

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 асинхронного електроприводу шламового насосу в умовах
гірничозбагачувального виробництва**

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Максим ПАВЛІЧУК

Керівник випускної роботи _____ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ

Нормо контролер _____ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ

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

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

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ПАВЛІЧУК Максим Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Модернізація асинхронного електроприводу шламового насосу в
умовах гірничозбагачувального виробництва

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація
асинхронного електроприводу шламового насосу в умовах
гірничозбагачувального виробництва
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та
розрахунок статичних характеристик привода; II. Обґрунтування і розробка
системи керування електроприводом; III. Моделювання динамічних режимів
роботи привода механізму на ЕОМ.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Загальний вид механізму та технічна характеристика; II.
Розрахунок статичних характеристик системи електроприводу; III.
Елементна база системи електроприводу; IV. Система керування
електроприводом; V. Модель для дослідження динамічних процесів; VI.
Дослідження динаміки системи електроприводу.-

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Тетяна БЕРІДЗЕ		
II	Тетяна БЕРІДЗЕ		
III	Тетяна БЕРІДЗЕ		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Основні відомості про технологічний механізм	21.05.26
2	Обґрунтування і вибір системи електроприводу	24.05.26
3	Розрахунок потужності і вибір електродвигуна	27.05.26
4	Розрахунок перетворювача	29.05.26
5	Розрахунок та побудова характеристик	31.05.26
6	Обґрунтування і вибір структури системи керування	02.06.26
7	Розрахунок параметрів елементів системи керування	07.06.26
8	Розробка алгоритмів та програмного забезпечення	11.06.26
9	Моделювання динамічних режимів	14.06.26
10	Аналіз якісних показників розробленої системи	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Максим ПАВЛІЧУК
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Тетяна БЕРІДЗЕ
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Модернізація асинхронного електроприводу шламового насосу в умовах гірничозбагачувального виробництва»

52 с., 18 рис., 35 літературних джерел

Мета роботи: Зниження питомого споживання електроенергії та підвищення експлуатаційного ресурсу технологічних агрегатів гідротранспорту збагачувальних фабрик шляхом переведення асинхронного електроприводу шламового насосу з нерегульованого режиму на частотно-регульований, а також підвищення енергоефективності, експлуатаційної надійності та довговічності роботи шламових насосів гірничозбагачувального комбінату шляхом впровадження системи частотно-регульованого асинхронного електроприводу, адаптованої до важких умов гідротранспортування абразивних сумішей зі змінною щільністю.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Проаналізувати режими роботи шламових (грунтових) насосів, які здійснюють перекачування високоабразивних пульп, та визначити основні причини низької енергоефективності наявного обладнання.

Провести аналіз технологічних режимів роботи систем гідротранспорту на збагачувальних фабриках та виявити основні причини передчасного виходу з ладу елементів нерегульованого насосного обладнання.

Обґрунтувати доцільність заміни механічного регулювання витрати пульпи (дроселювання або зміна рівня в зумпфі) на технологію частотного регулювання швидкості обертання вала двигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

Дослідити вплив прямого пуску та традиційного (засувного) методу регулювання продуктивності на енергетичні показники приводу та інтенсивність гідроабразивного зносу робочих коліс насосів і трубопроводів.

Розробити математичну модель гідромеханічної системи "перетворювач частоти – асинхронний двигун – шламовий насос – трубопровід" для дослідження динамічних та усталених режимів роботи.

Обґрунтувати вибір оптимальної структури перетворювача частоти та алгоритму керування (векторне керування або скалярне керування з компенсацією ковзання), здатного забезпечити надійний пуск заповненого шлаком насоса та подолання потенційних замулювань магістралі.

Розрахувати критичну (мінімальну) швидкість потоку в трубопроводі для виключення ризику завалювання (осадження твердої фази пульпи) при зниженні частоти обертання насосу.

Сформулювати технічні вимоги щодо апаратного захисту силової електроніки та електродвигунів від агресивного впливу навколишнього середовища (високої вологості, струмопровідного пилу, вібрацій), характерного для цехів збагачення.

Провести техніко-економічний аналіз проєкту модернізації із визначенням річної економії електроенергії та терміну окупності капітальних інвестицій.

Виконати оцінку очікуваного техніко-економічного ефекту від модернізації, враховуючи економію електроенергії за законами пропорційності лопатевих машин та зниження витрат на капітальні ремонти гідравлічної частини.

ШЛАМОВИЙ НАСОС, ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНЕ
ВИРОБНИЦТВО, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН,
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ЕЛЕКТРОПРИВІД, ГІДРОТРАНСПОРТ, АБРАЗИВНА ПУЛЬПА,
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, ЗАВАЛЮВАННЯ ТРУБОПРОВОДУ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок характеристик розімкненої системи привода	15
1.1. Основні відомості про промислову установку, загальний вид	15
1.2. Розрахунок потужності і вибір електродвигуна	20
1.3. Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту	21
1.4. Складання схеми заміщення, математичний опис і розрахунок механічних і енергетичних характеристик.....	24
Розділ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом....	31
2.1. Обґрунтування і вибір системи керування електроприводом.....	31
2.2. Вибір елементів і розрахунок регуляторів аналогової системи керування	34
Розділ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода на ЕОМ	38
3.1. Складання моделі САР ЕП.....	38
3.2. Моделювання динамічних режимів роботи замкненої системи ЕП.....	41
3.3. Аналіз якісних показників розробленої системи ЕП.....	43
Висновки	44
Список використаних джерел	46
Додаток А.....	49
Додаток Б	50
Додаток В	51

Вступ

Роль систем гідротранспорту у гірничо-збагачувальному виробництві

Сучасні гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК) є складними комплексами, де процеси переробки корисної копалини нерозривно пов'язані з використанням колосальних обсягів води. Практично всі ключові етапи збагачення — мокре подрібнення у кульових млинах, флотація, магнітна сепарація, класифікація та згущення — передбачають переміщення твердої фази (руди чи породи) у вигляді водної суспензії, тобто пульпи або шлаку. Головним інструментом для переміщення цих мас між технологічними апаратами, а також для транспортування відходів збагачення (хвостів) до хвостосховищ є шламові насоси. Вони є «серцево-судинною системою» будь-якої збагачувальної фабрики, і від їхньої безперебійної роботи залежить виконання виробничого плану всього підприємства.

Специфіка та екстремальні умови роботи шламових насосів

Робота шламових насосів суттєво відрізняється від перекачування чистої води і відбувається у надзвичайно важких умовах. Перекачувана гідросуміш містить велику кількість твердих, часто гострих і дуже твердих часток (кварц, залізна руда, граніт), що робить її надзвичайно абразивною. Крім того, щільність та в'язкість пульпи є нестабільними величинами. Вони постійно змінюються залежно від режиму роботи млинів, якості вихідної руди та кількості доданої води.

Такі коливання параметрів середовища призводять до постійних змін моменту опору на валу приводного електродвигуна. У моменти збільшення щільності гідросуміші (так званого "перевантаження по твердому") двигун стикається зі значним зростанням споживаного струму, що викликає його перегрів та прискорене старіння ізоляції.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки традиційних нерегульованих електроприводів

Історично склалося так, що переважна більшість шламових насосів на вітчизняних ГЗК оснащені нерегульованими асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором, які підключаються до мережі живлення напряму або через пристрої плавного пуску (софтстартери). Продуктивність (напір та витрата) у таких системах регулюється суто механічним шляхом — за допомогою часткового перекриття засувки на напірному трубопроводі. Цей метод дроселювання має низку критичних недоліків:

По-перше, він є вкрай неефективним з точки зору енергозбереження. Електродвигун постійно працює на номінальних обертах, споживаючи максимум потужності з мережі, тоді як значна частина цієї енергії марно витрачається на подолання штучно створеного гідравлічного опору на засувці.

По-друге, частково закрита засувка в умовах інтенсивного потоку абразивних часток піддається катастрофічно швидкому гідроабразивному зносу. Метал буквально "виїдається" пульпою, що вимагає часткої заміни дорогої запірної арматури.

По-третє, прямий пуск потужного насоса супроводжується величезними пусковими струмами та механічними ударами, які передаються через муфту на вал та підшипникові вузли, провокуючи появу мікротріщин у масивному чавунному робочому колесі та прискорюючи вихід з ладу підшипників.

Переваги модернізації на базі частотно-регульованого приводу (ЧРП)

Радикальним вирішенням комплексу цих проблем є перехід від механічного дроселювання до параметричного керування насосною

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

установкою шляхом зміни частоти обертання робочого колеса. Використання сучасного частотно-регульованого приводу дозволяє динамічно підлаштовувати швидкість насоса під поточні потреби технологічного процесу.

Завдяки відомим у гідравліці законам пропорційності лопатевих машин, споживана насосом потужність перебуває у кубічній залежності від частоти його обертання. Це означає, що зниження швидкості обертання всього на невелику частку призводить до дуже значного падіння споживаної електроенергії. У масштабах збагачувальної фабрики, де працюють десятки потужних насосів, така економія обчислюється мегаватами потужності.

Крім того, плавне регулювання швидкості дозволяє повністю відмовитися від використання засувки для регулювання потоку (вони залишаються лише як запірні арматури для ремонтів). Зниження швидкості потоку гідросуміші у трубопроводах експоненціально зменшує інтенсивність абразивного зносу як самих труб, так і проточної частини насоса (равлика та бронециліндрів). Перетворювач частоти також забезпечує ідеально плавний розгін агрегату, повністю знімаючи проблему гідравлічних ударів та електромеханічних перевантажень під час пуску.

Проблематика впровадження ЧРП в умовах цехів збагачення

Проте, модернізація електроприводу в умовах ГЗК не обмежується простою купівлею та встановленням інвертора. Цех збагачення — це приміщення з надзвичайно агресивним середовищем. Висока вологість через постійні випаровування води та протікання сальників насосів, наявність у повітрі дрібнодисперсного залізорудного або вугільного пилу (який є струмопровідним), а також постійні вібрації від роботи важких кульових млинів створюють серйозну загрозу для ніжної мікропроцесорної техніки силових інверторів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, науково-технічна задача полягає у правильному виборі ступеня захисту оболонок (ІР) електричних шаф, організації ефективної системи клімат-контролю всередині них (ізолювані теплообмінники без прямого контакту із зовнішнім повітрям), а також у розробці спеціалізованих алгоритмів керування. Наприклад, алгоритм приводу повинен вміти розпізнавати ознаки початку осідання твердої фази в трубах (загроза замулювання) і автоматично короткочасно підвищувати продуктивність для промивання магістралі.

Практична значущість дослідження

З огляду на вищезазначене, розробка комплексних технічних рішень для модернізації електроприводів шламових насосів є надзвичайно актуальною задачею для гірничодобувної промисловості. Практичне впровадження результатів таких досліджень дозволяє підприємствам суттєво знизити питомі витрати електроенергії на тонну виробленого концентрату, підвищити надійність обладнання, збільшити міжремонтні інтервали та, зрештою, зменшити собівартість кінцевої продукції, підвищивши її конкурентоздатність на світовому ринку.

Специфіка роботи шламових комплексів на ГЗК

На гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) системи гідротранспорту виконують критично важливу функцію — переміщення подрібненої рудної пульпи між стадіями збагачення, а також транспортування відходів виробництва (хвостів) у хвостосховища. Головним робочим органом цих систем є потужні відцентрові шламові (або ґрунтові) насоси. Особливістю їхньої експлуатації є безперервний характер роботи та перекачування середовищ із високим вмістом твердих абразивних частинок (до **40-50%** за масою).

Традиційно такі насоси комплектуються потужними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, які живляться напряму від мережі

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

та працюють із постійною частотою обертання. Оскільки приплив пульпи з технологічних секцій є нестабільним, регулювання продуктивності насосу зазвичай здійснюється за допомогою засувки (дротування) або за рахунок періодичної роботи "вхолосту" при зниженні рівня в приймальному резервуарі (зумпфі). Це призводить до колосальних втрат енергії та прискореного гідроабразивного зносу робочого колеса й броні (равлика) насоса.

Математичне обґрунтування частотного регулювання

Перехід до частотно-регульованого електроприводу (ЧРП) базується на законах подібності для відцентрових гідродинамічних машин (афінних законах). Згідно з ними, продуктивність насоса Q пропорційна частоті обертання ротора n , напір H пропорційний квадрату частоти, а споживана потужність P — кубу частоти обертання.

Таким чином, зниження частоти обертання вала всього на **20%** ($n = 0.8$) теоретично зменшує споживання електроенергії двигуном майже вдвічі.

Проте при проектуванні алгоритмів керування шламовим насосом існує специфічне обмеження: швидкість руху пульпи у трубопроводі не повинна впасти нижче критичної швидкості замулювання, яка описується рівнянням Дюранда.

Система автоматизації на базі перетворювача частоти повинна суворо контролювати цей поріг.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Порівняння методів регулювання продуктивності шламових насосів

Критерій порівняння	Механічний метод (Дроселювання засувкою)	Електромеханічний метод (Впровадження ПЧ)
Енергетична ефективність	Низька. Надлишковий тиск гаситься на засувці, перетворюючись на тепло і викликаючи кавітацію.	Висока. Двигун споживає рівно стільки енергії, скільки необхідно для поточного об'єму пульпи.
Ресурс гідравлічної частини	Швидкий знос робочого колеса через турбулентні завихрення та високу швидкість обертання.	Збільшення ресурсу в 1.5–2 рази за рахунок зниження середньої швидкості обертання та плавності потоку.
Пускові режими	Важкий пуск із прямими струмами, що викликає просідання напруги в мережі ГЗК.	Плавний розгін із обмеженням пускового струму на рівні номінального. Повна ліквідація гідроударів.

Автоматизація процесу	Складна, низька точність позиціонування механічних приводів засувки.	Легка інтеграція в загальну АСУ ТП фабрики через промислові протоколи (Modbus, Profibus).
------------------------------	--	---

Практична цінність модернізації

Впровадження частотного регулювання для асинхронних двигунів великої потужності (зазвичай від **250 до 1000 кВт**) на шламових насосах забезпечує комплексний ефект. Окрім прямого енергозбереження (яке становить від **20% до 45%** залежно від коливань завантаження фабрики), суттєво знижуються витрати на позапланові ремонти насосних агрегатів. Плавний пуск усуває динамічні удари в редукторах та муфтах, а також мінімізує гідроудари в магістральних трубопроводах, що знижує аварійність усього хвостового господарства ГЗК.

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

1.1. Основні відомості про промислову установку, загальний вид

Широке залучення в експлуатацію родовищ бідних залізних руд стало можливим завдяки освоєнню глибокого їхнього збагачення, що забезпечило виробництво залізорудних концентратів більше високої якості.

Передбачається також освоєння в промислових масштабах більше економічних способів збагачення окислених залізних руд, тому що окислені залізні руди разом з бурозалізнякаковими рудами є найбільш великими потенційними джерелами подальшого розвитку залізорудної бази країни.

Одинична потужність підприємств по переробці руди продовжує рости.

Накопичений науково-дослідний матеріал і коштовний практичний досвід збагачення залізних руд успішно використовується для подальшого поліпшення роботи збагачувальних фабрик, що тільки підкреслює важливість тієї ролі, яку відіграють останні у технологічному процесі в цілому.

Структурна схема збагачувального виробництва видобувного підприємства наведена на рис. 1.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1				Літ.	Лист	Листів
Розробив	Павлічук М.С.										
Перевірів	Берідзе Т.М.									15	16
Реценз.									КНУ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Берідзе Т.М.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

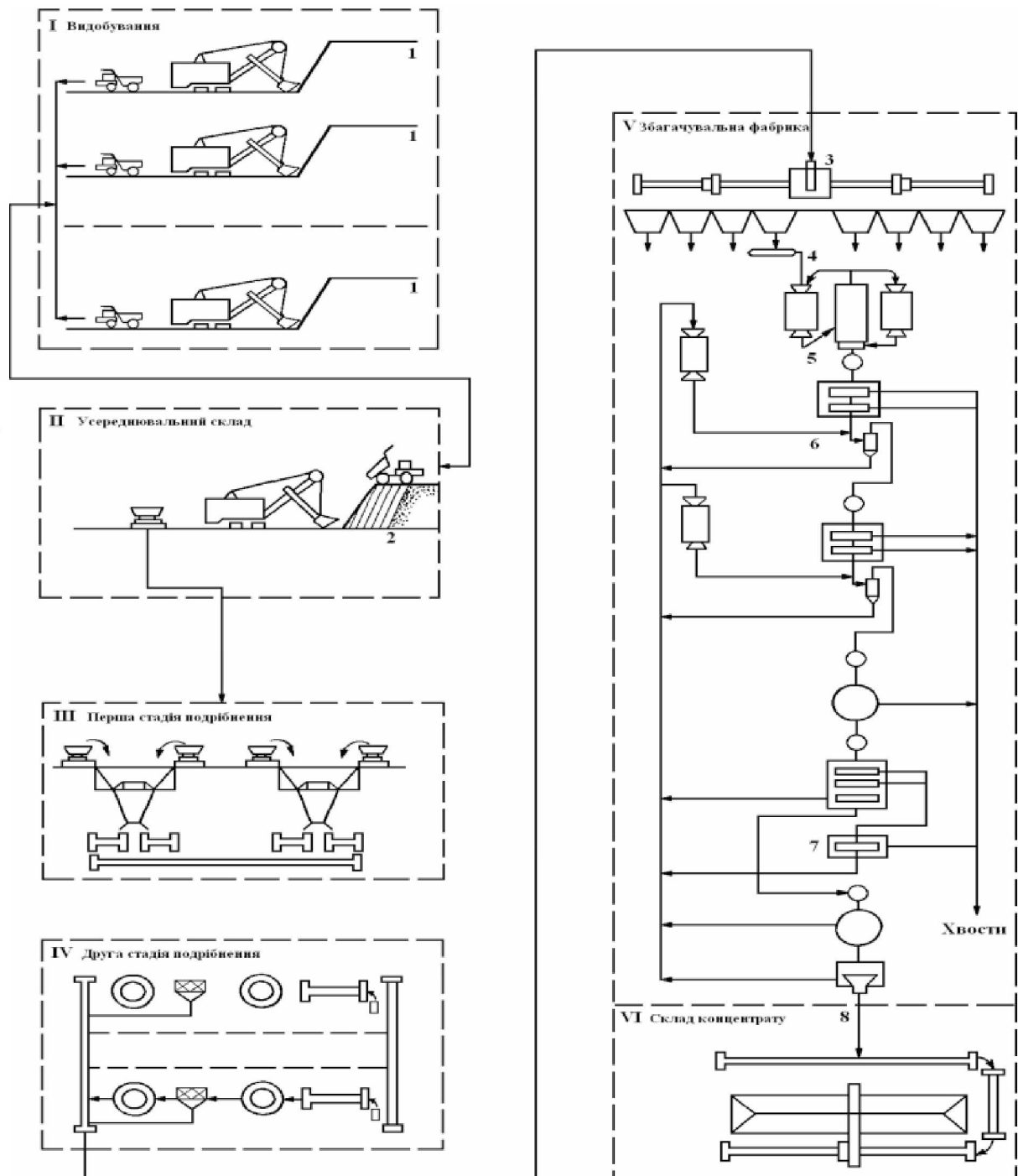


Рисунок 1.1 – Структурна схема збагачувального виробництва видобувного підприємства.

Насосний призначений для перекачування пульпи (Додаток А).

Зовнішній вигляд насоса наведений на рис. 1.2 – 1.3.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд насосу серії М.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

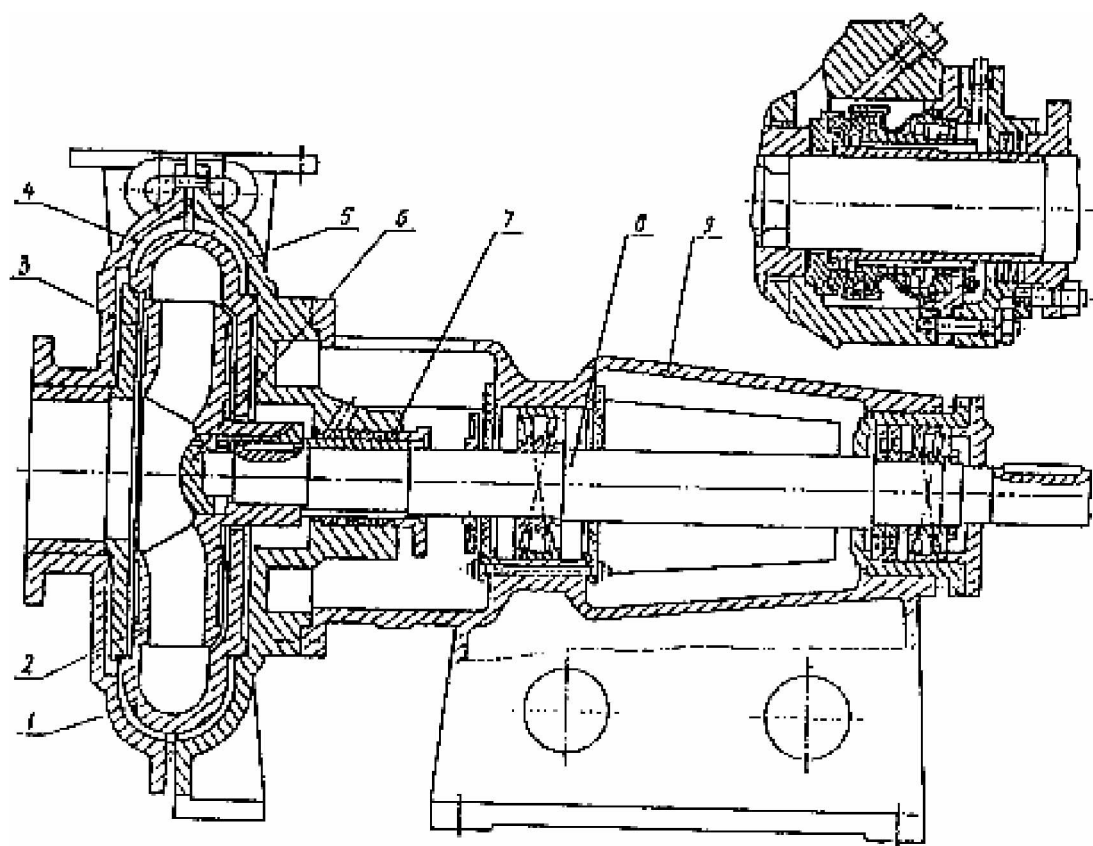


Рисунок 1.4 – Насос серії М у розрізі.

Графік характеристик насоса наведений на рис. 1.4.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16

Арк.

18

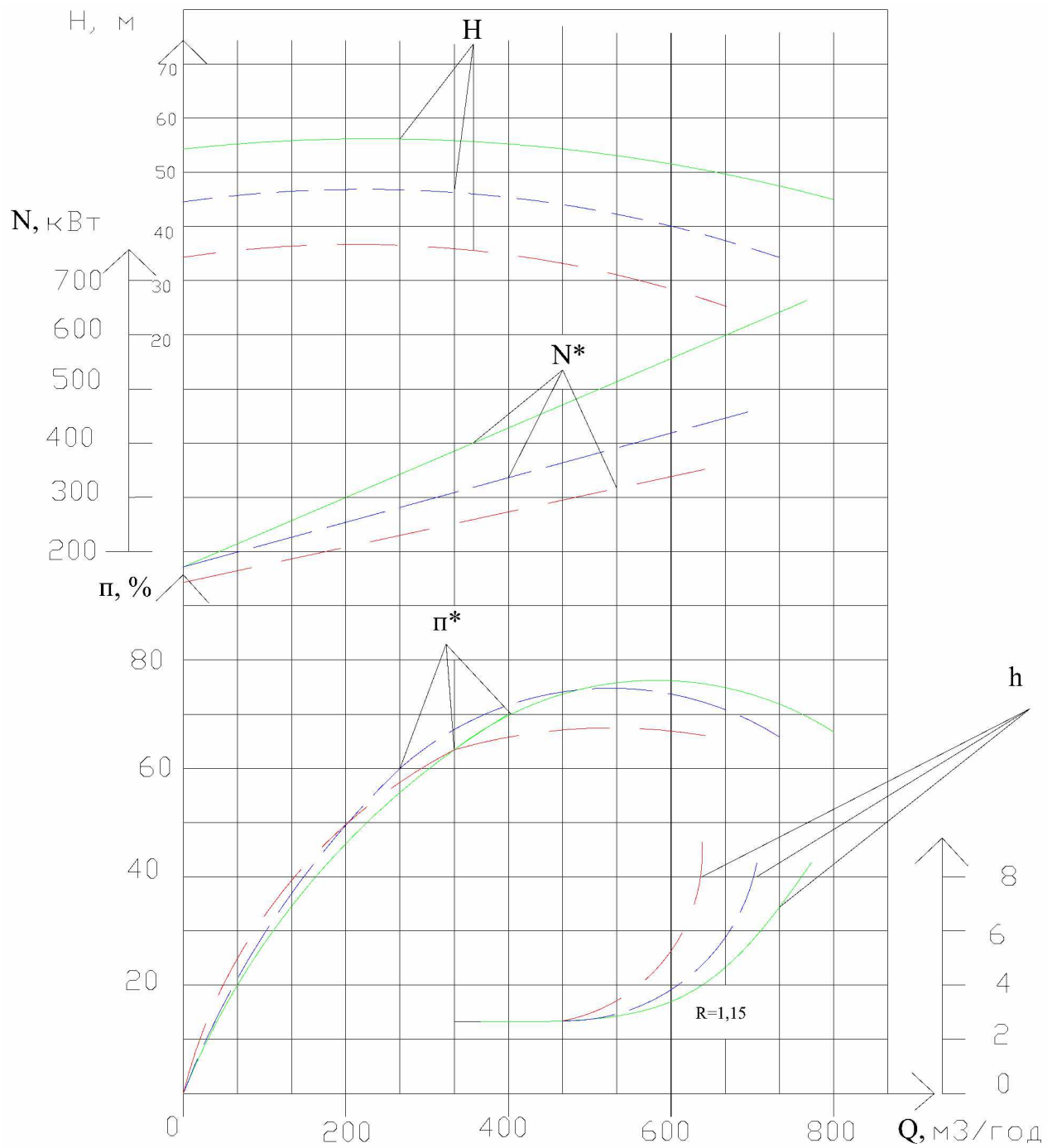


Рисунок 1.5 – Графік характеристик насоса серії М.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16

Арк.

19

1.2. Розрахунок потужності і вибір електродвигуна

Зробимо розрахунок потужності двигуна відповідно до формули:

$$P_p = \frac{\dot{I} \cdot Q \cdot \gamma \cdot g}{\eta} = \frac{\frac{3800}{3600} \cdot 25 \cdot 1350 \cdot 9.8}{0.77} = 453409 \text{ Вт}.$$

$$\text{де } \gamma = 1350 \frac{\text{м}^3}{\text{с}^3},$$

$$g = 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2},$$

$$\dot{I} = 25 \frac{\text{л}}{\text{с}},$$

$$Q = 1.056 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

З огляду на коефіцієнт запасу (який лежить у діапазоні 1.1-1.5, менше значення для могутніших насосів).

Прийmemo $K_3=1.1$ і визначимо потужність на валу насосного агрегату:

$$D_{\tilde{n}} = 1.1 \cdot D_{\delta} = 1.1 \cdot 453409 = 498750 \text{ Вт}; \quad (1.1)$$

З умови вибираємо найбільше найближче з ряду стандартних, значення потужності двигуна: $P_{ном} > P_c$

Вибираємо двигун А-560-500-6 з наступними паспортними даними (Додаток Б).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3. Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту

Принципова можливість регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною частоти живлячої напруги впливає з формули:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1 (s - 1)}{p} \quad (1.2)$$

При регулюванні частоти також виникає необхідність регулювання амплітуди напруги джерела, що впливає з виразу

$$U_1 \approx E_1 = c \cdot \Phi \cdot f_1. \quad (1.3)$$

Перетворювач частоти для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором вибирається за умовами

$$U_{dн} \geq U_n, \quad I_{dн} \geq I_n, \quad P_{dн} \geq P_n, \quad (1.4)$$

де $U_{dн}$, $I_{dн}$, $P_{dн}$ – номінальна напруга, струм і потужність перетворювача відповідно; U_n , I_n , P_n – номінальна напруга, струм і потужність двигуна.

Технічні характеристики ВПЧА-И-06/48-УХЛ.4 (Додаток В).

На рисунку 1.6 показана функціональна схема ВПЧА-И-06/48-УХЛ.4.

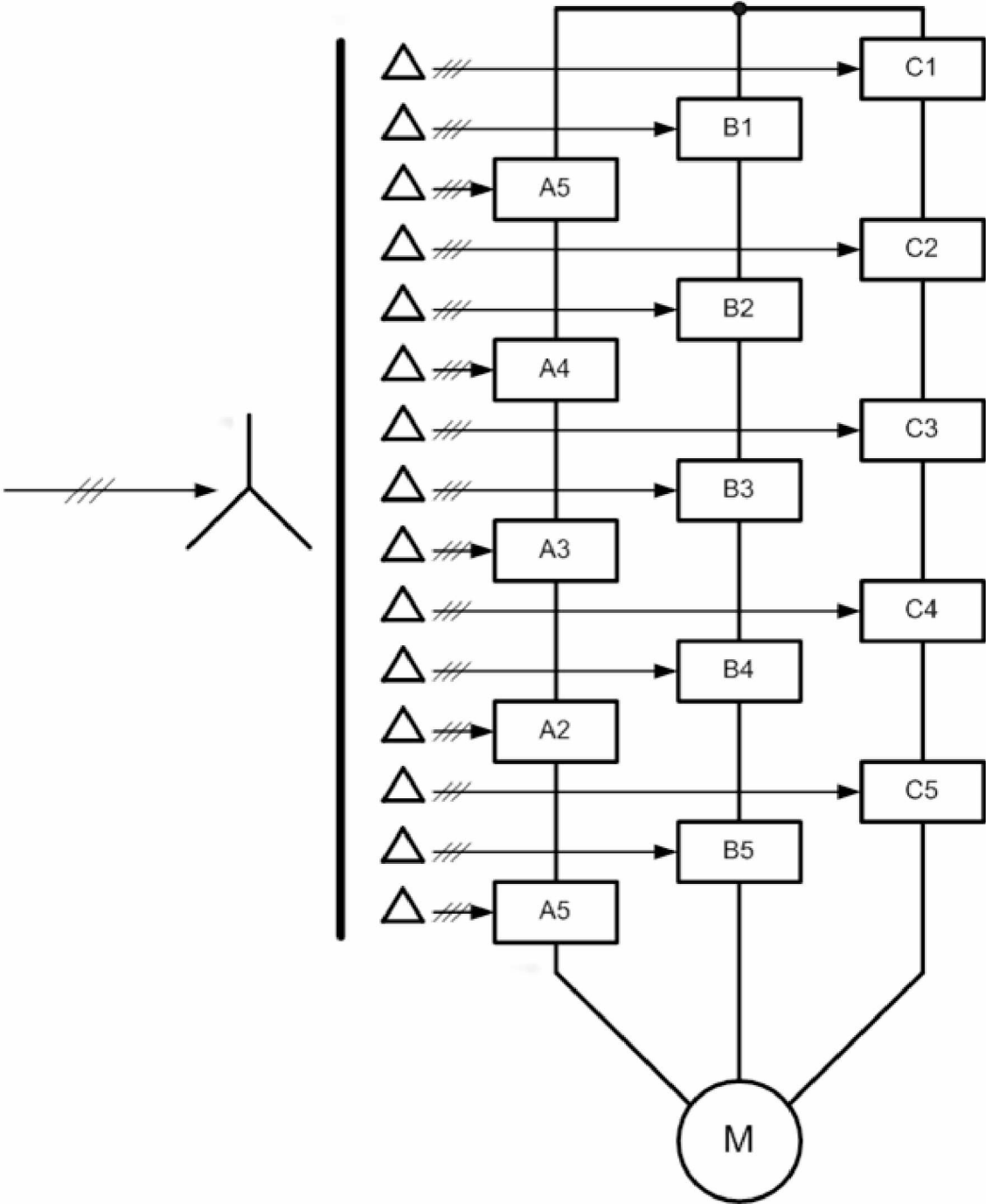


Рисунок 1.6 – Функціональна схема ВПЧА-И-06/48-УХЛ.4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Принципова схема ВПЧА-И-06/48-УХЛ.4 приведена на рисунку 1.7.

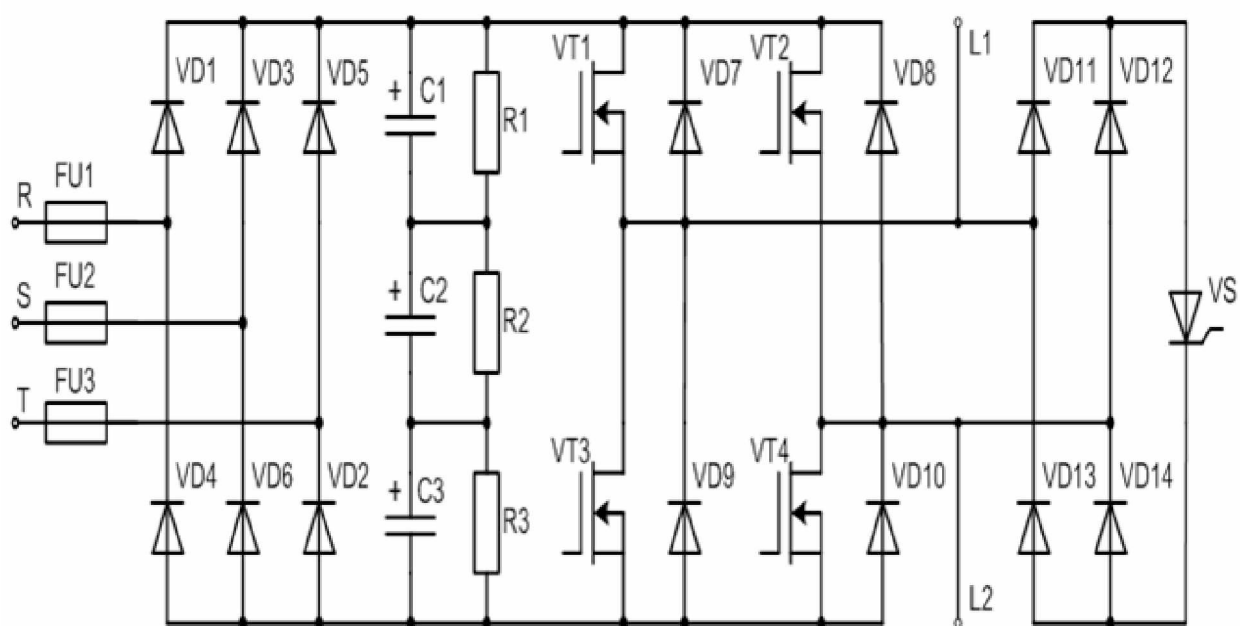


Рисунок 1.7 – Принципова схема ВПЧА-И-06/48-УХЛ.4

1.4. Складання схеми заміщення, математичний опис і розрахунок механічних і енергетичних характеристик

Для подальшого розрахунку механічних характеристик необхідно визначити відсутні параметри асинхронного двигуна згідно зі схемою зміщення показаної на рис. 1.8.

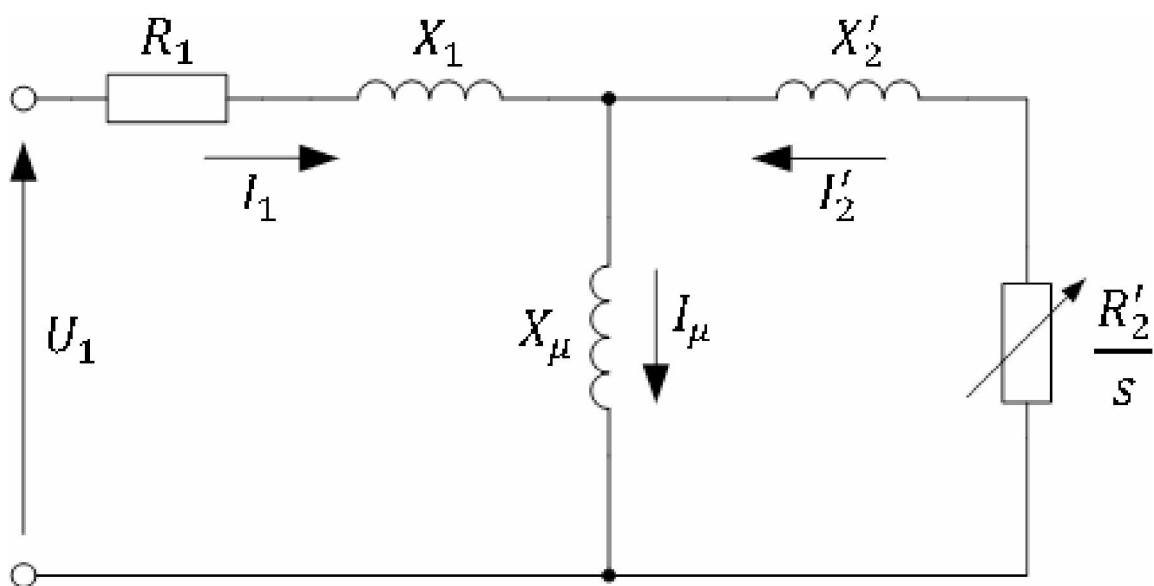


Рис. 1.8 – Схема заміщення фази асинхронного двигуна

Номінальна частота обертання поля статора (синхронна частота обертання) дорівнює

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (1.5)$$

де f_1 – номінальна частота живлячої напруги; p – число пар полюсів статорної обмотки, $p = 1$.

$$n_1 = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об / хв.}$$

Отже, номінальна кутова швидкість обертання поля статора

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}, \quad (1.6)$$

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{4} = 78,5 \text{ рад / с.}$$

Номінальна кутова швидкість обертання ротора дорівнює

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60}, \quad (1.7)$$

де n_n – номінальна частота обертання ротора,

$$\omega_n = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 742,9}{60} = 77,76 \text{ рад / с.}$$

Ковзання дорівнює відносній різниці кутових швидкостей поля статора й ротора двигуна. Тоді номінальне ковзання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1}, \quad (1.8)$$

$$s_H = \frac{750 - 742,9}{750} = 0,0095.$$

Критичне ковзання обчислюється за формулою

$$s_{kp} = \frac{s_H}{1 - 2 \cdot a \cdot s_H \cdot (\gamma_{\max} - 1)} \cdot (\gamma_{\max} + \sqrt{\gamma_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot a \cdot s_H \cdot (\gamma_{\max} - 1))}),$$

де $\gamma_{\max}$ – кратність максимального (критичного) обертаючого моменту до номінального; a – залежить від потужності АД і змінюється від 1 до 2.

У розрахунках можна прийняти $a = 1,5$.

Тоді

$$s_{kp} = \frac{0,0095}{1 - 2 \cdot 1,5 \cdot 0,0095 \cdot (2,2 - 1)} \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - (1 - 2 \cdot 1,5 \cdot 0,0095 \cdot (2,2 - 1))}) = 0,041$$

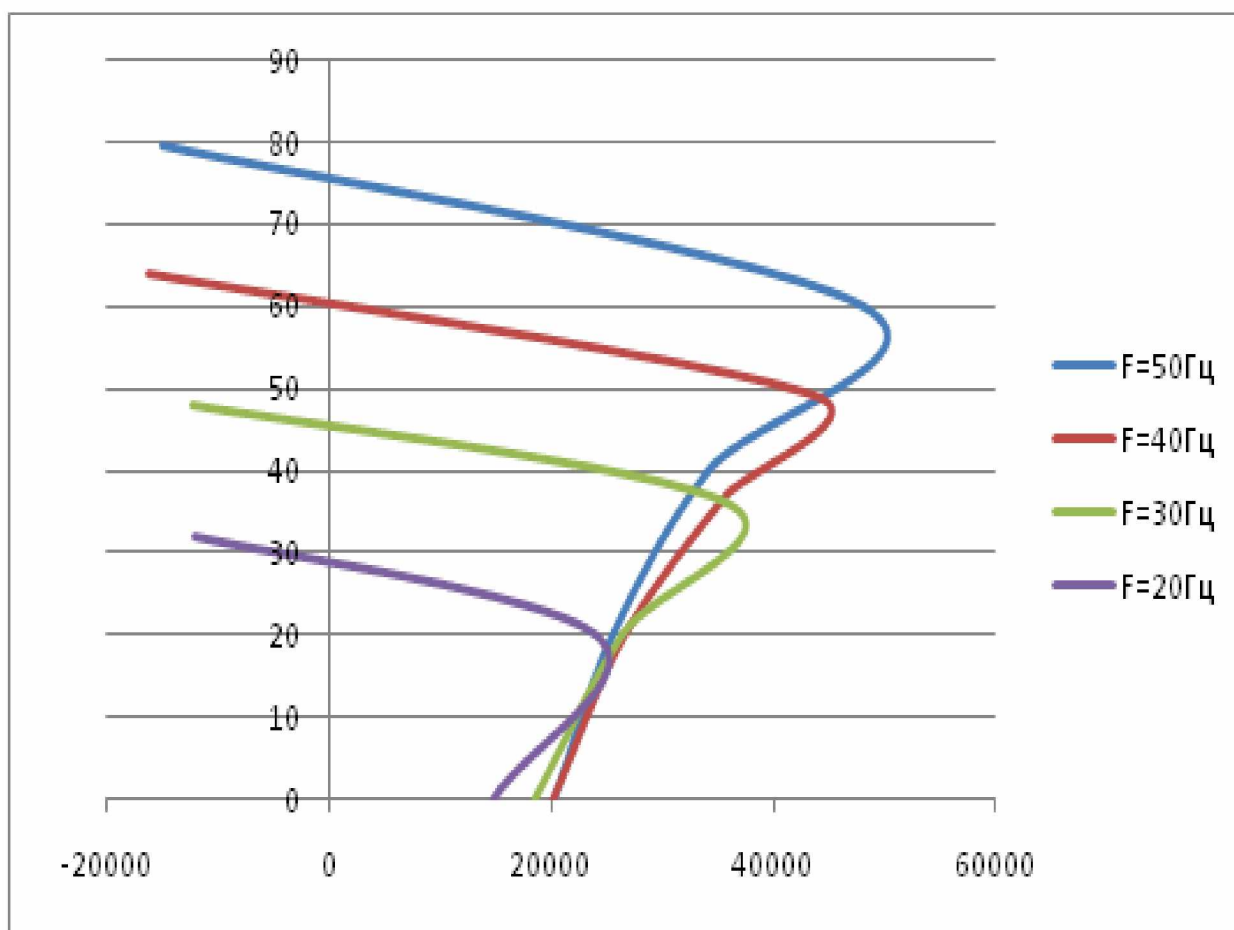


Рисунок 1.9 – Сімейство механічних характеристик

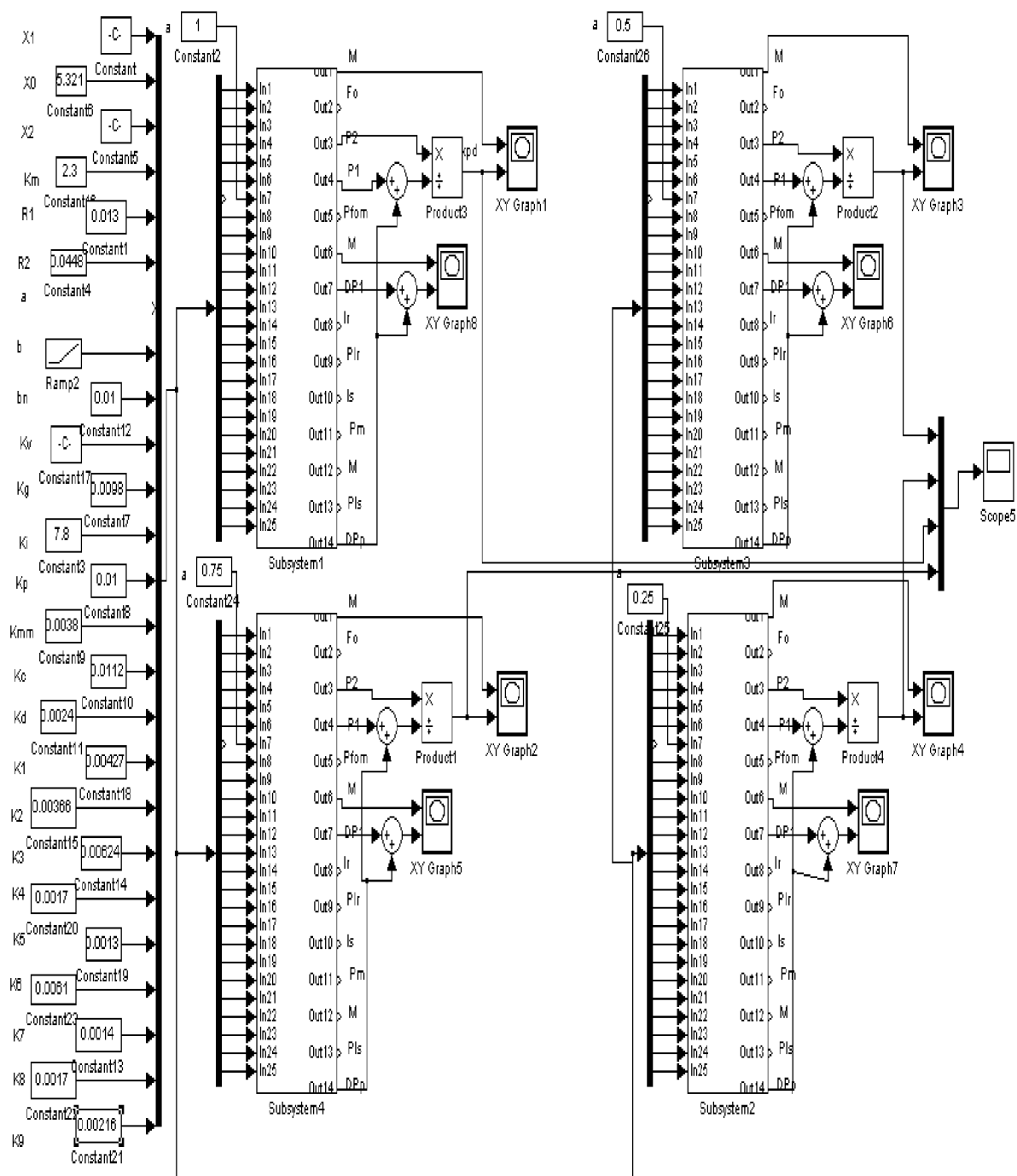


Рисунок 1.10 – Математична модель енергетичних показників системи ПЧ-АД

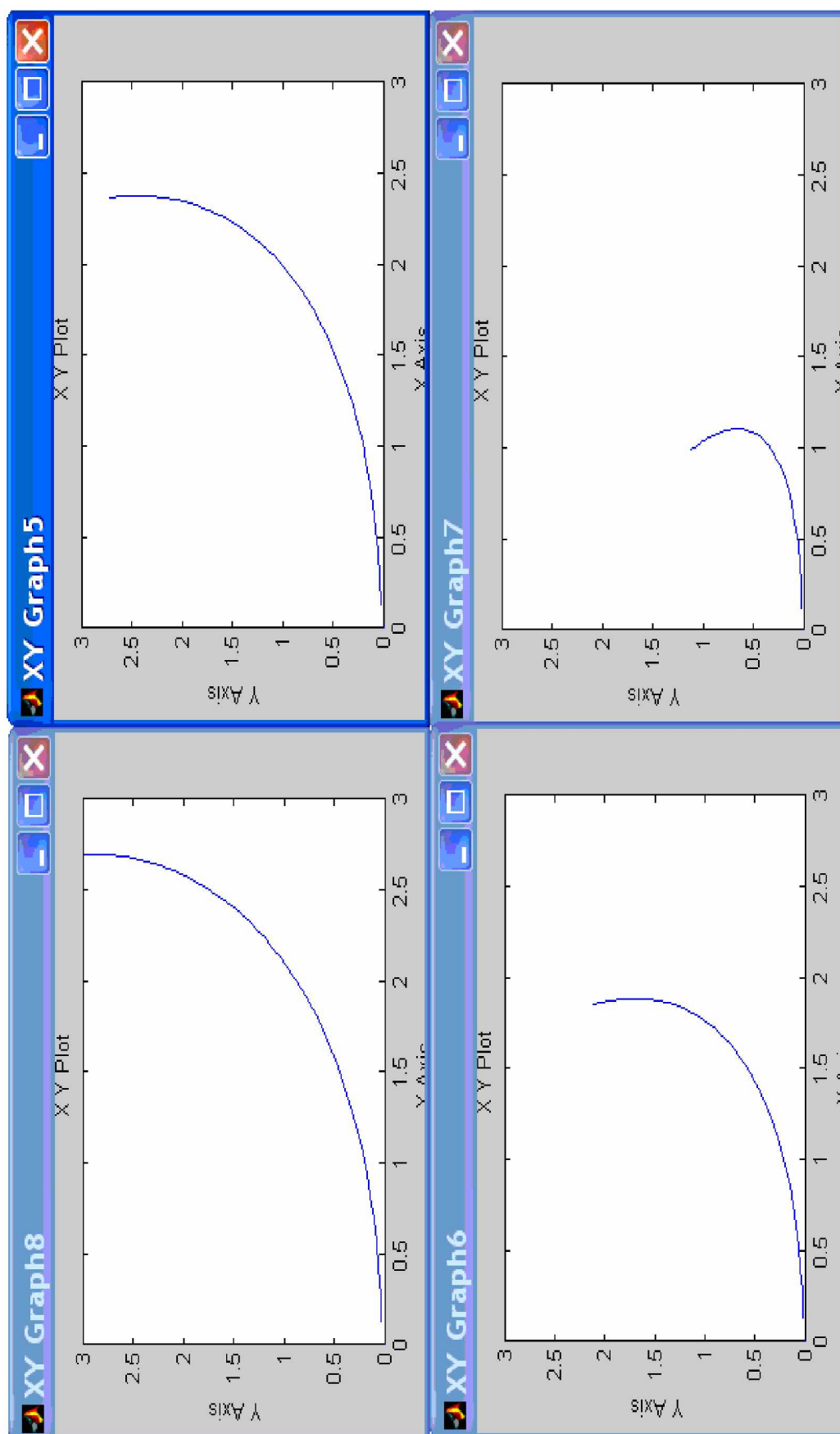


Рисунок 1.11 – Залежність сумарних втрат системи ПЧ-АД від моменту

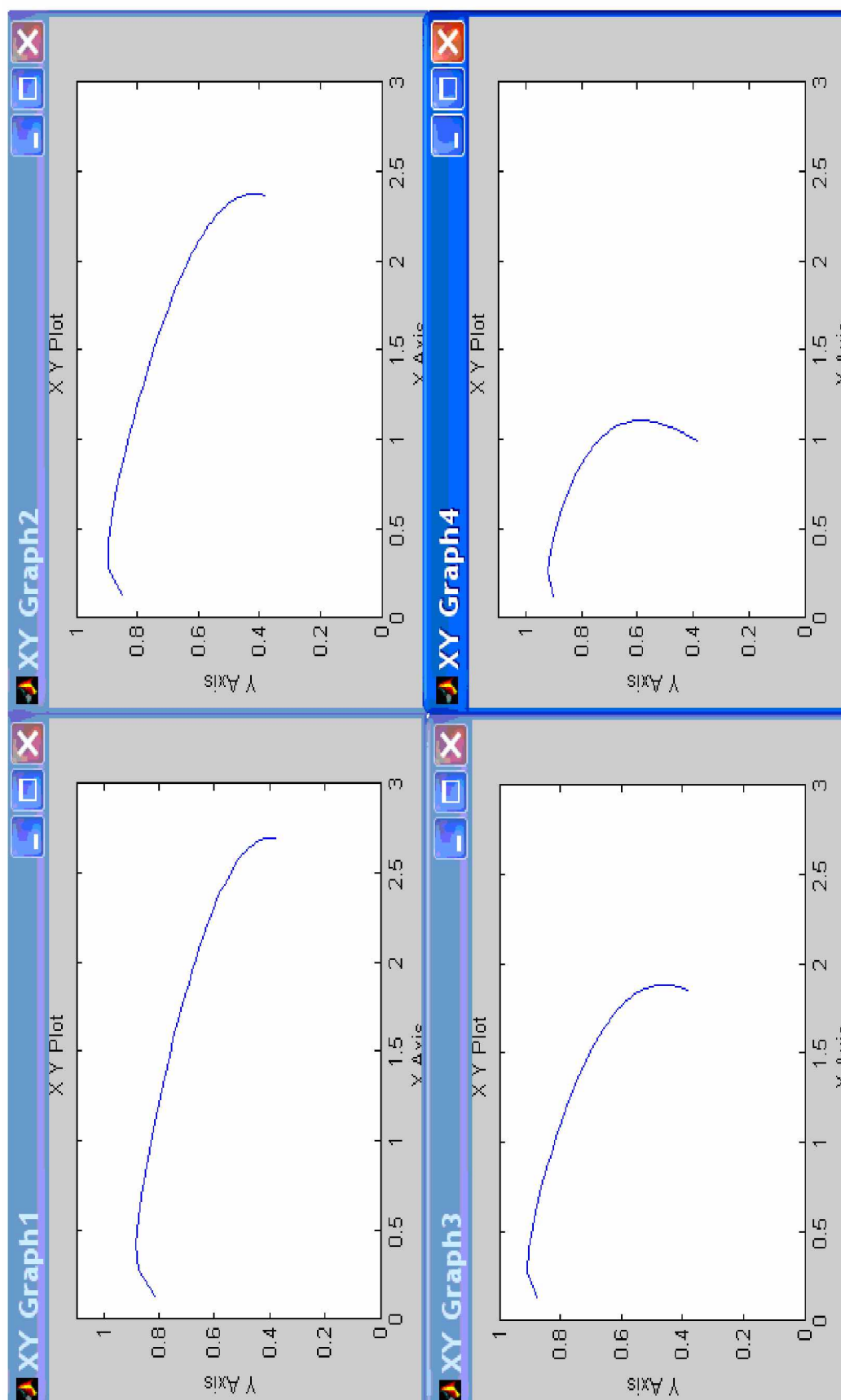


Рисунок 1.12 – Залежність ККД системи ПЧ-АД від моменту

Розділ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом

2.1. Обґрунтування і вибір системи керування електроприводом

Для створення глибоко регульованого високо динамічного електроприводу найбільш доцільним методом управління є векторне управління з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора.

При цьому найпростіше здійснюється регулювання швидкості при стабілізації потокозчеплення ротора.

Реалізація функціональних і координатних перетворювачів для системи векторного управління на базі аналогової техніки дуже складна.

Використання сучасних засобів мікропроцесорної техніки дозволяє розробникам створювати компактні, багатофункціональні і високоефективні системи векторного управління.

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{r\alpha}[n] = k_1 T \sum_{i=1}^n u_{s\alpha}(i) + k_2 T \sum_{i=1}^n i_{s\alpha}(i) + k_3 i_{s\alpha}[n]; \\ \psi_{r\beta}[n] = k_1 T \sum_{i=1}^n u_{s\beta}(i) + k_2 T \sum_{i=1}^n i_{s\beta}(i) + k_3 i_{s\beta}[n]; \\ \omega[n] = \frac{\left(\frac{i_{s\alpha}[n] - i_{s\alpha}[n-1]}{T} - A \cdot U_{s\alpha}[n] + B \cdot i_{s\alpha}[n] \right) \cdot \phi_1[n]}{C \cdot \phi_3[n]} - \\ - \frac{\left(\frac{i_{s\beta}[n] - i_{s\beta}[n-1]}{T} - A \cdot U_{s\beta}[n] + B \cdot i_{s\beta}[n] \right) \cdot \phi_2[n]}{C \cdot \phi_3[n]}; \end{array} \right. \quad (2.1)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив	Павлічук М.С.				Розділ 2	Літ.	Лист
Перевірів	Берідзе Т.М.						Листів
Реценз.							
Н. Контр.	Берідзе Т.М.					КНУ ЕЕМ-23ск	
Затвердив	Пересунько І.І.						
						31	7

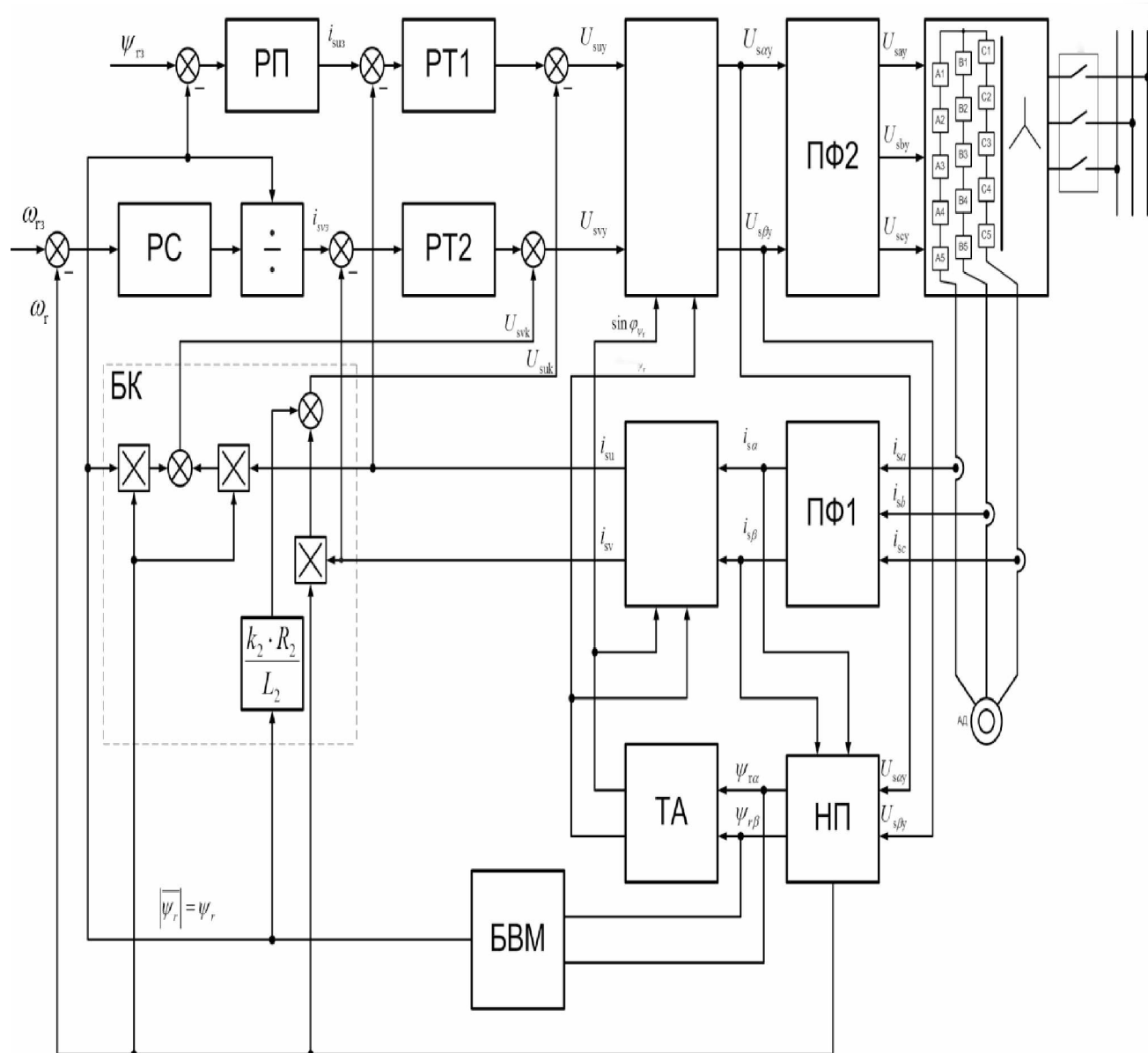


Рисунок 2.1 - Схема електрична функціональна системи регулювання швидкості при векторному керуванні асинхронним двигуном.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16

Арк.

32



2.2. Вибір елементів і розрахунок регуляторів аналогової системи керування

Розрахунок параметрів регуляторів.

Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму:

$$K_{oc} = \frac{U_y}{2 \cdot I_n} = \frac{10}{2 \cdot 63,2} = 0,079; \quad (2.2)$$

Потокозчеплення визначаємо за формулою:

$$\Psi = \frac{M_n}{1,5 \cdot I_n \cdot P_{II} \cdot K_2} = \frac{6430}{1,5 \cdot 63,2 \cdot 4 \cdot 0,977} = 17,35; \quad (2.3)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по потокозчепленню:

$$K_{\Psi} = \frac{U_y}{\Psi} = \frac{10}{17,35} = 0,576; \quad (2.4)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості:

$$K_{ош} = \frac{U_y}{\omega_n} = \frac{10}{77,76} = 0,129; \quad (2.5)$$

Передатна функція перетворювача частоти:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_{пч} \cdot p + 1} = \frac{3468}{0,000125 \cdot p + 1}; \quad (2.6)$$

де $T_{пч} = 0,000125$ - постійна часу ПЧ.

Коефіцієнт перетворювача частоти:

$$K_{пч} = \frac{U_{qn}}{U_y} = \frac{3468}{10} = 346,8; \quad (2.7)$$

Передатна функція регулятора потоку:

$$W_{pn}(p) = \frac{K_{oc} \cdot (T_2 \cdot p + 1)}{4 \cdot T_\mu \cdot K_\psi \cdot K_{oc} \cdot p} = \frac{0,079 \cdot (0,723p + 1)}{0,000125 \cdot 0,576 \cdot 0,2853 \cdot p} = \frac{0,057p + 0,079}{0,000082p}. \quad (2.8)$$

Передатна функція регулятора струму:

$$W_{pi}(p) = \frac{R_1' \cdot (T_1' \cdot p + 1)}{2 \cdot T_\mu \cdot K_\pi \cdot K_{oc} \cdot p} = \frac{1,65 \cdot (0,008 \cdot p + 1)}{0,000125 \cdot 346,2 \cdot 0,097 \cdot p} = \frac{0,00132p + 1,65}{0,0068p}. \quad (2.9)$$

Передатна функція моменту:

$$W_M(p) = \frac{3}{2} \cdot P_{II} \cdot K_2 = \frac{3}{2} \cdot 4 \cdot 0,977 = 5,86 \quad (2.10)$$

Передатна функція АД по координатних осях x і y :

$$W_x(p) = W_y(p) = \frac{\frac{1}{R_1}}{T_1' \cdot p + 1} = \frac{\frac{1}{1,65}}{0,008 \cdot p + 1} = \frac{0,606}{0,008p + 1}. \quad (2.11)$$

Передатна функція регулятора швидкості:

$$W_{PII}(p) = \frac{2}{3} \cdot \frac{K_{OC} \cdot K_{\Psi} \cdot K_2}{4 \cdot T_{\mu} \cdot P_n \cdot K_{OII}} \cdot j = \frac{0,097 \cdot 0,576 \cdot 0,977}{6 \cdot 0,000125 \cdot 4 \cdot 0,129} \cdot J = 67,5J. \quad (2.12)$$

Пропорційна частота регулятора потокозчепленню:

$$W_{PII} = \frac{K_{OC} \cdot T_2}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{\Psi} \cdot L_m} = \frac{0,057}{0,000082} = 695$$

Інтегральна частина регулятора потокозчепленню:

$$W_{PII} = \frac{K_{OC}}{4 \cdot T_{\mu} \cdot L_m} = \frac{0,079}{0,000082} = 926,5$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пропорційна частина регулятора струму:

$$W_{PTI} = \frac{R_1' \cdot T_1'}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{II} \cdot K_{OC}} = \frac{1,65 \cdot 0,008}{2 \cdot 0,000125 \cdot 346,8 \cdot 0,079} = 1,926$$

Інтегральна частина регулятора струму:

$$W_{PCC} = \frac{R_1'}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{II} \cdot K_{OT}} = \frac{1,65}{2 \cdot 0,000125 \cdot 346,8 \cdot 0,079} = 240$$

Передатна функція об'єкту потокозчепленню:

$$W_\Psi = \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1} = \frac{0,2853}{0,723p + 1}. \quad (2.13)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Розділ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода на ЕОМ

3.1. Складання моделі САР ЕП

Математична модель системи електропривода ПЧ-АД приведена на рис. 3.1.

Структурна схема розроблена у пакетному приложенні Simulink, який являє собою стандартну процедуру інструментів та засобів, які використовуються за для імітаційного моделювання фізичних процесів та явищ.

Пакетне програмування має за мету використання стандартних пвдпрограм та блоків, що суттєво зменшує час розрахунку перехідних процесів.

Розрахунок за допомогою технічних засобів параметрів електромеханічних систем дозволяє використовувати ці розрахунки для налаштування регуляторів системи керування, та підлаштування їх параметрів для використання у реальних схемах та системах регулювання.

Отже, використовуючи стандартні блоки запропонованої програмної моделі, ми можемо універсалізувати розрахунок та налаштування параметрів регуляторів відповідно до заданих показників якості перехідних процесів технологічного механізму.

Вигляд перехідних процесів має відповідати запропонованій структурі та схемі регулювання координат електроприводу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3				Літ.	Лист	Листів
Розробив	Павлічук М.С.										
Перевірів	Берідзе Т.М.									38	6
Реценз.									КНУ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Берідзе Т.М.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

До того, данну структуру можна використовувати для налаштування регуляторів системи керування, та підлаштування їх параметрів для використання у реальних схемах та системах регулювання схожих за характером протікання перехідних процесів та використаному обладнанні механізмів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Моделювання динамічних режимів роботи замкненої системи ЕП

Для поліпшення регулювальних властивостей електропривода й спрощення його структури прийнята структурна схема АД в системі відліку, орієнтована по векторі потокозчеплення ротора ψ_2 .

У цьому випадку по своїх регулювальних властивостях система наближається до структури електропривода постійного струму із двухзонним регулюванням.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

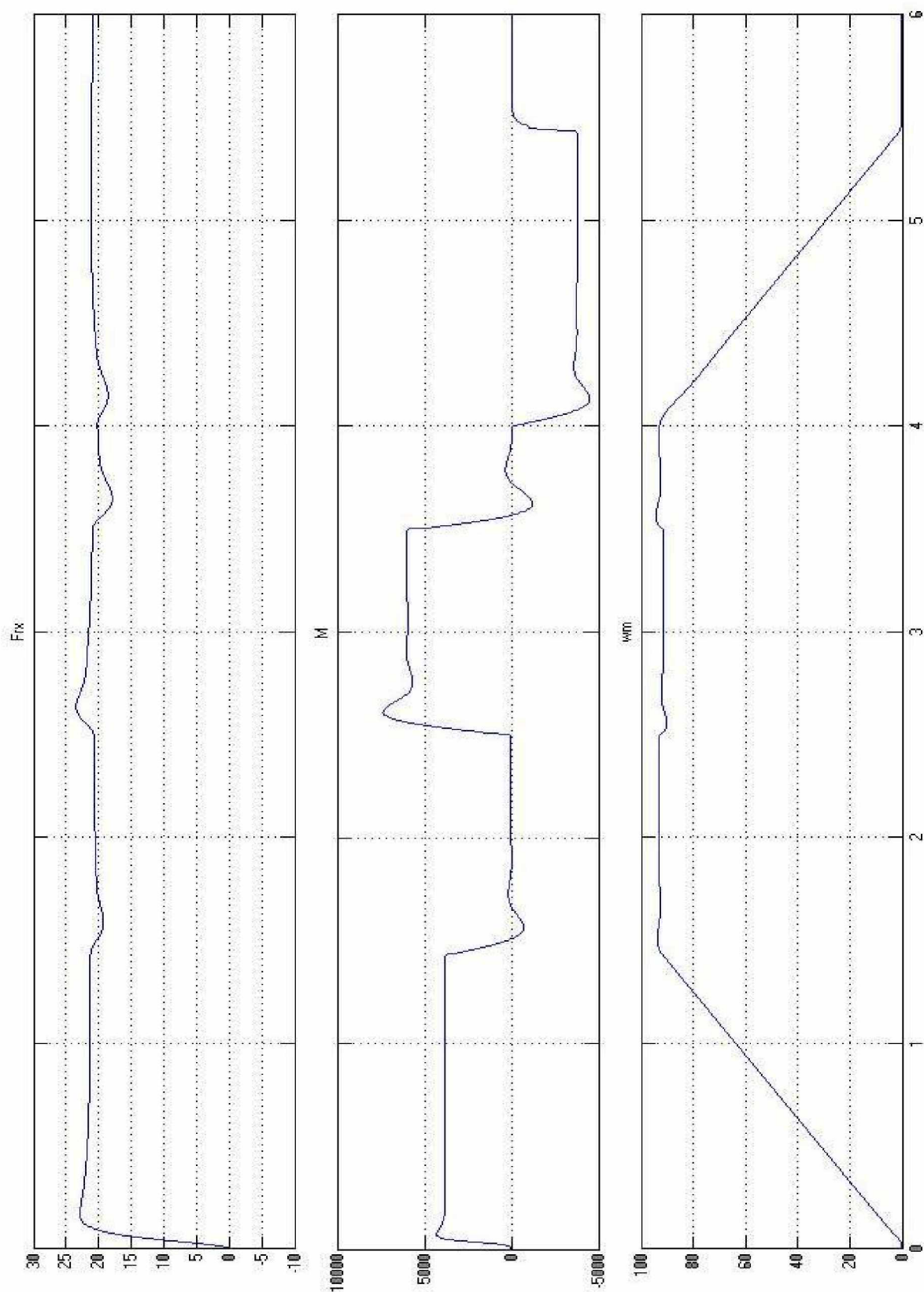


Рисунок 3.2 - Графіки зміни поточозчеплення, моменту та швидкості у пуско-гальмівних режимах

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16

Арк.

42

3.3. Аналіз якісних показників розробленої системи ЕП

Регулювання моменту при накиді навантаження здійснюється за 0,2 с. Як видно з осцилограми при поступовому навантаженні двигуна струм і момент двигуна зростають до номінального значення, а швидкість поступово зменшується від ω_0 до ω_1 .

Це дає можливість розрахувати статизм замкненої системи електроприводу:

$$\Delta\% = \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0} = 0,0516\% \quad (3.1)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Проаналізувати режими роботи шламових (грунтових) насосів, які здійснюють перекачування високоабразивних пульп, та визначити основні причини низької енергоефективності наявного обладнання.

Провести аналіз технологічних режимів роботи систем гідротранспорту на збагачувальних фабриках та виявити основні причини передчасного виходу з ладу елементів нерегульованого насосного обладнання.

Обґрунтувати доцільність заміни механічного регулювання витрати пульпи (дроселювання або зміна рівня в зумпфі) на технологію частотного регулювання швидкості обертання вала двигуна.

Дослідити вплив прямого пуску та традиційного (засувного) методу регулювання продуктивності на енергетичні показники приводу та інтенсивність гідроабразивного зносу робочих коліс насосів і трубопроводів.

Розробити математичну модель гідромеханічної системи "перетворювач частоти – асинхронний двигун – шламовий насос – трубопровід" для дослідження динамічних та усталених режимів роботи.

Обґрунтувати вибір оптимальної структури перетворювача частоти та алгоритму керування (векторне керування або скалярне керування з компенсацією ковзання), здатного забезпечити надійний пуск заповненого шлаком насоса та подолання потенційних замулювань магістралі.

Розрахувати критичну (мінімальну) швидкість потоку в трубопроводі для виключення ризику завалювання (осадження твердої фази пульпи) при зниженні частоти обертання насосу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Сформулювати технічні вимоги щодо апаратного захисту силової електроніки та електродвигунів від агресивного впливу навколишнього середовища (високої вологості, струмопровідного пилу, вібрацій), характерного для цехів збагачення.

Провести техніко-економічний аналіз проєкту модернізації із визначенням річної економії електроенергії та терміну окупності капітальних інвестицій.

Виконати оцінку очікуваного техніко-економічного ефекту від модернізації, враховуючи економію електроенергії за законами пропорційності лопатевих машин та зниження витрат на капітальні ремонти гідравлічної частини.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Abulnaga, B. E. (2002). Slurry Systems Handbook. McGraw-Hill.
2. Wilson, K. C., Addie, G. R., Sellgren, A., & Clift, R. (2006). Slurry Transport Using Centrifugal Pumps (3rd ed.). Springer.
3. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
4. Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2008). Pump Handbook (4th ed.). McGraw-Hill.
5. Leonhard, W. (2001). Control of Electrical Drives (3rd ed.). Springer.
6. Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons.
7. Stepanoff, A. J. (1957). Centrifugal and Axial Flow Pumps: Devices and Application. John Wiley & Sons.
8. Jacobs, J., & McCarty, R. (2014). Variable frequency drives for slurry pumping applications in mineral processing. Mining Engineering, 66(4), 45-52.
9. de Almeida, A. T., Fonseca, P., & Bertoldi, P. (2003). Energy-efficient motor systems in the industrial sector. IEEE Transactions on Industry Applications, 39(2), 521-526.
10. Saidur, R. (2010). A review on electrical motors energy use and energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(3), 877-898.
11. Rashid, M. H. (Ed.). (2017). Power Electronics Handbook (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
12. Sul, S. K. (2011). Control of Electric Machine Drive Systems. IEEE Press/Wiley.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

13. Wills, D. (2015). Slurry pump maintenance and optimization using speed control systems. *World Pumps*, 2015(5), 28-32.
14. Tarasov, S., & Shvydchenko, I. (2018). Energy saving in heavy-duty slurry pumping using variable speed drives. *E3S Web of Conferences*, 41, 02014.
15. Mohan, N. (2012). *Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling using MATLAB/Simulink*. Wiley.
16. Durand, R. (1953). The hydraulic transportation of coal and other materials in pipes. *Colliery Guardian*, 186, 303-309.
17. Hodge, B. K. (2011). *Alternative Energy Systems and Applications*. John Wiley & Sons. (Розділи щодо оптимізації промислових насосних комплексів).
18. Synchuk, O. M., & Kozakevych, I. A. (2015). Energy efficiency indicators of induction motor drives in mining applications. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 22-26.
19. ISO 9906:2012. Rotary pumps -- Hydraulic performance acceptance tests -- Grades 1, 2 and 3. International Organization for Standardization.
20. European Commission. (2014). *Ecodesign requirements for water pumps, fans and machine tools*. European Union Publications.
21. Abulnaga, B. E. (2002). *Slurry Systems Handbook*. McGraw-Hill Education.
22. Bose, B. K. (2006). *Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends*. Academic Press.
23. Volk, M. (2013). *Pump Characteristics and Applications* (3rd ed.). CRC Press.
24. Gülich, J. F. (2014). *Centrifugal Pumps* (3rd ed.). Springer.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25. Hughes, A., & Drury, B. (2013). Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications (4th ed.). Newnes.
26. Ahrens, M., & Williams, K. (2012). Energy efficiency of slurry pumping systems in mineral processing plants. Minerals Engineering, 33, 118-124.
27. Gandhi, B. K., Singh, S. N., & Seshadri, V. (2001). Performance characteristics of centrifugal slurry pumps handling Newtonian and non-Newtonian slurries. Journal of Fluids Engineering, 123(2), 271-280.
28. Tarodiya, R., & Gandhi, B. K. (2017). Experimental investigation of centrifugal slurry pump performance with clear water and solid-liquid mixtures. Particulate Science and Technology, 35(6), 668-675.
29. Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2013). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (3rd ed.). IEEE Press/Wiley.
30. Wang, J., Zhao, L., & Li, Y. (2018). Energy efficiency optimization of pumping systems based on variable speed drives and optimal control strategies. Applied Energy, 212, 106-118.
31. Engin, T., & Gur, M. (2003). Effect of pumping head and pipe diameter on energy efficiency of slurry transport systems. International Journal of Energy Research, 27(12), 1083-1092.
32. Barnes, M. (2003). Practical Variable Speed Drives and Power Electronics. Newnes.
33. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. (2002). Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press.
34. Jones, R. M. (2009). Variable speed drive applications in mining and processing: Benefits and technical challenges. CIM Bulletin, 102(1115), 1-8.
35. Palgrave, R. (2003). Troubleshooting Centrifugal Pumps and their systems. Elsevier.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Насосний призначений для перекачування пульпи.

Матеріал проточної частини - чавун.

Ущільнення вала - чепцеве.

Гідравлічний затвор сальника забезпечується за допомогою підведення рідини до кільця сальника по спеціальних трубопроводах з напірної порожнини насоса.

Метрична висота усмоктування при температурі води 20⁰С до 3,0 м.

Маса насоса 2150 кг.

Зовнішній діаметр колеса 750 мм.

Число оборотів у хвилину 750 об/хв.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Додаток Б

Паспортні дані двигуна А-560-500-6.

Найменування	Літерне позначення	Значення	Одиниця виміру
1.Потужність	P_n	500	кВт
2.Напруга живлення	U	6	кВ
3.Швидкість обертання	n_n	742.9	об/хв.
4.КПД	η	0.952	
5.Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi_{ном}$	0.8	
6.Кратність пускового струму	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	6	
7.Кратність пускового моменту	$\frac{\dot{I}_n}{M_{iii}}$	1.0	
8.Кратність максимального моменту	$\frac{\dot{I}_{max}}{\dot{I}_{iii}}$	2.2	
9.Момент інерції	J	58	$кг \cdot м^2$
10.Число пар полюсів	P	4	
11 .Номінальний струм статора	$I_{ном}$	63.2	А
12.Номінальне ковзання	$S_{ном}$	0.0095	

Технічні характеристики ВПЧА-И-06/48-УХЛ.4

Параметри		Значення
Позначення серії		ВПЧА - високовольтний частотно-регульований привід для асинхронного електродвигуна
Вхідна напруга силового ланцюга		3-х фазне 6000В (можливе відхилення без зниження параметрів -20% +15%)
Частота живлячої мережі, Гц		45~55
Діапазон регулювання частоти		0,1-120
Точність підтримки частоти, Гц		±0,01
Час пуску / останову, сек.		10 от 1600 (параметр, що налаштовується)
Перевантажувальна здатність		120% протягом 60 сек., 150% протягом 1 сек
Вихідна напруга силового		3-х фазне 6000 В
Коефіцієнт потужності		96% і більш при швидкості близької до номінальної
Аналоговий вхід		Два канала, 0~10V/4~20mA (на вибір)
Аналоговий вихід		Два канала, 0~10V/4~20mA (на вибір)
Дискретні сигнали вхід/вихід		24 на вході/16 на виході
Протоколи передачі даних		RS485
Органи управління		Промисловий комп'ютер з сенсорним екраном (Touch Screen)
Конструкція	Ступінь захисту	IP30
	Виконання	шафове; двостороннього обслуговування кабельне підведення знизу
	Охолодження	примусове вбудованими вентиляторами
Умови експлуатації	Температура	від 0° до +40°
	Температура зберігання і транспортування	від -40° до +70°
	Вологість макс.	90% без конденсації)
	Висота над рівнем моря	не більше 1000 м
	Вібрація макс.	0,5g з частотою 10-50 Гц

	Установка	УХЛ 4 – Кліматичне виконання і категорії розміщення -(для помірно-холодного клімату в закритому опалювальному приміщенні з температурою навколишнього повітря +1°C – +40°C)
--	-----------	---

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-16	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52