

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Модернізація електроприводу пасажирського ліфту житлового будинку
шляхом впровадження частотного керування**

Виконав: студент групи ЕЕМ-20

Станіслав ГОРБЕНКО

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Юрій ОСАДЧУК

Нормо контролер _____ к.т.н., доц. Юрій ОСАДЧУК

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ГОРБЕНКО Станіслав Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Модернізація електроприводу пасажирського ліфту житлового
будинку шляхом впровадження частотного керування

1. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація електроприводу пасажирського ліфту житлового будинку шляхом впровадження частотного керування. Завданнями досліджень є розробка та проектування автоматизованого електромеханічного комплексу на новій елементній базі.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити):
I. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок статичних характеристик привода; II. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ; III. Електропостачання.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): I. Загальний вид механізму та технічна характеристика; II. Розрахунок статичних характеристик системи привода; III. Розробка системи керування ПЧ-АД; IV. Обґрунтування системи керування та побудування моделі для дослідження динаміки; V. Дослідження динаміки системи електроприводу -1; VI. Дослідження динаміки системи електроприводу -2.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Юрій ОСАДЧУК		
II	Юрій ОСАДЧУК		
III	Юрій ОСАДЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Основні відомості про технологічний механізм, загальний вид, кінематика і режими роботи вид, кінематика і режими роботи	10.05.24
2	Обґрунтування і вибір системи електропривода	12.05.24
3	Розрахунок потужності і вибір електродвигуна	17.05.24
4	Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової	19.05.24
5	Розрахунок параметрів схеми заміщення, розрахунок	24.05.24
6	Обґрунтування і вибір структури системи керування	26.05.24
7	Розрахунок параметрів елементів системи керування	28.05.24
8	Розробка алгоритмів та програмного забезпечення	31.05.24
9	Моделювання статичних та динамічних режимів	04.06.24
10	Аналіз якісних показників розробленої системи	05.06.24
11	Електропостачання	07.06.24

Дата видання завдання 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Станіслав ГОРБЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Юрій ОСАДЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Анотація до пояснювальної записки: 98 сторінок, 22 рисунок, 12 таблиць, 19 використаних джерел.

Метою роботи є модернізація електроприводу пасажирського ліфту житлового будинку шляхом впровадження частотного керування та аналіз роботи цього електромеханічного комплексу. Для виконання поставленої задачі у роботі розглянули технологічний процес ліфтової установки та його особливості. В системі електроприводу вибрали наступну елементну базу: асинхронний двигун (4AC132S6Y3, $P_n = 6,3$ кВт; $I_n = 15,1$ А) і перетворювач частоти (фірма OMRON, серія 3G3FV, $P_n = 4 \dots 300$ кВт; $f_n = 0,1 \dots 400$ Гц). Виконана побудова моделі електроприводу та дослідження динамічних режимів роботи системи електроприводу. Результати роботи можуть бути використані при модернізації електрообладнання ліфтів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Частотно-регульований електропривод, автономний інвертор напруги, широтно-імпульсна модуляція, АІН, ШІМ, ліфт.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок статичних характеристик привода	8
1.1 Характеристика електромеханічної системи	9
1.1.1 Характеристика технологічного процесу	9
1.1.2 Опис ліфта і вибір кінематичної схеми	10
1.1.3 Розрахунок і побудова навантажувальної діаграм ліфта за цикл роботи	13
1.1.4 Розрахунок і побудова навантажувальних діаграм електропривода ліфта за цикл роботи	15
1.1.5 Попередній вибір потужності електропривода	24
1.1.6 Попередня перевірка двигуна	25
1.1.7 Вимоги до електроприводів ліфтів	26
1.2 Вибір електрообладнання	27
1.2.1 Обґрунтування частотно-регульованого електропривода для механізму підйому ліфта	27
1.2.2 Розробка функціональної схеми	30
1.2.3 Обґрунтування закону частотного регулювання	35
1.2.4 Вибір перетворювача частоти	35
1.3 Аналіз статичних режимів електропривода ліфта	38
1.3.1 Схема заміщення електропривода	38
1.3.2 Розрахунок природних швидкісних характеристик	40
1.3.3 Розрахунок швидкісних та механічних характеристик асинхронного двигуна при частотному регулюванні	45
1.3.4 Розрахунок енергетичних показників	59
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1	63

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

2	Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ	64
2.1	Математична модель асинхронного двигуна	65
2.2	Модель асинхронного двигуна з автономним інвертором напруги	72
2.2.1	Розрахунок параметрів регулятора потокозчеплення	73
2.2.2	Розрахунок параметрів регулятора струму	75
2.2.3	Розрахунок параметрів регулятора швидкості	76
	ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2	81
3	Електропостачання	82
3.1	Розрахунок навантажень	83
3.2	Розрахунок струмів короткого замикання	87
3.3	Розрахунок струмів короткого замикання до 1000 В	90
3.4	Вибір апаратури управління та захисту низьковольтної кабельної мережі	92
3.5	Перевірка кабелю на термічну стійкість та економічну щільність струму	93
	ВИСНОВКИ	96
	ЛІТЕРАТУРА	97

ВСТУП

У житлових багатоквартирних будинках Кривого Рогу у теперішній час в експлуатація знаходиться понад 3 тисяч ліфтів, більшість з яких експлуатується довше 25 років і повинні бути замінені чи пройти капітальний ремонт або модернізацію. Капітальному ремонту підлягли приблизно 700 ліфтів. Модернізація ліфта є дешевшою альтернативою заміни підйомника на більш сучасний, при цьому можливе поліпшення технічних характеристик та енергозбереження механізму.

Оскільки економія енергоресурсів є важливим чинником для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище необхідно впроваджувати засоби енергозбереження у ліфтове господарство. Впровадження частотно-регульованих електроприводів у систему підйомних установок є одним із таких засобів.

При використанні частотно-регульованого електропривода з асинхронним двигуном втрати на електроенергію знижуються на 40-60 % за рахунок зниження непродуктивних втрат, завдяки зменшення обертових махових мас лебідки, а також за рахунок зменшення динамічних навантажень в кінематичній схемі ліфта завдяки плавним перехідним процесам привода з частотним керуванням зменшуються витрати на капітальний ремонт і експлуатацію обладнання.

Застосування перетворювача частоти в електроприводі ліфтів також дозволяє виконати заміну двошвидкісного ліфтового електродвигуна на дешевший у декілька разів одношвидкісний асинхронний двигун.

Крім цього ліфти з частотно-регульованими приводами не тільки дозволяють заощаджувати, але і підвищують комфорт під час руху кабіни, оскільки пасажери майже не відчують руху через плавні перехідні процеси, які проходять у цій системі.

Таким чином для модернізації ліфтів технічно доцільно і економічно ефективно використовувати одношвидкісні асинхронні двигун з перетворювачем частоти.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ, ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03			
<i>Зм.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 1	<i>Лім.</i>	<i>Лист.</i>	<i>Листів</i>
<i>Розробив</i>	Горбенко С.В.							
<i>Перевірів</i>	Осадчук Ю.Г.							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Осадчук Ю.Г.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ - 20		

1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок статичних характеристик привода

1.1 Характеристика електромеханічної системи

1.1.1 Характеристика технологічного процесу

Висотні будівлі обладнуються засобами для швидшого та легшого вертикального переміщення людей та вантажів на різні поверхи. Найбільш розповсюдженим видом підйомників що використовують у громадських і житлових будівлях є ліфт. Він займає досить невелику площу багатоповерхівки.

Ліфт є пристроєм переривчастої дії, який здійснює переміщення робочої кабіни вертикально у шахті по жорстким напрямним з метою підймання або опускання людей та вантажу на задану висоту.

Основними елементами з яких складається ліфт є: канати, кабіна, шахта, противага, лебідка, електропривод, обмежувач швидкості та вловлювач.

Живлення освітлення кабіни, приводів вентиляторів і дверей, апаратів керування, а також іншого устаткування, включно з тим що знаходиться поза кабіни, здійснюється гнучким кабелем.

Цивільні будівлі обладнають ліфтами різної швидкості та вантажопідйомності в залежності від її висоти, заселеності та інших технологічних вимог. За характером вантажу, що перевозиться, ліфти поділяють на пасажирські, вантажні та вантажопасажирські.

Пасажирські ліфти використовують в жилих будівлях для переміщення людей і та їх багажу, в разі не перевищення вантажопідйомності ліфта.

При необхідності використання підйомної установки не тільки для транспортування людей, але і для перевезення габаритних предметів використовують вантажопасажирські ліфти. Вони відрізняються від пасажирських збільшеною вантажопідйомністю, ширшим прорізом дверей та більшою кабіною.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В разі перевезення лише вантажу в промислових будівлях використовують вантажні ліфти.

Підйомна маса вантажу, на який розрахований ліфт називають номінальною вантажопідйомністю. При чому у цю характеристику не враховують масу кабіни з її устаткуванням. У неї входить маса пасажирів, тари та іншого вантажу, що не знаходиться в кабіні весь час.

Ліфти поділяють за швидкістю на такі категорії:

- тихохідні (до 1 м/с);
- швидкохідні (1-2 м/с);
- швидкісні (2-4 м/с);
- високошвидкісні(понад 4 м/с).

Оскільки при збільшенні швидкості ліфта вище 4 м/с не завжди збільшується його продуктивність, причому швидкий підйом або опускання призводить до неприємних а іноді й до больових відчуттів у людей, їх використовують рідко.

1.1.2 Опис ліфта і вибір кінематичної схеми

Загальний вигляд пасажирського ліфта показаний на рис.1.1.

У машинному приміщенні 1 встановлений привід ліфта (лебідка) 2. Шахта 20 ліфта знаходиться під машинним приміщенням і пронизує будівлю по всій висоті. До огорожень 19 шахти, які встановлені з усіх боків, кріпляться напрямні 17 - для противаги 15 та 18 - для кабіни ліфта 25. Противага і кабіна за допомогою підвіски 27 підвішені на сталевих канатах 28 через канатоведучий шків 3. Електродвигун 5, прикріплений до редуктора через муфту, обертає канатоведучий шків 3. Ліфт зупиняється завдяки колодковим електромагнітним гальмам 4.

Підйом за межі робочої зони ліфта обмежують кінцеві вимикачі, які розташовані у верхній та нижній частині шахти.

Для аварійної зупинки ліфта і подальшого його утримання на одній висоті у разі обриву канатів каркас кабіни обладнують уловлювачем 26 та башмаками 23, які забезпечують рух кабіни по напрямним.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

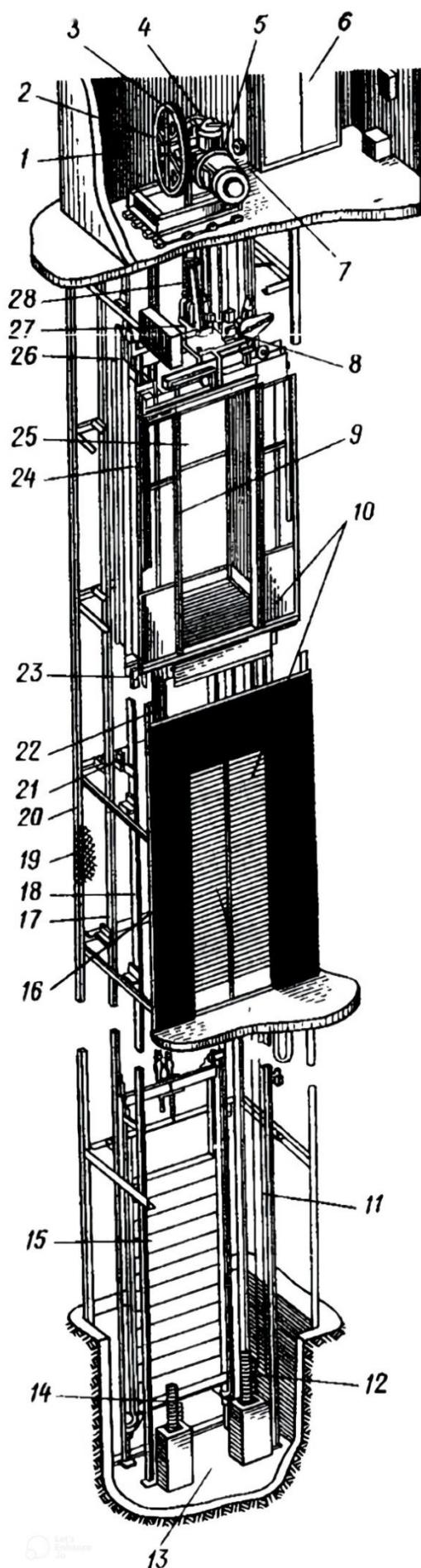


Рисунок 1.1 – Схема ліфта: 1 – машинне приміщення; 2 – лебідка; 3 – канатоведучий шків; 4 – колодке гальмо; 5 – електродвигун; 6 – панель керування ліфтом; 7 – обмежувач швидкості; 8 – привод дверей кабіни; 9 – панель керування кабіни; 10 – двері; 11 – трос; 12 – натяжний блок; 13 – пряминок; 14 – буфер; 15 – противага; 16 – поверхова кнопка виклику; 17 – напрямна противаги; 18 – напрямна кабіни; 19 – огороження шахти; 20 – шахта; 21 – поверховий перемикач; 22 – гнучкий кабель; 23 – башмак; 24 – відводка; 25 – кабіна; 26 – уловлювач; 27 – підвіска; 28 – сталевий канат

Від перевищення швидкості кабіни обладнують обмежувач швидкості 7, який встановлюється у машинному приміщенні і взаємопов'язаний з уловлювачем і кабіною тросом 11. Панель керування кабіни 9 з'єднана гнучким кабелем 22 з панеллю керування ліфтом 6, що розташована в машинному приміщенні.

Для руху ліфта на потрібний поверх пасажиру необхідно натиснути на кнопку панелі керування з відповідним номером. Ліфт почне рухатися і при наближенні до необхідного поверху відведення 24, яке встановлене на кабіні, замкне поверховий перемикач 21, який подасть сигнал на

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

11

переключення приводу у режим зниженої швидкості.

На цій швидкості кабіна буде рухатися до датчика точної зупинки, який встановлено у шахті. Датчик подасть сигнал на знеструмлення електродвигуна ліфта і ввімкнення гальма, що зупинить кабіну.

В цей час подається живлення на привід дверей шахти та кабіни і вони відчиняються. Після того як пасажери вийдуть спрацює реле часу, яке після деякої витримки часу подасть сигнал на зачинення дверей.

Ліфт за кінематичною схемою виконано з розташуванням приводного механізму зверху, як показано на рис. 1.2. Розміщення приводного механізму таким чином обумовлюється підвищеним коефіцієнтом корисної дії, зниженням на будівельні конструкції будинку навантаження, зменшенням зносу канатів і зниженням капітальних втрат.

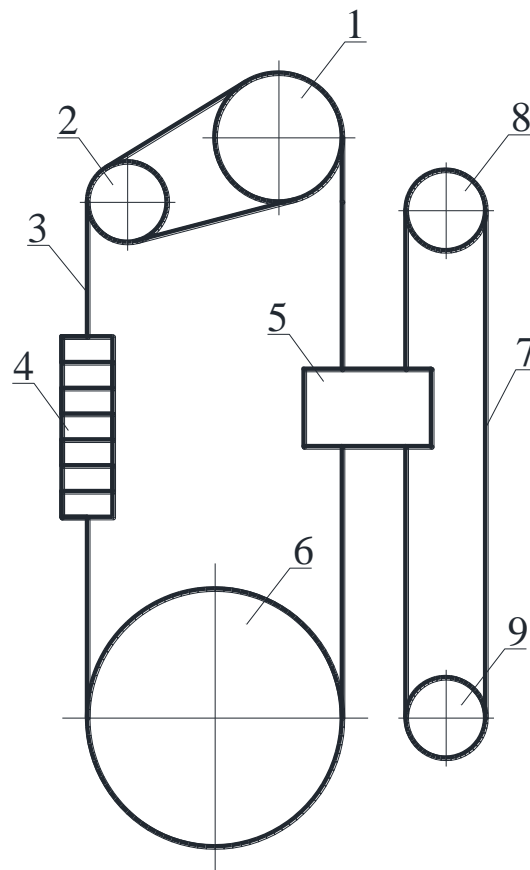


Рисунок 1.2 – Кінематична схема ліфтового підйомника

- 1 – двигун; 2 – відвідний шків; 3 – сталевий канат; 4 – противага; 5 – кабіна;
6 – направляючий шків; 7 – трос; 8, 9 – обмежувач швидкості

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Основні технічні дані установки наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технологічні дані ліфтової установки

Технологічні дані	Умовні позначення	Данні
Швидкість руху кабіни, м/с	V_k	1,0
Припустиме лінійне прискорення кабіни, м/с ²	$a_{\text{прип}}$	1,4
Маса кабіни, кг	m_k	960
Вантажопідйомність ліфта, кг	$m_{\text{вп}}$	500
Діаметр канатоведучого шківа, м	$D_{\text{ш}}$	0,93
Момент інерції канатоведучого шківа, м/с ²	$J_{\text{ш}}$	22,6
Повна висота підйому, м	H	33,6
Розбіжність кабіни і підлоги поверху, мм	ΔQ	±10
Число поверхів	N	13
Число циклів у годину	Z	25

1.1.3 Розрахунок і побудова навантажувальної діаграм ліфта за цикл роботи

Сучасні ліфти обладнуються противагами для зрівноважують сили ваги порожньої кабіни G_0 та частини ваги номінального вантажу, що підіймається $\alpha \cdot G_{\text{ном}}$.

Розрахуємо силу ваги противаги:

$$G_{\text{пр}} = G_0 + \alpha \cdot G_{\text{ном}}, \quad (1.1)$$

де $\alpha = (0,4 \div 0,6)$ – коефіцієнт зрівноваження, приймаємо $\alpha = 0,5$.

$$G_0 = m_k \cdot g \quad (1.2)$$

$$G_{\text{ном}} = m_{\text{вп}} \cdot g, \quad (1.3)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$.

$$G_0 = 960 \cdot 9,81 = 9417,6 \text{ Н}$$

$$G_{\text{ном}} = 500 \cdot 9,81 = 4905 \text{ Н}$$

$$G_{\text{пр}} = 9417,6 + 0,5 \cdot 4905 = 11870,1 \text{ Н}$$

Маса противаги рівне:

$$m_{\text{пр}} = \frac{G_{\text{пр}}}{g} \quad (1.4)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m_{\text{пр}} = \frac{11870,1}{9,81} = 1210 \text{ кг}$$

Сила на канатоведучому шківі:

$$F_c = \left(\frac{m_B}{m_{\text{ВП}}} \right) \cdot G_{\text{НОМ}} - \alpha \cdot G_{\text{НОМ}} \quad (1.5)$$

Без ваги:

$$F_c = \left(\frac{0}{500} \right) \cdot 4905 - 0,5 \cdot 4905 = -2452,5 \text{ Н}$$

З вагою:

$$F_c = \left(\frac{500}{500} \right) \cdot 4905 - 0,5 \cdot 4905 = 2452,5 \text{ Н}$$

Статична потужність на валу двигуна при підйомі кабіни дорівнюватиме:

$$P_{\text{ст.п}} = \frac{F_c \cdot V_k}{\eta_1}, \quad (1.6)$$

де η_1 – ККД редуктора, $\eta_1 = 0,8$.

Без ваги:

$$P_{\text{ст.п}} = \frac{-2452,5 \cdot 1}{0,8} = -3065,6 \text{ Вт}$$

З вагою:

$$P_{\text{ст.п}} = \frac{2452,5 \cdot 1}{0,8} = 3065,6 \text{ Вт}$$

При опусканні:

$$P_{\text{ст.о}} = F_c \cdot V_k \cdot \eta_2, \quad (1.7)$$

де η_2 – ККД редуктора при зворотній передачі потужності, $\eta_2 = 0,65$.

Без ваги:

$$P_{\text{ст.о}} = -2452,5 \cdot 1 \cdot 0,65 = -1594,1 \text{ Вт}$$

З вагою: $P_{\text{ст.о}}$, Вт

$$P_{\text{ст.о}} = 2452,5 \cdot 1 \cdot 0,65 = 1594,1 \text{ Вт}$$

Розрахункова діаграма навантажень ліфтової установки зображена на рис. 1.3.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1.4 Розрахунок і побудова навантажувальних діаграм електропривода ліфта за цикл роботи

Розрахунки виконаємо згідно з [9]. Дані для розрахунків приведені в таблиці 1.1.

Кутова швидкість шківів:

$$\omega_{ш} = \frac{2 \cdot V_{к}}{D_{ш}} \quad (1.8)$$
$$\omega_{ш} = \frac{2 \cdot 1}{0,93} = 2,15 \text{ рад/с}$$

Передаточне число редуктора:

$$i = \frac{\omega_{ном}}{\omega_{ш}} \quad (1.9)$$
$$i = \frac{98,39}{2,15} = 45,8$$

Статичний момент на валу двигуна при підйомі кабіни ліфта:

$$M_{ст.п} = \frac{F_c \cdot D_{ш}}{2 \cdot \eta_1 \cdot i} \quad (1.10)$$
$$M_{ст.п} = \frac{2452,5 \cdot 0,93}{2 \cdot 0,8 \cdot 45,8} = 31,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Статичний момент на валу двигуна при опусканні кабіни ліфта:

$$M_{ст.о} = \frac{F_c \cdot D_{ш} \cdot \eta_2}{2 \cdot i} \quad (1.11)$$
$$M_{ст.о} = \frac{2452,5 \cdot 0,93 \cdot 0,65}{2 \cdot 45,8} = 16,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Сумарний момент інерції системи, приведений до вала двигуна:

$$J_{\Sigma} = 1,1 \cdot J_{дв} + \left(\frac{m_{вп}}{m_{б}} \cdot m_{вп} + m_{пр} + m_{к} \right) \cdot \left(\frac{V_{к}}{\omega_{ном}} \right)^2 \quad (1.12)$$

$$J_{\Sigma} = 1,1 \cdot 0,04 + (1 \cdot 500 + 1210 + 960) \cdot \left(\frac{1}{98,39} \right)^2 = 0,32 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Динамічний момент, приведений до вала двигуна:

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \cdot \frac{2 \cdot a_{доп} \cdot i}{D_{ш}} \quad (1.13)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\text{дин}} = 0,32 \cdot \frac{2 \cdot 1,4 \cdot 45,8}{0,93} = 44,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунок навантажувальної діаграми при русі кабіни вверх.

Визначимо час, за який здійснюється розгін кабіни:

$$t_1 = \frac{V_k}{a}, \quad (1.14)$$

де $a = 1,5 \text{ м/с}^2$ – уповільнення

$$t_1 = \frac{1}{1,5} = 0,67 \text{ с}$$

Шлях, який проходить кабіна при розгоні:

$$S_1 = \frac{V_k}{2} \cdot t_1 \quad (1.15)$$

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot 0,67 = 0,335 \text{ м}$$

Швидкість на ділянці розгону:

$$V_1 = \frac{S_1}{t_1} \quad (1.16)$$

$$V_1 = \frac{0,335}{0,67} = 0,5 \text{ м/с}$$

Момент при розгоні:

$$M_1 = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст.п}} \quad (1.17)$$

$$M_1 = 44,12 + 31,12 = 75,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Знижена швидкість:

$$V_{\text{зн}} = \sqrt{2 \cdot a \cdot \Delta Q} \quad (1.18)$$

$$V_{\text{зн}} = \sqrt{2 \cdot 1,5 \cdot 0,01} = 0,173 \text{ м/с}$$

Час гальмування до зниженої швидкості:

$$t_3 = \frac{V_k - V_{\text{зн}}}{a} \quad (1.19)$$

$$t_3 = \frac{1 - 0,173}{1,5} = 0,551 \text{ с}$$

Шлях, який проходить кабіна на відрізьку гальмування:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_3 = \frac{V_K^2 - V_{3H}^2}{2 \cdot a} \quad (1.20)$$

$$S_3 = \frac{1^2 - 0,173^2}{2 \cdot 1,5} = 0,323 \text{ м}$$

Швидкість на ділянці гальмування до зниження швидкості:

$$V_3 = \frac{S_3}{t_3} \quad (1.21)$$

$$V_3 = \frac{0,323}{0,551} = 0,586 \text{ м/с}$$

Момент на третій ділянці буде дорівнювати:

$$M_3 = M_{\text{дин}} - M_{\text{ст.п}} \quad (1.22)$$

$$M_3 = 44,12 - 31,12 = 13 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Час роботи на ділянці зі зниженою швидкістю:

$$t_4 = \frac{\Delta S}{V_{3H}}, \quad (1.23)$$

де ΔS – шлях, пройдений зі зниженою швидкістю, приймаємо $\Delta S = 0,1 \text{ м}$.

$$t_4 = \frac{0,1}{0,173} = 0,578 \text{ с}$$

Швидкість на ділянці зі зниженою швидкістю:

$$V_4 = \frac{\Delta S}{t_4} \quad (1.24)$$

$$V_4 = \frac{0,1}{0,578} = 0,173 \text{ м/с}$$

Час гальмування:

$$t_5 = \frac{V_{3H}}{a} \quad (1.25)$$

$$t_5 = \frac{0,173}{1,5} = 0,115 \text{ с}$$

Шлях, який проходить кабіна на останньому відрізку гальмування:

$$S_5 = \frac{V_{3H}^2}{2 \cdot a} \quad (1.26)$$

$$S_5 = \frac{0,173^2}{2 \cdot 1,5} = 0,01 \text{ м}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість на останній ділянці гальмування:

$$V_5 = \frac{S_5}{t_5} \quad (1.27)$$

$$V_5 = \frac{0,01}{0,115} = 0,87 \text{ м/с}$$

Шлях, який проходить кабіна при сталій швидкості:

$$S_2 = S - S_1 - S_3 - S_5 - \Delta S \quad (1.28)$$

$$S_2 = 33,6 - 0,335 - 0,323 - 0,01 - 0,1 = 32,83 \text{ м}$$

Час роботи ліфта при сталій швидкості:

$$t_2 = \frac{S_2}{V_k} \quad (1.29)$$

$$t_2 = \frac{32,83}{1} = 32,83 \text{ с}$$

Швидкість на ділянці зі сталою швидкістю:

$$V_2 = \frac{S_2}{t_2} \quad (1.30)$$

$$V_2 = \frac{32,83}{32,83} = 1 \text{ м/с}$$

Момент на цій ділянці:

$$M_2 = M_4 = M_{\text{ст.п}} = 31,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Час, за який кабіна ліфта здійснює підйом з першого до тринадцятого поверху:

$$t_{\text{I-XIII}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 \quad (1.31)$$

$$t_{\text{I-XIII}} = 0,67 + 32,83 + 0,551 + 0,578 + 0,115 = 34,74 \text{ с}$$

Розрахунок навантажувальної діаграми ліфта між першим і другим поверхами будинку.

Час при розгоні ліфта:

$$t_7 = t_1 = 0,67 \text{ с}$$

Шлях пройдений при розгоні:

$$S_7 = S_1 = 0,335 \text{ м}$$

Швидкість на ділянці розгону:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_7 = V_1 = 0,5 \text{ м/с}$$

Момент при розгоні:

$$M_7 = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст.о}} \quad (1.32)$$

$$M_7 = 44,12 + 16,18 = 60,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Час гальмування до зниженої швидкості:

$$t_9 = t_3 = 0,551 \text{ с}$$

Шлях, пройдений на ділянці гальмування:

$$S_9 = S_3 = 0,323 \text{ м}$$

Швидкість на ділянці гальмування до зниженої швидкості:

$$V_9 = V_3 = 0,586 \text{ м/с}$$

Момент:

$$M_9 = M_{\text{дин}} - M_{\text{ст.о}} \quad (1.33)$$

$$M_9 = 44,12 - 16,18 = 27,94 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Час роботи на ділянці зі зниженою швидкістю:

$$t_{10} = t_4 = 0,578 \text{ с}$$

Швидкість на ділянці зі зниженою швидкістю:

$$V_{10} = V_4 = 0,173 \text{ м/с}$$

Час гальмування:

$$t_{11} = t_5 = 0,115 \text{ с}$$

Шлях, який проходить кабіна ліфта на останньому відрізку гальмування:

$$S_{11} = S_5 = 0,01 \text{ м}$$

Швидкість на останній ділянці гальмування:

$$V_{11} = V_5 = 0,87 \text{ м/с}$$

Шлях, який проходить ліфт між поверхами, при роботі зі сталою швидкістю:

$$S_8 = S_{\text{I-II}} - S_7 - S_9 - S_{11} - \Delta S, \quad (1.34)$$

$$\text{де } S_{\text{I-II}} = \frac{S}{13} = \frac{33,6}{13} = 2,58 \text{ м} - \text{висота між поверхами}$$

$$S_8 = 2,58 - 0,335 - 0,323 - 0,1 - 0,01 = 1,81 \text{ м}$$

Час роботи зі сталою швидкістю між поверхами:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_8 = \frac{S_8}{V_K} \quad (1.35)$$

$$t_8 = \frac{1,81}{1} = 1,81 \text{ с}$$

Швидкість на цій ділянці:

$$V_8 = 1 \text{ м/с}$$

Момент:

$$M_8 = M_{10} = M_{\text{ст.о}} = 16,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Час циклу:

$$T_{\text{ц}} = \frac{3600}{Z} \quad (1.36)$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{3600}{25} = 144 \text{ с}$$

Час роботи двигуна:

$$t_{\text{I-II}} = t_{\text{II-III}} = t_{\text{III-IV}} = \dots = t_{\text{XII-XIII}} = t_1 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} \quad (1.37)$$

$$t_{\text{I-II}} = 0,67 + 1,81 + 0,551 + 0,578 + 0,115 = 3,72 \text{ с}$$

$$t_{\text{руху}} = t_{\text{I-XIII}} + t_{\text{II-III}} + \dots + t_{\text{XII-XIII}} \quad (1.38)$$

$$t_{\text{руху}} = 34,74 + 3,72 \cdot 12 = 79,38 \text{ с}$$

Сумарний час паузи:

$$t_{\Sigma \text{пауз}} = T_{\text{ц}} - t_{\text{руху}} \quad (1.39)$$

$$t_{\Sigma \text{пауз}} = 144 - 79,38 = 64,62 \text{ с}$$

Час паузи:

$$t_{\text{пауз}} = t_6 = t_{12} = \frac{t_{\Sigma \text{пауз}}}{13} \quad (1.40)$$

$$t_{\text{пауз}} = \frac{64,62}{13} = 4,97 \text{ с}$$

Діаграма навантаження і тахограма руху ліфта зображені на рисунках 1.4 і 1.5.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

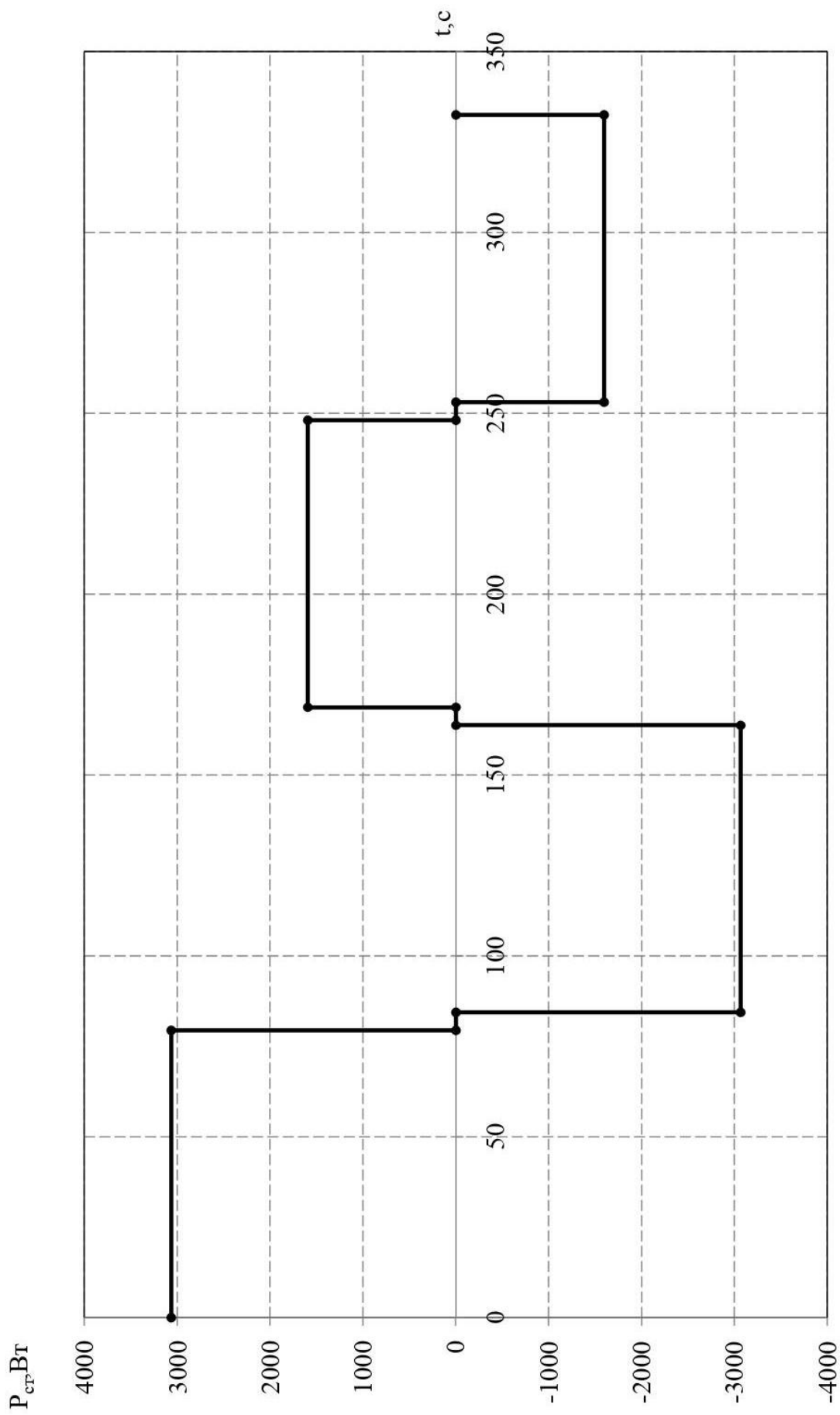


Рисунок 1.3 – Діаграма навантажень підйомної установки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

21

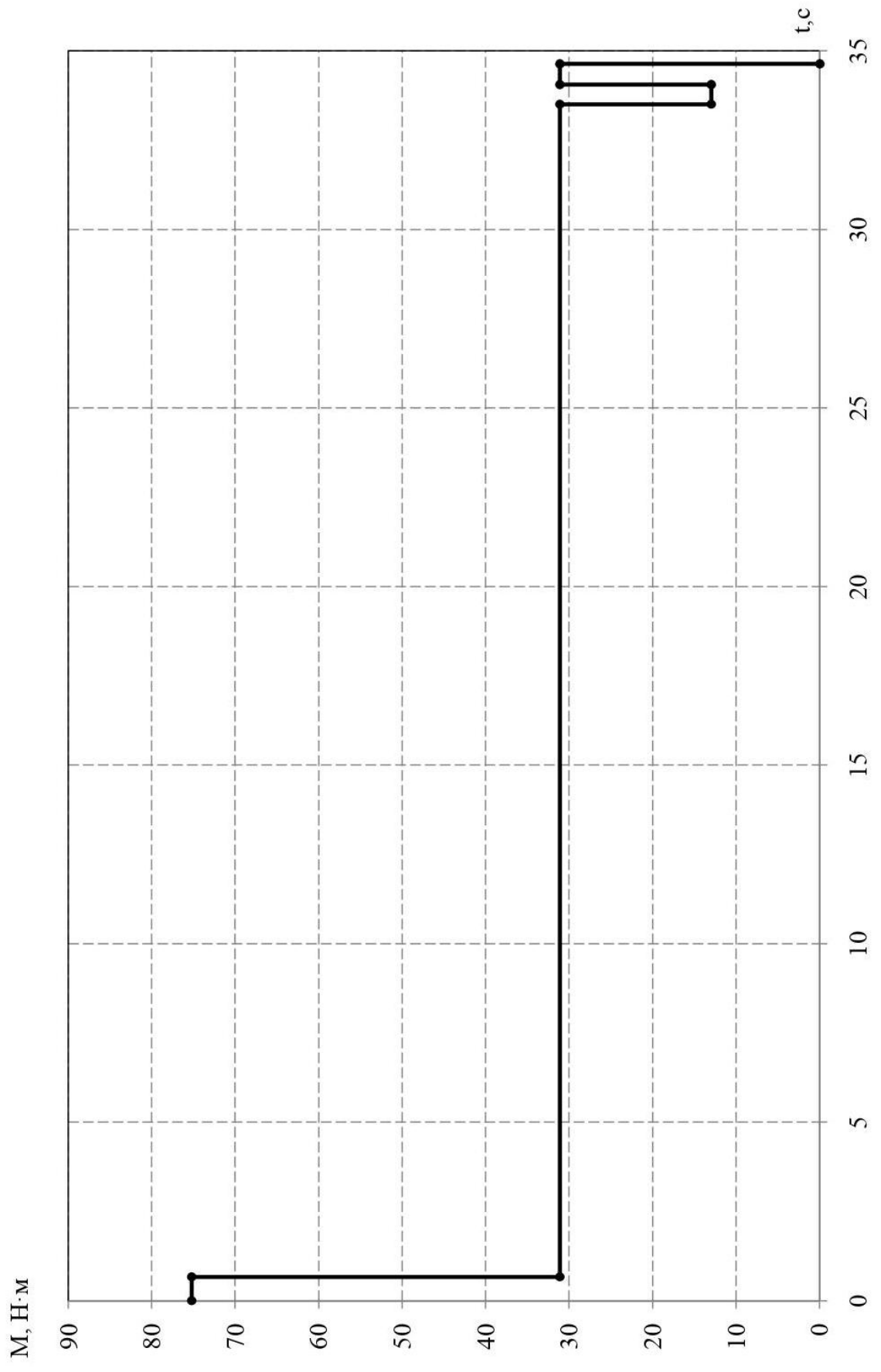


Рисунок 1.4 – Діаграма навантаження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

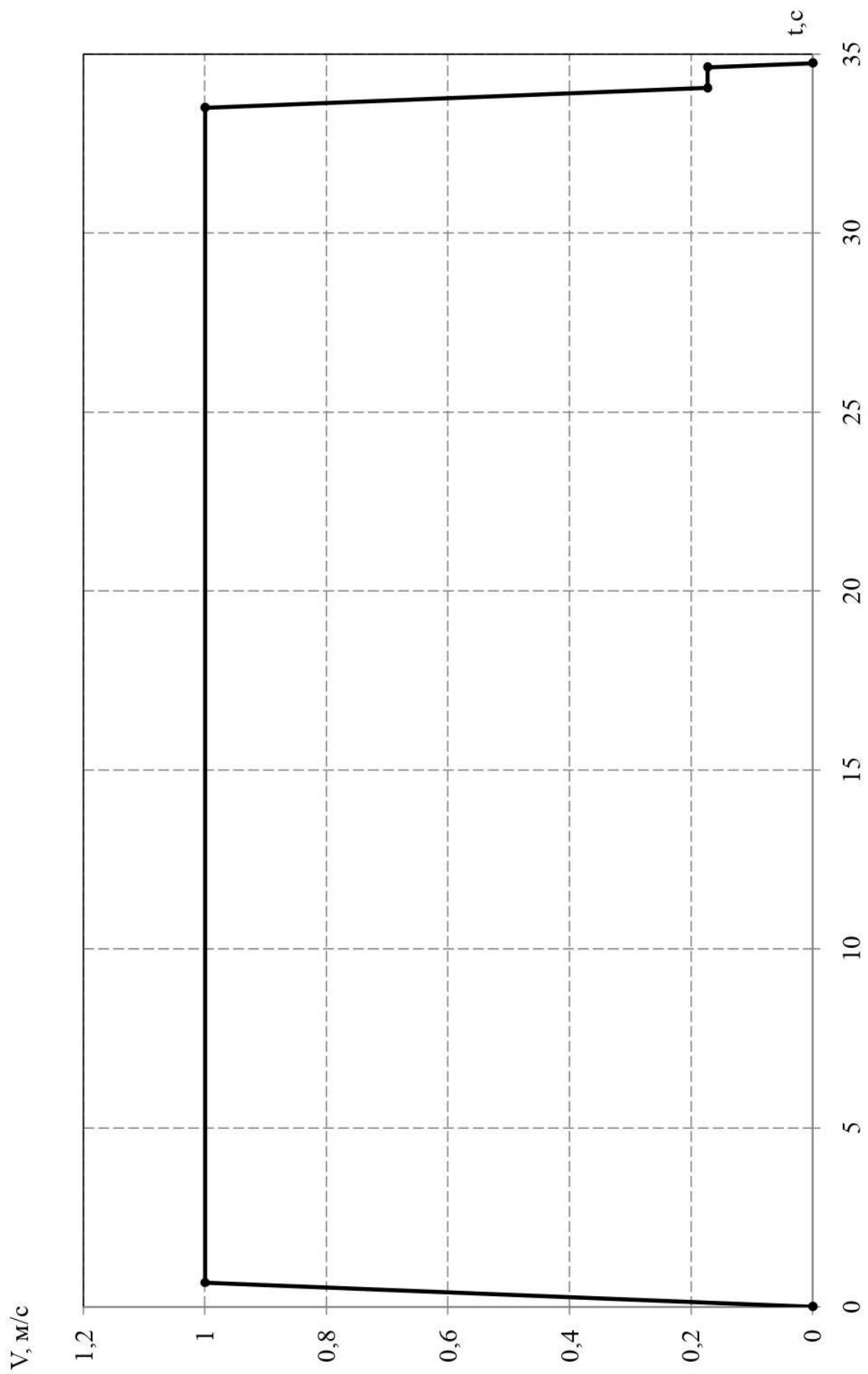


Рисунок 1.5 – Тахограма руху ліфта

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

23

1.1.5 Попередній вибір потужності електропривода

При умові, що швидкість підйому й опускання однакові, розрахункову потужність знаходимо як:

$$P_{cp} = \sqrt{\frac{P_{ст.п}^2 + P_{ст.о}}{2} \cdot \frac{TB_p}{TB_{ст}}} \quad (1.41)$$

де TB_p – розрахункова тривалість включення, визначимо за формулою [9]:

$$TB_p = \frac{t_{I-XIII} + t_{XIII-I}}{t_{ц} + t_{пауз}} \quad (1.42)$$

$$TB_p = \frac{34,74 + 79,38}{144 + 64,62} = 0,547 = 54,7\%$$

$$P_{cp} = \sqrt{\frac{3065,6^2 + 1594,1^2}{2} \cdot \frac{54,7}{40}} = 4040,6 \text{ Вт}$$

Необхідна потужність:

$$P_{дв} = k_3 \cdot P_{cp}, \quad (1.43)$$

де $k_3 = 1,3 \div 1,5$ – коефіцієнт запасу, що враховує нагрівання машини динамічними навантаженнями, приймаємо $k_3 = 1,5$.

$$P_{дв} = 1,5 \cdot 4040,6 = 6061 \text{ Вт}$$

Параметри попередньо обраного двигуна зводимо в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Паспортні дані двигуна

Тип двигуна	4AC132S6Y3
Номінальна потужність, кВт	$P_H = 6,3$
Номінальна напруга, В	$U_H = 380$
Номінальний струм статора, А	$I_H = 15,1$
Номінальна частота обертання вала, об/хв	$n_H = 940$
Коефіцієнт корисної дії, %	$\eta = 79$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,8$
Момент інерції двигуна, кг·м ²	$J_{дв} = 0,04$
Пусковий струм	$i_H = 6,5$
Максимальний момент двигуна, Н·м	$M_{max} = 134,46$

Продовження таблиці 1.2

Величина опорів зазначених у відносних одиницях	
Активний опір статора	$R'_1 = 0,079$
Індуктивний опір статора	$X'_1 = 0,079$
Активний опір ротора	$R''_2 = 0,081$
Індуктивний опір ротора	$X''_2 = 0,12$
Індуктивний опір намагнічування ланцюга статора	$X_\mu = 1,9$

Розрахуємо додаткові параметри двигуна.

Номінальна кутова швидкість двигуна:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{H}}}{30} \quad (1.44)$$

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{3,14 \cdot 940}{30} = 98,39 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{H}}}{\omega_{\text{НОМ}}} \quad (1.45)$$

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{6300}{98,39} = 64,03 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

1.1.6 Попередня перевірка двигуна

Тривалість включення графіка.

$$T_{\text{ВГР}} = \frac{t_{\text{р}\Sigma} \cdot 100}{t_{\text{у}\Sigma} + (t_{\text{п}\Sigma} + t_{\text{т}\Sigma}) \cdot \beta_{\text{п.т}} + t_{\text{о}\Sigma} \cdot \beta_0 + t_{\text{зн}\Sigma} \cdot \beta_{\text{зн}}}, \quad (1.46)$$

де $\beta_{\text{п.т}}$, β_0 , $\beta_{\text{зн}}$ – коефіцієнт погіршення тепловіддачі в пускових і гальмівних режимах, при нерухомому роторі та при зниженій швидкості, приймаємо $\beta_0 = 0,5$.

$$\beta_{\text{п.т}} = \frac{1 - \beta_0}{2} + \beta_0 \quad (1.47)$$

$$\beta_{\text{п.т}} = \frac{1 - 0,5}{2} + 0,5 = 0,75$$

$$\beta_{\text{зн}} = \frac{1 - \beta_0}{V_{\text{к}}} V_{\text{зн}} + \beta_0 \quad (1.48)$$

$$\beta_{\text{зн}} = \frac{1 - 0,5}{1} 0,173 + 0,5 = 0,587$$

$$T_{B_{гр}} = \frac{79,38 \cdot 100}{54,55 + (8,71 + 8,658) \cdot 0,75 + 64,62 \cdot 0,5 + 7,514 \cdot 0,914} \approx 76\%$$

Перевірка по нагріву.

Еквівалентний момент:

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 \cdot t_{pi}}{\sum t_{pi}}} \quad (1.49)$$

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{78413,3}{79,38}} = 51,42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Перевірка за перевантажувальною здатністю.

Умова по нагріву:

$$M_{ном} > M_{екв} \quad (1.50)$$

$$64,03 > 51,42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Умова перевірки за перевантаженням:

$$M_{max} > M_{пуск} \quad (1.51)$$

$$M_{пуск} = M_{ном} \cdot m_k \quad (1.52)$$

$$M_{пуск} = 63,01 \cdot 1,9 = 121,66 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$134,46 > 121,66 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

За нагрівом і перевантаженням двигун проходить перевірку.

1.1.7 Вимоги до електроприводів ліфтів

На основі досвіду з проектування та експлуатації підйомного транспорту були визначені наступні основні вимоги, які має задовольняти електропривод ліфтів, на основі яких вибирається найдоцільніша система керування.

Ліфтовий електропривод повинен: мати функцію реверсування, здійснювати точну зупинку кабіни на заданій висоті, забезпечувати високу надійність, економічну ефективність та мінімальний час перехідних процесів, при цьому максимальне значення прискорення повинно бути строго обмеженим. Упродовж всього розвитку ліфтового електричного устаткування, через свою простоту, асинхронний електродвигун з

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

короткозамкненим ротором бачили найбільш бажаним. Вибір такого двигуна спрощував не лише конструкцію споруди, але й експлуатацію.

Цей двигун може реалізувати характеристики, які відповідають вимогам ліфтових установок, а саме: відносно низькі пускові струми, при великих пускових моментах за підвищеного ковзання, прямий пуск електродвигуна, механічне гальмування на повній робочій швидкості обертання після зняття напруги. Усі нові моделі ліфтів обладнуються асинхронними двигунами з короткозамкненими роторами. Такий електропривод дозволяє зменшити робочу швидкість кабіни перед зупинкою в кілька разів, що збільшує саму точність зупинки та зменшує знос гальмового пристрою.

З огляду на все вищесказане можна сформулювати вимоги до електропривода:

- 1) Режим роботи - повторно-короткочасний;
 - 2) Привід - реверсивний;
 - 3) Забезпечення плавного пуску і гальмування, щоб прискорення і уповільнення не перевищували встановлені норми;
 - 4) Точна зупинка кабіни відповідно до вимог ліфтових установок.
- Зважаючи на всі вищевикладені вимоги вибираємо електропривод з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором.

1.2 Вибір електрообладнання

1.2.1 Обґрунтування частотно-регульованого електропривода для механізму підйому ліфта

Основним елементом частотно-регульованого електропривода є статичний перетворювальний пристрій – перетворювач частоти, який керує швидкістю обертання асинхронного двигуна зміною таких параметрів як напруга або частота змінного струму. Оскільки асинхронні електродвигуни мають простішу конструкцію та зручніше обслуговування ніж інші двигуни постійного й змінного струму їх скрізь застосовують: у всіх галузях енергетики, промисловості та міської інфраструктури.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість обертання виконавчого механізму можливо регулювати різними способами, які здійснюються наступними пристроями:

- Перетворювач частоти;
- Електромеханічний перетворювач частоти (системи Генератор-Двигун);
- Гідравлічна муфта;
- Механічний варіатор;
- Шляхом введення додаткового опору в електричний ланцюг ротора або статора.

Останні чотири способи мають такі недоліки, як:

- Низька рентабельність;
- Низький діапазон та якість регулювання ;
- Складність в застосуванні, обслуговуванні, експлуатації.

Перетворювач частоти не має усіх вище перелічених недоліків.

Коефіцієнт корисної дії перетворювача частоти, який регулює швидкість обертання асинхронного двигуна зміною величини напруги і частоти, досягає 98 %, при цьому споживається з мережі лише активна складова струму навантаження. Також завдяки мікропроцесорній системі управління забезпечується висока якість керування електродвигуном та можливість контролю великої кількості його параметрів за допомогою чого можна передбачити розвиток аварії.

Силова частина перетворювача частоти, що складається з вхідного випрямляча, ланцюга постійного струму з LC - фільтром та автономного інвертора напруги з ШІМ, показана на наступному рисунку:

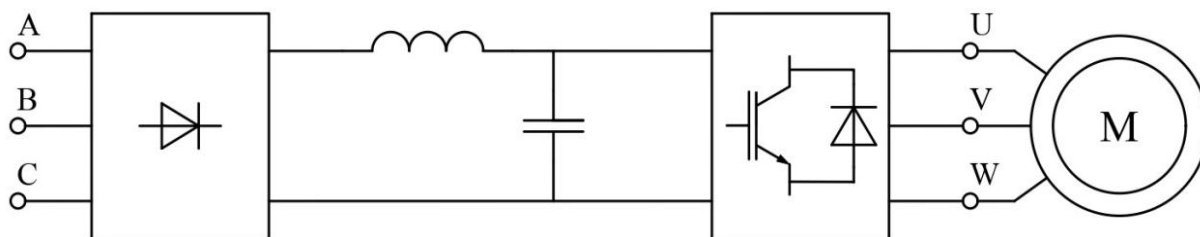


Рисунок 1.6 – Силовая схема частотного электропривода

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Використання цього пристрою може бути одним із способів вирішення таких стандартних проблем більшості підприємств та організацій:

- Зниження витрат на планово-попереджувальні і ремонтні роботи;
- Продовження строку служби технологічного устаткування;
- Збереження енергоресурсів;
- Забезпечення якісного контролю за технологічними процесами.

Окрім регулювання швидкості привода, перетворювач частоти виконує й захисну функцію електродвигуна, а саме здійснює контроль фаз двигуна та мережі живлення, захищає механізм від перенапруг, коротких замикань, струмових перевантажень, низької мережевої напруги, і захисну функцію приводного механізму, а саме захист від нагріву двигуна, недонавантаження та від клину механізмів.

Сучасні перетворювачі частоти дозволяють суттєво збільшити ресурс роботи двигуна та виконавчого механізму на основі даних аналізу їх робочих і пускових характеристик та стеження за змінами їх роботи впродовж їх життєвого циклу. На основі цих даних та за рахунок можливості плавного пуску, який є характерною функцією ПЧ, величина пускового перехідного процесу може не перевищувати номінальний струм електродвигуна, таким чином зменшуючи навантаження на електромережу та механізми, що піддаються пуску.

Ліфти є окремим класом підйомно-транспортних механізмів, що використовують двошвидкісний асинхронний двигун. При зміні електроприводу ліфта на частотно-регульований відбувається зниження витрат електроенергії на 50-60%, обмеження ударних моментів у перехідних режимах, що забезпечує більшу надійність роботи ліфта та ергономічність. Також з'являється можливість застосування дешевшого одношвидкісного асинхронного електродвигуна.

Через усі ці переваги у промислово розвинутих країнах асинхронні двигуни відразу використовують у парі з перетворювачем частоти.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Впровадження перетворювача частоти в середньому окупується протягом 1,5 року, незважаючи на досить високу вартість пристрою, за рахунок його ефективності та можливості економії енергоресурсів. Оскільки така техніка має багаторічний ресурс, то економічний ефект буде відповідним. Таким чином це устаткування є найвигіднішим об'єктом для інвестування у обладнання підприємства. Кошти, які інвестуються у перетворювачі частоти для виробництва гарантовано окупаються підприємством за строк окупності.

Використання частотно-регульованого електропривода запроваджує наступні технологічні функції:

- Регулювання швидкості обертання двигуна в межах від нуля до номінальної і навіть вище номінальної швидкості;
- Плавний пуск і гальмування;
- Обмеження струму на рівні номінального в робочих, пускових, і аварійних режимах;
- Збільшення строку служби електричної та механічної частини устаткування;
- Виключення зайвого устаткування.

1.2.2 Розробка функціональної схеми

Частотно-регульований електропривод складається з електродвигуна, перетворювача електричної енергії (для ЧРЕ - перетворювача частоти) і системи керування електроприводом.

Електричні двигуни, які застосовуються на виробництві і в побуті, поділяють за родом струму на двигуни змінного та постійного струму. В минулому при необхідності регулювання швидкості обертання електродвигуна використовували двигуни постійного струму. В якості перетворювача електричної енергії використовували пристрій для регулювання напруги, а саме - реостат, який має просту конструкцію та є дешевим. Попри це двигун постійного струму є складнішим за конструкцією та дорожчим в порівнянні з асинхронним двигуном, має недовговічний

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щітковий апарат, який сильно впливає на зниження надійності електричної машини. Асинхронний двигун є більш надійною електричною машиною, який має відносно низьку вартість і є ліпшим в експлуатації. До початку 80-х регулятори швидкості обертання асинхронним двигуном не використовувалися через їх низьку якість, високу вартість та складність системи електронного регулювання частоти живлячої напруги. Згодом з'явилися недорогі перетворювачі частоти, побудовані на основі нових електронних елементах, які винайшли під час бурхливого розвитку електроніки. Це дало можливість широко впроваджувати регулятори швидкості обертання асинхронними двигунами в індустрію та інші галузі.

Поява силових модулів на базі IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor або біполярний транзистор з ізольованим затвором) частково призвела до швидкого зросту ринку перетворювачів частоти. Ці силові модулі розраховані на напругу кілька кіловольт, струм до кількох кілоампер та частоту 30 кілогерц і вище.

Принцип регулювання швидкості обертання перетворювачем частоти розглянемо на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який є наймасовішим електродвигуном. Настільки масовим, що обсяг спожитої електроенергії приводами з асинхронним двигуном становить більше 50% усієї споживаної електроенергії.

Цей двигун складається із двох основних частин: статора з трьохфазною обмоткою, яка утворює полюси, та ротора, що вільно рухається. При подачі трифазного живлення на обмотки статора електродвигуна, які зміщенні один відносно одного на 120 градусів, утворюється обертове магнітне поле, яке індукує електрорушійну силу у обмотці ротора, в результаті чого формується роторне поле. Взаємодія статорного та роторного магнітного поля утворює сумарний магнітний потік. Таким чином на обмотку ротора починає діяти обертовий електромагнітний момент у результаті взаємодії струмів ротора з магнітним потоком, що змушує ротор обертатися.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При чому електромагнітний момент ротора буде створюватися лише за умови, що швидкість обертання ротора буде менша за швидкість обертання магнітного поля статора. Характеристика що описує різницю між швидкістю обертання поля ротора і статора називається ковзанням.

Регулювати швидкість ротора асинхронного двигуна можна зміною амплітуди живлячої напруги, зміною частоти напруги та зміною кількості пар полюсів статора.

Перетворювачі частоти можна поділити на:

- з безпосереднім зв'язком;
- з проміжним зв'язком.

Представники першої категорії формують вихідну напругу синусоїдальної форми на основі ділянок синусоїд перетвореної вхідної напруги, при чому максимальна вихідна частота не може бути рівною вхідній. Вихідна частота перетворювачів даного типу знаходиться в діапазоні від 0 до 25-33 Гц.

Однак найбільшого поширення одержав перетворювач частоти другого типу, тобто з проміжним контуром постійного струму, виконаного на основі інвертора напруги. На рисунку 1.7 наведена структурна схема цього перетворювача. За допомогою діодної мостової схеми вхідна змінна напруга мережі випрямляється, а пульсації згладжуються проміжним індуктивно-ємнісним фільтром.

Таким чином на вхід інвертора, який виконується на силових IGBT модулях, подається випрямлена напруга, яка перетворюється цим пристроєм назад у змінну, але вже з необхідним значенням частоти і амплітуди напруги. Для цього перетворення в інверторах використовується метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), який формує вихідний сигнал перетворювача послідовністю імпульсів напруги сталої амплітуди і тривалості, яка змінюється, при чому на індуктивному навантаженні, а саме на обмотці статора електродвигуна, формується струм синусоїдальної форми. За

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допомогою цього методу можливо регулювати частоту в діапазоні від 0 до кількох тисяч герців.

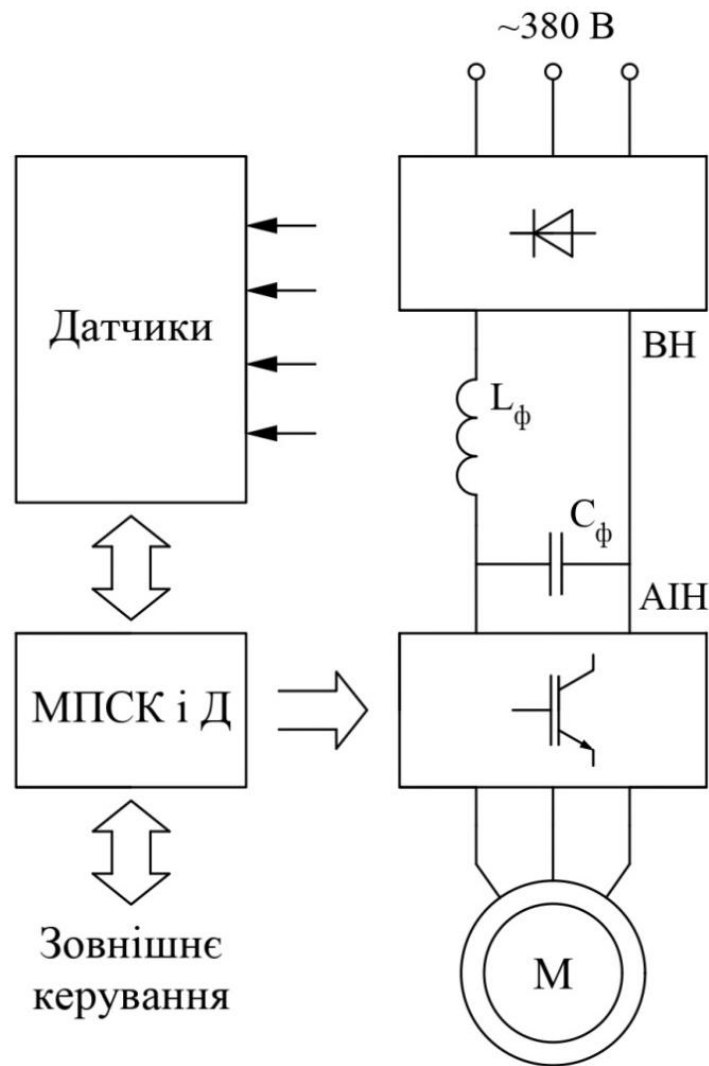


Рисунок 1.7 – Спрощена функціональна схема перетворювача частоти з проміжним контуром постійного струму: МПСК – мікропроцесорна система керування і діагностики; ВН – випрямляч напруги; АІН – автономний інвертор напруги; М – двигун; L_{ϕ} , C_{ϕ} – індуктивність та ємність фільтра.

Структурна схема системи автоматичного керування такого частотно-регульованого електроприводу наведена на рисунку 1.8.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

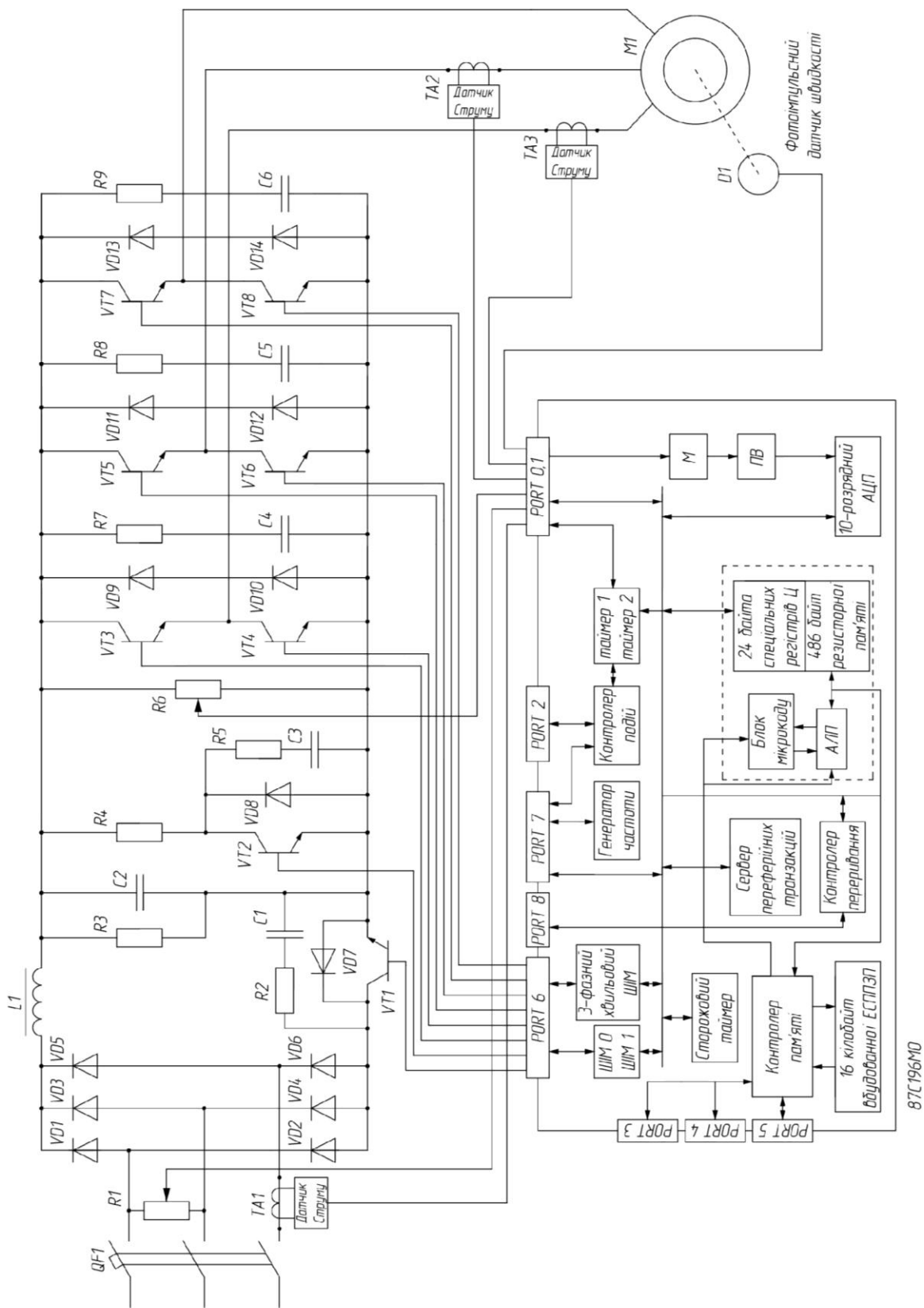


Рисунок 1.8 – Структурна схема системи автоматичного керування електроприводом ліфта

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

34

1.2.3 Обґрунтування закону частотного регулювання

Частотне регулювання у найпростішому його виконанні виконується шляхом зміни амплітуди коливань напруги та частоти трифазного джерела живлення. Швидкість асинхронного двигуна можна прямопропорційно регулювати зміною частоти, зменшуючи її або збільшуючи, при чому швидкість обертання можливо збільшити вище номінальної.

При використанні частот регулювання нижче номінальної, можливо обрати такий закон частотного керування, тобто таке співвідношення частоти і амплітуди напруги, яка живить двигун, що магнітний потік машини буде підтримуватися незмінним.

Таким чином максимальний момент електродвигуна теж буде зберігатися незмінним, що забезпечує у всьому діапазоні регулювання сталу перевантажувальну здатність при незмінному моменті навантаження. При використанні частот регулювання вище номінальної, яке забезпечують перетворювачі частоти з проміжним контуром постійного струму, застосовується режим зменшеного магнітного потоку двигуна, оскільки амплітуду напруги залишають на рівні номінальної.

Найбільш розповсюдженим законом частотного керування, через простоту його реалізації, є закон одночасного регулювання частоти та напруги статора з дотриманням наступних залежностей: $U/f = \text{const}$; $U^2/f = \text{const}$; $U/\sqrt{f} = \text{const}$. У даній роботі буде проводитися дослідження режимів електропривода для $U/f = \text{const}$.

1.2.4 Вибір перетворювача частоти

Регулювання швидкості в асинхронному електродвигуні здійснюється за допомогою частоти. Для цих цілей застосовується частотний перетворювач. Його вибирають по номінальній потужності, напрузі і струму двигуна. З довідника японської фірми OMRON вибираємо частотний перетворювач SYSDRIVE 3G3FV з характеристиками приведеними в таблиці 1.3.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.3 - Технічні дані SYSDRIVE 3G3FV

Вхідна напруга	3 фази, 380 В – 460 В; 1 чи 3 фази 220 В
Потужність	4 – 300 кВт
Вихідна частота	0,1 – 400 Гц
Керування	U/f і Vector Control
Ступінь захисту	IP20/PROO

Таблиця 1.4 - Спеціальні додаткові пристрої

Найменування	Модель	Опис
Гальмовий блок	3G3IV-PCDBR	Використовується в комбінації з блоком гальмового резистора для зменшення часу гальмування двигуна. Не є необхідним для інверторів класу 200 В потужністю до 7,5 кВт чи класу 400 В потужністю до 15 кВт.
Блок гальмового резистора	3G3IV-PLKEB	Поглинає енергію регенерації двигуна і зменшує час гальмування двигуна.
Гальмовий резистор	3G3IV-PERF 150WJ 01	Використовується для інверторів класу 200 В потужністю до 3,7 кВт і інверторів класу 400 В потужністю до 2,2 кВт. Поглинає енергію регенерації двигуна і зменшує час гальмування двигуна.
Дросель для ланцюга постійного струму	3G3HV-PUZDAB	Забезпечує зниження гармонійних складових струмів і поліпшує фактор потужності інвертора 3G3FV. Моделі потужністю від 18,5 кВт і більше мають вбудований дросель у ланцюзі постійного струму.
Кабель приєднання ЦПУ.	3G3FV-PCN125 (1m)	Спеціальний кабель для інверторів серії 3G3FV. Використовується для приєднання ЦПУ до інвертора, коли вони встановлені роздільно.
	3G3IV-PCN325 (3m)	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

36

Таблиця 1.5 - Периферійні пристрої, які встановлюються окремо

Найменування	Модель	Опис
Цифровий вимірвальний пристрій	КЗТJ-V11	Підключається до багатофункціонального аналогового виходу інвертора. Дозволяє контролювати швидкість чи обертання його лінійну швидкість.
Аналоговий пульт керування (стандартного типу, металевий корпус)	G3IV-RJVIOP96	Дозволяє здійснювати установку задатчика частоти, а також включення і вимикання за допомогою дистанційних аналогових команд (50 максимум). Характеристики завдання частоти: 75 Гц. 150 Гц. 220 Гц.
Аналоговий пульт керування (стандартного типу, металевий корпус)	G3IV-RJVIOP95	Дозволяє здійснювати установку задатчика частоти, а також включення і вимикання за допомогою дистанційних аналогових команд (50 м максимум). Характеристики завдання частоти: 60/320 Гц, 90/180 Гц.

1.3 Аналіз статичних режимів електропривода ліфта

1.3.1 Схема заміщення електропривода

Асинхронний двигун є активно-індуктивним навантаженням, фазовий кут φ якого залежить від ковзання s . На рисунку 1.9 зображена схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором.

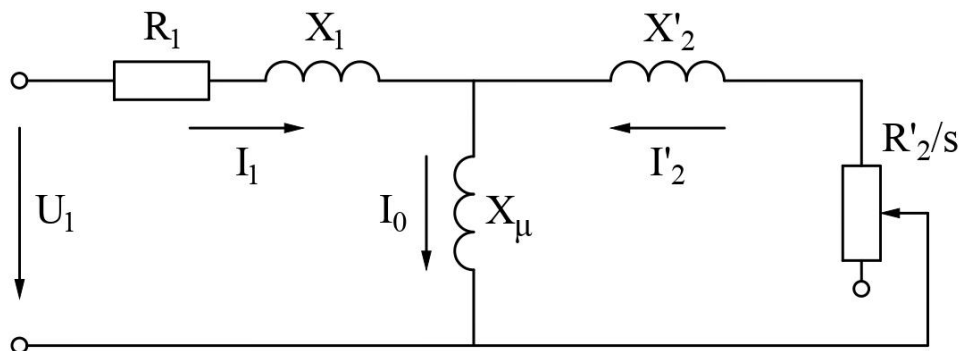


Рисунок 1.9 – Схема заміщення асинхронного двигуна з частотним керуванням

Використовуючи T-подібну схему заміщення коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)$ та модуль еквівалентного навантаження Z_e , що залежить від ковзання, визначають наступним чином:

Модуль еквівалентного навантаження:

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} \quad (1.53)$$

$$Z_e = \sqrt{13,22^2 + 10,85^2} = 17,1 \text{ Ом}$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos(\varphi) = \frac{R_e}{Z_e} \quad (1.54)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{13,22}{17,1} = 0,773$$

Перерахунок величин опорів з відносних одиниці в іменовані.

Активний номінальний опір статора:

$$R_1 = R'_1 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (1.55)$$

$$R_1 = 0,079 \cdot \frac{220}{15,1} = 0,079 \cdot 14,6 = 1,153 \text{ Ом}$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Індуктивний номінальний опір статора:

$$X_1 = X'_1 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (1.56)$$

$$X_1 = 0,079 \cdot \frac{220}{15,1} = 0,079 \cdot 14,6 = 1,153 \text{ Ом}$$

Активний номінальний опір ротора, приведений до обмотки статора:

$$R'_2 = R''_2 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (1.57)$$

$$R'_2 = 0,081 \cdot 14,6 = 1,183 \text{ Ом}$$

Індуктивний номінальний опір ротора, приведений до обмотки статора:

$$X'_2 = X''_2 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (1.58)$$

$$X'_2 = 0,12 \cdot 14,6 = 1,752 \text{ Ом}$$

Номінальний індуктивний опір ланцюга намагнічування:

$$X_\mu = X'_\mu \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (1.59)$$

$$X_\mu = 1,9 \cdot 14,6 = 27,74 \text{ Ом}$$

Активний еквівалентний опір при номінальному ковзанні:

$$R_e(s_H) = R_1 + \frac{\left(X_\mu^2 \cdot \frac{R'_2}{s_H}\right)}{\left(\frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + (X'_2 + X_\mu)^2} \quad (1.60)$$

$$R_e(s_H) = 1,153 + \frac{27,74^2 \cdot \frac{1,183}{0,06}}{\left(\frac{1,183}{0,06}\right)^2 + (1,752 + 27,74)^2} = 13,22 \text{ Ом}$$

Індуктивний еквівалентний опір при номінальному ковзанні:

$$X_e(s_H) = X_1 + X_\mu \frac{\left(\frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X'_2 \cdot (X'_2 + X_\mu)}{\left(\frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + (X'_2 + X_\mu)^2} \quad (1.61)$$

$$X_e(s_H) = 1,153 + 27,74 \cdot \frac{\left(\frac{1,183}{0,06}\right)^2 + 1,752 \cdot (1,752 + 27,74)}{\left(\frac{1,183}{0,06}\right)^2 + (1,752 + 27,74)^2} = 10,85 \text{ Ом}$$

1.3.2 Розрахунок природних швидкісних характеристик

Синхронна швидкість поля статора:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{НОМ}}}{p} \quad (1.62)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,72 \text{ рад/с}$$

Номинальне ковзання:

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{НОМ}}}{\omega_0} \quad (1.63)$$

$$s_H = \frac{104,72 - 98,39}{104,72} = 0,06$$

Критичний момент:

$$M_{\text{кр}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)} \quad (1.64)$$

$$M_{\text{кр}} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,72 \cdot \left(1,153 + \sqrt{1,153^2 + (1,153 + 1,752)^2} \right)} = 162,04 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальний момент:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_0(1 - s_H)} \quad (1.65)$$

$$M_H = \frac{6300}{104,72 \cdot (1 - 0,06)} = 64 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Функція моменту по формулі Клосса:

$$M_H = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}}(1 + a \cdot s_{\text{кр}})}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{кр}}} \quad (1.66)$$

де:

$$a = \frac{R_1}{R_2'} \quad (1.67)$$

$$a = \frac{1,153}{1,183} = 0,975$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Критичне ковзання:

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 \cdot (X_1 + X'_2)^2}} \quad (1.68)$$

$$s_{кр} = \frac{1,183}{\sqrt{1,153^2 \cdot (1,153 + 1,752)^2}} = 0,379$$

Функція швидкості за ковзанням s:

$$\omega(s) = \omega_0 \cdot (1 - s) \quad (1.69)$$

Таблиця 1.6 – Розрахунок природної механічної та швидкісної характеристики

s	M, Н·м	ω, рад/с	s	M, Н·м	ω, рад/с
0,00001	0,012	104,72	0,25	152,276	78,54
0,01	11,479	103,67	0,3	158,857	73,30
0,02	22,482	102,63	0,34	161,345	69,12
0,03	32,995	101,58	0,35	161,884	67,02
0,04	43,009	100,53	0,36	162,006	65,97
0,05	52,519	99,48	0,37	162,040	64,93
0,06	61,524	98,44	0,38	161,992	63,88
0,07	70,027	97,39	0,39	161,868	62,83
0,08	78,035	96,34	0,4	161,675	61,78
0,09	85,557	95,30	0,41	157,595	52,36
0,1	92,603	94,25	0,5	157,595	52,36
0,11	99,187	93,20	0,55	154,146	47,12
0,12	105,324	92,15	0,6	150,258	41,89
0,13	111,030	91,11	0,65	146,135	36,65
0,14	116,322	90,06	0,7	141,916	31,42
0,15	121,217	89,01	0,75	137,697	26,18
0,16	125,734	87,96	0,8	133,540	20,94
0,17	129,890	86,92	0,85	129,486	15,71
0,18	133,704	85,87	0,9	125,561	10,47
0,19	137,194	84,82	0,95	121,779	5,24
0,2	140,376	83,78	1	118,149	0,00

На рис. 1.10 зображена природна механічна характеристика, яка була побудована за результатами обчислень.

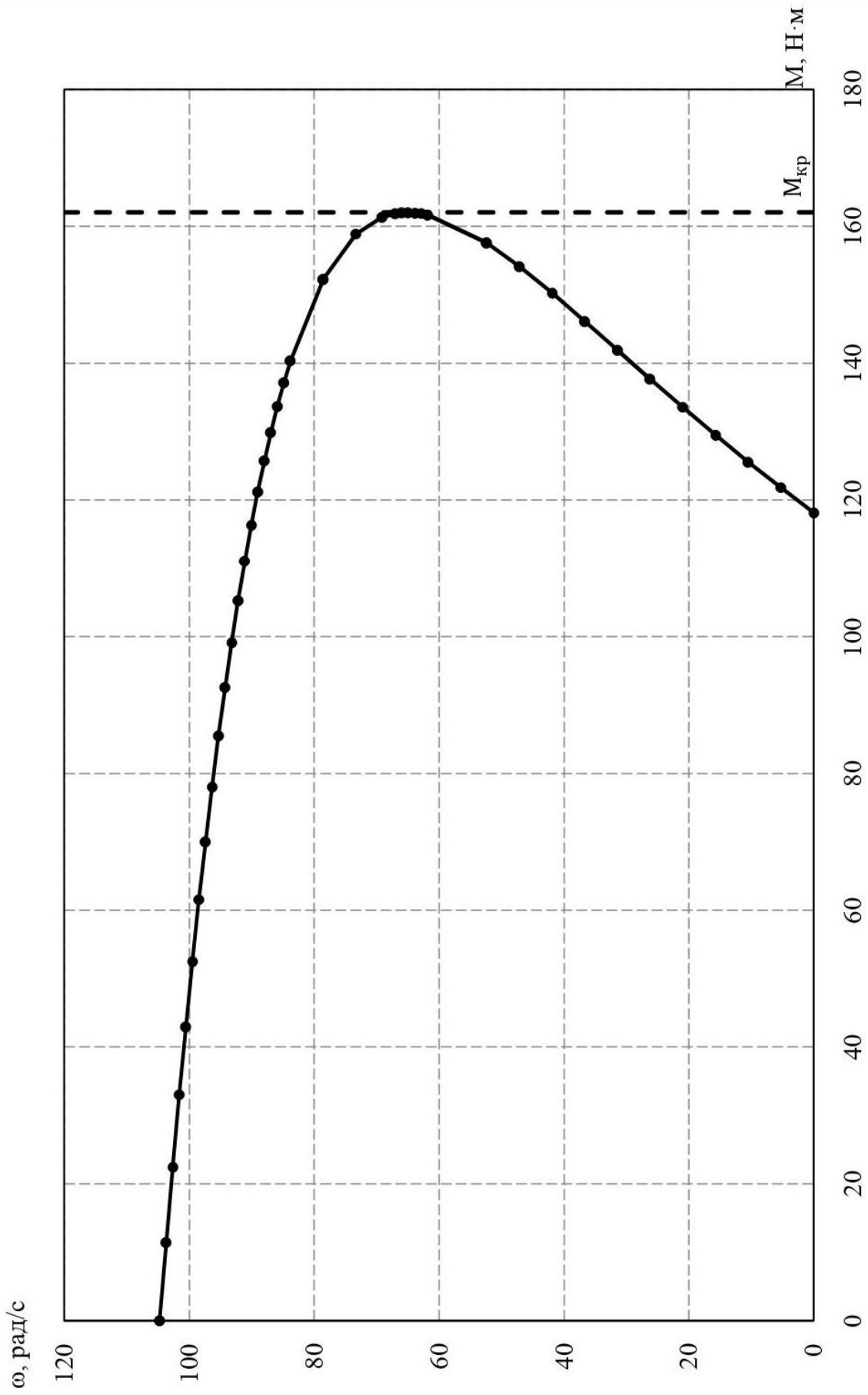


Рисунок 1.10 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Для розрахунку природної електромеханічної характеристики
використаємо наступні формули:

$$I_1 = \frac{U_{\text{фн}}}{\sqrt{(R_1 + R_B)^2 + (X_1 + X_B)^2}} \quad (1.70)$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s) \quad (1.71)$$

$$R_B(s) = \frac{\left(X_\mu^2 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_\mu)^2} \quad (1.72)$$

$$R_B(s) = \frac{27,74^2 \cdot \frac{1,183}{s}}{\left(\frac{1,183}{s}\right)^2 + (1,752 + 27,74)^2}$$

$$X_B(s) = X_\mu \frac{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X'_2 \cdot (X'_2 + X_\mu)}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_\mu)^2} \quad (1.73)$$

$$X_B(s) = 27,74 \cdot \frac{\left(\frac{1,183}{s}\right)^2 + 1,752 \cdot (1,752 + 27,74)}{\left(\frac{1,183}{s}\right)^2 + (1,752 + 27,74)^2}$$

Результати обчислень занесемо в таблицю 1.7.

Таблиця 1.7 – Розрахунок природної електромеханічної характеристики

s	ω , рад/с	R, Ом	X, Ом	I, А
0,00001	104,719	1,1595	28,8930	7,6082
0,01	103,6728	7,2771	27,3663	7,7691
0,02	102,6256	11,5722	23,6980	8,3420
0,03	101,5784	13,6673	19,5336	9,2281
0,04	100,5312	14,1990	15,8836	10,3262
0,05	99,484	13,8886	13,0181	11,5571
0,06	98,4368	13,2085	10,8605	12,8654
0,07	97,3896	12,4087	9,2508	14,2142
0,08	96,3424	11,6074	8,0428	15,5790
0,09	95,2952	10,8549	7,1250	16,9434

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

43

Продовження таблиці 1.7

s	ω , рад/с	R, Ом	X, Ом	I, А
0,1	94,248	10,1686	6,4173	18,2964
0,11	93,2008	9,5510	5,8633	19,6303
0,12	92,1536	8,9982	5,4234	20,9399
0,13	91,1064	8,5040	5,0691	22,2216
0,14	90,0592	8,0617	4,7804	23,4730
0,15	89,012	7,6648	4,5423	24,6924
0,16	87,9648	7,3076	4,3439	25,8788
0,17	86,9176	6,9849	4,1770	27,0318
0,18	85,8704	6,6925	4,0354	28,1512
0,19	84,8232	6,4265	3,9143	29,2371
0,2	83,776	6,1837	3,8099	30,2897
0,25	78,54	5,2344	3,4558	35,0750
0,3	73,304	4,5805	3,2592	39,1344
0,35	68,068	4,1046	3,1392	42,5746
0,4	62,832	3,7435	3,0607	45,4972
0,45	57,596	3,4605	3,0066	47,9912
0,5	52,36	3,2329	2,9678	50,1309
0,55	47,124	3,0459	2,9390	51,9775
0,6	41,888	2,8896	2,9170	53,5808
0,65	36,652	2,7571	2,8999	54,9812
0,7	31,416	2,6433	2,8863	56,2115
0,75	26,18	2,5445	2,8753	57,2984
0,8	20,944	2,4580	2,8664	58,2636
0,85	15,708	2,3816	2,8589	59,1252
0,9	10,472	2,3136	2,8526	59,8978
0,95	5,236	2,2527	2,8474	60,5937
1	0	2,1979	2,8428	61,2230

На рис. 1.11 зображена природна електромеханічна характеристика, яка була побудована за результатами обчислень.

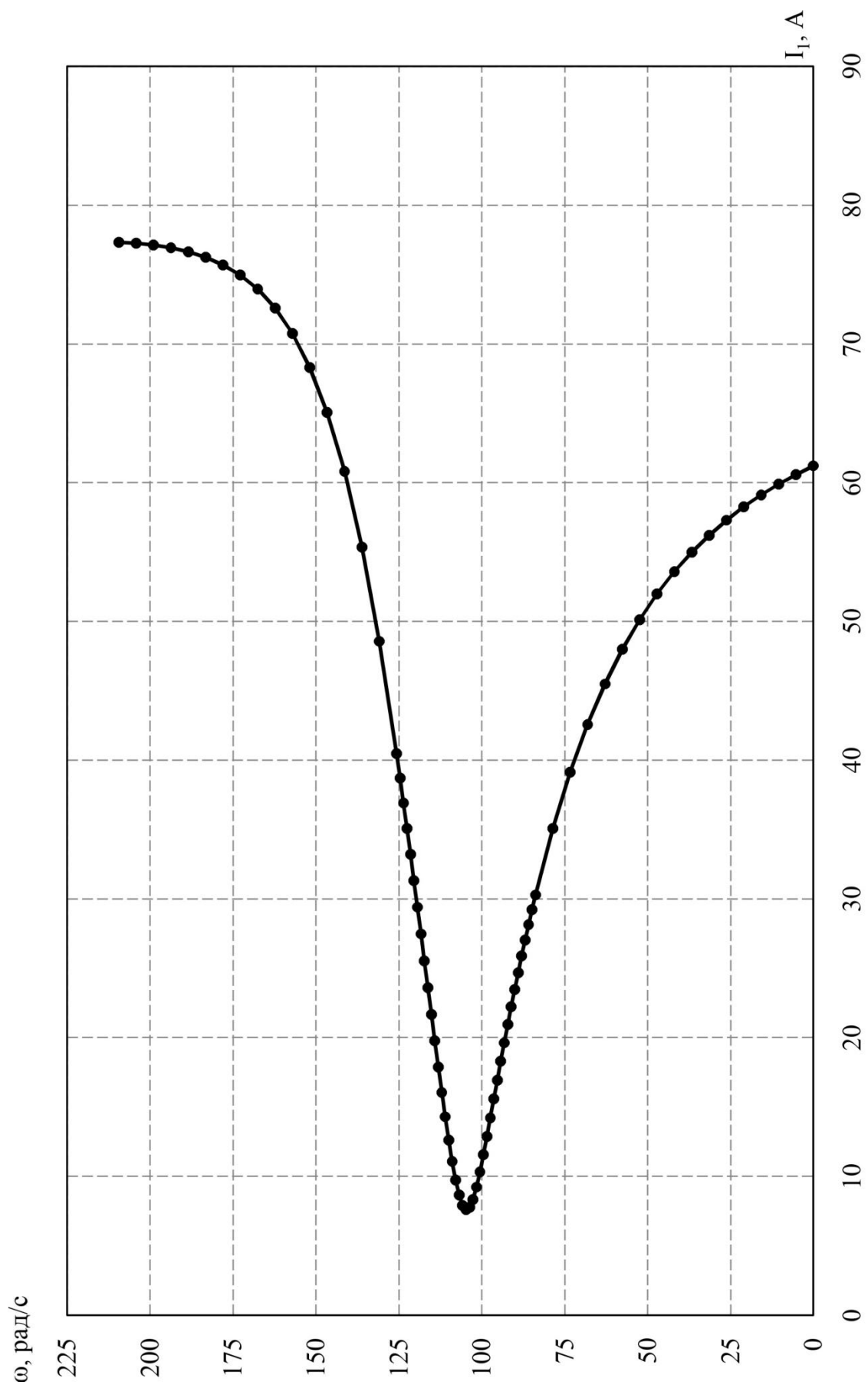


Рисунок 1.11 – Природна електромеханічна характеристика асинхронного двигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

45

1.3.3 Розрахунок швидкісних та механічних характеристик асинхронного двигуна при частотному регулюванні

Побудова штучних механічних характеристик двигуна

Керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором здійснюємо за законом частотного керування швидкості $U/f = \text{const}$, який виконується перетворювачем частоти, враховуючи падіння напруги на активному опорі обмотки статора R_1 , що дозволяє зберігати перевантажувальну здатність двигуна по моменту, $M_k = \text{const}$.

Вирази для розрахунку взяті з підручника [5].

Частота, яка відповідає максимальній швидкості при $\omega_{\text{max}} = 98,39$ рад/с:

$$f_1 = \frac{\omega_{\text{max}} \cdot p}{2 \cdot \pi} \quad (1.74)$$
$$f_1 = \frac{98,39 \cdot 3}{2 \cdot 3,14} = 47 \text{ Гц}$$

Частота, яка відповідає середній швидкості при $\omega_{\text{cp}} = 49,2$ рад/с:

$$f_2 = \frac{\omega_{\text{max}} \cdot p}{2 \cdot \pi} \quad (1.75)$$
$$f_2 = \frac{49,2 \cdot 3}{2 \cdot 3,14} = 23,5 \text{ Гц}$$

Мінімальна частота та швидкість асинхронного двигуна, яка обмежена межею регулювання частоти перетворювача частоти, при $f_3 = 0,1$ Гц:

$$\omega_{\text{min}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_3}{p} \quad (1.76)$$
$$\omega_{\text{min}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1}{3} = 0,209 \text{ рад/с}$$

Коефіцієнт розсіювання статора і ротора та загальний коефіцієнт:

$$\tau_1 = \frac{X_1}{X_\mu} \quad (1.77)$$
$$\tau_1 = \frac{1,153}{27,74} = 0,042$$

$$\tau_2 = \frac{X'_2}{X_\mu} \quad (1.78)$$

$$\tau_2 = \frac{1,752}{27,74} = 0,063$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 \quad (1.79)$$

$$\tau = 0,042 + 0,063 + 0,042 \cdot 0,063 = 0,108$$

Коефіцієнти, які залежать від параметрів двигуна: $f(R_1, R_2, X_1, X_2, X_\mu)$

$$b = R_1 \cdot (1 + \tau_2) \quad (1.80)$$

$$b = 1,153 \cdot (1 + 0,063) = 1,226$$

$$c = X_\mu \cdot \tau \quad (1.81)$$

$$c = 27,74 \cdot 0,108 = 2,996$$

$$d = \frac{R_1}{X_\mu} \quad (1.82)$$

$$d = \frac{1,153}{27,74} = 0,042$$

$$e = 1 + \tau_1 \quad (1.83)$$

$$e = 1 + 0,042 = 1,042$$

При максимальному значенні ω :

Синхронна частота обертання магнітного поля асинхронного двигуна на частоті f_1 :

$$\omega_{c1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \quad (1.84)$$

$$\omega_{c1} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 47}{3} = 98,39 \text{ рад/с}$$

Відносна частота напруги статора:

$$\alpha_1 = \frac{f_1}{f_{\text{НОМ}}} \quad (1.85)$$

$$\alpha_1 = \frac{47}{50} = 0,94$$

Відносна напруга на статорі:

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{R_1 \cdot \alpha_1 + \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha_1^2)(d^2 + e^2 \cdot \alpha_1^2)}}{R_1 + \sqrt{(b^2 + c^2)(d^2 + e^2)}}} \quad (1.86)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{1,153 \cdot 0,94 + \sqrt{(1,226^2 + 2,996^2 \cdot 0,94^2)(0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,94^2)}}{1,153 + \sqrt{(1,226^2 + 2,996^2)(0,042^2 + 1,042^2)}}} = 0,9509$$

Критичний момент:

$$M_{кр1} = \frac{3 \cdot (U_{1\phi} \cdot \gamma_1)^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \cdot \alpha_1 + \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha_1^2)(d^2 + e^2 \cdot \alpha_1^2)}} \quad (1.87)$$

$$M_{кр1} = \frac{3 \cdot (220 \cdot 0,9509)^2}{2 \cdot 104,72 \cdot (1,153 \cdot 0,94 + \sqrt{9,066})} = 153,09 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Абсолютне критичне ковзання:

$$\beta_{кр1} = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 \cdot \alpha_1^2}{b^2 + c^2 \cdot \alpha_1^2}} \quad (1.88)$$

$$\beta_{кр1} = 1,183 \cdot \sqrt{\frac{0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,94^2}{1,226^2 + 2,996^2 \cdot 0,94^2}} = 0,377$$

Формула Клосса, перетворена для випадку із змінною частотою:

$$M_1(\beta) = \frac{2 \cdot M_{кр1} (1 + q_1 \cdot \beta_{кр1})}{\frac{\beta}{\beta_{кр1}} + \frac{\beta_{кр1}}{\beta} + 2 \cdot q_1 \cdot \beta_{кр1}} \quad (1.89)$$

де

$$q_1 = \frac{R_1 \cdot \alpha_1}{R'_2 \cdot (d^2 + e^2 \cdot \alpha_1^2)} \quad (1.90)$$

$$q_1 = \frac{1,153 \cdot 0,94}{1,183 \cdot (0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,94^2)} = 0,953$$

Швидкість за функцією β :

$$\omega_1(\beta) = \omega_{c1} \cdot (1 - \beta) \quad (1.91)$$

При середньому значенні ω :

Синхронна частота обертання магнітного поля асинхронного двигуна на частоті f_2 :

$$\omega_{c2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_2}{p} \quad (1.92)$$

$$\omega_{c2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 23,5}{3} = 49,19 \text{ рад/с}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відносна частота напруги статора:

$$\alpha_2 = \frac{f_2}{f_{\text{НОМ}}} \quad (1.93)$$

$$\alpha_2 = \frac{23,5}{50} = 0,47$$

Відносна напруга на статорі:

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{R_1 \cdot \alpha_2 + \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha_2^2)(d^2 + e^2 \cdot \alpha_2^2)}}{R_1 + \sqrt{(b^2 + c^2)(d^2 + e^2)}}} \quad (1.94)$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{1,153 \cdot 0,47 + \sqrt{(1,226^2 + 2,996^2 \cdot 0,47^2)(0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,47^2)}}{1,153 + \sqrt{(1,226^2 + 2,996^2)(0,042^2 + 1,042^2)}}} = 0,5677$$

Критичний момент:

$$M_{\text{кр}2} = \frac{3 \cdot (U_{1\phi} \cdot \gamma_2)^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \cdot \alpha_2 + \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha_2^2)(d^2 + e^2 \cdot \alpha_2^2)})} \quad (1.95)$$

$$M_{\text{кр}2} = \frac{3 \cdot (220 \cdot 0,5677)^2}{2 \cdot 104,72 \cdot (1,153 \cdot 0,47 + \sqrt{0,842})} = 153,09 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Абсолютне критичне ковзання:

$$\beta_{\text{кр}2} = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 \cdot \alpha_2^2}{b^2 + c^2 \cdot \alpha_2^2}} \quad (1.96)$$

$$\beta_{\text{кр}2} = 1,183 \cdot \sqrt{\frac{0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,47^2}{1,226^2 + 2,996^2 \cdot 0,47^2}} = 0,312$$

Формула Клосса, перетворена для випадку із змінною частотою:

$$M_2(\beta) = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}2} (1 + q_2 \cdot \beta_{\text{кр}2})}{\frac{\beta}{\beta_{\text{кр}2}} + \frac{\beta_{\text{кр}2}}{\beta} + 2 \cdot q_2 \cdot \beta_{\text{кр}2}}, \quad (1.97)$$

де:

$$q_2 = \frac{R_1 \cdot \alpha_2}{R'_2 \cdot (d^2 + e^2 \cdot \alpha_2^2)} \quad (1.98)$$

$$q_2 = \frac{1,153 \cdot 0,47}{1,183 \cdot (0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,47^2)} = 1,896$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість за функцією β :

$$\omega_2(\beta) = \omega_{c2} \cdot (1 - \beta) \quad (1.99)$$

При мінімальному значенні ω :

Синхронна частота обертання магнітного поля асинхронного двигуна на частоті f_3 :

$$\omega_{c3} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_3}{p} \quad (1.100)$$

$$\omega_{c3} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1}{3} = 0,209 \text{ рад/с}$$

Відносна частота напруги статора:

$$\alpha_3 = \frac{f_3}{f_{ном}} \quad (1.101)$$

$$\alpha_3 = \frac{0,1}{50} = 0,002$$

Відносна напруга на статорі:

$$\gamma_3 = \sqrt{\frac{R_1 \cdot \alpha_3 + \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha_3^2)(d^2 + e^2 \cdot \alpha_3^2)}}{R_1 + \sqrt{(b^2 + c^2)(d^2 + e^2)}}} \quad (1.102)$$

$$\gamma_3 = \sqrt{\frac{1,153 \cdot 0,002 + \sqrt{(1,226^2 + 2,996^2 \cdot 0,002^2)(0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,002^2)}}{1,153 + \sqrt{(1,226^2 + 2,996^2)(0,042^2 + 1,042^2)}}$$

$$\gamma_3 = 0,1094$$

Критичний момент:

$$M_{кр3} = \frac{3 \cdot (U_{1\phi} \cdot \gamma_3)^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \cdot \alpha_3 + \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha_3^2)(d^2 + e^2 \cdot \alpha_3^2)})} \quad (1.103)$$

$$M_{кр3} = \frac{3 \cdot (220 \cdot 0,1094)^2}{2 \cdot 104,72 \cdot (1,153 \cdot 0,47 + \sqrt{0,00266})} = 153,09 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Абсолютне критичне ковзання:

$$\beta_{кр3} = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 \cdot \alpha_3^2}{b^2 + c^2 \cdot \alpha_3^2}} \quad (1.104)$$

$$\beta_{крз} = 1,183 \cdot \sqrt{\frac{0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,002^2}{1,226^2 + 2,996^2 \cdot 0,002^2}} = 0,041$$

Формула Клосса, перетворена для випадку із змінною частотою:

$$M_3(\beta) = \frac{2 \cdot M_{крз} (1 + q_3 \cdot \beta_{крз})}{\frac{\beta}{\beta_{крз}} + \frac{\beta_{крз}}{\beta} + 2 \cdot q_3 \cdot \beta_{крз}}, \quad (1.105)$$

де:

$$q_3 = \frac{R_1 \cdot \alpha_3}{R_2' \cdot (d^2 + e^2 \cdot \alpha_3^2)}. \quad (1.106)$$

$$q_3 = \frac{1,153 \cdot 0,002}{1,183 \cdot (0,042^2 + 1,042^2 \cdot 0,002^2)} = 1,102$$

Швидкість за функцією β :

$$\omega_3(\beta) = \omega_{с3} \cdot (1 - \beta) \quad (1.107)$$

Результати обчислень занесемо в таблицю 1.8.

Таблиця 1.8 – Розрахунок штучних механічних та швидкісних характеристик

β	$M_1, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\omega_{с1}, \text{рад/с}$	$M_2, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\omega_{с2}, \text{рад/с}$	$M_3, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\omega_{с3}, \text{рад/с}$
0,00001	0,01104	98,3890	0,01562	49,1895	0,07805	0,2090
0,01	10,8254	97,4061	15,0331	48,6981	72,1684	0,2069
0,02	21,2105	96,4222	28,9248	48,2062	121,7630	0,2048
0,03	31,1403	95,4383	41,7237	47,7143	146,2093	0,2027
0,04	40,6047	94,4544	53,4831	47,2224	153,0454	0,2006
0,05	49,5978	93,4705	64,2593	46,7305	150,2500	0,1986
0,06	58,1179	92,4866	74,1096	46,2386	143,0477	0,1965
0,07	66,1666	91,5027	83,0919	45,7467	134,2680	0,1944
0,08	73,7489	90,5188	91,2632	45,2548	125,2950	0,1923
0,09	80,8726	89,5349	98,6793	44,7629	116,7490	0,1902
0,1	87,5475	88,551	105,3940	44,271	108,8709	0,1881
0,11	93,7857	87,5671	111,4588	43,7791	101,7203	0,1860
0,12	99,6007	86,5832	116,9228	43,2872	95,2745	0,1839

Продовження таблиці 1.8

β	$M_1, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\omega_{c1}, \text{рад/с}$	$M_2, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\omega_{c2}, \text{рад/с}$	$M_3, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\omega_{c3}, \text{рад/с}$
0,13	105,0073	85,5993	121,8323	42,7953	89,4773	0,1818
0,14	110,0211	84,6154	126,2310	42,3034	84,2617	0,1797
0,15	114,6586	83,6315	130,1597	41,8115	79,5612	0,1777
0,16	118,9366	82,6476	133,6565	41,3196	75,3142	0,1756
0,17	122,8721	81,6637	136,7568	40,8277	71,4654	0,1735
0,18	126,4822	80,6798	139,4936	40,3358	67,9668	0,1714
0,19	129,7839	79,6959	141,8973	39,8439	64,7762	0,1693
0,2	132,7938	78,712	143,9961	39,352	61,8574	0,1672
0,25	144,0239	73,7925	150,7559	36,8925	50,3806	0,1568
0,3	150,1938	68,873	153,0160	34,433	42,4191	0,1463
0,35	152,7795	63,9535	152,4567	31,9735	36,5977	0,1359
0,4	152,8927	59,034	150,1627	29,514	32,1656	0,1254
0,45	151,3413	54,1145	146,8330	27,0545	28,6826	0,1150
0,5	148,6999	49,195	142,9175	24,595	25,8754	0,1045
0,55	145,3716	44,2755	138,7060	22,1355	23,5659	0,0941
0,6	141,6361	39,356	134,3842	19,676	21,6330	0,0836
0,65	137,6864	34,4365	130,0706	17,2165	19,9920	0,0732
0,7	133,6539	29,517	125,8394	14,757	18,5816	0,0627
0,75	129,6276	24,5975	121,7356	12,2975	17,3565	0,0523
0,8	125,6661	19,678	117,7851	9,838	16,2825	0,0418
0,85	121,8078	14,7585	114,0014	7,3785	15,3335	0,0314
0,9	118,0760	9,839	110,3894	4,919	14,4887	0,0209
0,95	114,4843	4,9195	106,9488	2,4595	13,7320	0,0105
1	111,0394	0	103,6760	0	13,0503	0

На рис. 1.12 зображені штучні механічні характеристики, які були побудовані за результатами обчислень.

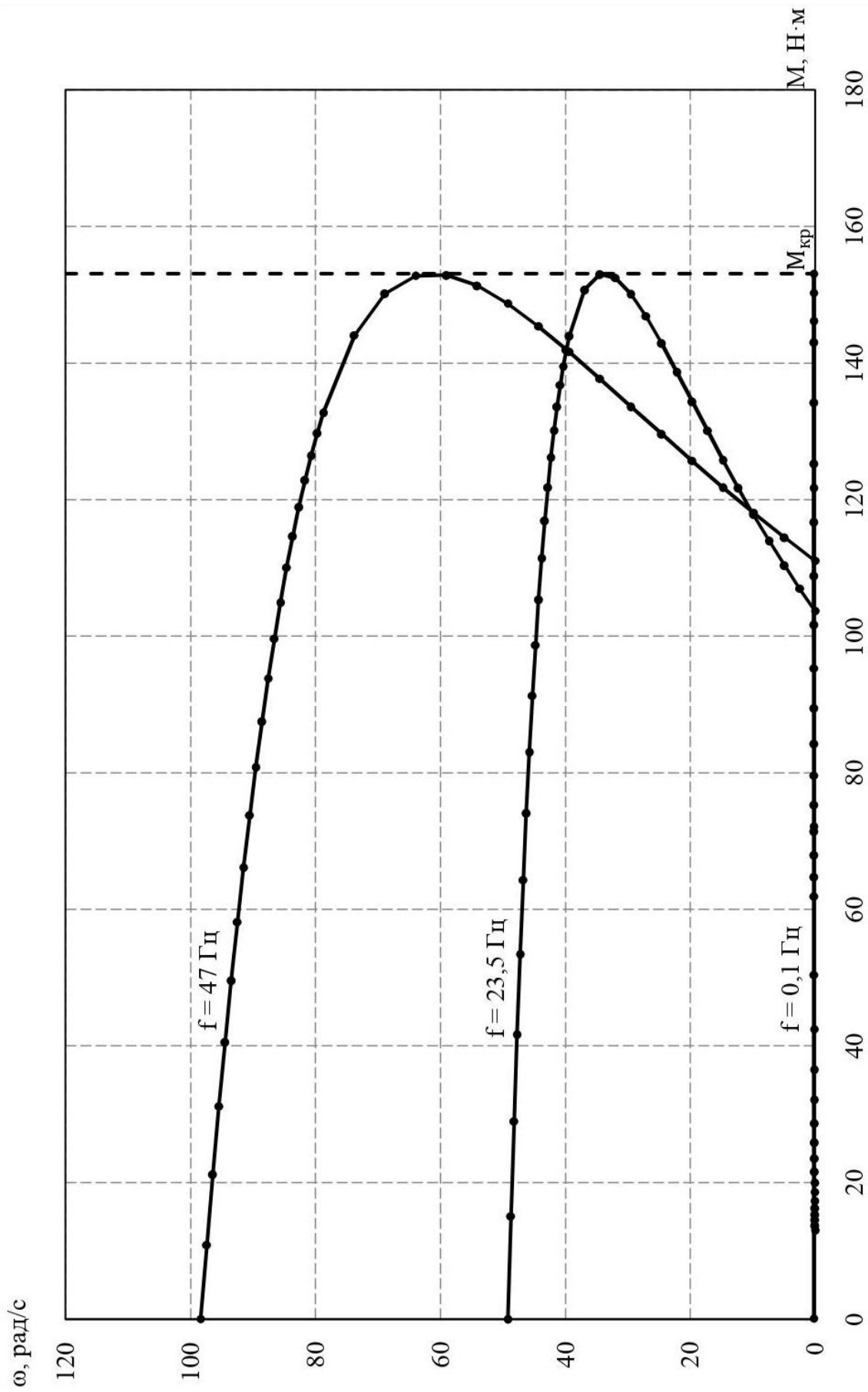


Рисунок 1.12 – Штучні механічні характеристики асинхронного двигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

53

Побудова штучних електромеханічних характеристик.

Для розрахунку штучних електромеханічних характеристик використаємо формули для частотного керування при $\psi_1 = \text{const}$:

$$I_1 = \frac{E_{S.H}}{\sqrt{(R_B)^2 + (X_1 + X_B)^2}} \quad (1.108)$$

де

$$E_{S.H} = \sqrt{(U_{\phi H} \cdot \sin(\varphi_{НОМ}))^2 + (U_{\phi H} \cdot \cos(\varphi_{НОМ}) - I_{1НОМ} R_1)^2} \quad (1.109)$$

$$E_{S.H} = \sqrt{(220 \cdot 0,634)^2 + (220 \cdot 0,773 - 15,1 \cdot 1,153)^2} = 206,78 \text{ В}$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (\alpha - s) \quad (1.110)$$

$$R_B(s) = \frac{\left(X_\mu^2 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_\mu)^2} \quad (1.111)$$

$$R_B(s) = \frac{27,74^2 \cdot \frac{1,183}{s}}{\left(\frac{1,183}{s}\right)^2 + (1,752 + 27,74)^2}$$

$$X_B(s) = X_\mu \frac{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X'_2 \cdot (X'_2 + X_\mu)}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_\mu)^2} \quad (1.112)$$

$$X_B(s) = 27,74 \cdot \frac{\left(\frac{1,183}{s}\right)^2 + 1,752 \cdot (1,752 + 27,74)}{\left(\frac{1,183}{s}\right)^2 + (1,752 + 27,74)^2}$$

при $\alpha_1 = 0,94$ Гц

$$I_1 = \frac{206,78}{\sqrt{(R_B)^2 + (X_1 + X_B)^2}}$$

$$\omega = 104,72 \cdot (0,94 - s)$$

при $\alpha_2 = 0,47$ Гц

$$I_1 = \frac{206,78}{\sqrt{(R_B)^2 + (X_1 + X_B)^2}}$$

$$\omega = 104,72 \cdot (0,47 - s)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

при $\alpha_3 = 0,1$ Гц

$$I_1 = \frac{206,78}{\sqrt{(R_B)^2 + (X_1 + X_B)^2}}$$

$$\omega = 104,72 \cdot (0,002 - s)$$

Результати обчислень занесемо в таблицю 1.9.

Графіки розрахованих залежностей зображені на рисунку 1.13.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.9 – Розрахунок природної електромеханічної характеристики

При $\alpha 1 = 0,94$ Гц					При $\alpha 2 = 0,47$ Гц					При $\alpha 3 = 0,1$ Гц				
s	ω , рад/с	R, Ом	X, Ом	I, А	s	ω , рад/с	R, Ом	X, Ом	I, А	s	ω , рад/с	R, Ом	X, Ом	I, А
-1	203,2	-1,04	2,84	68,29	-1	153,9	-1,04	2,84	68,29	-1	104,9	-1,04	2,84	68,29
-0,95	197,9	-1,10	2,85	67,76	-0,95	148,7	-1,10	2,85	67,76	-0,95	99,7	-1,10	2,85	67,76
-0,9	192,7	-1,16	2,85	67,16	-0,9	143,5	-1,16	2,85	67,16	-0,9	94,5	-1,16	2,85	67,16
-0,85	187,4	-1,23	2,86	66,47	-0,85	138,2	-1,23	2,86	66,47	-0,85	89,2	-1,23	2,86	66,47
-0,8	182,2	-1,30	2,87	65,67	-0,8	133,0	-1,30	2,87	65,67	-0,8	84,0	-1,30	2,87	65,67
-0,75	177,0	-1,39	2,88	64,75	-0,75	127,8	-1,39	2,88	64,75	-0,75	78,7	-1,39	2,88	64,75
-0,7	171,7	-1,49	2,89	63,67	-0,7	122,5	-1,49	2,89	63,67	-0,7	73,5	-1,49	2,89	63,67
-0,65	166,5	-1,60	2,90	62,41	-0,65	117,3	-1,60	2,90	62,41	-0,65	68,3	-1,60	2,90	62,41
-0,6	161,3	-1,74	2,92	60,93	-0,6	112,1	-1,74	2,92	60,93	-0,6	63,0	-1,74	2,92	60,93
-0,55	156,0	-1,89	2,94	59,17	-0,55	106,8	-1,89	2,94	59,17	-0,55	57,8	-1,89	2,94	59,17
-0,5	150,8	-2,08	2,97	57,07	-0,5	101,6	-2,08	2,97	57,07	-0,5	52,6	-2,08	2,97	57,07
-0,45	145,6	-2,31	3,01	54,57	-0,45	96,3	-2,31	3,01	54,57	-0,45	47,3	-2,31	3,01	54,57
-0,4	140,3	-2,59	3,06	51,58	-0,4	91,1	-2,59	3,06	51,58	-0,4	42,1	-2,59	3,06	51,58
-0,35	135,1	-2,95	3,14	48,00	-0,35	85,9	-2,95	3,14	48,00	-0,35	36,9	-2,95	3,14	48,00
-0,3	129,9	-3,43	3,26	43,73	-0,3	80,6	-3,43	3,26	43,73	-0,3	31,6	-3,43	3,26	43,73
-0,25	124,6	-4,08	3,46	38,67	-0,25	75,4	-4,08	3,46	38,67	-0,25	26,4	-4,08	3,46	38,67
-0,2	119,4	-5,03	3,81	32,78	-0,2	70,2	-5,03	3,81	32,78	-0,2	21,2	-5,03	3,81	32,78
-0,19	118,3	-5,27	3,91	31,49	-0,19	69,1	-5,27	3,91	31,49	-0,19	20,1	-5,27	3,91	31,49
-0,18	117,3	-5,54	4,04	30,18	-0,18	68,1	-5,54	4,04	30,18	-0,18	19,1	-5,54	4,04	30,18
-0,17	116,2	-5,83	4,18	28,83	-0,17	67,0	-5,83	4,18	28,83	-0,17	18,0	-5,83	4,18	28,83
-0,16	115,2	-6,15	4,34	27,46	-0,16	66,0	-6,15	4,34	27,46	-0,16	17,0	-6,15	4,34	27,46
-0,15	114,1	-6,51	4,54	26,05	-0,15	64,9	-6,51	4,54	26,05	-0,15	15,9	-6,51	4,54	26,05
-0,14	113,1	-6,91	4,78	24,62	-0,14	63,9	-6,91	4,78	24,62	-0,14	14,9	-6,91	4,78	24,62
-0,13	112,1	-7,35	5,07	23,16	-0,13	62,8	-7,35	5,07	23,16	-0,13	13,8	-7,35	5,07	23,16
-0,12	111,0	-7,85	5,42	21,69	-0,12	61,8	-7,85	5,42	21,69	-0,12	12,8	-7,85	5,42	21,69
-0,11	110,0	-8,40	5,86	20,19	-0,11	60,7	-8,40	5,86	20,19	-0,11	11,7	-8,40	5,86	20,19
-0,1	108,9	-9,02	6,42	18,69	-0,1	59,7	-9,02	6,42	18,69	-0,1	10,7	-9,02	6,42	18,69
-0,09	107,9	-9,70	7,13	17,18	-0,09	58,6	-9,70	7,13	17,18	-0,09	9,6	-9,70	7,13	17,18
-0,08	106,8	-10,45	8,04	15,68	-0,08	57,6	-10,45	8,04	15,68	-0,08	8,6	-10,45	8,04	15,68
-0,07	105,8	-11,26	9,25	14,20	-0,07	56,5	-11,26	9,25	14,20	-0,07	7,5	-11,26	9,25	14,20
-0,06	104,7	-12,06	10,86	12,75	-0,06	55,5	-12,06	10,86	12,75	-0,06	6,5	-12,06	10,86	12,75
-0,05	103,7	-12,74	13,02	11,36	-0,05	54,5	-12,74	13,02	11,36	-0,05	5,4	-12,74	13,02	11,36
-0,04	102,6	-13,05	15,88	10,06	-0,04	53,4	-13,05	15,88	10,06	-0,04	4,4	-13,05	15,88	10,06
-0,03	101,6	-12,51	19,53	8,92	-0,03	52,4	-12,51	19,53	8,92	-0,03	3,4	-12,51	19,53	8,92
-0,02	100,5	-10,42	23,70	7,99	-0,02	51,3	-10,42	23,70	7,99	-0,02	2,3	-10,42	23,70	7,99
-0,01	99,5	-6,12	27,37	7,38	-0,01	50,3	-6,12	27,37	7,38	-0,01	1,3	-6,12	27,37	7,38

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Продовження таблиці 1.9

s	ω, рад/с	R, Ом	X, Ом	L, А	s	ω, рад/с	R, Ом	X, Ом	L, А	s	ω, рад/с	R, Ом	X, Ом	L, А
0,0	98,4	0,01	28,89	7,16	0,0	49,2	0,01	28,89	7,16	1E-05	0,2	0,01	28,89	7,16
0,01	97,4	6,12	27,37	7,38	0,01	48,2	6,12	27,37	7,38	0,01	-0,8	6,12	27,37	7,38
0,02	96,3	10,42	23,70	7,99	0,02	47,1	10,42	23,70	7,99	0,02	-1,9	10,42	23,70	7,99
0,03	95,3	12,51	19,53	8,92	0,03	46,1	12,51	19,53	8,92	0,03	-2,9	12,51	19,53	8,92
0,04	94,2	13,05	15,88	10,06	0,04	45,0	13,05	15,88	10,06	0,04	-4,0	13,05	15,88	10,06
0,05	93,2	12,74	13,02	11,36	0,05	44,0	12,74	13,02	11,36	0,05	-5,0	12,74	13,02	11,36
0,06	92,2	12,06	10,86	12,75	0,06	42,9	12,06	10,86	12,75	0,06	-6,1	12,06	10,86	12,75
0,07	91,1	11,26	9,25	14,20	0,07	41,9	11,26	9,25	14,20	0,07	-7,1	11,26	9,25	14,20
0,08	90,1	10,45	8,04	15,68	0,08	40,8	10,45	8,04	15,68	0,08	-8,2	10,45	8,04	15,68
0,09	89,0	9,70	7,13	17,18	0,09	39,8	9,70	7,13	17,18	0,09	-9,2	9,70	7,13	17,18
0,1	88,0	9,02	6,42	18,69	0,1	38,7	9,02	6,42	18,69	0,1	-10,3	9,02	6,42	18,69
0,11	86,9	8,40	5,86	20,19	0,11	37,7	8,40	5,86	20,19	0,11	-11,3	8,40	5,86	20,19
0,12	85,9	7,85	5,42	21,69	0,12	36,7	7,85	5,42	21,69	0,12	-12,4	7,85	5,42	21,69
0,13	84,8	7,35	5,07	23,16	0,13	35,6	7,35	5,07	23,16	0,13	-13,4	7,35	5,07	23,16
0,14	83,8	6,91	4,78	24,62	0,14	34,6	6,91	4,78	24,62	0,14	-14,5	6,91	4,78	24,62
0,15	82,7	6,51	4,54	26,05	0,15	33,5	6,51	4,54	26,05	0,15	-15,5	6,51	4,54	26,05
0,16	81,7	6,15	4,34	27,46	0,16	32,5	6,15	4,34	27,46	0,16	-16,5	6,15	4,34	27,46
0,17	80,6	5,83	4,18	28,83	0,17	31,4	5,83	4,18	28,83	0,17	-17,6	5,83	4,18	28,83
0,18	79,6	5,54	4,04	30,18	0,18	30,4	5,54	4,04	30,18	0,18	-18,6	5,54	4,04	30,18
0,19	78,5	5,27	3,91	31,49	0,19	29,3	5,27	3,91	31,49	0,19	-19,7	5,27	3,91	31,49
0,2	77,5	5,03	3,81	32,78	0,2	28,3	5,03	3,81	32,78	0,2	-20,7	5,03	3,81	32,78
0,25	72,3	4,08	3,46	38,67	0,25	23,0	4,08	3,46	38,67	0,25	-26,0	4,08	3,46	38,67
0,3	67,0	3,43	3,26	43,73	0,3	17,8	3,43	3,26	43,73	0,3	-31,2	3,43	3,26	43,73
0,35	61,8	2,95	3,14	48,00	0,35	12,6	2,95	3,14	48,00	0,35	-36,4	2,95	3,14	48,00
0,4	56,5	2,59	3,06	51,58	0,4	7,3	2,59	3,06	51,58	0,4	-41,7	2,59	3,06	51,58
0,45	51,3	2,31	3,01	54,57	0,45	2,1	2,31	3,01	54,57	0,45	-46,9	2,31	3,01	54,57
0,5	46,1	2,08	2,97	57,07	0,5	-3,1	2,08	2,97	57,07	0,5	-52,2	2,08	2,97	57,07
0,55	40,8	1,89	2,94	59,17	0,55	-8,4	1,89	2,94	59,17	0,55	-57,4	1,89	2,94	59,17
0,6	35,6	1,74	2,92	60,93	0,6	-13,6	1,74	2,92	60,93	0,6	-62,6	1,74	2,92	60,93
0,65	30,4	1,60	2,90	62,41	0,65	-18,8	1,60	2,90	62,41	0,65	-67,9	1,60	2,90	62,41
0,7	25,1	1,49	2,89	63,67	0,7	-24,1	1,49	2,89	63,67	0,7	-73,1	1,49	2,89	63,67
0,75	19,9	1,39	2,88	64,75	0,75	-29,3	1,39	2,88	64,75	0,75	-78,3	1,39	2,88	64,75
0,8	14,7	1,30	2,87	65,67	0,8	-34,6	1,30	2,87	65,67	0,8	-83,6	1,30	2,87	65,67
0,85	9,4	1,23	2,86	66,47	0,85	-39,8	1,23	2,86	66,47	0,85	-88,8	1,23	2,86	66,47
0,9	4,2	1,16	2,85	67,16	0,9	-45,0	1,16	2,85	67,16	0,9	-94,0	1,16	2,85	67,16
0,95	-1,0	1,10	2,85	67,76	0,95	-50,3	1,10	2,85	67,76	0,95	-99,3	1,10	2,85	67,76
1	-6,3	1,04	2,84	68,29	1	-55,5	1,04	2,84	68,29	1	-104,5	1,04	2,84	68,29

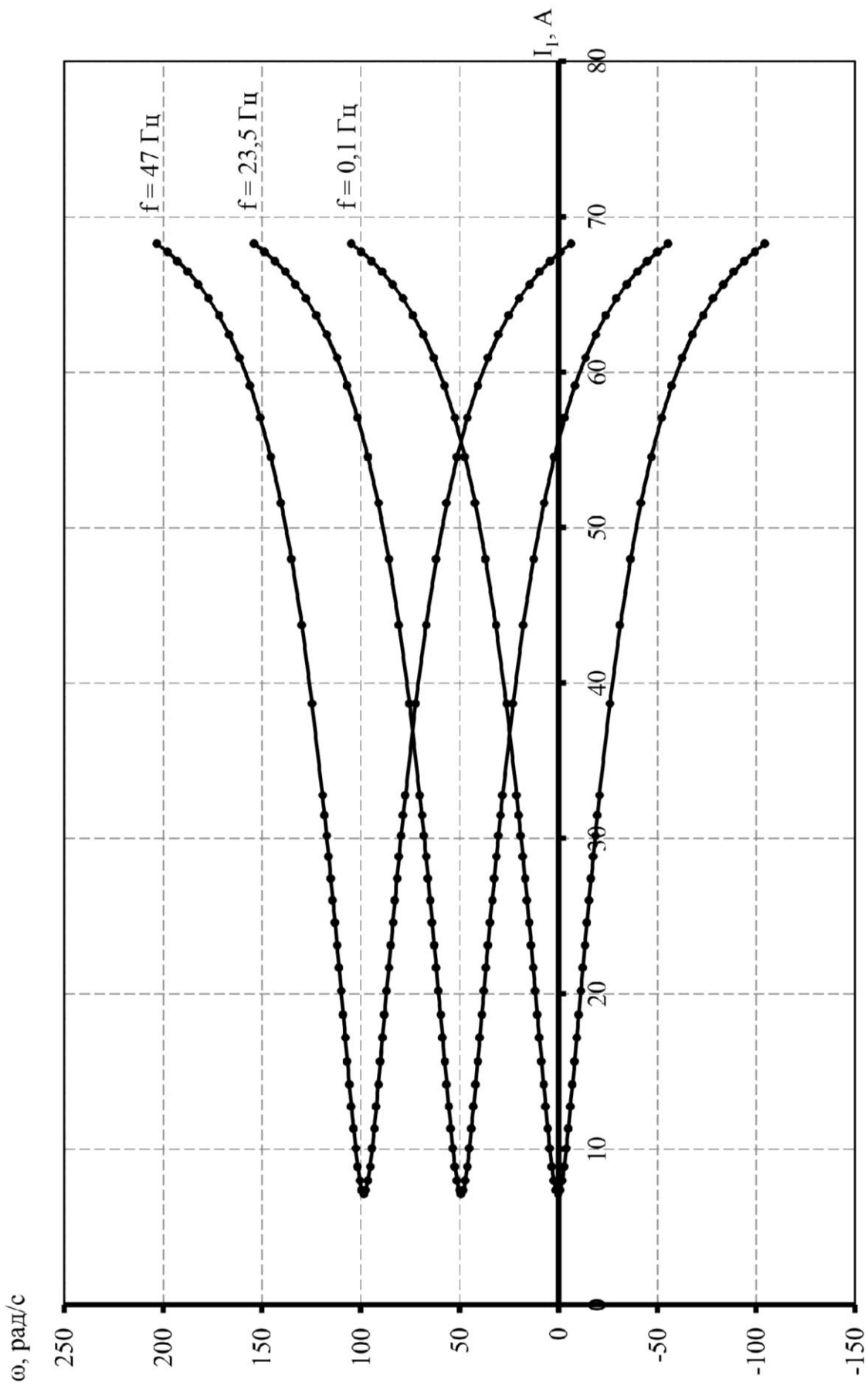


Рисунок 1.13 – Штучні електромеханічні характеристики асинхронного двигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03

Арк.

58

1.3.4 Розрахунок енергетичних показників

Розрахунок втрат асинхронного двигуна.

В усіх електричних машинах перетворення електричної енергії в механічну супроводжується певними втратами енергії, асинхронний двигун теж не є виключенням, бо потужність, яку він споживає з енергомережі P_1 більша за перетворену корисну потужність електродвигуна P_2 на величину втрат P :

$$P_2 = P_1 - P \quad (1.113)$$

Ця величина P уособлює теплову енергію, яка призводить до нагрівання двигуна. Втрати можна поділити на основні та додаткові. До основних відносяться: магнітні, електричні та механічні.

Струм, який проходить через обмотки статора та ротора спричиняє їх нагрівання, що зумовлює електричні втрати P_e , пропорційні квадрату цього струму.

Втрати в обмотці статора:

$$P_{e1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \quad (1.114)$$

Втрати в обмотці ротора:

$$P_{e2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \quad (1.115)$$

де r_1 і r_2 – активні опори обмоток статора і ротора перераховані на робочу температуру $\theta_{роб}$:

$$r_1 = r_{120} \left(1 + \alpha(\theta_{роб} - 20) \right) \quad (1.116)$$

$$r_2 = r_{220} \left(1 + \alpha(\theta_{роб} - 20) \right) \quad (1.117)$$

де r_{120} і r_{220} – активні опори обмоток при температурі $\theta_t = 20$ °С;

$\alpha = 0,004$ – температурний коефіцієнт алюмінію та міді.

$$r_1 = 1,153 \cdot (1 + 0,004 \cdot (40 - 20)) = 1,245 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 1,183 \cdot (1 + 0,004 \cdot (40 - 20)) = 1,278 \text{ Ом}$$

$$P_{e1} = 3 \cdot 15,1^2 \cdot 1,245 = 851,62 \text{ Вт}$$

$$P_{e2} = 3 \cdot 15,1^2 \cdot 1,278 = 874,19 \text{ Вт}$$

У роторі електричні втрати прямопропорційні ковзанню, з огляду на це робота асинхронного двигуна при малих ковзаннях є більш економічною, оскільки зі зменшенням ковзання зменшуються й електричні втрати в роторі:

$$P_{e2} = P_{em} \cdot s \quad (1.118)$$

де P_{em} – електромагнітна потужність АД;

$$P_{em} = P_1 - (P_M + P_{e1}) \quad (1.119)$$

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (1.120)$$

$$P_1 = 3 \cdot 220 \cdot 15,1 \cdot 0,8 = 7972,8 \text{ Вт}$$

$$P_{em} = 7972,8 - 851,62 = 7121,18 \text{ Вт}$$

При перемагнічуванні осердя асинхронного двигуна виникають магнітні втрати P_M , які обумовлені вихровими струмами та явищем гістерезису. Магнітні втрати пропорційні частоті перемагнічування $P_M = f^\beta$, де $\beta = 1,3-1,5$. Оскільки при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц і номінальному ковзанні $s_H = 6\%$ частота перемагнічування осердя ротора рівна $f_2 = f_1 s = 3$ Гц, то втрати в осерді будуть настільки малі, що у розрахунках їх не враховують.

Втрати на вентиляцію і тертя у підшипниках називають механічними, величина яких пропорційна квадрату швидкості обертання ротору ($P_{мех} = n^2$):

$$P_{мех} = P_H \cdot 0,01 \quad (1.121)$$

$$P_{мех} = 6300 \cdot 0,01 = 63 \text{ Вт}$$

Всі види втрат, які важко врахувати, такі як втрати викликані пульсацією у зубцях магнітної індукції, вищими гармоніками називають додатковими. ДСТУ додаткові втрати в асинхронному двигуну приймає на рівні 0,5% потужності P_1 :

$$P_{дод} = P_1 \cdot 0,005 \quad (1.122)$$

$$P_{дод} = 7972,8 \cdot 0,005 = 39,86 \text{ Вт}$$

Для неномінальних режимів роботи двигуна додаткові витрати розраховують за наступним виразом:

$$P'_{дод} = P_{дод} \cdot \beta^2, \quad (1.123)$$

де $\beta = I_1/I_{1H}$ – коефіцієнт навантаження, прийmemo $\beta = 1,1$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P'_{\text{дод}} = 39,86 \cdot 1,1^2 = 48,2 \text{ Вт}$$

Розрахунок втрат в транзисторах перетворювача частоти.

У перетворювачах частоти основні втрати енергії відбуваються у транзисторах, при проходженні в них струму:

$$\Delta P_{\text{пр}} = I_{V\text{ср}}(U_0 + k_{\phi}R_d), \quad (1.124)$$

де U_0 – порогова напруга транзистора:

$$U_0 = (1,35 \div 1,55) \cdot U_k; \quad (1.125)$$

$U_k = 3\text{В}$ – падіння напруги на транзисторі;

$$U_0 = 1,4 \cdot 3 = 4,2 \text{ В};$$

R_d – динамічний опір відкритого транзистора:

$$R_d = \frac{(0,2 \div 0,3) \cdot U_k}{I_{\text{ТН}}}, \quad (1.126)$$

де $I_{\text{ТН}} = I_{\text{н}}/m_1 = 15,1/3 = 5,03 \text{ А}$.

$$R_d = \frac{0,25 \cdot 3}{5,03} = 0,15 \text{ Ом}$$

$I_{V\text{ср}}$ – середнє значення струму і коефіцієнта його форми:

$$I_{V\text{ср}} = \frac{K_3 \cdot I_{\text{н}}}{K_0 \cdot m \cdot a}, \quad (1.127)$$

де $K_3 = 2,2$ – коефіцієнт запасу по струму;

$K_0 = 0,5$ – коефіцієнт охолодження;

$a = 2$ – число ввімкнення вентиляльних груп у фазі.

$$I_{V\text{ср}} = \frac{2,2 \cdot 15,1}{0,5 \cdot 3 \cdot 2} = 11,07 \text{ А}$$

k_{ϕ} – коефіцієнт форми струму:

$$k_{\phi} = \frac{I_V}{I_{V\text{ср}}}, \quad (1.128)$$

де I_V – діюче значення струму транзистора;

$$I_V = \frac{I_{\text{н}}}{\sqrt{m}} \quad (1.129)$$

$$I_V = \frac{15,1}{\sqrt{3}} = 8,73 \text{ А}$$

$$k_{\phi} = \frac{8,73}{11,07} = 0,79$$

$$\Delta P_{\text{пр}} = 11,07 \cdot (4,2 + 0,79 \cdot 0,15) = 47,8 \text{ Вт}$$

Окрім втрат в транзисторах перетворювача частоти існують ще й втрати від струмів витоку в закритому транзисторі, комутаційні втрати, вони за частоти 50 Гц складають приблизно 2% загальних втрат.

З огляду на це загальні втрати у перетворювачі частоти можна визначити за наступним виразом:

$$\Delta P_{\tau} = 1,02 \cdot \Delta P_{\text{пр}} \quad (1.130)$$

$$\Delta P_{\tau} = 1,02 \cdot 47,8 = 48,8 \text{ Вт}$$

Розрахунок втрат та коефіцієнта корисної дії АД з ПЧ

Сумарні втрати системи АД з ПЧ:

$$\Delta P = P_{e1} + P_{e2} + P_m + P_{\text{мех}} + P_{\text{дод}} + P_{\tau} \quad (1.131)$$

$$\Delta P = 851,62 + 874,19 + 63 + 48,2 + 48,8 = 1885,81 \text{ Вт}$$

Коефіцієнт корисної дії системи:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} \quad (1.132)$$

$$\eta = 1 - \frac{1885,81}{7972,8} = 0,76$$

Оскільки електричні втрати ротора та статора залежать від значення струму на відповідних обмотках, їх вважають змінними втратами, як і додаткові втрати. А магнітні втрати до них не відносять, бо вони майже не залежать від навантаження.

Одним з основних параметрів, який характеризує доцільність системи є коефіцієнт корисної дії, який визначає її ефективність та економічність експлуатації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

В цьому розділі ми розрахували та побудували навантажувальні діаграми ліфта та його електропривода за цикл роботи, вибрали електродвигун для ліфтової установки типу 4AC132S63У з номінальною потужністю 6,3 кВт, який перевірили за нагрівом та перевантажувальній здатності. Перевірку двигун пройшов.

Також визначилися зі схемою частотно-регульованого електроприводу, яка включає в себе частотний перетворювач з ланцюгом постійного струму, та розробили його функціональну схему. З огляду на вимоги до електроприводу ліфтів, а також його режими роботи, вибрали частотний перетворювач «OMRON» типу SYSDRIVE 3G3FV.

Виконали розрахунок природних швидкісних та механічних характеристик. Потім розрахували швидкісні та механічні характеристики АД при частотному регулюванні з трьома точками частоти: 47; 23,5; 0,1 Гц. Також виконали розрахунок енергетичних показників електропривода.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИВОДА МЕХАНІЗМУ НА ЕОМ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03			
<i>Зм.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	Горбенко С.В.				Розділ 2	<i>Лім.</i>	<i>Лист.</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевірів</i>	Осадчук Ю.Г.							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Осадчук Ю.Г.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.							
						КНУ ЕЕМ - 20		

2 Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ

2.1 Математична модель асинхронного двигуна

Рівняння АД в системі координат, що обертається з довільною швидкістю ω_k щодо нерухомої природної системи координат статора має наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_S; \\ 0 = R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \bar{\psi}_R; \\ \bar{\psi}_S = L_S \bar{i}_S + L_m \bar{i}_R; \\ \bar{\psi}_R = L_m \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R; \\ M = \frac{3}{2} p \cdot k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

де p – число пар полюсів.

В електричних машинах виникають перехідні електромагнітні процеси, які необхідно враховувати для динамічних системах. Для цього використаємо змінні, що описують машину, а саме просторові вектори струму статора \bar{i}_S і потокозчеплення ротора $\bar{\psi}_R$). Після відповідних перетворень попереднє рівняння прийме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_S = r \bar{i}_S + L'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\omega_k L'_S \bar{i}_S - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_R + jk_R p \omega_m \bar{\psi}_R; \\ 0 = -k_R R_R \bar{i}_R + \frac{1}{T_R} \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \bar{\psi}_R; \\ M = \frac{3}{2} p \cdot k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \end{array} \right. \quad (2.2)$$

де $r = (R_S + k_R^2 R_R)$, $L'_S = \left(L - \frac{L_m^2}{L_R}\right)$, $k_R = \frac{L_m}{L_R}$, $T_R = \frac{L_R}{R_R}$.

В нерухомій системі координат ($\omega_k = 0$) дійсна вісь позначається через α , а уявна через β , а просторові вектори розкладаються на:

$\bar{u}_S = u_{S\alpha} + ju_{S\beta}$, $\bar{i}_S = i_{S\alpha} + ji_{S\beta}$, $\bar{\Psi}_R = \Psi_{R\alpha} + j\Psi_{R\beta}$. Таким чином рівняння прийме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{S\alpha} = r i_{S\alpha} + L'_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \Psi_{R\beta}; \\ u_{S\beta} = r i_{S\beta} + L'_S \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \Psi_{R\alpha}; \\ 0 = -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \Psi_{R\alpha} + \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} + p \omega_m \Psi_{R\beta}; \\ 0 = -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \Psi_{R\beta} + \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} - p \omega_m \Psi_{R\alpha}; \\ M = \frac{3}{2} p \cdot k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_R \times \bar{i}_S); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H. \end{array} \right. \quad (2.3)$$

В операторній формі система рівнянь прийме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{S\alpha} = r \left(1 + \bar{T}'_{sS}\right) i_{S\alpha} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \Psi_{R\beta}; \\ u_{S\beta} = r \left(1 + \bar{T}'_{sS}\right) i_{S\beta} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \Psi_{R\alpha}; \\ 0 = -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} (1 + \bar{T}_{RS}) \Psi_{R\alpha} + p \omega_m \Psi_{R\beta}; \\ 0 = -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} (1 + T_{RS}) \Psi_{R\beta} - p \omega_m \Psi_{R\alpha}; \\ M = \frac{3}{2} p \cdot k_R \cdot (\Psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} i_{S\alpha}); \\ J s \omega_m = M - M_H, \end{array} \right. \quad (2.4)$$

де $T'_{sS} = \frac{L'_S}{r}$.

Розрахуємо основні базові амплітудні номінальні значення фазної напруги і струму та значення кутової частоти:

$$\begin{aligned} U_b &= \sqrt{2} U_1 \\ U_b &= \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$I_b = \sqrt{2}I_1 \quad (2.6)$$

$$I_b = \sqrt{2} \cdot 15,1 = 21,4 \text{ A}$$

$$\omega_b = \omega_1 = 2\pi f_1 \quad (2.7)$$

$$\omega_b = \omega_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}$$

Розрахуємо опори та індуктивності для моделі асинхронного двигуна.

Опір статора:

$$R_S = R'_1 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (2.8)$$

$$R_S = 0,079 \cdot \frac{220}{15,1} = 0,079 \cdot 14,6 = 1,153 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статора:

$$X_S = X'_1 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (2.9)$$

$$X_S = 0,079 \cdot \frac{220}{15,1} = 0,079 \cdot 14,6 = 1,153 \text{ Ом}$$

Активний номінальний опір ротора, приведений до обмотки статора:

$$R_R = R''_2 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (2.10)$$

$$R_R = 0,081 \cdot 14,6 = 1,183 \text{ Ом}$$

Індуктивний номінальний опір ротора, приведений до обмотки статора:

$$X_R = X''_2 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (2.11)$$

$$X_R = 0,12 \cdot 14,6 = 1,752 \text{ Ом}$$

Номінальний індуктивний опір ланцюга намагнічування:

$$X_\mu = X'_\mu \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_H} \quad (2.12)$$

$$X_\mu = 1,9 \cdot 14,6 = 27,74 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання статора:

$$L_{iS} = \frac{X_S}{2\pi f_H} \quad (2.13)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_{iS} = \frac{1,153}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00367 \text{ Гн}$$

Індуктивність розсіювання ротора:

$$L_{iR} = \frac{X_R}{2\pi f_H} \quad (2.14)$$

$$L_{iR} = \frac{1,752}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00558 \text{ Гн}$$

Індуктивність взаємоіндукції:

$$L_m = \frac{X_\mu}{2\pi f_H} \quad (2.15)$$

$$L_m = \frac{27,74}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0883 \text{ Гн}$$

Індуктивність статора:

$$L_S = L_{iS} + L_m \quad (2.16)$$

$$L_S = 0,00367 + 0,0883 = 0,09197 \text{ Гн}$$

Індуктивність ротора:

$$L_R = L_{iR} + L_m \quad (2.17)$$

$$L_R = 0,00558 + 0,0883 = 0,09388 \text{ Гн}$$

Розрахуємо коефіцієнти двигуна:

$$r = R_S + k_R^2 R_R, \quad (2.18)$$

де:

$$k_R = \frac{L_m}{L_R}. \quad (2.19)$$

$$k_R = \frac{0,0883}{0,09388} = 0,9406$$

$$r = 1,153 + 0,9406^2 \cdot 1,183 = 2,1996 \text{ Ом}$$

$$T_R = \frac{L_R}{R_R} \quad (2.20)$$

$$T_R = \frac{0,09388}{1,183} = 0,0794 \text{ с}$$

$$L'_S = \left(L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right) \quad (2.21)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L'_s = \left(0,09197 - \frac{0,0883^2}{0,09388} \right) = 0,0089 \text{ Гн}$$

$$T'_s = \frac{L_s}{r} \quad (2.22)$$

$$T'_s = \frac{0,09197}{2,1996} = 0,0041 \text{ с}$$

Результати обчислень занесемо в таблицю 2.1.

Модель, побудована за рівнянням 2.4, зображена на рисунку 2.1.

Графіки перехідних процесів моделі зображені на рисунку 2.2.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти моделі асинхронного двигуна

Коефіцієнт	r, Ом	T's, с	k _R	T _R , с	L's, Гн
Значення	2,1996	0,0041	0,9406	0,0794	0,0089

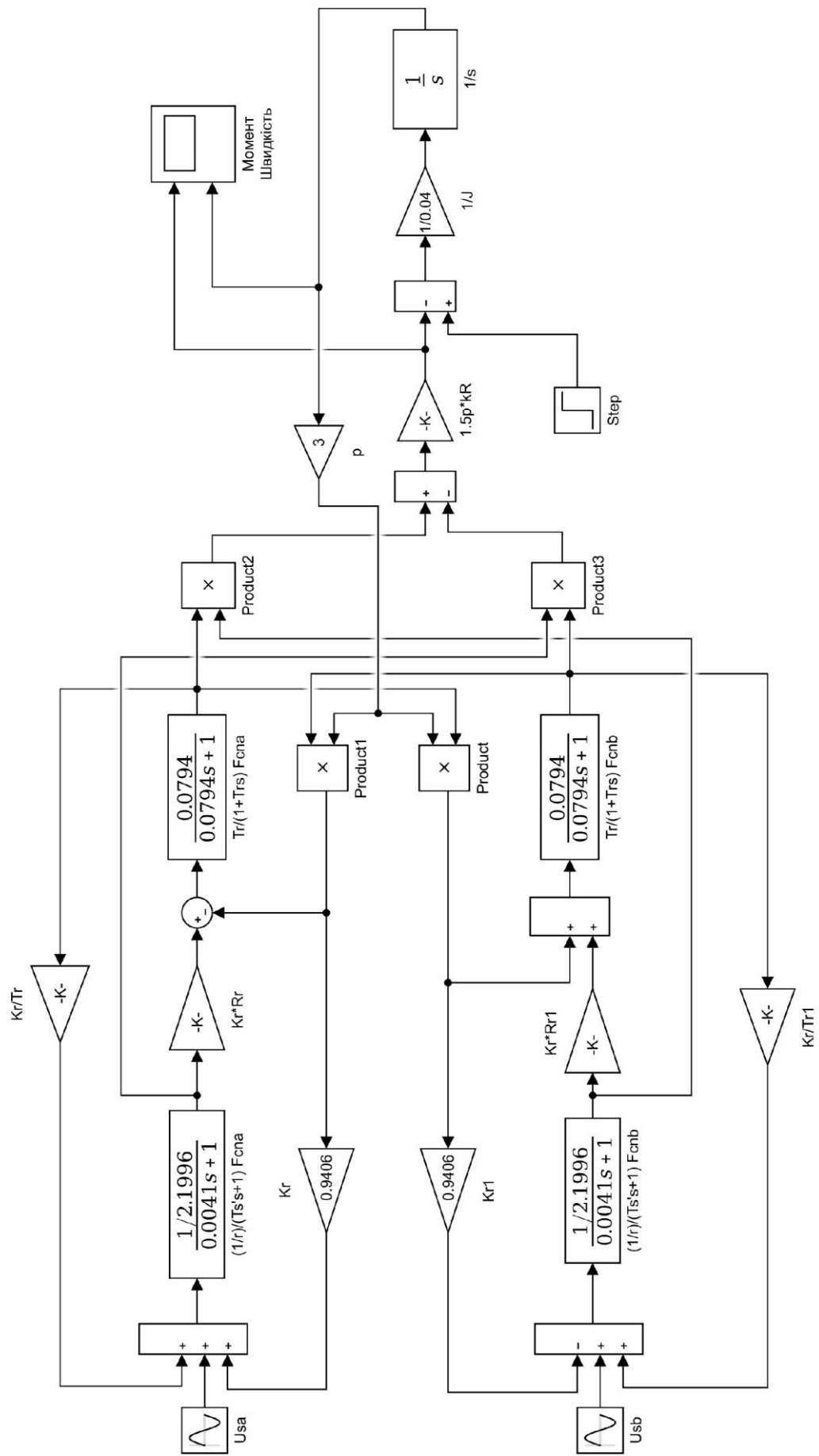


Рисунок 2.1 – Модель асинхронного двигуна з коротко замкнутим ротором

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

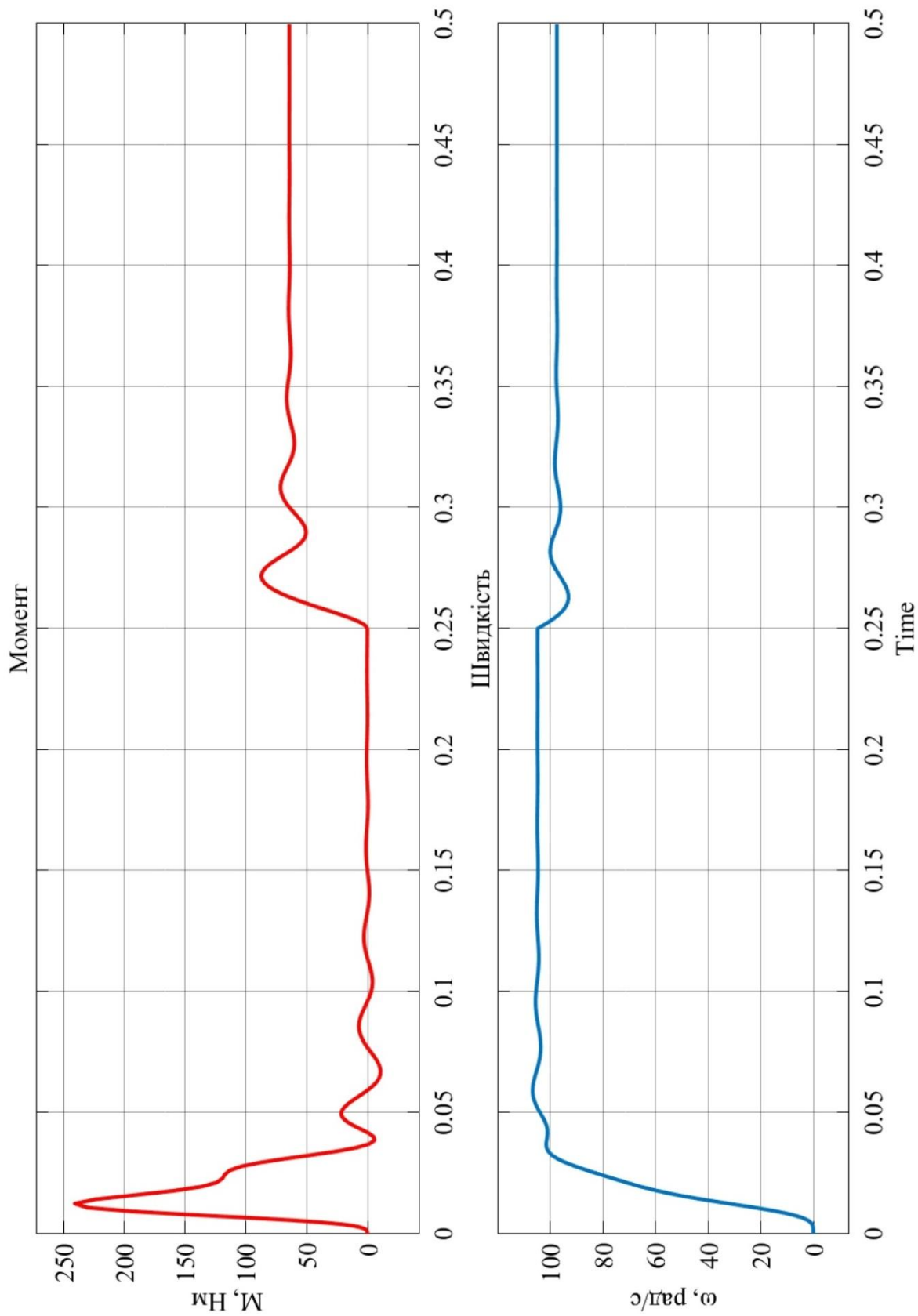


Рисунок 2.2 – Графік перехідних процесів моменту і швидкості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.2 Модель асинхронного двигуна з автономним інвертором напруги

Структурна схема електропривода в цьому випадку будується на підставі рівнянь (8.13) (див. [3] стор. 291). На регулятор тут покладаються додаткові функції. Потрібно, щоб вісь x обертової системи координат збігалася з потокозчепленням ротора. Тоді в регуляторі виробляється частота обертання системи координат, а рівняння, що описує систему, приймуть вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{sx} = r \left(1 + \bar{T}'_{ss} \right) i_{sx} - \omega_K L'_s i_{sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx}; \\ u_{sy} = r \left(1 + \bar{T}'_{ss} \right) i_{sy} + \omega_K L'_s i_{sx} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}; \\ k_R r i_{sx} = \frac{1}{T_R} (1 + \bar{T}_R s) \psi_{Rx}; \\ k_R r i_{sy} = (\omega_K - p \omega_m) \psi_{Rx}; \\ M = \frac{3}{2} p k_R \psi_{Rx} i_{sy}; \\ J s \omega_m = M - M_H. \end{array} \right. \quad (2.23)$$

Модель АКЗ разом з регулятором, що виробляє частоту обертання координат Frequency, складена по системі рівнянь (2.23), показана на рис. 2.4. У моделі враховане насичення машини (блок Saturation). При реалізації четвертого рівняння системи (2.23) до дільника додана мала постійна (блок Constant) для того, щоб уникнути ділення на нуль на початку моделювання. Для надання системі необхідних якостей необхідно синтезувати регулятори як у каналі регулювання (стабілізації) потоку, так і в каналі регулювання швидкості.

Така система представлена на рис. 2.5. Результати моделювання системи зображені на рис. 2.6. Тут блок Subsystem є Subblock-ом АКЗ (див. рис. 2.3), реалізованим по рівняннях (2.23).

При живленні асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором від автономного інвертора напруги не вдається синтезувати регулятори класичним способом унаслідок того, що в цьому випадку сильний вплив на динаміку роблять перехресні зв'язки.

Виконаємо вибір та розрахунок регуляторів потокозчеплення, струму та швидкості.

2.2.1 Розрахунок параметрів регулятора потокозчеплення

Передатна функція об'єкта регулювання наступна:

$$W_{об\psi}(s) = \frac{\frac{1}{r} T_R k_R R_R}{(T_S s + 1)(T_R s + 1)} \quad (2.24)$$

При чому у каналі регулювання потокозчеплення ротора $T_R \gg T_S$, тому в якості регулятора оберемо пропорційно – інтегральний регулятор (ПІ-регулятор) з передатною функцією:

$$W_{p\psi}(s) = \frac{k_{p\psi}(T_R s + 1)}{T_R s} = k_{П\psi} + \frac{k_{I\psi}}{s}, \quad (2.25)$$

де $k_{П\psi} = k_{p\psi}$ – коефіцієнт пропорційної складової ПІ-регулятора;

$k_{I\psi} = \frac{k_{p\psi}}{T_R}$ – коефіцієнт інтегральної складової ПІ-регулятора.

Схема ПІ-регулятора наведена на рис. 2.3.

Передатна функція ПІ-регулятора має наступний вигляд:

$$W_{ПІ}(s) = \frac{-U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{R_{33} C_{33} s + 1}{C_{33} s} = \frac{T_{ПІ} s + 1}{T_I s} = \frac{k_{ПІ}(T_{ПІ} s + 1)}{T_{ПІ} s} = k_{ПІ} + \frac{k_I}{s}, \quad (2.26)$$

де $T_{ПІ} = R_{33} \cdot C_{33}$ – постійна часу регулятора, с;

$T_I = R_{ВХ} \cdot C_{33} = \frac{T_{ПІ}}{k_{ПІ}}$ – постійна часу інтегрування, с;

$k_{ПІ} = k_{ПІ} = \frac{R_{33}}{R_{ВХ}} = \frac{T_{ПІ}}{T_I}$ – коефіцієнт підсилення регулятора.

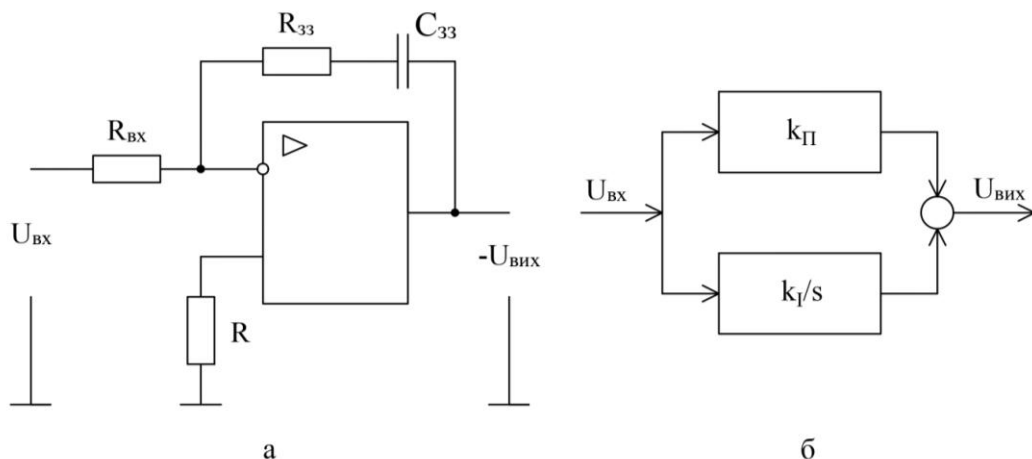


Рисунок 2.3 – Принципова (а) та структурна (б) схеми ПІ-регулятора

При передатній функції об'єкта:

$$W_{об}(s) = \frac{k_{об}}{(T_2s + 1)(T_1s + 1)} \quad (2.27)$$

Передатна функція замкнутої системи з ПІ-регулятором (див. табл.3.2[3]):

$$W_{об}(s) = \frac{\frac{k_p k_{об}}{T_1 T_2}}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}, \quad (2.28)$$

де k_p – коефіцієнт регулятора;

$$2\xi\omega_0 = \frac{1}{T_1} \quad (2.29)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k_p k_{об} k_{зз}}{T_1 T_2} \quad (2.30)$$

Параметри регулятора в замкнутому контурі можна визначити за наступним алгоритмом:

$$k_p = \bar{k}_p k_{кр} \quad (2.31)$$

де \bar{k}_p – відносний коефіцієнт регулятора, при розрахунку регулятора на модульний оптимум приймається $\bar{k}_p = 2$

$k_{кр}$ – критичний коефіцієнт регулятора, розраховується з виразів 2.29 і 2.30 при $\xi = 1$:

$$\omega_0 = \frac{1}{2 \cdot 1 \cdot T_1} \quad (2.32)$$

$$\left(\frac{1}{2T_1}\right)^2 = \frac{k_{кр} k_{об} k_{зз}}{T_1 T_2} \quad (2.33)$$

$$\frac{1}{4T_1^2} = \frac{k_{кр} k_{об} k_{зз}}{T_1 T_2} \quad (2.34)$$

$$k_{кр} = \frac{T_2}{4T_1 k_{об} k_{зз}} \quad (2.35)$$

$$k_p = \frac{2T_2}{4T_1 k_{об} k_{зз}} = \frac{T_2}{2T_1 k_{об} k_{зз}} \quad (2.36)$$

Розрахований таким чином ПІ-регулятор компенсує перехресні зв'язки у каналі x .

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прийmemo $T_1 = T_S$; $T_2 = T_R$; $k_{o6} = \frac{T_R k_R R_R}{r}$; $k_{33} = k_{33\psi} = 1$.

Тоді:

$$k_{p\psi} = \frac{r}{2 \cdot T_S \cdot k_R \cdot R_R \cdot k_{33\psi}} \quad (2.37)$$

$$k_{p\psi} = \frac{2,1996}{2 \cdot 0,0041 \cdot 0,9406 \cdot 1,183 \cdot 1} = 241$$

Отже параметри регулятора потокозчеплення налаштовані на модульний оптимум рівні:

$$k_{\Pi\psi} = 241$$

$$k_{I\psi} = \frac{241}{0,0794} = 3035$$

Прийmemo $k_{\Pi\psi} = 250$, а $k_{I\psi} = 3000$.

2.2.2 Розрахунок параметрів регулятора струму

Передатна функція об'єкта регулювання наступна:

$$W_{o6i}(s) = \frac{1/r}{T_S s + 1} \quad (2.38)$$

Задля компенсації перехресних зв'язків у каналі у також виберемо ПІ-регулятор з передатною функцією:

$$W_{pi}(s) = \frac{k_{pi}(T_S s + 1)}{T_S s} = k_{\Pi} + \frac{k_I}{s}, \quad (2.39)$$

де $k_{\Pi} = k_{pi}$ – коефіцієнт пропорційної складової ПІ-регулятора;

$k_{I} = \frac{k_{pi}}{T_S}$ – коефіцієнт інтегральної складової ПІ-регулятора.

Передатна функція розімкнутого контуру:

$$W_{позі}(s) = \frac{k_{pi}}{r T_S s} \quad (2.40)$$

Тоді передатна функція замкнутого контуру в каналі у знаходиться за формулою:

$$W_{3i}(s) = \frac{W_{позі}}{1 + W_{позі} W_{33}} \quad (2.41)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{zi}(s) = \frac{\frac{k_{pi}}{rT_S s}}{1 + \frac{k_{pi}k_{zzi}}{r \cdot T_S s}} \quad (2.42)$$

$$W_{zi}(s) = \frac{k_{pi}}{r \cdot T_S s + k_{pi}k_{oci}} \quad (2.43)$$

$$W_{zi}(s) = \frac{1}{\frac{r \cdot T_S s}{k_{pi}} + k_{zzi}} \quad (2.44)$$

$$W_{zi}(s) = \frac{1}{k_{zzi}} \cdot \frac{1}{\frac{r \cdot T_S s}{k_{pi}k_{zzi}} + 1} \quad (2.45)$$

При $k_{pi} \gg 1$ передатна функція замкнутого контуру рівна:

$$W_{zi}(s) = \frac{1}{k_{zzi}} \cdot \frac{1}{\frac{r \cdot T_S s}{k_{pi}k_{zzi}} + 1} \approx \frac{1}{k_{zzi}} \quad (2.46)$$

Для того, щоб позбутися постійної часу T_S вираз $\frac{r \cdot T_S}{k_{pi}k_{zzi}}$ повинен бути наближеним до нуля.

Таким чином знайдемо коефіцієнт регулювання:

$$k_{pi} = \frac{r \cdot T_S s}{k_{zzi} \cdot 0,00001} \quad (2.47)$$

$$k_{pi} = \frac{2,1996 \cdot 0,0041}{1 \cdot 0,00001} = 900$$

Отже параметри регулятора струму налаштовані на модульний оптимум рівні:

$$k_{Pi} = 901$$

$$k_{Ii} = \frac{901}{0,0041} = 220000$$

Прийmemo $k_{Pi} = 900$, а $k_{Ii} = 220000$.

2.2.3 Розрахунок параметрів регулятора швидкості

Для надання цій системі астатизму за швидкістю виберемо ПІ-регулятор з передатною функцією:

$$W_{p\omega}(s) = \frac{k_{p\omega}(T_{p\omega}s + 1)}{T_{p\omega}s} = k_{П\omega} + \frac{k_{I\omega}}{s}, \quad (2.48)$$

де $k_{П\omega} = k_{p\omega}$ – коефіцієнт пропорційної складової ПІ-регулятора;

$k_{I\omega} = \frac{k_{p\omega}}{T_{p\omega}}$ – коефіцієнт інтегральної складової ПІ-регулятора.

Передатна функція за збуренням (8.35) (див. [3] стор. 306):

$$W'(s) = \frac{-k_{ззі}}{1,5pk_R k_{зз\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega}s}{\frac{T_{p\omega}Jk_{ззі}}{k_{зз\omega} k_{p\omega}} s^2 + T_{p\omega}s + 1} \quad (2.49)$$

При $k_{p\omega} \gg 1$ передатна функція буде рівна:

$$W'(s) = \frac{-k_{ззі}}{1,5pk_R k_{зз\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega}s}{T_{p\omega}s + 1} \quad (2.50)$$

Провал швидкості при прикладанні моменту можна визначити за формулою:

$$\Delta\omega = \frac{-k_{ззі}}{1,5pk_R k_{зз\omega} k_{p\omega}} \Delta M \quad (2.51)$$

З цього рівняння визначимо коефіцієнт регулятора, при $\Delta M = 64 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а $\Delta\omega = -0,06 \text{ рад/с}$:

$$k_{p\omega} = \frac{-k_{ззі}}{1,5pk_R k_{зз\omega} \Delta\omega} \Delta M \quad (2.52)$$

$$k_{p\omega} = \frac{1}{1,5 \cdot 3 \cdot 0,9406 \cdot 1 \cdot 0,06} \cdot 64 = 252$$

Отже параметри регулятора струму налаштовані на модульний оптимум рівні:

$$k_{П\omega} = 252$$

$$k_{I\omega} = \frac{252}{1} = 252$$

Прийmemo $k_{П\omega} = 250$, а $k_{I\omega} = 250$.

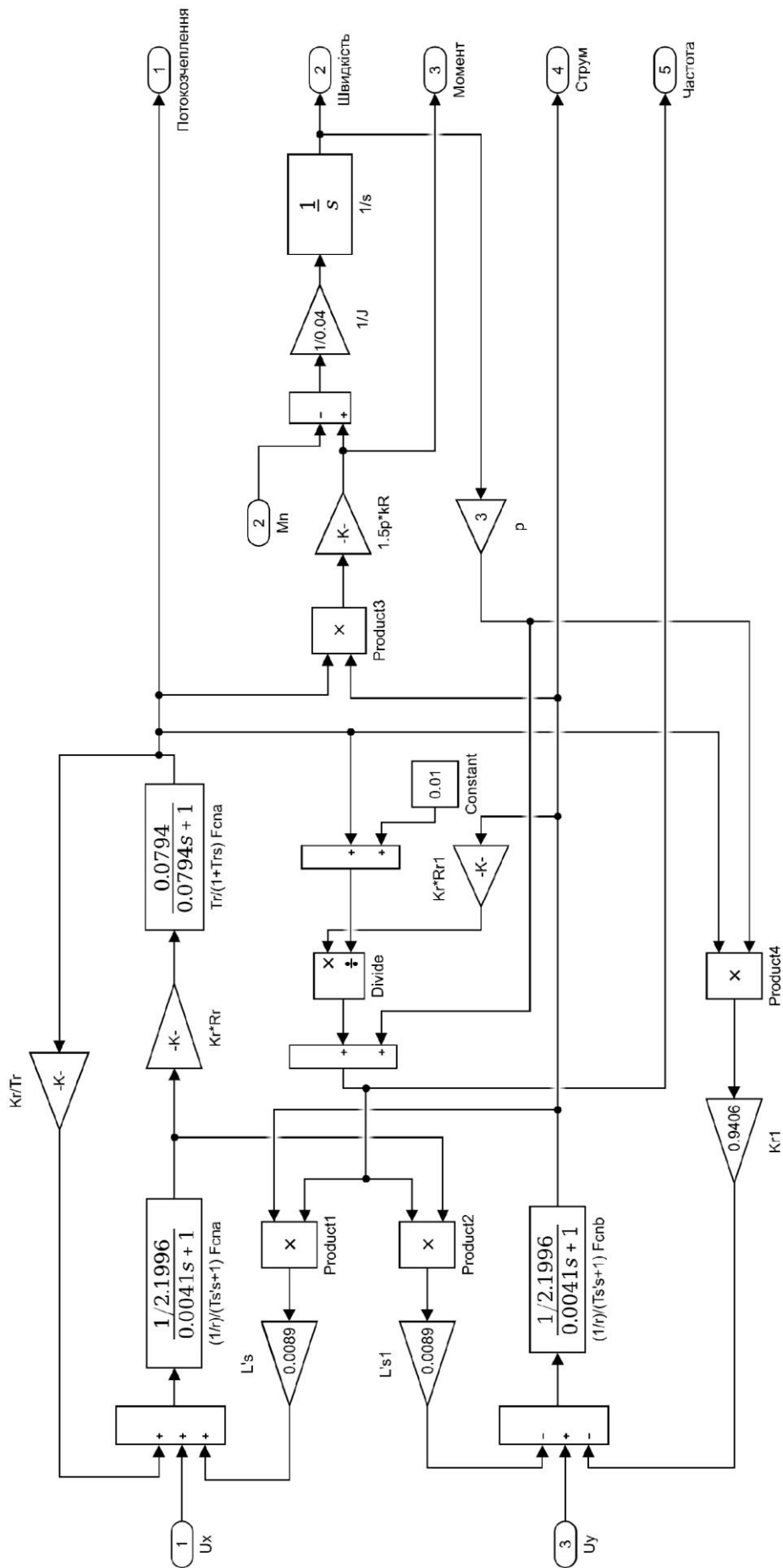


Рисунок 2.4 – Модель електропривода з АІН

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

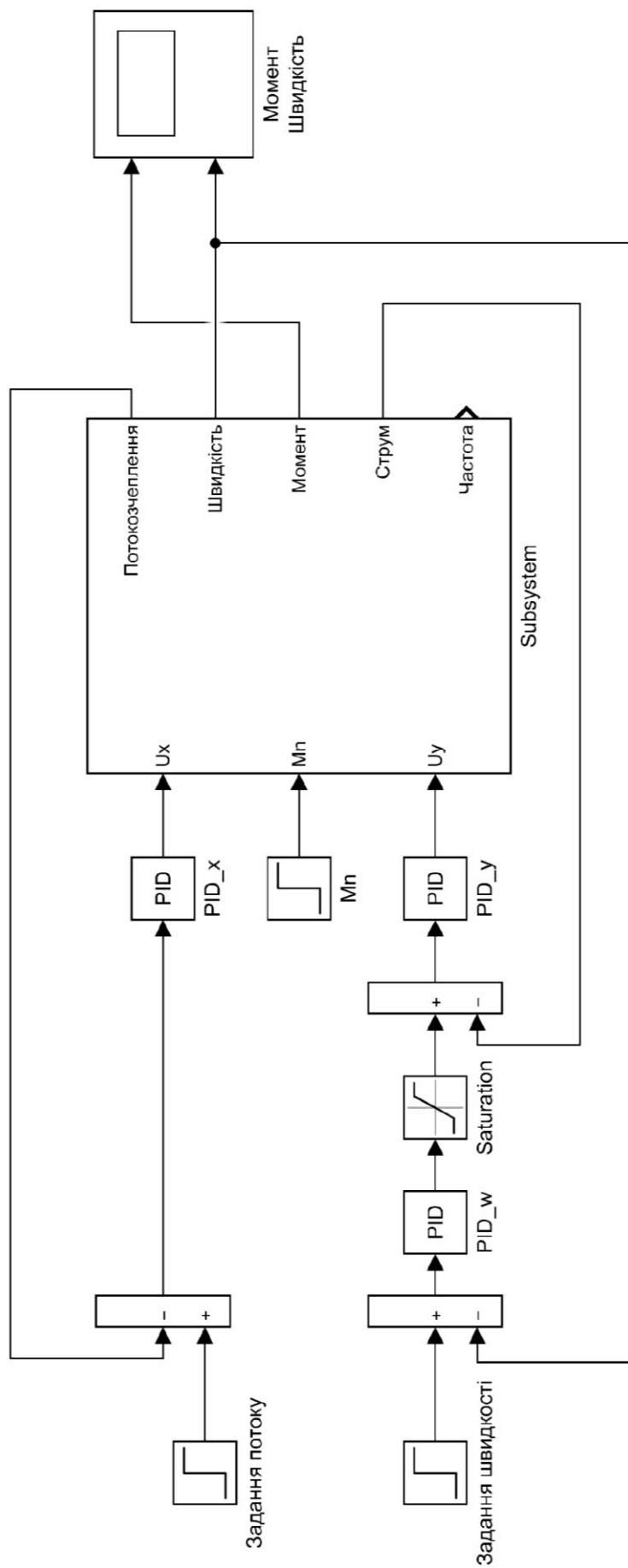


Рисунок 2.5 – Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при керуванні від джерела напруги

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

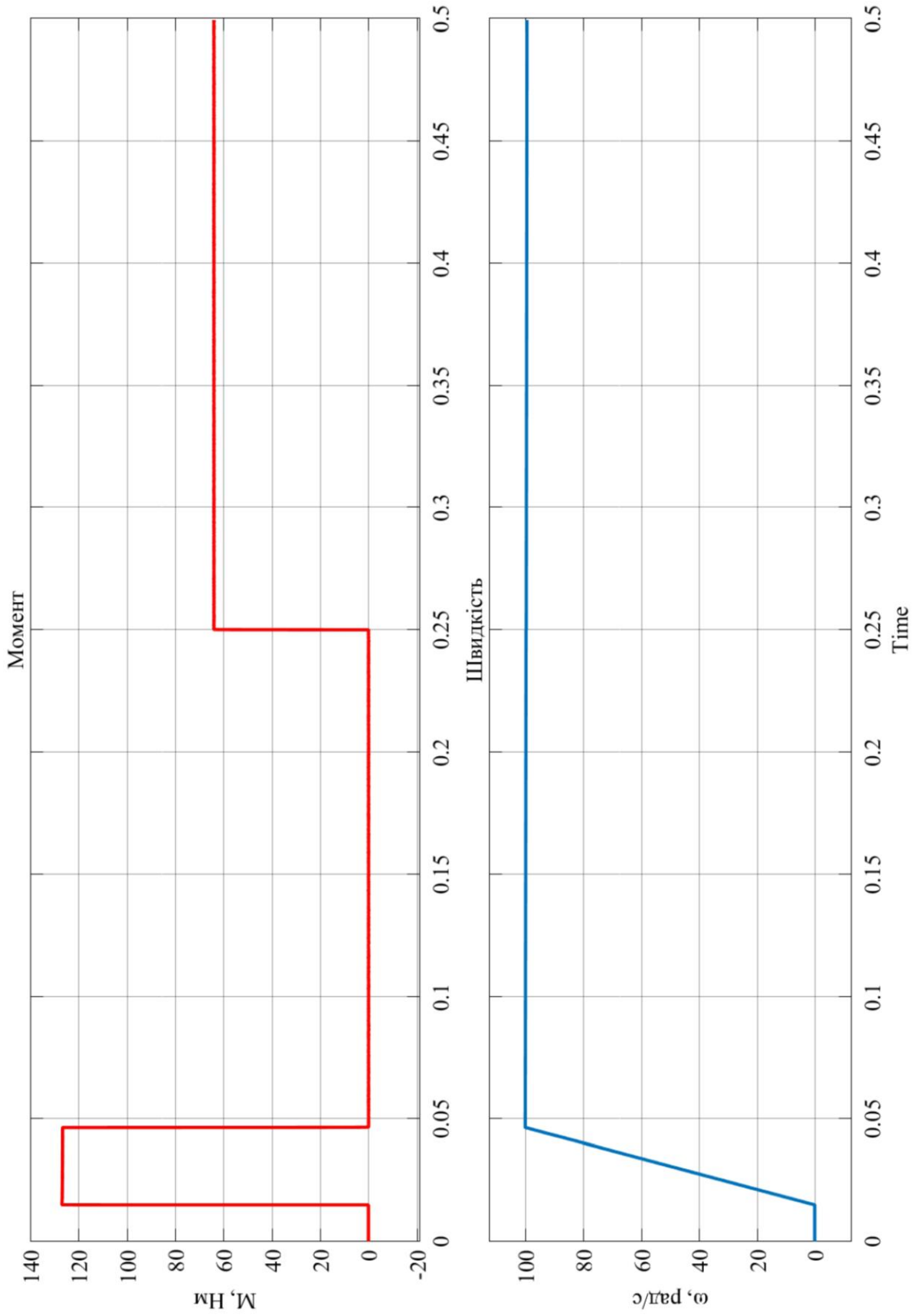


Рисунок 2.6 – Графік перехідних процесів моменту і швидкості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

В цьому розділі ми побудували математичну модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат та модель з живленням від автономного інвертора напруги за допомогою математичного пакету MATLAB. Розрахували регулятори поточозчеплення, струму та швидкості замкненої системи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03			
<i>Зм.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 3	<i>Лім.</i>	<i>Лист.</i>	<i>Листів</i>
<i>Розробив</i>	Горбенко С.В.							
<i>Перевірів</i>	Осадчук Ю.Г.							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Осадчук Ю.Г.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ - 20		

3 Електропостачання

3.1 Розрахунок навантажень

Розрахунок навантажень міської мережі включає визначення навантажень окремих споживачів (житлових будинків, суспільних будинків, комунально-побутових підприємств та ін.) і елементів системи електропостачання (розподільних пунктів, підстанцій та ін.).

Схема ділянки міської мережі живлення тринадцяти поверхового житлового будинку, для якого виконуємо розрахунок, наведена на рис. 3.1.

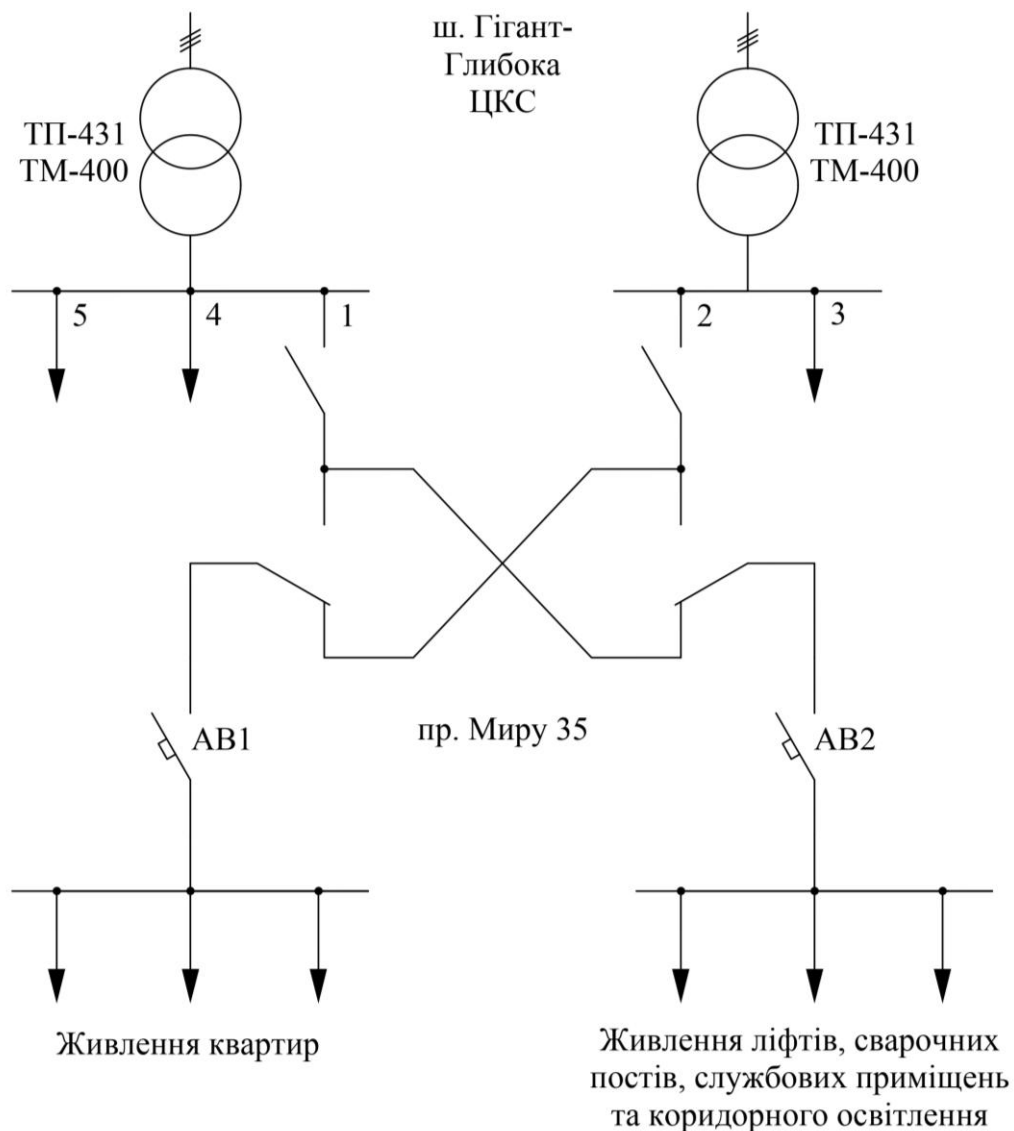


Рисунок 3.1 – Схема електропостачання

Проведемо розрахунок навантажень для схеми, зображеної на рис. 3.1, по алгоритму наведеному в [18]. Лінія 1 і 2 живить 13-поверховий 200-

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

квартирний газифікований будинок із двома ліфтами. Номінальні потужності ліфтових установок $P_{\text{лф.ном1}} = 5$ кВт, $P_{\text{лф.ном2}} = 6,3$ кВт. Лінія 3 живить два житлових газифікованих будинки з числом квартир $n_1=144$ і $n_2=108$ квартир. Лінія 4 живить ще дві житлові будівлі з числом квартир $n_1=180$ і $n_2=108$ квартир. Лінія 5 живить дитячий сад на 80 місць і два магазини, з кількістю робочих місць 50 та 150.

Визначимо активні навантаження на вводах житлових будинків:

Активне навантаження житлового будинку (квартир і силових електроприймачів) визначається як:

$$P_{\text{ж.б}} = P_{\text{уд.кв}} \cdot n + 0,9P_c, \quad (3.1)$$

де $P_{\text{уд.кв}}$ – питома навантаження квартир, що залежить від типу кухонних плит і кількості квартир (n) у будинку (див. табл. 6.15 [18]);

P_c – навантаження силових електроприймачів будинку.

$$P_c = k_{c1} \sum P_{\text{лф.ном}} + k_{c2} \sum P_{\text{дв.ном}}, \quad (3.2)$$

де k_{c1} і k_{c2} – відповідно коефіцієнти попиту установок ліфтів (див. табл. 6.16 [18]) та інших електродвигунів, k_{c2} приймається рівним 0,7;

$P_{\text{лф.ном}}$ і $P_{\text{дв.ном}}$ – номінальні потужності електродвигуна ліфта (див. табл. 6.17 [18]) та інших електродвигунів (за паспортними даними).

Повне навантаження житлового будинку і живлячої його лінії:

$$S_{\text{ж.д}} = \frac{P_{\text{ж.б}}}{\cos \varphi}, \quad (3.3)$$

де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності лінії, що живить житловий будинок (див. табл. 6.18 [18]).

$$P_{61} = 0,5 \cdot 200 + 0,9 \cdot 0,7 \cdot (6,3 + 5) = 107,1 \text{ кВт}$$

$$S_{61} = \frac{107,1}{0,96} = 112 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{62} = 0,6 \cdot 144 = 87 \text{ кВт}$$

$$S_{62} = \frac{87}{0,96} = 90 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{63} = 0,6 \cdot 108 = 65 \text{ кВт}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{63} = \frac{65}{0,96} = 68 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{64} = 0,6 \cdot 180 = 108 \text{ кВт}$$

$$S_{64} = \frac{108}{0,96} = 113 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{65} = 0,6 \cdot 108 = 65 \text{ кВт}$$

$$S_{65} = \frac{65}{0,96} = 68 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Активні та повні навантаження магазинів промислових товарів і дитячого саду:

$$P_{\text{м.п.т1}} = 0,11 \cdot 50 = 6 \text{ кВт}$$

$$S_{\text{м.п.т1}} = \frac{6}{0,9} \approx 7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{\text{м.п.т2}} = 0,11 \cdot 150 = 17 \text{ кВт}$$

$$S_{\text{м.п.т2}} = \frac{17}{0,9} \approx 19 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{\text{д.т}} = 0,4 \cdot 80 = 32 \text{ кВт}$$

$$S_{\text{д.т}} = \frac{32}{0,97} \approx 33 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Визначимо активні та повні навантаження ліній 1-5 напругою 0,4 кВ:

Активне навантаження лінії напругою 0,4 кВ, що живить групу однотипних житлових будинків:

$$P_{\text{лі}} = P_{\text{уд.кв}} \cdot N + 0,9P_c, \quad (3.4)$$

де $P_{\text{уд.кв}}$ – питоме навантаження квартир, що залежить від типу кухонних плит і кількості квартир (N) у будинку (див. табл. 6.15 [18]);

Повне навантаження лінії може бути визначене за формулою:

$$S_{\text{лі}} = \frac{P_{\text{лі}}}{\cos \varphi} \quad (3.5)$$

$$P_{\text{л1/2}} = P_{61} = 107,1 \text{ кВт}$$

$$S_{\text{л1/2}} = \frac{107,1}{0,97} = 110 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{\text{л3}} = 0,6 \cdot (144 + 108) \approx 151 \text{ кВт}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{Л3} = \frac{151}{0,96} = 157 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{Л4} = 0,6 \cdot (108 + 180) \approx 173 \text{ кВт}$$

$$S_{Л4} = \frac{173}{0,96} = 180 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$P_{Л5} = 32 + 0,11(6 + 17) \approx 35 \text{ кВт}$$

$$S_{Л5} = \frac{35}{0,8} = 44 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Активне та повне навантаження на шинах трансформаторної підстанції визначимо як:

$$P_{ТП} = P_{уд,кв} \cdot \Sigma N + k_{c1} \cdot P_c + k_{c3} \cdot (P_{м.п.т1} + P_{м.п.т2}) + k_{c4} \cdot P_{д.т}, \quad (3.6)$$

де k_{ci} – відповідні коефіцієнти попиту (див. табл. 6.20 [18]).

$$P_{ТП} = 0,43 \cdot (200 + 144 + 108 + 180 + 108) + 0,9 \cdot 7,91 + \\ + 0,4 \cdot 6 + 0,4 \cdot 17 + 0,8 \cdot 32 \approx 360 \text{ кВт}$$

$$Q_{ТП} = \Sigma P_{ж.б} \cdot \text{tg } \varphi_{ж.б} + P_c \cdot \text{tg } \varphi_c + \Sigma P_{м.п.т} \cdot \text{tg } \varphi_{м.п.т} + P_{д.т} \cdot \text{tg } \varphi_{д.т}, \quad (3.7)$$

де $\text{tg } \varphi_i$ – відповідний коефіцієнт реактивного навантаження.

$$Q_{ТП} = (100 + 87 + 65 + 108 + 65) \cdot 0,29 + 7,1 \cdot 1,33 + \\ + 0,48 \cdot 6 + 0,48 \cdot 17 + 0,25 \cdot 32 \approx 152 \text{ кВар}$$

Повне навантаження лінії, що живить неоднорідні споживачі з різними $\cos \varphi$ може бути визначене за формулою:

$$S_{ТП} = \frac{P_{ТП}}{\cos \varphi_{заг}}, \quad (3.8)$$

де $\cos \varphi_{заг}$ – загальний коефіцієнт потужності, що відповідає загальному коефіцієнту реактивного навантаження:

$$\text{tg } \varphi_{заг} = \frac{Q_{ТП}}{P_{ТП}} \quad (3.9)$$

$$\text{tg } \varphi_{заг} = \frac{152}{360} = 0,422$$

Тоді $\cos \varphi_{заг} = 0,921$, а повне навантаження становитиме:

$$S_{ТП} = \frac{360}{0,921} = 391 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замикання виконують через необхідність перевірки на стійкість вибраних установок захисту за короткого замикання та перевірки відключаючих здібностей пуско-захисної апаратури. Струми коротких замикань необхідно враховувати при виборі електрообладнання, оскільки вони набагато більші за струми в електроустаткуванні при номінальному режимі роботи, що може спричинити аварійну ситуацію.

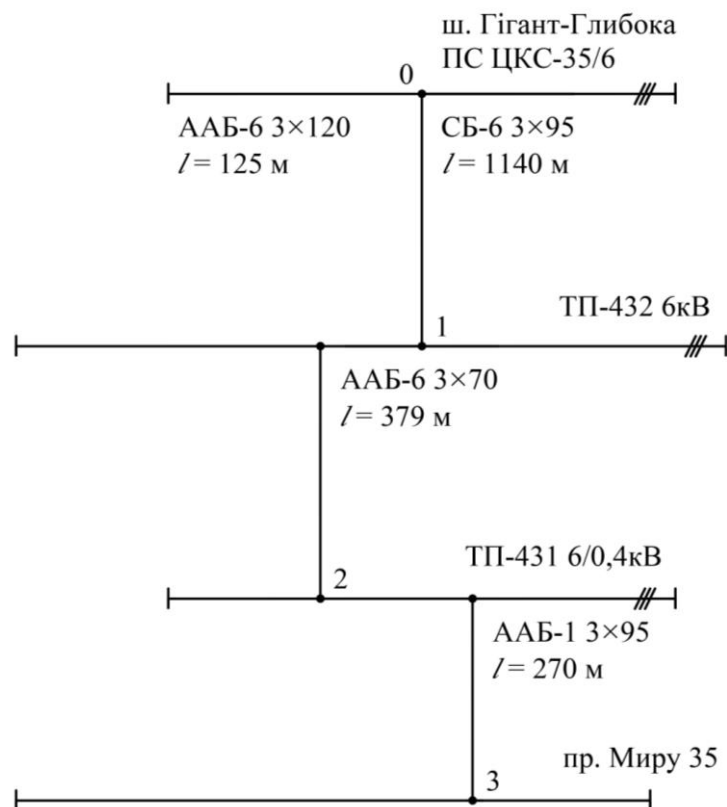


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема

Після складання розрахункової схеми складаємо схему заміщення на якій після розрахунку вказуємо опори елементів ланцюгу.

Індуктивний опір кабельної лінії рівний:

$$x = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (3.10)$$

де x_0 – індуктивний опір кабелю, Ом/км;

ℓ – довжина кабелю, км;

S_6 – базисна величина потужності, $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;

U_{cp} – середня напруга мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Активний опір кабельної лінії рівний:

$$r = r_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (3.11)$$

де r_0 – активний опір кабелю, Ом/км;

Результуючий індуктивний опір за даної схеми рівний:

$$x_{рез} = x_1 + x_2 + \dots + x_n \quad (3.12)$$

Результуючий індуктивний опір дорівнює:

$$r_{рез} = r_1 + r_2 + \dots + r_n \quad (3.13)$$

Струм короткого замикання визначається за формулою:

$$I_{кз} = \frac{I_6}{z_{рез}}, \quad (3.14)$$

де I_6 – базисний струм на ступені напруги точки короткого замикання, визначається як:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}}; \quad (3.15)$$

$z_{рез}$ – загальний результуючий опір:

$$z_{рез} = \sqrt{r_{рез}^2 + x_{рез}^2}. \quad (3.16)$$

Ударний струм в точці короткого замикання:

$$I_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{кз}, \quad (3.17)$$

де k_y – ударний коефіцієнт струму короткого замикання (див.[17] стор. 358).

Потужність короткого замикання:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{кз}, \quad (3.18)$$

де U – напруга мережі.

Визначаємо опір до точки 0:

$$x_{0(c)} = x_{c(n)} \cdot \frac{S_6}{S_{ном}}, \quad (3.19)$$

де $x_{c(n)}$ – індуктивний опір системи;

$S_{ном}$ – потужність трансформатора;

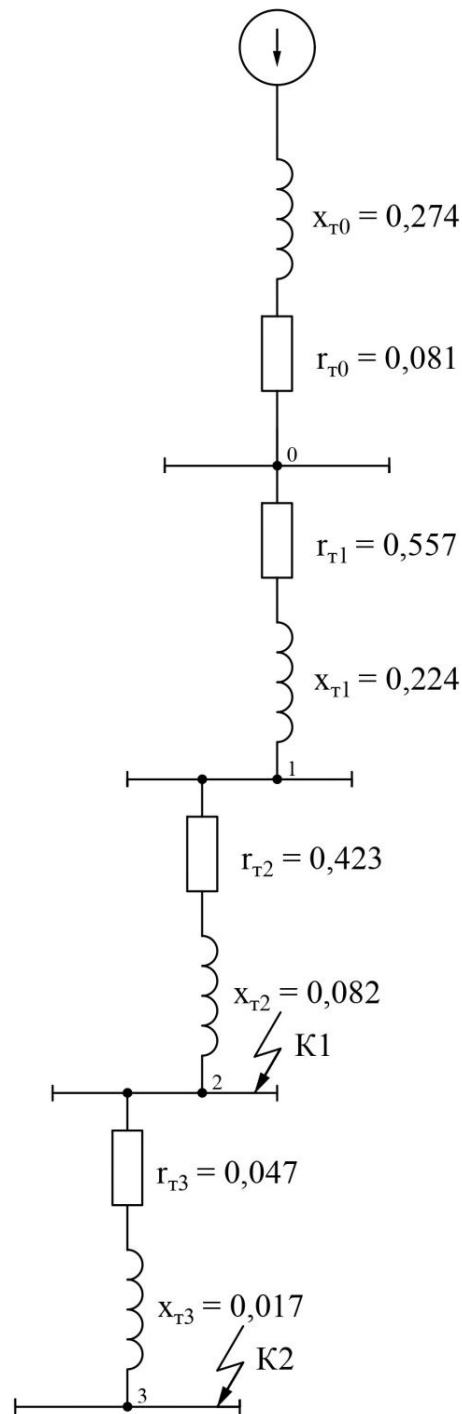


Рисунок 3.3 – Схема заміщення

$$x_{0(c)} = 0,1 \cdot \frac{100}{40} = 0,25$$

$$x_{(0)} = 0,076 \cdot 0,125 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,024$$

$$x_{T0} = 0,25 + 0,024 = 0,274$$

$$r_{T0} = 0,258 \cdot 0,125 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,081$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Визначаємо опір до точки 1:

$$x_{T1} = 0,078 \cdot 1,14 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,224$$

$$r_{T1} = 0,194 \cdot 1,14 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,557$$

Визначаємо опір до точки 2:

$$x_{T2} = 0,086 \cdot 0,379 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,082$$

$$r_{T2} = 0,443 \cdot 0,379 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,423$$

Результуючий активний та індуктивний опір:

$$x_{рез} = 0,274 + 0,224 + 0,082 = 0,58$$

$$r_{рез} = 0,081 + 0,557 + 0,423 = 1,061$$

Загальний опір до точки 2:

$$z_{рез} = \sqrt{1,061^2 + 0,58^2} = 1,209$$

Базисний струм:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 11 \text{ кА}$$

Струм короткого замикання в точці К1:

$$I_{кз1} = \frac{11}{1,209} = 9,1 \text{ кА}$$

Оскільки $x_{рез}/r_{рез} = 0,55$, то $k_y = 1,05$

Ударний струм короткого замикання в точці К1:

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 9,1 = 13,5 \text{ кА}$$

Потужність короткого замикання в точці К1:

$$S = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 13,5 = 140 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

3.3 Розрахунок струмів короткого замикання до 1000 В

Цей розрахунок складається з визначення найбільш можливого струму короткого замикання та найменш можливого струму двофазного короткого замикання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Струм трифазного короткого замикання в низьковольтній мережі:

$$I_{\text{ктр}}^{(3)} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\text{тр}}^2 + x_{\text{тр}}^2}}, \quad (3.20)$$

де $r_{\text{тр}}$ та $x_{\text{тр}}$ – активний та індуктивний опір трансформатора:

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{3 \cdot I_{\text{нн}}^2}, \quad (3.21)$$

де $\Delta P_{\text{кз}} = 5,5$ кВт – втрати короткого замикання трансформатора ТМ-400;

$I_{\text{нн}}$ – струм на вторинній обмотці трансформатора:

$$I_{\text{нн}} = \frac{S_{\text{Т}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} \quad (3.22)$$

$$I_{\text{нн}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 578 \text{ А}$$

$$r_{\text{тр}} = \frac{5500}{3 \cdot 578^2} = 0,0055 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{тр}} = \frac{10 \cdot U_{\text{кз}} \cdot U_{\text{н}}^2}{S_{\text{ном}}}, \quad (3.23)$$

де $U_{\text{кз}} = 4,5\%$ – напруга короткого замикання трансформатора;

$U_{\text{н}} = 0,4$ кВ – номінальна напруга на низькій стороні трансформатора;

$S_{\text{ном}} = 400$ кВ · А – номінальна потужність трансформатора.

$$x_{\text{тр}} = \frac{10 \cdot 4,5 \cdot 0,4^2}{400} = 0,018 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{ктр}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,0055^2 + 0,018^2}} = 12285 \text{ А}$$

Визначаємо активний та індуктивний опір до точки 3:

Активний опір:

$$r_3 = r_{\text{тр}} + r_{\text{кабз}} \cdot \ell, \quad (3.24)$$

де $r_{\text{кабз}} = 0,326$ Ом/км – активний опір кабелю ААБ-1 3х95;

$$r_3 = 0,0055 + 0,326 \cdot 0,27 = 0,094 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір:

$$x_3 = x_{\text{тр}} + x_{\text{кабз}} \cdot \ell, \quad (3.25)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $x_{\text{каб3}} = 0,06 \text{ Ом/км}$ – активний опір кабелю ААБ-1 3х95;

$$x_3 = 0,018 + 0,06 \cdot 0,27 = 0,034 \text{ Ом}$$

Оскільки до точки 3 два однакових трансформатора та їх кабелі підключені паралельно, то активний опір складатиме:

$$r_{T3} = \frac{0,094 \cdot 0,094}{0,094 + 0,094} = 0,047 \text{ Ом}$$

А індуктивний опір буде рівним:

$$x_{T3} = \frac{0,034 \cdot 0,034}{0,034 + 0,034} = 0,017 \text{ Ом}$$

Визначимо трифазний струм короткого замикання в точці К2:

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,047^2 + 0,017^2}} = 4621 \text{ А}$$

Визначимо двофазний струм короткого замикання в точці К2:

$$I_{K2}^{(2)} = 0,87 \cdot I_{K2}^{(3)} \quad (3.26)$$

$$I_{K2}^{(2)} = 0,87 \cdot 4621 = 4020 \text{ А}$$

3.4 Вибір апаратури управління та захисту низьковольтної кабельної мережі

Автоматичні вимикача вибирають за призначенням, за номінальною напругою, за номінальним струмом та струмом відключення, при цьому повинні виконуватися наступні умови:

$$\text{За номінальною напругою} \quad U_{\text{н.м}} \geq U_c \quad (3.27)$$

$$\text{За номінальним струмом} \quad I_{\text{н.в}} \geq I_{\text{нн}} \quad (3.28)$$

$$\text{За струмом відключення} \quad I_{\text{вимк}} \geq 1,2 \cdot I_{K2}^{(2)} \quad (3.29)$$

де $U_{\text{н.м}}$ – номінальна напруга мережі;

$I_{\text{н.в}}$ – номінальний струм вимикача;

$I_{\text{вимк}}$ – номінальний струм вимкнення.

Для захисту споживачів будинку виберемо загальний автоматичний вимикач типу ВМ250У3, результати вибору занесені в таблицю 3.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1. – Результати вибору загального автоматичного вимикача

Каталожні дані	Умова	Розрахункові дані
$U_{н.м} = 400 \text{ В}$	\geq	$U_c = 380 \text{ В}$
$I_{н.в} = 1200 \text{ А}$	\geq	$I_{нн} = 578 \text{ А}$
$I_{вИМК} = 5 \text{ кА}$	\geq	$I_k = 4,82 \text{ кА}$

Вибір автоматичного вимикача для захисту ліфтової установки:

Пусковий струм електродвигуна:

$$I_{п} = i_{п} \cdot I_{нОМ} \quad (3.30)$$

$$I_{п} = 6,5 \cdot 15,1 = 98,15 \text{ А}$$

Струм спрацювання (відсічки):

$$I_{спр} = 1,25 \cdot I_{п} \quad (3.31)$$

$$I_{спр} = 1,25 \cdot 98,15 = 123 \text{ А}$$

Приймемо уставку (миттєве спрацювання) $I_y = 400 \text{ А}$.

Виберемо автомат типу А3710Б, результати вибору занесені в таблицю

3.2.

Таблиця 3.2. – Результати вибору вимикача ліфтової установки

Каталожні дані	Умова	Розрахункові дані
$U_{н.м} = 400 \text{ В}$	\geq	$U_c = 380 \text{ В}$
$I_{н.в} = 40 \text{ А}$	\geq	$I_p = 15,1 \text{ А}$
$I_y = 400 \text{ А}$	\geq	$I_{спр} = 123 \text{ А}$

3.5 Перевірка кабелю на термічну стійкість та економічну щільність струму

Перевірка кабелю по термічній стійкості:

$$S = I_{\infty} \cdot \alpha \cdot \sqrt{t_{\phi}}, \quad (3.32)$$

де I_{∞} – встановлений струм короткого замикання, кА;

α – термічний коефіцієнт кабелю до 10 кВ, з алюмінієвими жила $\alpha = 12$;

t_{ϕ} – час проходження струму короткого замикання, $t_{\phi} = 0,8$.

Струм короткого замикання визначимо за формулою:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\infty} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot z_K}, \quad (3.33)$$

де U – номінальна напруга мережі;

z_K – повний опір кабелю:

$$z_K = \sqrt{r_K^2 + x_K^2}, \quad (3.34)$$

де r_K – активний опір кабелю:

$$r_K = r \cdot \ell, \quad (3.35)$$

де $r = 0,326$ Ом/км – активний опір кабелю ААБ-1 3х95;

$$r_K = 0,326 \cdot 0,27 = 0,088 \text{ Ом}$$

x_K – індуктивний опір кабелю:

$$x_K = x \cdot \ell \quad (3.36)$$

де $x = 0,06$ Ом/км – активний опір кабелю ААБ-1 3х95;

$$x_K = 0,06 \cdot 0,27 = 0,016 \text{ Ом}$$

Повний опір рівний:

$$z_K = \sqrt{0,088^2 + 0,016^2} = 0,089 \text{ Ом}$$

Тоді струм короткого замикання:

$$I_{\infty} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,089} = 2465 \text{ А}$$

Термічна стійкість:

$$S = 2,465 \cdot 12 \cdot \sqrt{0,8} = 26,5 \text{ мм}^2$$

Вибраний кабель підходить по термічній стійкості.

Перевіримо кабель по економічній щільності струму.

$$S_e = \frac{I_p}{J_e}, \quad (3.37)$$

де $J_e = 1,7$ – економічна щільність струму;

I_p – робочий струм:

$$I_p = \frac{S_{\text{л}}}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (3.38)$$

де $S_{\text{л}}$ – повна потужність на лінії

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_p = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 159 \text{ A}$$

$$S_e = \frac{159}{1,7} = 93,5 \text{ мм}^2$$

Вибраний кабель підходить по економічній щільності струму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Загальною метою дипломного проекту було розробити електропривод ліфта та виконати аналіз режимів його роботи. Для реалізації поставленої мети в дипломному проекті було виконано обґрунтування доцільності застосування частотно-регульованого електроприводу для ліфта. Виконаний розрахунок потужного приводу і запропонована конкретна схема електроприводу на базі частотного перетворювача японської фірми "OMRON" серії SYSDRIVE 3G3FV.

Результати досліджень підтверджують високу якість статичних та енергетичних характеристик при частотному регулюванні.

В дипломному проекті детально розглянуті питання динамічних режимів роботи ліфта шляхом математичного моделювання в пакеті MATLAB, для порівняння виконаних розрахунків перехідних процесів при живленні синусоїдальним коливанням і при живленні від автономного інвертора напруги.

При розгляданні питання електропостачання ми прийшли до висновку, що при застосуванні частотно-регульованого електропривода схему електропостачання змінювати не потрібно.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

ЛІТЕРАТУРА

1. Чутчиков П. И. Ремонт лифтов [Текст] : учеб. пособие / П. И. Чутчиков. – М.: Стройиздат, 1983. – 271 с.
2. Фираго Б. И. Теория электропривода / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. — 585 с.
3. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.
4. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0. – СПб.: Корона-принт, 2001. – 320с. : ил.
5. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
6. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода [Текст] : учебник для вузов / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер – 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
7. Типовой электропривод промышленных установок [Текст] : учебник для вузов / С.А. Волотковский, В.И. Емец, В.К. Козло и др. – Киев: Вища школа, 1983. – 312с.
8. Есаков В. П. Электрооборудование и электропривод промышленных установок / В.П. Есаков. – Киев: Головное издательство, 1981. – 248с.
9. Теория электропривода: Методические указания и типовые задания к проекту / И. Я. Браславский, Е. Г. Казаков, В. И. Лихошерст, В. П. Метельков. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 1999. – 56 с.
10. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
11. Бычков В. П. Электропривод и автоматизация металлургического производства [Текст] : учеб. пособие / В.П. Бычков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1977. – 391 с.
12. Кравчик А. Э. Справочник по асинхронным двигателям серии 4А / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. — 504 с. : ил.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216с. : ил.
14. Сандлер А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.
15. Дмитриков В. Ф. Теория и методы анализа преобразователей частоты и ключевых генераторов / В.Ф. Дмитриков, В.Е. Тонкаль. – М.: Энергия, 1988. – 312с.
16. Липкин Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б.Ю. Липкин. – М.: Высшая школа, 1990. – 366с. : ил.
17. Коновалова Л. Л. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Л.Л. Коновалова, Л.Д. Рожкова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528с. : ил.
18. Блок В. М. Пособие к курсовому и дипломному проектированию / В.М. Блок, Г.К. Обушев, Л.Б. Паперно и др. – М.: Высшая школа, 1990. – 383с.
19. Удут Л. С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 156 с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-03	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		