:

$$L_{psc} = \lambda \cdot h, \quad L_{psc} = 1 \cdot 8,2 = 8,2 \text{ м};$$

Число світильників в приміщенні:

$$N = \frac{S}{L_{psc}^2} = \frac{960}{8,2^2} = 14,27 \approx 15 \text{ шт.}$$

Відстань між крайніми світильниками і стіною:

$$l = 0,45 \cdot L_{psc} = 0,45 \cdot 8,2 = 3,69 \approx 4 \text{ м.}$$

Для визначення коефіцієнта використання знайдемо індекс приміщення i :

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{40 \cdot 24}{8,2 \cdot (40 + 24)} = 1,83 \approx 2$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		55

Коефіцієнти відбиття поверхонь цеху: стелі -- $p_n = 70\%$, стін -- $p_c = 50\%$, підлоги -- $p_p = 10\%$. а отриманими значеннями i і r визначимо величину коефіцієнта використання світлового потоку для РСП05 / Г03. Для даного світильника $\eta = 74\%$.

За формулою визначимо необхідний світловий потік в кожному світильнику:

$$F = \frac{100 \cdot 960 \cdot 1,3 \cdot 1,15}{15 \cdot 0,74} = 12929,73 \text{ лм.}$$

Розташування світильників в приміщенні цеху приведено на рис. 4.1.

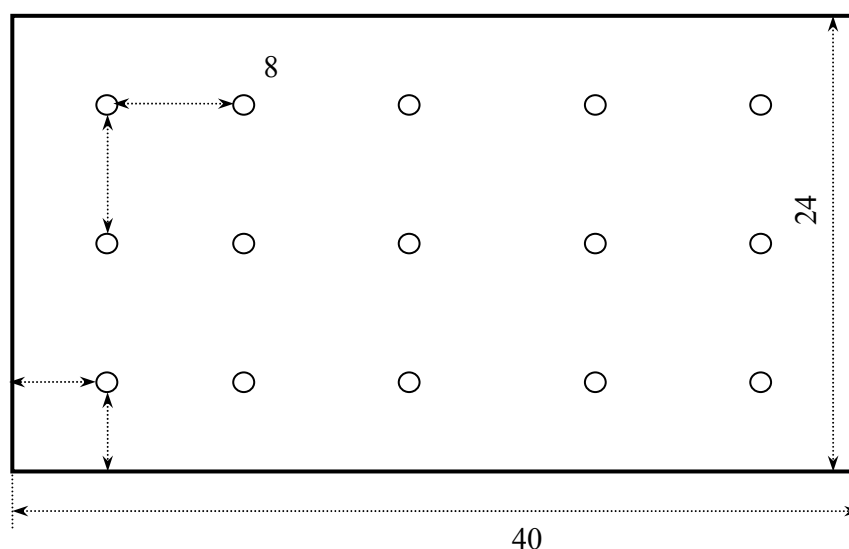


Рисунок 4.1 - Розташування світильників в цеху

Вибираємо лампу ДРЛ250.

Короткі технічні характеристики обраної лампи: потужність -- 250Вт; - напруга--145В; - світловий потік після 100 годин горіння -- 13500 лм.

Відхилення розрахункової освітленості від нормованої становить:

$$\Delta = \frac{13500 - 12929,73}{13500} \cdot 100\% = 4,22\%$$

Відхилення знаходиться в допустимих межах, звідси можна зробити висновок, що лампа ДРЛ250 задовольняє умовам і може бути використана в електромеханічному цеху в якості джерела світла.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата	ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк
56

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Головною метою даного розділу є визначення капітальних та експлуатаційних витрат на впровадження проектного варіанту системи електропривода установки відцентрового лиття.

Об'єктом проектування є система електропривода на основі перетворювача частоти ALTIVAR 930.

До впровадження проектного варіанту в якості приводного двигуна використовувався асинхронний двигун з короткозамкненим, а іноді з фазним ротором, та релейно-контакторною схемою керування [2]. Задана швидкість визначалась співвідношенням робочих діаметрів на багатоструменевому шківі. При цьому прискорення визначалось суто моментом інерції навантаження і його неможливо було регулювати.

Розрахунки в спеціальній частині проекту показали доцільність використання сучасної системи електропривода перетворювач частоти - асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (ПЧ-АД).

Використання такої системи електропривода дозволить впливати на параметри технологічного процесу та умови роботи обладнання: змінювати швидкість без втручання у механічну частину електропривода, змінювати значення прискорення у широких межах відповідно до вимог технологічного процесу, зменшити динамічні навантаження в елементах електропривода за рахунок підвищення якості регулювання режимами роботи двигуна. Також це дозволить підвищити надійність експлуатації устаткування, зменшити кількість ремонтів та час на додаткове обслуговування, зменшити споживання електричної енергії.

5.1 Розрахунок капітальних витрат

Капітальні витрати – це грошові ресурси, призначені для створення та придбання основних фондів та нематеріальних активів, які підлягають амортизації.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		57

Капітальні витрати на впровадження проектного варіанта визначаються наступним чином:

$$K_{np} = K_{об} (\sum C_i) + K_{тр} + K_{мн} + K_{пр}$$

де $K_{об}$ – вартість придбаного обладнання, грн;

$K_{тр}$ – транспортно - заготівельні та складські витрати, грн;

$K_{мн}$ – витрати на монтаж та наладку обладнання, грн;

$K_{пр}$ – інші одноразові вкладення грошей.

Транспортно-заготівельні витрати включені у вартість електрообладнання, так як фірма – продавець здійснює його доставку відповідно до договору.

Демонтажні та монтажно-налагоджувальні роботи здійснюються на підприємстві штатними електромеханіками та розраховуються відповідно до формули:

$$Z_{м(н)} = \sum (C_i \times a_i \times t_i) \times K_{д} \times K_{см} \times K_{пр}$$

де $i = 4$ – розряд робочих, що здійснюють монтажно – налагоджувальні роботи;

$C_i = 2$ чол. – чисельність робочих 4-го розряду задіяних у монтажі;

$a_i = 30,5$ грн. – годинна тарифна ставка робочих (електромонтер 4-го розряду);

$t_i = 16$ год. – час на виконання наладки;

$K_{д} = 1,15$ – коефіцієнт доплат;

$K_{см} = 1,22$ – коефіцієнт, що враховує єдиний соціальний внесок;

$K_{пр} = 1,05$ – коефіцієнт, що враховує непередбачені витрати.

Вартість монтажних робіт:

$$Z_{м} = (2 \times 16 \times 30,5) \times 1,15 \times 1,22 \times 1,05 = 1437,8 \text{ грн.}$$

Вартість демонтажних робіт ($t_{д} = 8$ год. – час на здійснення демонтажу):

$$Z_{н} = (2 \times 8 \times 50,5) \times 1,15 \times 1,22 \times 1,05 = 1190,31 \text{ грн.}$$

Разом:

$$Z_{м(н)} = Z_{н} + Z_{м} = 1190,31 + 2380,61 = 3570,92 \text{ грн.}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		58

Проектні капіталовкладення в обладнання та монтаж-налагоджувальні роботи прийняті на основі цін прейскуранта на електрообладнання фірми “Шнейдер Електрик Україна”, (м. Київ, Україна) від 01.04.18.

Розрахунок капітальних витрат подамо в вигляді таблиці капітальних витрат за розділами (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Зведення капітальних витрат

П/п	Найменування розділів	Проектний варіант, грн.
1	Електрообладнання:	
	Електропривод ALTIVAR 930	18250,90
	Дросель мережевий	4190,96
	Вимикач автоматичний	918,5
	Контактор	416,3
	Запобіжник швидкодіючий (3 шт.)	267,8
	Тримач запобіжника	256,68
Шафа металева (800*800*300)	6020,2	
	Разом	30321,34
2	Витрати на монтаж та наладку	1437,8
3	Демонтажні роботи	1190,31
4	Ліквідаційна вартість базового обладнання	
5	РАЗОМ	32950

Таким чином, капітальні витрати на впровадження проектного варіанту складають:

$$K_{np} = 30321,34 + 1437,81 + 1190,31 = 32950 \text{ грн.}$$

5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати – це поточні витрати на експлуатацію та обслуговування об’єкту проектування за певний період, виражені в грошовій формі.

До основних статей експлуатаційних витрат за електротехнічним обладнанням відносяться :

- амортизаційні відрахування (C_a);

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		59

- заробітна плата обслуговуючого персоналу (C_3);
- відрахування на соціальні заходи від заробітної плати (C_c);
- витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт обладнання (C_m);
- вартість електроенергії, спожитої об'єктом проектування ($C_э$).

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складуть:

$$C = Ca + C_3 + C_c + C_m + C_э, \text{ грн.}$$

Так як в процесі впровадження проектного варіанту не планується змінювати чисельність обслуговуючого персоналу, то розрахунки річного фонду заробітної плати та відрахувань на соціальні заходи не проводяться.

$$C = Ca + C_m + C_э, \text{ грн.}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат ведеться за проектним варіантом.

5.2.1 Амортизаційні відрахування

Річний фонд амортизаційних відрахувань визначається у відсотках від суми капітальних витрат за видами основних фондів та нематеріальних активів за розділами зведення капітальних витрат.

Обладнання, що встановлюється, відноситься до 4 групи основних фондів – машини та устаткування з мінімальним строком експлуатації 5 років.

Відсоток амортизаційних відрахувань визначаємо прямолінійним методом – пропорційним розподілом суми витрат на весь строк служби:

$$Ha = \frac{1}{Tn} \times 100\% = \frac{1}{5} \times 100\% = 20\%,$$

Оскільки, проектний варіант розглядається для впровадження, ліквідаційна вартість основних засобів дорівнює 0,0 грн.

$$Ca = Knp * Ha$$

$$Ca = 32950 \times 20\% = 6590 \text{ грн}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		60

5.2.2 Розрахунок вартості спожитої електроенергії

Кількість спожитої за рік електроенергії в проектному варіанті розраховується за формулою:

$$W_2 = N_y \times \Phi_2 \times K_{инт} / КПД$$

$N_y = 1,5$ кВт – встановлена потужність обладнання в проектному варіанті;

$K_{инт} = 0,8$ – інтегральний коефіцієнт використання потужності;

$КПД = 0,92$ – коефіцієнт корисної дії електропривода в проектному варіанті.

Φ_2 – річний фонд робочого часу визначаємо за формулою:

$$\Phi_2 = (D_k - D_{np} - D_v) \times T_{см}, \text{ год.},$$

$$\Phi_2 = (365 - 103 - 12) \times 16 = 4000 \text{ год}$$

де D_k – кількість календарних днів в році, 365 днів;

D_{np} – кількість святкових днів в році, 12 днів;

D_v – кількість вихідних днів в році, 103 дні;

$T_{см}$ – номінальний час роботи обладнання за рік, 16 год., робота здійснюється у дві робочі зміни.

$$W_{2п} = 1,5 \times 4000 \times 0,8 / 0,92 = 5217,4 \text{ (кВт·рік)}$$

Вартість електроенергії, спожитої об'єктом на потязі року, визначається виходячи з його встановленої потужності та річного фонду робочого часу об'єкта за формулою:

$$C_э = W_2 \times Ц_э,$$

Вартість електроенергії, спожитої об'єктом на потязі року:

$$C_{эп} = 5217,4 \times 1,86 = 9704,34 \text{ грн}$$

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		61

де C_{Σ} - тариф 1 кВт*год. електроенергії для споживачів 1-го класу 1-ї групи, за даними «Дніпрообленерго» станом на 01.05.2018 становить 1,86 грн/кВт*год.

5.2.3 Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт

Річні витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт електротехнічного обладнання складають витрати на матеріали, запасні частини, заробітну плату ремонтним робочим и т.д. Розраховуються за формулою:

$$C_m = \sum_{i=1}^n \left(h_i \cdot t_{1i} \cdot m_i \cdot R_{\Sigma i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_{\phi} \right), \text{ грн,}$$

де n – число приладів, що підлягають ремонту;

- $h = 50,5$ грн/год., – годинна тарифна ставка робочих (електромонтер четвертого розряду), виконуючих ремонт;
- t_1 – трудомісткість одного ремонту при категорії складності ремонту в одну ремонтну одиницю в залежності от виду ремонту, год/од;
- m – кількість ремонтів за рік;
- $R_{\Sigma} = 2,5$ – сумарна категорія складності ремонту в залежності від виду електрообладнання;
- S – вартість однотипних замінюваних елементів, грн;
- Π – кількість однотипних замінюваних елементів;
- T – середній термін служби деталей даного типу, год;
- $T_{\phi} = 4000$ ч, – кількість годин роботи електрообладнання за рік.

В якості запасних частин і матеріалів виберемо контактор в кількості 1 шт. та швидкодіючі запобіжники кількістю 3 шт./набір.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		62

Таблиця 5.2

Витрати на технічне обслуговування и ремонт

	<i>h</i>	<i>t1</i>	<i>m</i>	$R\Sigma$	<i>S1</i>	<i>П1</i>	<i>T1</i>	<i>S2</i>	<i>П2</i>	<i>T2</i>	<i>Tф</i>	<i>Cт</i>	<i>Cт2</i>	<i>Cт</i>
Проектний	50,5	2	1.5	2.5	416,3	1	1000	267,8	1	1000	4000	2043,95	1449,95	3493,9

Таким чином, річні експлуатаційні витрати для проектного варіанта складуть:

$$C_{np} = 9704,34 + 6590 + 3493,9 = 19788,25 \text{ грн};$$

За результатами проведених розрахунків визначена сума капітальних та експлуатаційних витрат. Сума капітальних затрат склала 32950 грн. Сума експлуатаційних витрат склала 19788,25 грн. Основну частину в експлуатаційних витратах складають витрати, пов'язані з оплатою електроенергії. Загальна сума становить 52664,24 грн.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата

ЕП.ПД.18.01.ПЗ

Арк

63

ВИСНОВКИ

1. Проведено розрахунок потужності і вибір двигуна електроприводу виливниці установки відцентрового лиття. Основним критерієм вибору двигуна є величина динамічного моменту, який він може розвивати для розгону.

2. Запропонована система векторного керування швидкістю електродвигуна виливниці. Виконані розрахунки регуляторів.

3. Для керування двигуном вибрано перетворювач частоти типа ATV930HU22N4 та додаткове обладнання.

4. Методами математичного моделювання проведено дослідження роботи запропонованої системи керування електроприводом, які підтвердили її працездатність.

5. В розділі «Техніко-економічне обґрунтування» проведено розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат.

6. В розділі «Охорона праці» виконано аналіз шкідливих виробничих факторів, запропоновані організаційно-технічні заходи з охорони праці. Виконано розрахунок штучного освітлення.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		64

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Юдин С.Б., Левин М.М., Розенфельд С.Е. Центробежное литье. М.: Машиностроение, 1972, - 280 с., ил.
2. Сафронов В.Я. Справочник по литейному оборудованию. М.: Машиностроение, 1985, - 320 с., ил.
3. Казачковський М.М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: НГА України, 2003. – 225 с.
4. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 227 с.
5. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
6. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т./Под. ред. И.П. Копылова и В.К. Клокова - М: Энергоатомиздат, 1988. т.1. -655 с.; т.2. -496 с.
7. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. -616 с.
8. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
9. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
10. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
11. Колб Ант. А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник – Д., Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.
12. www.schneider-electric.ua .
13. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. Інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

					ЕП.ПД.18.01.ПЗ	Арк
Зм.	Арк..	№ докум.	Підп.	Дата		65