

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Модернізація системи керування електроприводом клітьового підйому
шахти «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком»

Виконав: здобувач групи ЗЕЕМ-22ск _____ Ольга ЯНЧА

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Олексій МИХАЙЛЕНКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Олексій МИХАЙЛЕНКО

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

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

Кривий Ріг

2025

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *бакалавр*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Янчої Ольги Петрівни

1. Тема роботи: Модернізація системи керування електроприводом клітьового підйому шахти «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком»
2. Строк подання студентом роботи: 15 червня 2025 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: удосконалення автоматизованої системи керування електроприводом клітьового підйому шляхом впровадження цифрового регулятора швидкості в системі ТП-Д
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): опис шахтного клітьового підйомника; вимоги до електроприводу клітьового підйомника; розрахунок механічної частини та вибір електродвигуна; розрахунок природних і штучних статичних характеристик ТП-Д, моделювання динаміки електроприводу; розробка і моделювання системи цифрової системи керування
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): загальний вигляд клітьового підйомника; статичні характеристики двигуна підйомника; статичні характеристики ТП-Д; динамічні характеристики розімкненої системи електроприводу; динамічні характеристики системи цифрової системи керування швидкістю клітей

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
II	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
III	Олексій МИХАЙЛЕНКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Загальна частина	12.05.25–22.05.25
2	Спеціальна частина	23.05.25–30.05.25
3	Проектно-конструкторська розробка	31.05.25–07.06.25
4	Оформлення пояснювальної записки	08.06.25–14.06.25
5	Оформлення презентації	15.06.25–16.06.25
6		
7		

Дата видачі завдання: 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____

Ольга ЯНЧА

Керівник роботи _____

Олексій МИХАЙЛЕНКО

Реферат

У даній роботі проведено комплексне дослідження електроприводу клітьового підйому, яке охоплює як механічні, так і електромеханічні аспекти роботи системи. На початковому етапі проаналізовано механічні характеристики приводу, зокрема побудовано графіки зміни швидкості, прискорення, потужності та рушійного зусилля протягом робочого циклу. На основі цих досліджень визначено оптимальні параметри електродвигуна та обґрунтовано його вибір.

Друга частина роботи приділена підбору компонентів електроприводу, зокрема, тиристорного перетворювача, та аналізу його параметрів. Для обраного обладнання розроблено математичну модель, що дозволило дослідити як стаціонарні, так і перехідні режими роботи електроприводу клітьового підйомника. Порівняно показники якості роботи для нерегульованих та регульованих систем електроприводу, що дозволило виявити переваги останнього.

У третьому частині розроблено цифровий ПІ-регулятор швидкості для електроприводу шахтного підйому. Обґрунтовано вибір ПІ-структури, яка забезпечує стабільне регулювання при змінному навантаженні та високій інерційності. Створено математичну модель приводу, дискретизовану методом Тастіна для цифрової реалізації. Параметри регулятора визначено за методом Циглера-Ніколса, що забезпечило оптимальну швидкодію, стійкість і точність. Моделювання в MATLAB підтвердило ефективність системи, оцінивши перехідні процеси, перерегулювання та стійкість.

КЛІТЬОВИЙ ПІДЙОМНИК, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ,
ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, СТАТИЧНІ РЕЖИМИ, ДИНАМІЧНІ
РЕЖИМИ, ЦИФРОВЕ КЕРУВАННЯ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зміст

Розділ 1. Характеристика електромеханічного обладнання шахтного підйому .	9
1.1 Характеристика шахти «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком»	10
1.2 Характеристика шахтних підйомних установок та їх електроприводу .	11
1.3 Розрахунок і вибір обладнання клітьового підйому шахти «Криворізька».....	17
1.3.1 Обчислення режимних параметрів клітьового підйомника	17
1.3.2 Обчислення механіки клітьового підйомника	20
1.3.3 Обчислення кінематики клітьового підйомника	23
1.4 Динаміка клітьового підйомника.....	26
Висновки за розділом 1	32
Розділ 2. Базова система електроприводу шахтного підйому.....	33
2.1 Статичні і динамічні характеристики двигуна шахтної підйомної установки	34
2.2 Вибір силової частини системи ТП-Д шахтного підйомника	39
2.2.1 Тиристорний перетворювач	40
2.2.2 Згладжуючий реактор	40
2.2.3 Трансформатор силовий.....	40
2.3 Обчислення параметрів схеми заміщення ТП-Д шахтного підйомника	42
2.4 Характеристики тиристорного випрямляча.....	44
2.4.1 Фазова характеристика	45
2.4.2 Регульовальні характеристики	47
2.4.3 Зовнішня характеристика	47
2.5 Система ТП-Д шахтного підйомника в статичі та динаміці.....	48
Висновки за розділом 2	55

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 3. Створення цифрової системи керування швидкістю електроприводу шахтного підйому	56
3.1 Обґрунтування розробки цифрового регулятора для шахтного підйомника.....	57
3.2 Цифрова модель електродвигуна шахтного підйомника	58
3.3 Створення цифрового ПІ-регулятора для системи керування шахтним підйомником	60
3.4 Аналіз стійкості системи керування шахтним підйомником	64
Висновки за розділом 3	66
Висновки	68
Список використаних джерел	70

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вступ

У сучасних умовах гірничодобувної промисловості підвищення ефективності, безпеки та надійності роботи шахтного підйомного обладнання є одним із ключових завдань. Клітьові підйомні установки відіграють критично важливу роль у транспортуванні людей, матеріалів та корисних копалин, тому їхня стабільна та безвідмовна робота безпосередньо впливає на продуктивність шахти. Існуючі системи керування електроприводом часто засновані на застарілій апаратурі та алгоритмах, що призводить до неефективного використання енергії, підвищеного зносу механічних частин і зростання ризиків аварійних ситуацій.

Модернізація системи керування електроприводом дозволяє перейти на сучасніше обладнання, як-то мікропроцесорні контролери та цифрові системи моніторингу, що забезпечують точне регулювання швидкості, плавний пуск і гальмування, а також автоматичне коригування режимів роботи в залежності від навантаження. Це не лише підвищує енергоефективність, але й значно зменшує динамічні навантаження на конструкцію, що продовжує строк експлуатації обладнання. Крім того, інтеграція сучасних засобів діагностики дозволяє оперативно виявляти потенційні несправності та запобігати аваріям, що особливо важливо у умовах підвищеної небезпеки шахтного середовища.

Важливим аспектом є також відповідність сучасним енергетичним стандартам. Застосування енергоощадних технологій у системах керування електроприводом дозволяє знизити споживання електроенергії, що є суттєвим фактором для зменшення собівартості видобутку. Крім того, зменшення пускових струмів і гармонік у мережі покращує якість електроенергії та знижує вплив на електромережу.

Таким чином, модернізація системи керування електроприводом клітьового підйому шахти є актуальною не лише з технічної точки зору, але й з економічної та безпекової. Впровадження сучасних рішень у цій галузі сприятиме підвищенню продуктивності, зниженню експлуатаційних витрат та забезпеченню безпеки роботи шахтних підйомних установок, що робить дану

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

бакалаврську роботу важливою для подальшого розвитку гірничодобувної промисловості.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

**Розділ 1. Характеристика електромеханічного
обладнання шахтного підйому**

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Характеристика електромеханічного обладнання шахтного підйому				Літ.		Аркуш	Аркушів
Розроб.	Янча О.П.								Н		9	
Перевір.	Михайленко О.Ю.								ЕІ ЗЕЕМ-22ск			
Конс.												
Н.контр.	Михайленко О.Ю.											
Затверд.	Пересунько І.І.											

1.1 Характеристика шахти «Криворізька»
АТ «Кривбасзалізрудком»

АТ «Кривбасзалізрудком» є одним із провідних гірничодобувних підприємств України спеціалізованим на видобутку залізної руди. Воно забезпечує сировиною підприємства чорної металургії, як в Україні, так і за кордоном. Основним видом діяльності компанії є підземний видобуток залізняка, що відповідає сучасним вимогам металургійного виробництва [1].

Підприємство експлуатує низку шахт у Криворізькому басейні, де застосовуються сучасні технології гірничих робіт і автоматизовані системи керування виробничими процесами. Завдяки впровадженню інноваційних рішень АТ «Кривбасзалізрудком» досягає високих показників ефективності та безпеки видобутку.

Важливим напрямком діяльності компанії є модернізація виробничої інфраструктури зокрема оновлення обладнання для підйому руди, вентиляції та водовідливу, що дозволяє підвищити продуктивність і зменшити енерговитрати. АТ «Кривбасзалізрудком» також активно розвиває систему моніторингу стану шахтних виробок і обладнання, що сприяє запобіганню аварійним ситуаціям і підвищенню безпеки праці.

Компанія має розгалужену логістичну мережу для транспортування руди включаючи залізничні та автомобільні перевезення, що забезпечує стабільність постачання сировини споживачам.

Криворізький залізрудний басейн є стратегічно важливим промисловим регіоном України, де зосереджені значні запаси високоякісних залізних руд, що живлять металургійні підприємства країни та йдуть на експорт. Видобуток ведеться переважно підземним способом, зокрема на шахті «Криворізька», що належить АТ «Кривбасзалізрудком». Ця шахта, розташована у Кривому Розі, має глибину до 1580 метрів, з основним видобутком на горизонті 1315 метрів та підготовчими роботами на 1390 і 1465 метрах. Висота експлуатаційного ярусу становить 75 метрів, а загальні запаси руди оцінюються в 59,5 мільйонів тонн до глибини 1465 метрів. Геологічна характеристика родовища показує

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

значну мінливість - потужність рудних тіл коливається від 8 до 110 метрів при куті падіння 36-57 градусів. Основні рудні поклади представлені мартитовими та гетит-мартитовими кварцитами, які відрізняються високою пористістю та низькою стійкістю, тоді як вмісні породи складаються з більш міцних амфіболітів. Шахта розробляє два основних поклади – «Основна-95» та «Паралельна кар'єра №2», для яких характерне західне падіння під кутом близько 45 градусів. Руди мають складний мінеральний склад з переважанням мартитових різновидів та показують значну мінливість фізико-механічних властивостей. Середня об'ємна вага руди становить $3,65 \text{ т/м}^3$, а вмісних порід - $3,2 \text{ т/м}^3$. Родовище характеризується високим вмістом заліза - бортовий вміст становить 46%, мінімальний промисловий – 50%, а гранично допустимий у видобувній дозі – 45%. Загальна протяжність рудних покладів сягає 2100 метрів при максимальній глибині їх поширення. Ці унікальні геологічні умови роблять шахту «Криворізька» важливим об'єктом для подальшого розвитку гірничодобувної промисловості в регіоні.

1.2 Характеристика шахтних підйомних установок та їх електроприводу

Шахтні підймальні установки є важливим технологічним компонентом гірничих підприємств, виконуючи комплекс функцій з транспортування корисних копалин, породи, персоналу та технічних матеріалів між поверхнею та підземними горизонтами. Ці інженерні системи дозволяють не лише здійснювати основні виробничі процеси, але й забезпечують технічне обслуговування шахтних стовбурів, включаючи ремонтні роботи та огляд стану кріплення. На сучасних гірничих підприємствах зазвичай функціонує декілька спеціалізованих підймальних систем, кожна з яких оптимізована під конкретні завдання - чи то транспортування вантажів, чи переміщення персоналу. Конструкційно підймальна установка представляє собою інтегрований комплекс, що включає як механічне обладнання, так і спеціальні гірничі споруди. До складу механічного оснащення входять підйомні машини, спеціалізовані вантажні посудини, канатні системи, а також завантажувально-

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

розвантажувальні механізми. Інфраструктурна складова охоплює приствольні господарства з бункерами-накопичувачами та приймальними майданчиками, шахтні стовбури з направляючими системами для руху вантажних ємностей, а також надшахтні споруди, до яких належать копри, приймальні бункери або спеціалізовані будівлі з майданчиками для обслуговування неопрокидних клітей. Конкретна конфігурація цих елементів варіюється залежно від типу підйомної системи (вертикальна чи похила), виду використовуваних вантажних посудин (кільця, скіпи) та особливостей технологічного процесу конкретного гірничого підприємства [2–4].

На рис. 1.1 представлена конструктивна схема вертикальної клітьової підйомної установки, де основні операції з завантаження та розвантаження відбуваються синхронно на різних рівнях - у кліті на нижньому (6) чи верхньому (3) в надшахтній будівлі прийомних майданчиках. Привідний механізм установки включає підйомну машину 1, яка через систему канатів та напрямних шківів, встановлених на копрі 2, забезпечує зустрічний рух кліті та противаги. Система має також опрокидувач 4 і бункер 5 для породи.

Принцип роботи заснований на поперемінному навиванні та звиванні канатів, що досягається обертанням органів навивки від електродвигуна. Особливістю сучасних глибоких шахт, зокрема шахти «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком», є використання багатоканатних підйомних систем для комплексного транспортування корисних копалин, персоналу та матеріалів. Унікальність цієї шахти полягає в одночасній роботі двох типів підйомів - клітьового та скіпового - в межах одного стовбура, що обумовлює необхідність застосування окремих підйомних посудин для кожної установки через обмежені просторові умови. У даному дослідженні розглядається клітьова підйомна установка, що має одну кліть та противагу, спеціально адаптована для обслуговування двох робочих горизонтів - 1315 м (основний видобувний рівень) та 1390 м (рівень підготовчих робіт), що дозволяє оптимізувати виробничий цикл підприємства. Така конфігурація особливо актуальна для глибоких шахт з інтенсивним режимом експлуатації, де

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

критично важливим є забезпечення безперерйного транспортного зв'язку між поверхнею та підземними виробками.

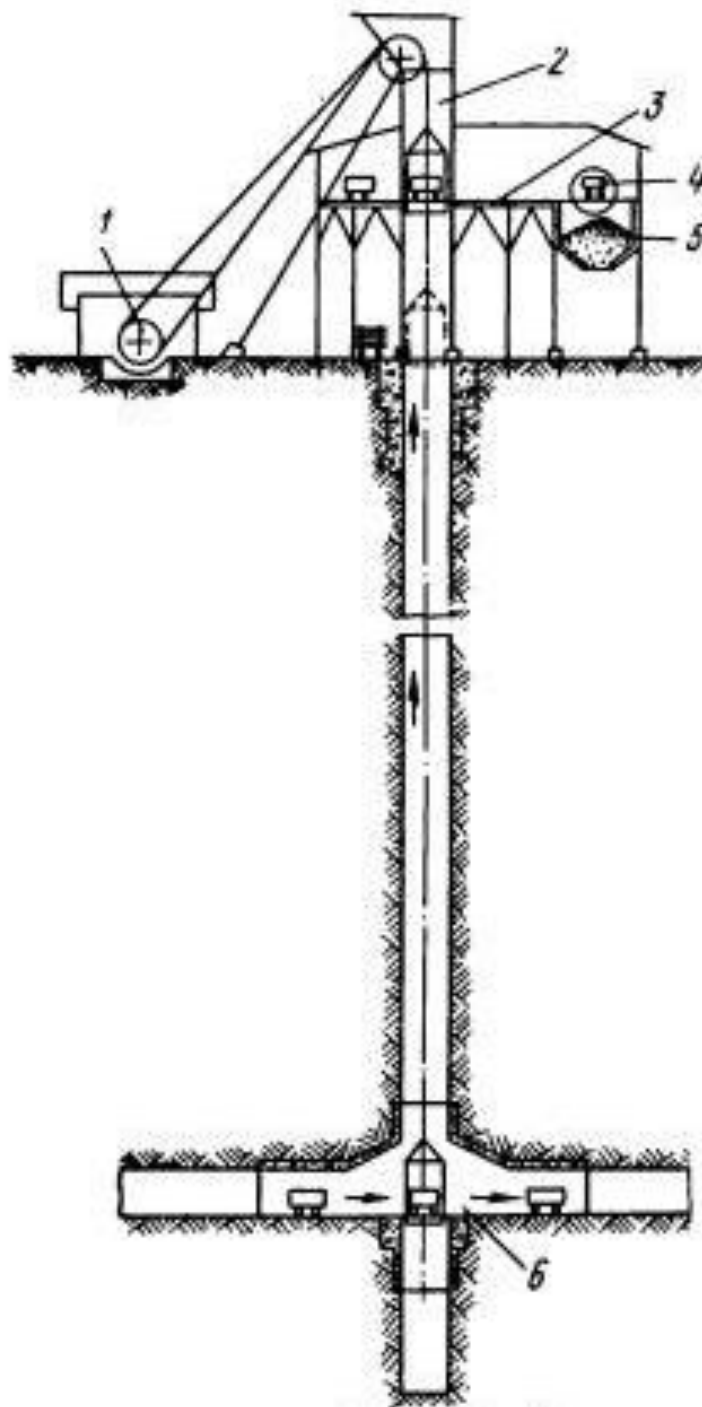


Рисунок 1.1 – Схема клітьового шахтного підйомника

Багатоканатні підйомні машини знаходять широке застосування у клітьових підйомних установках глибоких шахт, де вони вирішують низку критично важливих технічних завдань [3]. Ці механізми особливо актуальні для шахт з глибиною понад 1000 метрів, таких як шахта «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком», де традиційні одноканатні системи вже не

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

забезпечують необхідної надійності та продуктивності. Принципова відмінність багатоканатних машин полягає у розподілі навантаження між кількома підйомними канатами, що значно підвищує безпеку експлуатації та зменшує діаметр канатів у порівнянні з одноканатними системами. Конструктивно такі установки включають клітьову систему з чотирма або більше паралельними канатами, які синхронно навиваються на барабани підйомної машини спеціальної конструкції.

Важливою перевагою багатоканатних систем є їхня здатність забезпечувати плавний пуск і гальмування підйомних посудин, що особливо критично при транспортуванні людей. Завдяки розподілу навантаження між кількома канатами значно знижується ймовірність раптового руйнування підйомної системи, оскільки навіть у разі обриву одного каната інші здатні тривалий час утримувати навантаження. На шахті «Криворізька» такі установки використовуються у комплексі з іншими підйомними системами, що дозволяє оптимізувати транспортні потоки між різними горизонтами видобутку. Особливістю експлуатації багатоканатних машин є необхідність ретельного контролю рівномірності натягу всіх канатів, для чого застосовуються спеціальні системи моніторингу та балансування [2–4].

Технічні характеристики сучасних багатоканатних підйомних машин для клітьового підйому дозволяють забезпечувати швидкість руху до 16-18 м/с при глибинах підйому понад 2000 метрів. Їхня конструкція передбачає використання потужних синхронних або асинхронних двигунів з частотним регулюванням, що забезпечує точне позиціонування клітей на різних горизонтах. Важливим аспектом є застосування спеціальних напрямних систем для канатів, які запобігають їхньому перекручуванню та забезпечують стабільність ходу підйомних посудин. На шахтах як-то «Криворізька», де одночасно експлуатуються клітьові та скіпові підйоми, багатоканатні системи дозволяють ефективно вирішувати завдання з транспортування персоналу та обладнання без зайвого навантаження на транспортну інфраструктуру.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Сучасні шахтні підйомні установки функціонують як програмно-керовані комплекси, де основу робочого циклу формує розрахункова тахограма, яка може задаватися як автоматизованою системою регулювання, так і оператором-машиністом. Технологічні особливості конкретного підйомного процесу безпосередньо впливають на конфігурацію тахограми, визначаючи кількість та характер її робочих періодів. Криві швидкості та прискорення, що формують цю діаграму, виступають ключовими показниками ефективності та економічної доцільності експлуатації підйомної системи. У разі автоматизованого керування точне відтворення заданої діаграми руху цілком залежить від характеристик електроприводу, причому найвищі вимоги висуваються до процесу гальмування, що обумовлено значними інерційними навантаженнями. Типова підйомна установка середньої потужності має приведену масу 50...80 тонн при максимальній швидкості руху до 20 м/с, що вимагає гальмівного шляху 20...30 метрів для безпечного зупинення з допустимим уповільненням.

Критично важливим параметром є точність фіксації кліті на приймальному майданчику, де максимально допустиме відхилення не повинно бути більше ніж 0,3 метра, що відповідає відносній точності позиціювання на рівні 0,8...1%. У вугільній промисловості широко поширені підйомні системи з асинхронними електродвигунами, де регулювання швидкості здійснюється традиційним способом - шляхом введення додаткових опорів у ланцюг ротора. Однак такий метод супроводжується значними енергетичними втратами, що обмежує економічну ефективність установок. Стандартний діапазон потужностей для електродвигунів асинхронних приводів зазвичай не перевищує 1,2 МВт, хоча в промисловості зустрічаються і потужніші рішення з показниками понад 2 МВт. Ці особливості експлуатації підйомних систем вказують на необхідність ретельного розрахунку динамічних характеристик та енергетичних параметрів при проектуванні шахтного підйомного обладнання, особливо з урахуванням суворих вимог до точності позиціювання та енергоефективності сучасних гірничих підприємств [2–4].

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У гірничій промисловості, особливо на рудних шахтах, значної популярності набули підйомні установки з електроприводом за системою генератор-двигун (Г-Д), які переважно застосовуються при потужностях понад 1-1,2 МВт. Ця технологія має суттєві переваги перед традиційними асинхронними приводами, зокрема відсутність потужної комутаційної апаратури, можливість плавного регулювання швидкості у широкому діапазоні, високу точність дотримання заданої діаграми швидкості на всіх етапах робочого циклу - під час розгону, рівномірного руху та точного підходу до майданчика. Важливою особливістю системи Г-Д є її здатність компенсувати реактивну потужність за рахунок синхронного двигуна, що особливо актуально для шахтних умов з їхнім характерним низьким середнім коефіцієнтом потужності.

Порівняльні дослідження редукторних та безредукторних приводів [2–4] демонструють переваги останніх у вигляді підвищеного ККД, зменшення пускового моменту та часу розгону, а також підвищеної продуктивності підйомних операцій. Ці фактори роблять доцільним залучення низькошвидкісних двигунів постійного струму у складі шахтних підйомних систем. Для особливо потужних установок у кілька тисяч кіловат все більшого поширення набувають вентильні перетворювачі за схемою тиристорний перетворювач-двигун (ТП-Д), які реалізуються у трьох основних конфігураціях: з одним випрямлячем для живлення якоря двигуна без реверсу, з реверсом у колі якоря або колі збудження [2–4].

Вибір оптимальної системи електроприводу для конкретної шахтної підйомної установки потребує комплексного аналізу механічних характеристик зважаючи на діаграми швидкості, прискорень, рушійних зусиль та потужності, що дозволяє визначити найбільш ефективне рішення, яке відповідає як технічним вимогам, так і економічним критеріям експлуатації. Сучасні тенденції розвитку приводної техніки для шахтних підйомників спрямовані на поєднання переваг систем Г-Д та ТП-Д з інтелектуальними системами керування, що забезпечують підвищену точність позиціонування,

енергоефективність та надійність роботи у складних умовах гірничих підприємств.

1.3 Розрахунок і вибір обладнання клітьового підйому шахти «Криворізька»

На шахті «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком» функціонує двозонна система вертикального транспортування, де основне навантаження з переміщення видобутої руди покладено на скіпову підйомну установку типу ЦШ-5х8, тоді як клітьовий підйом відіграє допоміжну роль у забезпеченні гірничих робіт. Ця друга система спеціалізується на перевезенні персоналу, обмежених обсягів корисних копалин, а також спеціалізованого обладнання та необхідних матеріалів. У рамках даного проекту основним об'єктом дослідження виступає саме клітьова підйомна система, для якої передбачається проведення комплексних розрахунків основних параметрів та підбір відповідного технологічного оснащення.

В якості базових вихідних параметрів для проектування прийнято наступні техніко-економічні показники: загальний річний обсяг видобутку руди становить 646 тис. тонн (згідно даних 2023 року [5]). Враховуючи обставини при яких відбуваються зараз видобуток, то прийmemo, що продуктивність нормального періоду роботи буде у два рази більша – 1292 тис. тонн/рік. При цьому клітьова установка обслуговує два робочих горизонти – 1315 та 1390 метрів. Виробничий процес організований у тризмінному режимі з чітко визначеною нормою видобутку, де середньодобова продуктивність одного підземного працівника становить 5 тонн руди. Ці параметри формують технологічні вимоги до продуктивності клітьового підйому, його вантажопідйомності та швидкісних характеристик, що враховуватимуться при подальших розрахунках і виборі обладнання.

1.3.1 Обчислення режимних параметрів клітьового підйомника

Для виконання підйомних операцій запропоновано використання двоповерхової неопрокидної кліті 2КН-5,2, обладнаної тритонними

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

вагонетками ВДК-3,3, розміщеними на кожному з рівнів. Основні технічні параметри обраного підйомного обладнання детально представлені у відповідних таблицях, як-то табл. 1.1 і табл. 1.2 [4]. Визначення оптимальної швидкості підйомних операцій проводилось з урахуванням необхідності транспортування 210 осіб персоналу протягом години у межах однієї зміни, при цьому тривалість повного циклу підйому-спуску обмежена 40-хвилинним інтервалом [4].

Таблиця 1.1 – Технічні дані кліті неопрокидної 2КН-5,2

$S, м^2$	$h, м$	$m_{кліті}, т$	$m_{вант\ max}, т$	$F_{max}, кН$	$d_{кан\ max}, мм$
15,6	5,78	14,35	14	660	64

Таблиця 1.2 – Технічні дані вагонетки ВДК-3,3

$V, м^3$	$m_{вант\ max}, т$	$m_{вагон}, кг$
3,3	5,6	1605

Робоча продуктивність шахти характеризується змінними показниками, які визначаються за такими формулами:

$$Q_{зм} = \frac{Q_p}{n_{\partial} \cdot n_{зм}} = \frac{1292 \cdot 10^3}{300 \cdot 3} = 1436 \text{ т/зм.} \quad (1.1)$$

Число людей, що спускаються за зміну:

$$n_{роб.ор} = k_{перс} \frac{Q_{зм}}{v} = 1,1 \frac{1436}{8} = 197,39 \text{ чол.} \quad (1.2)$$

Максимальна місткість кліті для перевезення персоналу:

$$n_{роб} = \frac{S_{кл}}{0,2} = \frac{15,6}{0,2} = 78.$$

Кількість рейсів для підйому людей за зміну:

$$n_{ц} = \frac{n_{роб\ or}}{n_{роб}} = \frac{197,35}{78} = 2,531. \quad (1.3)$$

Приймаємо $n_y = 3$.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Час, необхідний для повного циклу підйому:

$$T_y = 2400/n_y = 2400/3 = 800 \text{ с.} \quad (1.4)$$

Час технологічних пауз між операціями:

$$t_n = n_{роб} + 25 = 78 + 20 = 98 \text{ с.} \quad (1.5)$$

Час руху кліті в одному напрямку (вгору або вниз):

$$T_p = \frac{T_y - 2t_n}{2} = \frac{800 - 2 \cdot 98}{2} = 302 \text{ с.} \quad (1.6)$$

Висота на яку проводиться підняття:

$$H = H_{ствол} + h_{естак} = 1390 + 12 = 1402 \text{ м,} \quad (1.7)$$

Середня і орієнтовна найбільші швидкості підняття:

$$v_{сер} = \frac{H}{T_p} = \frac{1402}{302} = 4,642 \text{ м/с,} \quad (1.8)$$

$$v_{max} = \alpha_c v_{сер} = 1,25 \cdot 4,642 = 5,803 \text{ м/с.} \quad (1.9)$$

1.3.2 Обчислення механіки клітьового підйомника

Висота копра:

$$\begin{aligned} h_k &= h_e + h_{кл} + h_{пер} + 0,75R_{напр.шків} = \\ &= 12 + 8,58 + 6 + 0,75 \cdot 2,5 = 28,5 \text{ м.} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Беремо типовий копер $h_k = 29 \text{ м.}$

Вертикальна відстань між нижнім приймальним майданчиком:

$$H_k = H_c + h_k = 1390 + 29 = 1419 \text{ м.} \quad (1.2)$$

Маса противаги:

$$\begin{aligned} m_{пр} &= m_{кл} + m_{ваг} + 0,5Q_n = \\ &= 14,35 \cdot 10^3 + 1605 + 0,5 \cdot 1,184 \cdot 10^4 = 2,188 \cdot 10^4 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Сумарна маса вантажу, що включає кліть та вагонетку:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$Q_n = Q_{\text{вант. кл}} + Q_{\text{вант. ваг}} = 78 \cdot 80 + 5600 = 1,184 \cdot 10^4 \text{ кг.}$$

Загальне навантаження системи:

$$\begin{aligned} m_0 &= m_{\text{кл}} + m_{\text{вагон}} + Q_n + m_{\text{пр}} = \\ &= 14,35 \cdot 10^3 + 1605 + 1,184 \cdot 10^4 + 2,188 \cdot 10^4 = 4,97 \cdot 10^4 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Лінійна щільність підйомного канату розраховується як:

$$m_p = \frac{m_0}{\frac{\sigma_s}{gZ\rho_0} - H_\kappa} = \frac{4,97 \cdot 10^4}{\frac{1800 \cdot 10^6}{9,81 \cdot 7,5 \cdot 9200} - 1419} = 40,02 \text{ кг/м}, \quad (1.3)$$

Де $\sigma_s = 1800 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$; $g = 9,81 \text{ кг/м}^2$; $Z = 7,5$; $\rho_0 = 9200 \text{ кг/м}^3$; $H_\kappa = 1419 \text{ м}$

Число підіймальних канатів:

$$n_\kappa = m_p \left(\frac{\varphi_{\text{канат}} \psi}{D_{\text{шків.тертя}}} \right)^2 = 40,02 \left(\frac{0,0166 \cdot 95}{5} \right)^2 = 3,981, \quad (1.4)$$

де $D_{\text{шків.тертя}} = 5 \text{ м}$; $\varphi_\kappa = 0,0166$; $\psi \geq 95$.

Беремо 4 канати ЛК-Р 6х30 з $D_p = 45,5 \text{ мм}$; $Q_p = 1035 \cdot 10^3 \text{ Н}$;
 $m_p = 8,75 \text{ кг/м}$; $S_{\text{пр}} = 892,89 \text{ мм}^2$ [4].

Запас міцності взятих канатів:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{n_\kappa \cdot Q_\kappa}{g m_0 + n_\kappa + m_p + H_\kappa} = \\ &= \frac{4 \cdot 1035 \cdot 10^3}{9,81 \cdot 4,97 \cdot 10^4 + 4 + 8,75 + 1419} = 9,46 \geq 7,5. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Запас міцності достатній, канат прийнятий.

Ступінь невірноваженості:

$$\delta = \frac{m_p H}{k Q_n} = \frac{8,75 \cdot 1402}{1,2 \cdot 1,184 \cdot 10^4} = 0,863 \geq 0,5. \quad (1.6)$$

Система вимагає врівноваження.

Лінійна маса врівноважуючих канатів:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$m_q = \frac{n_{\text{канат.}} \cdot m_p}{n_{\text{врівн. канат.}}} = \frac{4 \cdot 8,75}{3} = 11,67 \text{ кг/м}, \quad (1.7)$$

Беремо 3 канати 170х27,5 мм, що мають питому масу одного канату з врахуванням змазки $m_q = 11,85 \text{ кг/м}$.

Різниця лінійних мас:

$$n_k \cdot m_p - n_{\text{вк}} \cdot m_q = |4 \cdot 8,75 - 3 \cdot 11,85| = 0,55 \text{ кг/м}.$$

Тепер система вже врівноважена.

Барабан для навивання канату циліндричного розрізного виду:

$$D_{\text{бар}} = 79d_k = 79 \cdot 45,5 = 3595 \text{ мм}. \quad (1.8)$$

Приймаємо $D_{\text{бар}} = 4 \text{ м}$; $D_{\text{напрямн. шків.}} = 4 \text{ м}$; $GD^2_{\text{напрямн. шків.}} = 342000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$.

Ширина барабана:

$$B_k = \left(\frac{H + 2l_e}{\pi D_{\text{б}}} + 2n_{\text{в.т}} + n_{\text{в.з}} \right) d_k + d_z =$$

$$= \left(\frac{1402 + 2 \cdot 35}{3,14 \cdot 4} + 2 \cdot 3 + 2 \right) 45,5 + 3 = 6069 \text{ мм}, \quad (1.9)$$

де $n_{\text{в.з}} = 2 \text{ витки}$; $n_{\text{в.т}} \geq 3$; $l_e = 30 \dots 35 \text{ мм}$; $b_z = 2 \dots 3 \text{ мм}$.

Беремо машину ЦШ-4х4 [4]: $T_{c \text{ max}} = 800 \text{ кН}$; $F_{c \text{ max}} = 250 \text{ кН}$;

$$GD^2_m = 2100000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2; \quad GD^2_{\text{в.ш}} \leq 500000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2; \quad v_{\text{max з ред.}} = 16 \text{ м/с};$$

$$v_{\text{max без ред.}} = 12 \text{ м/с}.$$

Перевіримо розрізний барабан за навантаженнями.

Напруга канату найбільша:

$$T_{c \text{ max}} = m_0 + m_p H_k g =$$

$$= 4,97 \cdot 10^4 + 8,75 \cdot 1418 \cdot 9,81 = 609 \text{ кН} < 800 \text{ кН}. \quad (1.10)$$

Різниця натягів канатів найбільша:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$F_{ct\max} = Q_n + m_p H g = 1,184 \cdot 10^4 + 8,75 \cdot 1402 \cdot 9,81 = 236,5 \text{ кН} < 250 \text{ кН}. \quad (1.11)$$

Так як $T_{c\max}$ і $F_{c\max}$ менше допустимих значень для розрізного барабана, ЦЩ-4х4 приймається.

1.3.3 Обчислення кінематики клітьового підйомника

Для клітьового підйомника вважається за доцільне брати триперіодну діаграму швидкостей та прискорень [3].

Базові прискорення: $a_1 = 0,9 \text{ м/с}^2$ ($a_1 < 1 \text{ м/с}^2$) і $a_3 = 0,7 \text{ м/с}^2$ ($a_3 \leq 0,75 \text{ м/с}^2$).

Траєкторія руху кліті під час одного циклу підйому включає три характерні ділянки: ділянку прискореного руху за час t_1 , ділянку рівномірного руху за час t_2 та ділянку гальмування за час t_3 . Кожен з цих етапів має свою довжину шляху, що в сукупності визначає повний переміщення кліті під час операції підйому.

Маємо:

$$H = h_1 + h_2 + h_3.$$

$$H = \frac{v_{p\max} t_1}{2} + v_{p\max} t_2 + \frac{v_{p\max} t_3}{2} = v_{p\max} \frac{t_1 + 2t_2 + t_3}{2}.$$

$$H = \frac{2 \cdot T_p - v_{p\max}/a_1 - v_{p\max}/a_3}{2} v_{p\max}.$$

Звідкіля:

$$v_{p\max}^2 \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_3} \right) - 2T_p v_{p\max} + 2H = 0. \quad (1.12)$$

Позначимо через:

$$1/a_1 + 1/a_3 = 1/a_m. \quad (1.13)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Модуль прискорень:

$$a_m = \frac{a_1 \cdot a_3}{a_1 + a_3}. \quad (1.14)$$

На підставі (1.12)– (1.14):

$$\nu_{p \max}^2 - 2a_m T_p \nu_{p \max} + 2a_m H = 0.$$

Звідки:

$$\nu_{p \max} = a_m T_p - \sqrt{a_m T_p^2 - 2a_m H}. \quad (1.15)$$

$\nu_{\max}$ кліті повинна бути $\nu_{\max} \geq \nu_{p \max}$.

Модуль прискорень:

$$a_m = \frac{a_1 \cdot a_3}{a_1 + a_3} = \frac{0,9 \cdot 0,7}{0,9 + 0,7} = 0,394 \text{ м/с}.$$

Швидкість найбільша (обчислена):

$$\begin{aligned} \nu_{p \max} &= a_m T_p - \sqrt{a_m T_p^2 - 2a_m H} = \\ &= 0,394 \cdot 302 - \sqrt{0,394 \cdot 302^2 - 2 \cdot 0,394 \cdot 1402} = 4,737 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Оскільки $\nu_{\max} = 5,803 \text{ м/с} \geq \nu_{p \max} = 4,737 \text{ м/с}$, то приймаємо $\nu_{\max} = 5,803 \text{ м/с}$.

Прискорений, сповільнений і рівномірний рух:

$$t_1 = \frac{\nu_{\max}}{a_1} = \frac{5,803}{0,9} = 6,448 \text{ с}.$$

$$h_1 = \frac{\nu_{\max} t_1}{2} = \frac{5,803 \cdot 6,448}{2} = 18,708 \text{ м}.$$

$$t_3 = \frac{\nu_{\max}}{a_3} = \frac{5,803}{0,7} = 8,29 \text{ с}.$$

$$h_3 = \frac{\nu_{\max} t_3}{2} = \frac{5,803 \cdot 8,29}{2} = 24,053 \text{ м}.$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$h_2 = H - h_1 - h_3 = 1402 - 18,708 - 24,053 = 1359 \text{ м.}$$

$$t_2 = \frac{h_2}{v_{\max}} = \frac{1359}{5,803} = 234,231 \text{ с.}$$

На рис. 1.2 наведені встановлені триперіодні діаграми.

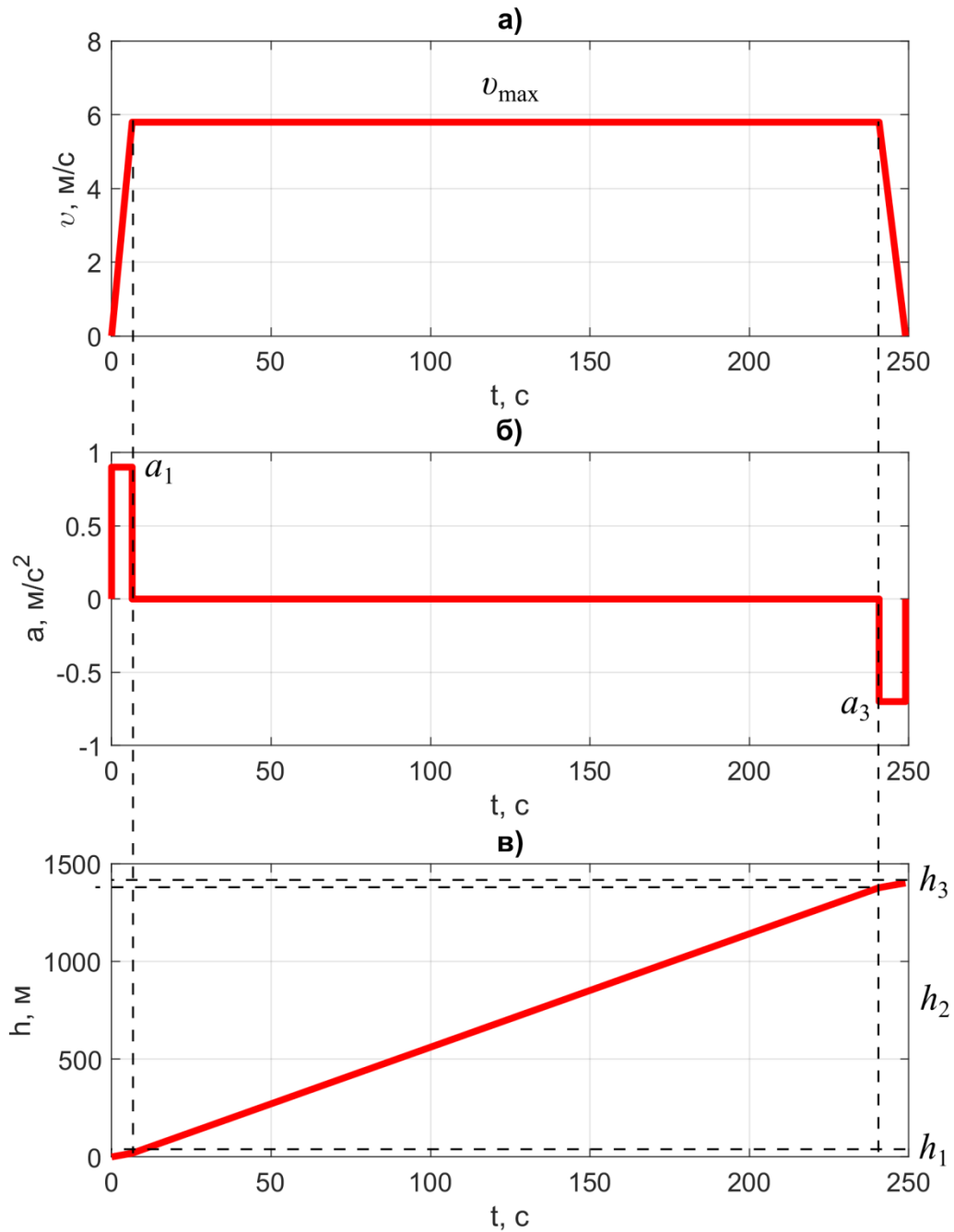


Рисунок 1.2 – Триперіодні діаграми: а) швидкість; б) прискорення; в) шляху кліті

Час руху кліті:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 = 6,45 + 234,23 + 8,29 = 248,97 \text{ с.}$$

Перевірочний час руху кліті:

$$T = \frac{H}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{2} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_3} \right) = \frac{1402}{5,803} + \frac{5,803}{2} \left(\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,7} \right) = 248,97 \text{ с.}$$

Коефіцієнт резерву підйомника:

$$C_{\phi} = C \frac{T_p + t_n}{T + t_n} = 1,5 \frac{302 + 98}{248,97 + 98} \approx 1,729.$$

де $C = 1,5$.

1.4 Динаміка клітьового підйомника

Орієнтовна потужність двигуна підйомника:

$$P_{\text{дв.ор}} = \frac{k - 0,5}{1000 T \eta_n} Q_n H g \rho = \frac{1,2 - 0,5}{1000 \cdot 248,97 \cdot 0,94} \cdot 1,184 \cdot 10^3 \cdot 1402 \cdot 9,81 \cdot 1,3 = 723,65 \text{ кВт}, \quad (1.10)$$

де $k = 1,2$; $\eta_n = 0,94$; $\rho = 1,2 \dots 1,3$ [3].

Швидкість обертання електродвигуна:

$$n_{\text{дв}} = \frac{60 v_{\max}}{\pi D_{\text{напр.шків.}}} = \frac{60 \cdot 5,803}{3,14 \cdot 4} = 27,71 \text{ об/хв.} \quad (1.11)$$

Попередньо розглянемо два тихходові двигуни постійного струму незалежного збудження SIEMENS AG 1GH5 635-5EJ40-7MV5 і 1GH5 635-5EJ40-7NV5 [6] з номінальними даними (див. табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Технічні дані двигунів

	$P_{\text{ном}},$ кВт	$U_{\text{ном}},$ В	$I_{\text{ном}},$ А	$n_{\text{ном}},$ об/хв	$\eta, \%$	$J,$ кг/м ²
1GH5 635-5EJ40-7MV5	745	520	1600	160	88	289

1GH5 635-5EJ40-7NV5	870	600	1600	187	90	289
---------------------	-----	-----	------	-----	----	-----

ЦШ-4х4 безредукторна.

Відстань між вісями барабану та ствола:

$$l = h_k - c \operatorname{ctg} \beta + \frac{D_{\text{напр.шків.}}}{2} = 29 - 1 \operatorname{ctg} 45^\circ + 2 = 30 \text{ м},$$

де $\beta = 45^\circ$; $c = 1 \dots 2$.

Довжина струни найбільша:

$$L_c = \sqrt{h_k - c^2 + \left(l - \frac{D_{\text{напр.шків.}}}{2}\right)^2} = \sqrt{29 - 1^2 + 30 - 2^2} = 39,59 \text{ м. (1.12)}$$

Довжина канату [3]:

$$\begin{aligned} L_p &= H + 2 \cdot h_k + \frac{\pi D_{\text{напр.шків.}}}{2} + 2 \cdot L_c + \frac{\pi D_{\text{врівн.шків.}}}{2} = \\ &= 1402 + 2 \cdot 29 + \frac{3,14 \cdot 4}{2} + 2 \cdot 39,59 + \frac{3,14 \cdot 4}{2} = 1552 \text{ м.} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Довжина канатів, котрі врівноважують:

$$L_q = H + 30 = 1402 + 30 = 1432 \text{ м.}$$

Приведені маси підйимальної машини, шківів (направляючого і відхиляючого), двигуна:

$$m'_{\text{н.ш}} = \frac{GD_{\text{напр.шків.}}^2}{gD_{\text{напр.шків.}}^2} = \frac{345 \cdot 10^3}{9,8 \cdot 4^2} = 2179 \text{ кг}, \quad (1.14)$$

$$m'_{\text{в.ш}} = \frac{GD_{\text{відх.шків.}}^2}{gD_{\text{відх.шків.}}^2} = \frac{345 \cdot 10^3}{9,8 \cdot 4^2} = 2179 \text{ кг}, \quad (1.15)$$

$$m'_{\text{дв}} = \frac{GD_{\text{дв}}^2}{gD_{\text{напр.шків.}}^2} = \frac{360 \cdot 10^3}{9,81 \cdot 4^2} = 2294 \text{ кг.} \quad (1.16)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$m'_{\text{маш}} = \frac{GD^2_{\text{маш}}}{gD^2_{\text{напр.шків}}} = \frac{2100 \cdot 10^3}{9,8 \cdot 4^2} = 13380 \text{ кг}. \quad (1.17)$$

де $GD^2_{\text{напр.шків}} = 342000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ при $D_{\text{напр.шків}} = 4 \text{ м}$ [4];

$GD^2_{\text{відх.шків}} = 342000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ при $D_{\text{відх.шків}} = 4 \text{ м}$ [4]; $GD^2_{\text{дв}} = 360000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ [4];

$GD^2_{\text{маш}} = 2100000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ [4].

Маса рухомих частин підйомника приведені:

$$\begin{aligned} m_n &= 2Q_n + m_{\text{кл}} + m_{\text{ваг}} + m_{\text{нр}} + n_p L_p m_p + n_q L_q m_q + m'_{\text{н.ш}} + m'_{\text{в.ш}} + m'_{\text{дв}} + m'_{\text{маш}} = \\ &= 2 \cdot 1,184 \cdot 10^4 + 14,35 \cdot 10^3 + 1605 + 2,188 \cdot 10^4 + 4 \cdot 1552 \cdot 8,75 + \\ &+ 3 \cdot 1432 \cdot 11,85 + 2179 + 2179 + 2294 + 13380 = 186800 \text{ кг}. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Рушійні зусилля на триперіодній діаграмі:

$$F = [kQ_n + k_y Q_c + H \quad p - q] g + m_n a, \quad (1.19)$$

де $k = 1, 2$ [3].

У клітьовому підйомнику [3], де врівноважуючий канат збалансований $m_p = m_q$.

Рухомі зусилля:

$$\begin{aligned} F_1 = F_2 &= kQ_n + m_{\text{кл}} + m_{\text{ваг}} - m_{\text{нр}} \quad g + m_n a_1 = \\ &= 1,2 \cdot 1,184 \cdot 10^4 + 14,35 \cdot 10^3 + 1605 - 2,188 \cdot 10^4 \quad 9,81 + \\ &+ 1,868 \cdot 10^5 \cdot 0,9 = 2,494 \cdot 10^5 \text{ Н}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_3 = F_4 &= kQ_n + m_{\text{кл}} + m_{\text{ваг}} - m_{\text{нр}} \quad g + m_n a_1 = \\ &= 1,2 \cdot 1,184 \cdot 10^4 + 14,35 \cdot 10^3 + 1605 - 2,188 \cdot 10^4 \quad 9,81 = 8,131 \cdot 10^4 \text{ Н}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_5 = F_6 &= kQ_n + m_{\text{кл}} + m_{\text{ваг}} - m_{\text{нр}} \quad g + m_n a_3 = \\ &= 1,2 \cdot 1,184 \cdot 10^4 + 14,35 \cdot 10^3 + 1605 - 2,188 \cdot 10^4 \quad 9,81 - \\ &- 1,868 \cdot 10^5 \cdot 0,7 = -4,943 \cdot 10^4 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Еквівалентне зусилля:

$$F_{екв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n F_i^2 \cdot t_i}{T_{екв}}} = \sqrt{\frac{F_1^2 \cdot t_1 + F_3^2 \cdot t_2 + F_5^2 \cdot t_3}{T_{екв}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2,494 \cdot 10^5^2 \cdot 6,448 + 8,131 \cdot 10^4^2 \cdot 234,23 + -3,075 \cdot 10^4^2 \cdot 8,29}{281,31}} =$$

$$= 8,872 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Всі зусилля наносимо на діаграму (див. рис. 1.3).

Еквівалентна тривалість циклу:

$$T_{екв} = \xi_1 \cdot t_1 + t_3 + t_2 + \xi_2 \cdot t_{\Pi} = 281,31 \text{ с,} \quad (1.20)$$

де $\xi_1 = 1$ і $\xi_2 = 0,33$.

Перевірка на перевантаження:

$$\gamma_{\text{під}} = \frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{екв}}} = \frac{2,494 \cdot 10^5}{8,368 \cdot 10^4} = 2,98 < 1,8 \dots 3. \quad (1.21)$$

Еквівалентна потужність двигуна:

$$P_{\text{екв}} = \frac{F_{\text{екв}} \cdot v_{\text{max}}}{1000 \cdot \eta_{\Pi}} = \frac{8,368 \cdot 10^4 \cdot 5,803}{1000 \cdot 0,94} = 516,57 \text{ кВт.} \quad (1.22)$$

Запас за потужністю:

$$\frac{P_{\text{дв}}}{P_{\text{екв}}} = \frac{1000}{516,57} = 1,936 > 1. \quad (1.23)$$

Попередньо прийнятий 1GH5 635-5EJ40-7MV5 може бути застосований на підйомнику ЦШ-4х4.

Потужність двигуна:

$$P_x = \frac{F_x v_x}{10^3 \eta_n}. \quad (1.24)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

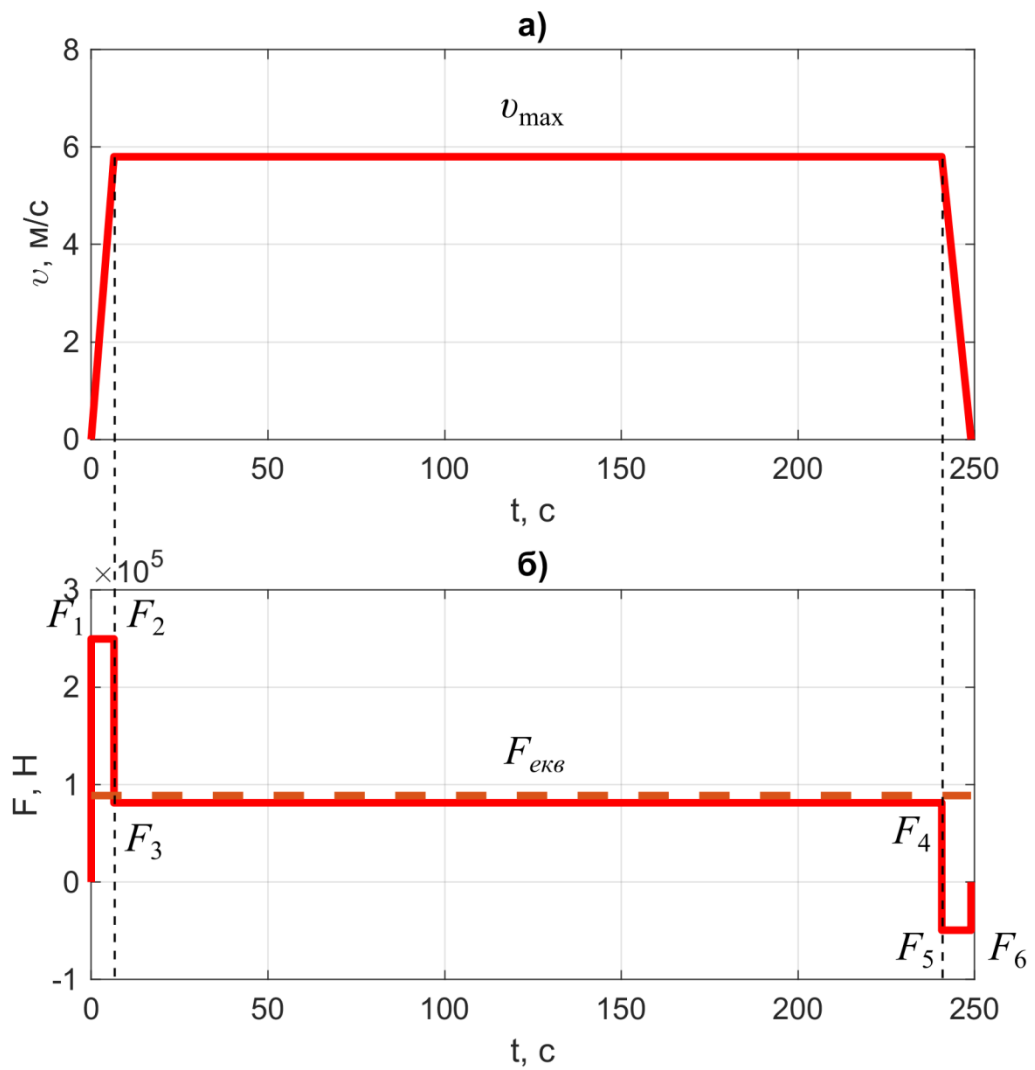


Рисунок 1.3 – Діаграма рушійних зусиль клітьового підйомника

Потужності на валу двигуна для триперіодної діаграми:

$$P_1 = \frac{F_1 \cdot 0}{1000 \cdot \eta_n} = \frac{2,494 \cdot 10^5 \cdot 0}{1000 \cdot 0,94} = 0 \text{ кВт};$$

$$P_2 = \frac{F_2 \cdot v_{\max}}{1000 \cdot \eta_n} = \frac{2,494 \cdot 10^5 \cdot 5,803}{1000 \cdot 0,94} = 1540 \text{ кВт};$$

$$P_3 = \frac{F_3 \cdot v_{\max}}{1000 \cdot \eta_n} = \frac{8,131 \cdot 10^4 \cdot 5,803}{1000 \cdot 0,94} = 501,929 \text{ кВт};$$

$$P_4 = \frac{F_4 \cdot v_{\max}}{1000 \cdot \eta_n} = \frac{8,131 \cdot 10^4 \cdot 5,803}{1000 \cdot 0,94} = 501,929 \text{ кВт};$$

$$P_5 = \frac{F_5 \cdot v_{\max}}{1000 \cdot \eta_n} = \frac{-4,943 \cdot 10^4 \cdot 9,67}{1000 \cdot 0,94} = -305,13 \text{ кВт};$$

$$P_6 = \frac{F_6 \cdot v_{\max}}{1000 \cdot \eta_n} = \frac{-4,943 \cdot 10^4 \cdot 0}{1000 \cdot 0,94} = 0 \text{ кВт}.$$

Діаграму витрат потужності див. на рис. 1.4.

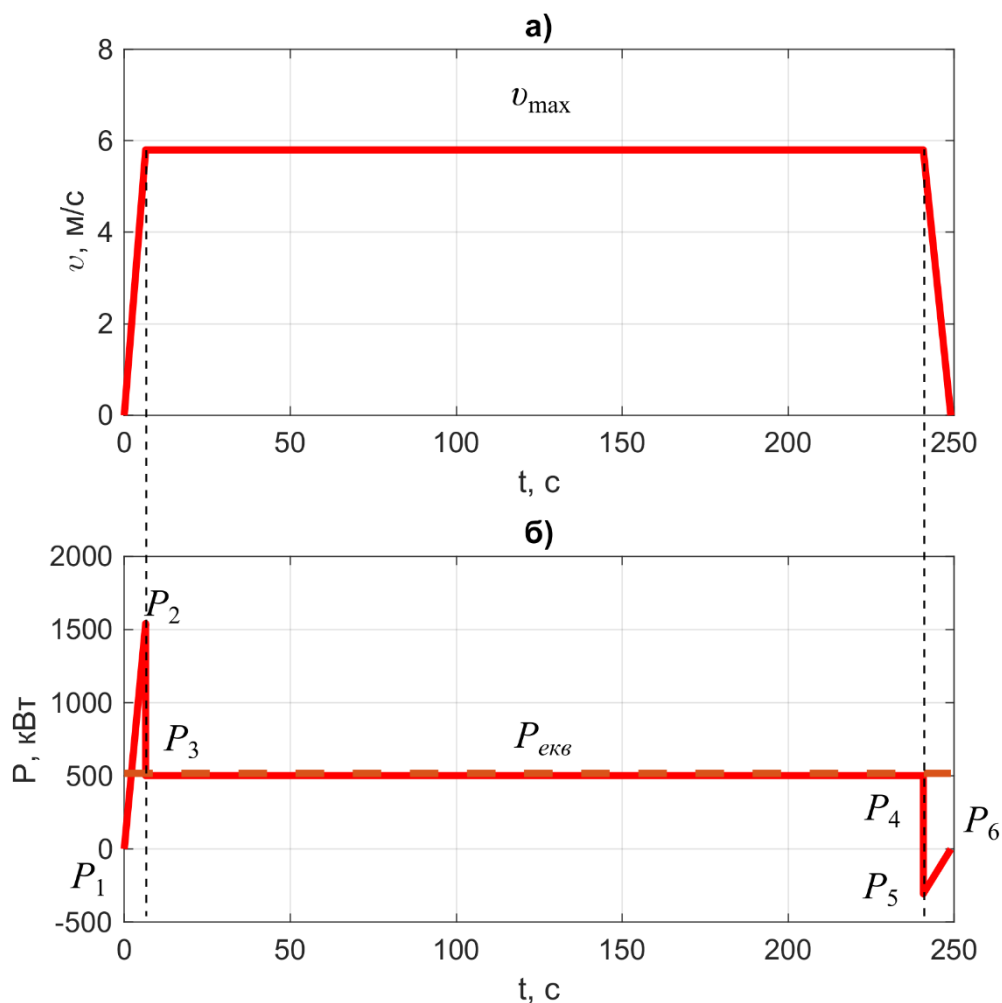


Рисунок 1.4 – Діаграма витрат потужності клітьової підйомальної установки

Для остаточного вибору двигуна порівняємо їх енергоефективність [7].

Витрати електроенергії на 1 т залізної руди [7]:

$$W_{\tau} = \frac{k_m \cdot P_{\partial\partial} \cdot 1000}{3600 \cdot \eta_{\partial\partial} \cdot \eta_{\text{мер}} \cdot m_n}, \quad (1.25)$$

Втрати клітьового підйомника за рік:

$$W_{\text{річ}} = W_{\text{т}} \cdot A_{\text{річ}} \quad (1.26)$$

Результати розрахунків енерговитрат для приводу клітьового підйомнику показані у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Енерговитрати клітьового підйомника шахти

Марка двигуна	1GH5 635-5EJ40-7MV5	1GH5 635-5EJ40-7NV5
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	745	870
ККД	0,88	0,9
$\Delta P, \text{кВт/кг}$	0,044	0,05
$\Delta P_{\text{річн}}, \text{МВт} \cdot \text{год/рік}$	2,822	3,222

Враховуючи, що витрати електроенергії за рік для 1GH5 635-5EJ40-7MV5 на 12,45 % нижче ніж для 1GH5 635-5EJ40-7NV5, тому остаточно приймаємо двигун 1GH5 635-5EJ40-7MV5.

Висновки за розділом 1

У першому розділі здійснювалося обчислення механічних властивостей клітьового підйомника шахти. Проаналізовано кінематику і динаміку підйомної системи. Побудовані триперіодні діаграми швидкостей, прискорень, рушійних зусиль та потужностей. У результаті для клітьового підйомника обрано двигун постійного струму незалежного збудження фірми SIEMENS AG. Двигун перевірявся за підніманням вантажу і визначався запас за потужністю. Виконано порівняння витрат електроенергії за рік при встановленні двигунів 1GH5 635-5EJ40-7MV5 і 1GH5 635-5EJ40-7NV5 на клітьовий підйомник шахти. Двигун 1GH5 635-5EJ40-7MV5 забезпечує на 12,45 % нижчі енерговитрати.

**Розділ 2. Базова система електроприводу
шахтного підйому**

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	<i>Базова система электроприводу шахтного підйому</i>				Літ.		Аркуш	Аркушів
Розроб.	Янча О.П.								Н		33	
Перевір.	Михайленко О.Ю.								<i>ЕІ ЗЕЕМ-22ск</i>			
Конс.												
Н.контр.	Михайленко О.Ю.											
Затверд.	Пересунько І.І.											

2.1 Статичні і динамічні характеристики двигуна шахтної підйомальної установки

Для отримання статичної й динамічної характеристик двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5 складаємо його модель і розраховуємо.

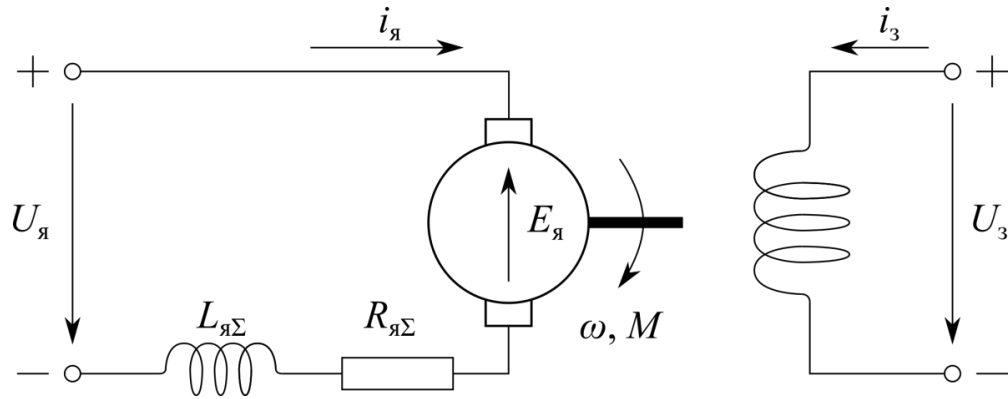


Рисунок 2.1 – Схема двигуна для отримання моделі

Складаємо модель двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5 у формі системи диференціальних рівнянь [8, 9, 10]:

$$\begin{cases} u_{\text{я}} = L_{\text{я}\Sigma} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} R_{\text{я}\Sigma} + E_{\text{я}}; \\ u_3 = L_3 \frac{di_3}{dt} + i_3 R_3; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c; \\ M = k_M \Phi_3 i_{\text{я}}; \\ \Phi_3 = k_{\Phi} i_3; \\ E_{\text{я}} = k_E \Phi_3 \omega, \end{cases} \quad (2.1)$$

Приводимо (2.1) до операторної форми:

$$\begin{cases} i_{\text{я}} = u_{\text{я}} - k_E \Phi_3 \omega \left(\frac{1/R_{\text{я}\Sigma}}{T_{\text{я}\Sigma} s + 1} \right); \\ i_3 = u_3 \left(\frac{1/R_3}{T_3 s + 1} \right); \\ \omega = k_M \Phi_3 i_{\text{я}} - M_c \frac{1}{J s}; \\ \Phi_3 = k_{\Phi} i_3. \end{cases} \quad (2.2)$$

Або:

$$\begin{cases} i_{\text{я}} = u_{\text{я}} - k_E \Phi_3 \omega \left(\frac{1/R_{\Sigma}}{T_{\Sigma} s + 1} \right); \\ \omega = k_M \Phi_3 i_{\text{я}} - M_c \frac{1}{J_S}. \end{cases} \quad (2.3)$$

За даними двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5 розрахуємо коефіцієнти для математичної моделі [8]:

$$R_{\text{я}} = \alpha \left(1 - \eta_{\text{н}} \right) \left(\frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} \right) = 0,5 \left(1 - 0,88 \right) \left(\frac{520}{1600} \right) = 0,0195 \text{ Ом}, \quad (2.4)$$

$$L_{\text{я}} = \xi \frac{U_{\text{н}}}{2p \cdot I_{\text{н}} \cdot n_{\text{н}}} = 0,6 \frac{520}{2 \cdot 4 \cdot 1600 \cdot 160} = 152,3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, \quad (2.5)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 160}{60} = 16,755 \text{ с}^{-1}. \quad (2.6)$$

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}} = 520 - 1600 \cdot 0,0195 = 488,8 \text{ В}. \quad (2.7)$$

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{745 \cdot 10^3}{16,755} = 44463,91 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.8)$$

$$T_3 = \sqrt{\frac{\pi P_{\text{н}} / 10^3}{30 \cdot 2p^2 \cdot \omega_{\text{н}}}} = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 745 \cdot 10^3 / 10^3}{30 \cdot 2 \cdot 4^2 \cdot 16,755}} = 8,53 \text{ с}. \quad (2.9)$$

$$k_M = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{44463,91}{1600} = 27,79 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}. \quad (2.10)$$

$$k_E = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{520 - 1600 \cdot 0,0195}{16,755} = 27,51 \frac{\text{В}}{\text{с}^{-1}}. \quad (2.11)$$

Рівняння статичних характеристик двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5:

$$\omega \text{ } I = \frac{U_{\text{н}}}{k_E} - \frac{I R_{\text{я}}}{k_E}; \quad (2.12)$$

$$\omega \text{ } M = \frac{U_{\text{н}}}{k_E} - \frac{M R_{\text{я}}}{k_E k_M}. \quad (2.13)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для побудови статичних характеристик 1GH5 635-5EJ40-7MV5 визначимо характерні точки [9, 10]:

$$\omega_{0EM} = \omega_{0M} = \frac{U_H}{k_E} = \frac{520}{29,17} = 17,83 \text{ c}^{-1}. \quad (2.14)$$

$$\Delta\omega_{EM} = \frac{I_H \cdot R_{\text{я}}}{k_E} = \frac{1600 \cdot 0,0195}{29,17} = 1,07 \text{ c}^{-1}. \quad (2.15)$$

$$\Delta\omega_M = \frac{M_H \cdot R_{\text{я}}}{k_E \cdot k_M} = \frac{44463,91 \cdot 0,0195}{27,79 \cdot 29,17} = 1,07 \text{ c}^{-1}. \quad (2.16)$$

Графіки природніх статичних характеристик 1GH5 635-5EJ40-7MV5 наведені на рис. 2.2 і рис. 2.3.

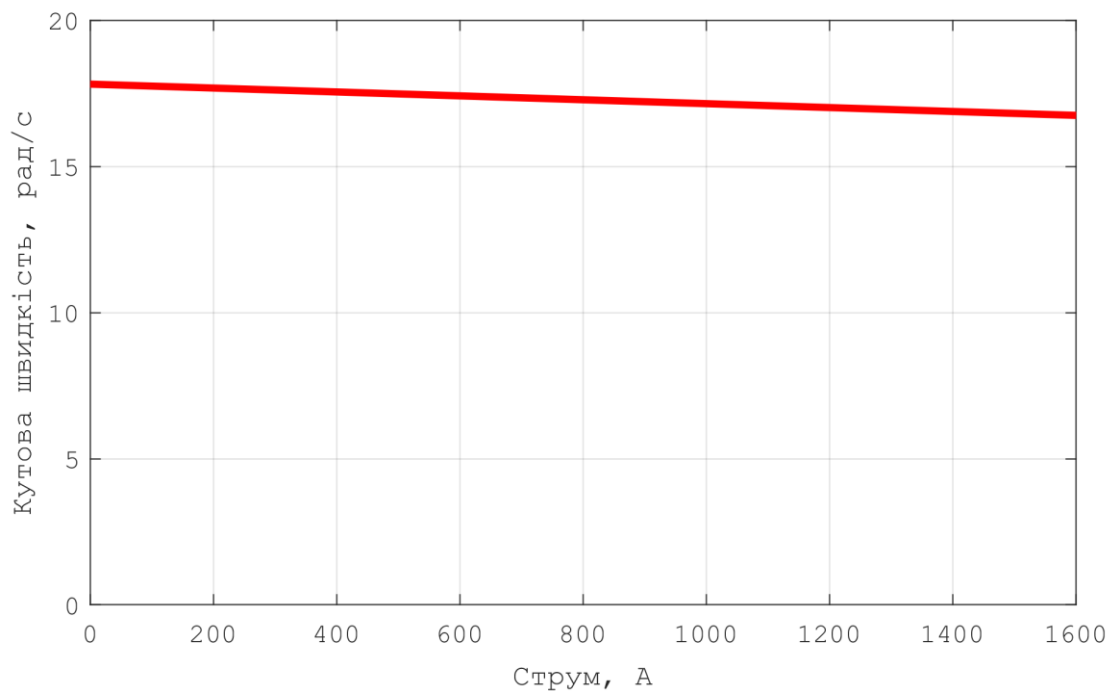


Рисунок 2.2 – Природна електромеханічна характеристика двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5

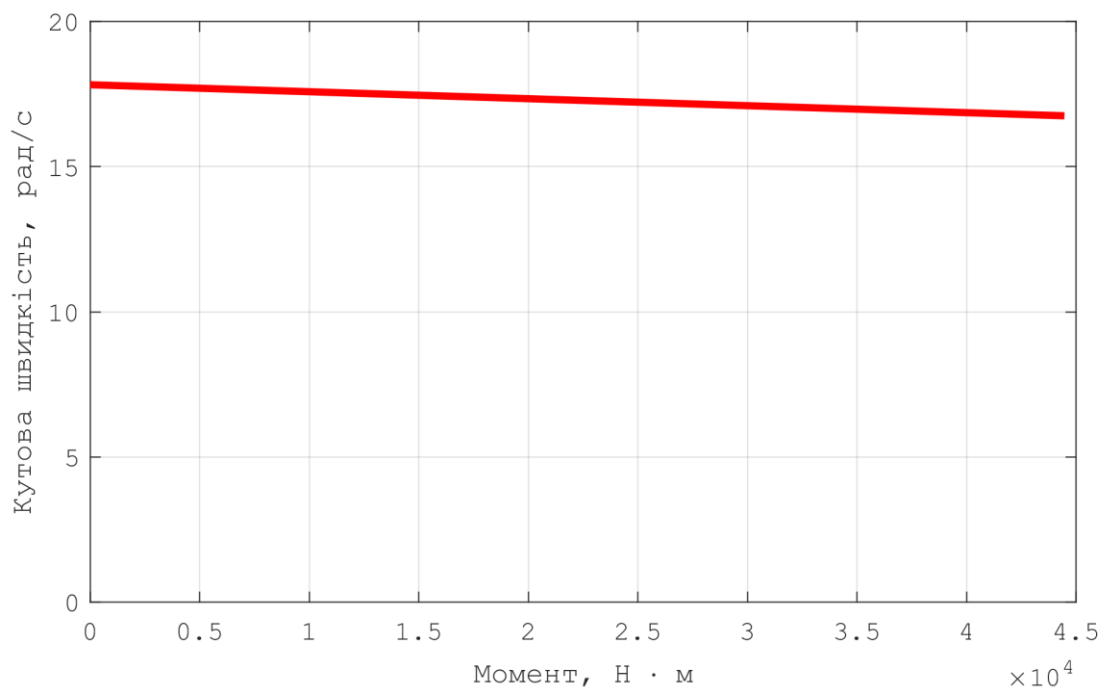


Рисунок 2.3 – Природна механічна характеристика двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5

Структурна схема моделі двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5 підйомника побудована за (2.3) і її симуляція у MATLAB/Simulink продемонстровані на рис. 2.4 і рис. 2.5.

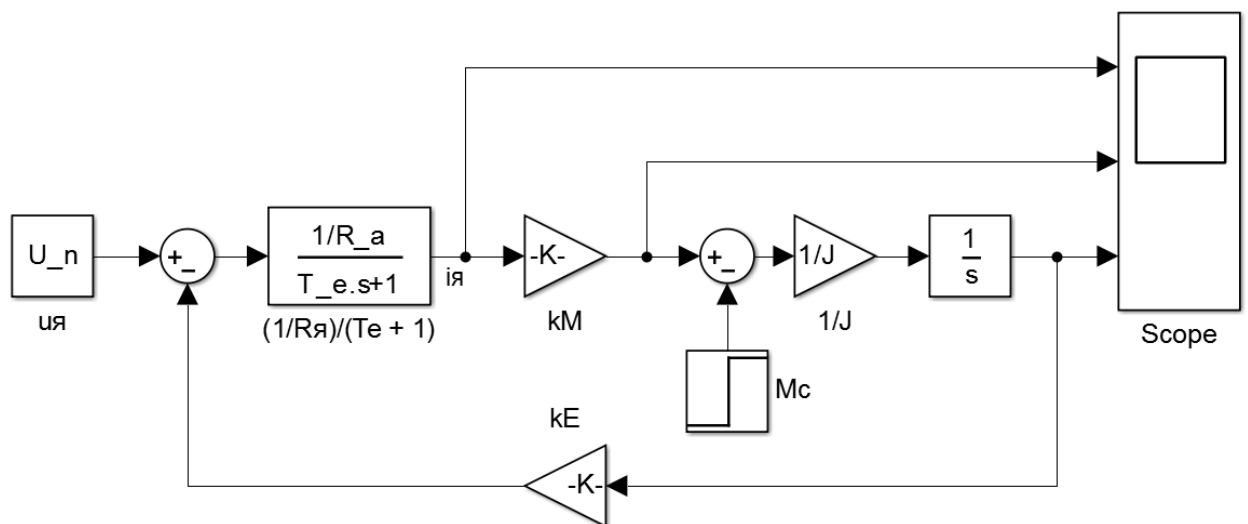


Рисунок 2.4 – Модель двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5

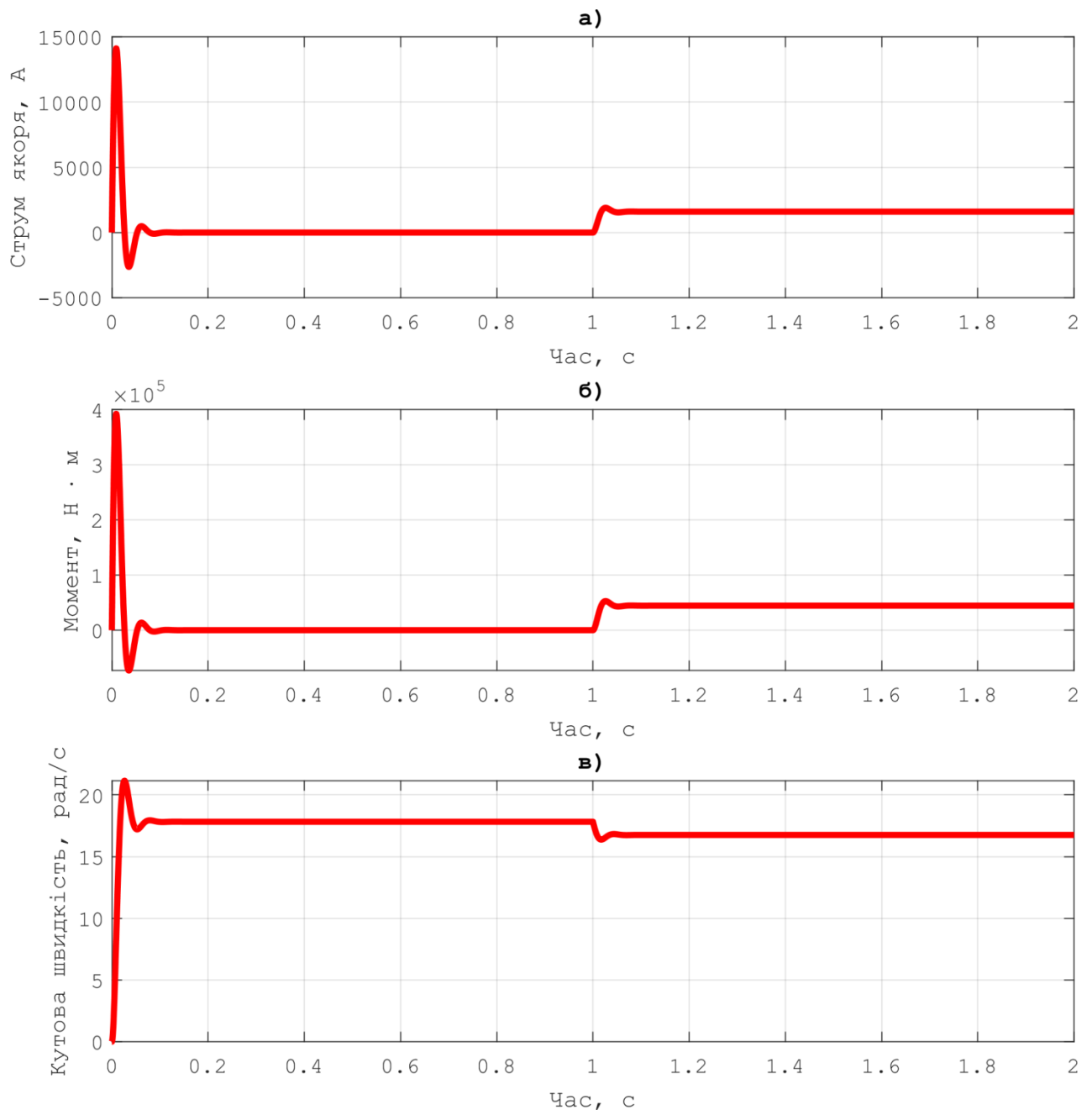


Рисунок 2.5 – Динаміка двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5: а) струм; б) момент; в) швидкість

Динаміка в двигуні шахтного підйомника за швидкістю проходить з перерегулюванням і кидками за струмом ($I_{\max} = 14,113 \cdot 10^3$ А) і моментом ($M_{\max} = 392199$ Н · м) при пуску. Для поліпшення динаміки розглянемо застосування схеми «тиристорний перетворювач – двигун» (ТП-Д) на клітьовому шахтному підйомнику.

2.2 Вибір силової частини системи ТП-Д шахтного підйомника

Враховуючи значну потужність двигуна (рис. 2.6), обрано систему тиристорного перетворювача з реверсуванням у ланцюзі якоря, що відображено на відповідній схемі. Управління реверсивним перетворювачем здійснюється за допомогою роздільної імпульсно-фазової системи, де керуючі сигнали надходять лише на активний комплект вентилів, який у даний момент проводить струм. При цьому другий комплект вентилів перебуває у закритому стані, оскільки імпульси керування на нього не подаються. Така схема забезпечує ефективне перемикання напрямку обертання двигуна без ризику одночасної роботи обох комплектів, що дозволяє уникнути коротких замикань у силовій частині перетворювача. Застосування подібної системи керування значно підвищує надійність електроприводу та забезпечує плавний реверс двигуна навіть при високих навантаженнях [9, 11].

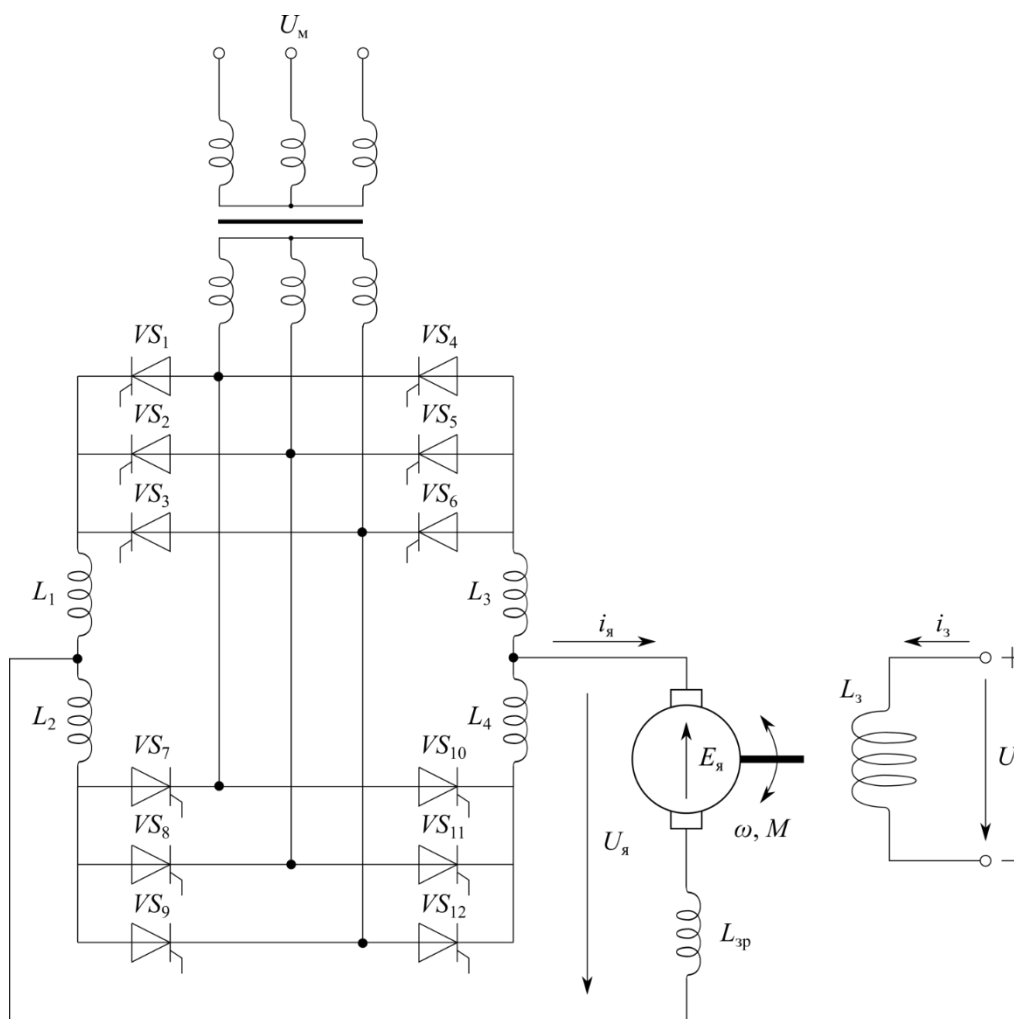


Рисунок 2.6 – Схема системи ТП-Д клітьового підйомника

Це рішення дозволяє також оптимізувати енергоефективність системи, оскільки закриття неактивних вентилів усуває втрати, пов'язані з паразитними струмами у невикористовуваному комплекті. Крім того, роздільне керування забезпечує швидке перемикання між робочими режимами, що особливо важливо для динамічних процесів, таких як гальмування або зміна напрямку обертання під навантаженням.

2.2.1 Тиристорний перетворювач

Вибір тиристорного перетворювача проводиться за $I_{дн}$ і $U_{дн}$ [10]:

$$I_{дн} = \frac{P_n}{\eta_n \cdot U_n} = \frac{745 \cdot 10^3}{0,88 \cdot 520} = 1628,1 \text{ А.} \quad (2.17)$$

$$U_{дн} = U_n = 520 \text{ В.}$$

При тому, що $I_{днП} \geq I_{дн}$ і $U_{днП} \geq U_{дн}$.

Приймаємо агрегат від виготовляється ПАТ «Запорізький електроапаратний завод» [13]: ТЕП-2500/660-1331-Я-В1П2-0-УХЛ4 з $U_{дн} = 660 \text{ В}$, $I_{дн} = 2500 \text{ А}$, і $P_n = 1650 \text{ кВт}$, двома зустрічно-паралельними 6-пульсними випрямлячами.

2.2.2 Згладжуючий реактор

Для згладжування пульсацій за умовою $L_{нзр} \leq 0,1 \div 0,15 L_y$ беремо реактор, СРОСЗ-1250УХЛ4 [12]: $I_{нзр} = 2500 \text{ А}$; $L_{нзр} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

2.2.3 Трансформатор силовий

Напруги обмоток:

$$U_{1\phi} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464,1 \text{ В.}$$

$$U_{2\phi} = k_u \cdot k_m \cdot k_\alpha \cdot k_T \cdot U_{дн} = 0,428 \cdot 1,05 \cdot 1,05 \cdot 1,05 \cdot 520 = 257,35 \text{ В,} \quad (2.18)$$

де $k_U = \pi / 3\sqrt{6} = 0,428$; $k_m = 1,05$; $k_\alpha = 1,05$; $k_T = 1,05$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Випрямлена напруга (найбільша) при $\alpha = 0$:

$$U_{d\max} = E_{d0} = U_{2\phi} \cdot k_{cx} = 257 \cdot 2,34 = 602,2 \text{ В}, \quad (2.1)$$

$$\text{де } k_{cx} = \frac{U_d}{U_{2\phi}} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} = 2,34.$$

Струм вторинної обмотки:

$$I_{2\phi} = k'_i \cdot k''_i \cdot I_{dн} = 1,05 \cdot 0,817 \cdot 1628,06 = 1396,63 \text{ А}, \quad (2.19)$$

$$\text{де } k'_i = 1,05; \quad k''_i = I_2 / I_d = \sqrt{2/3} = 0,817.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k_{mp} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{3464,10}{257,35} = 13,46. \quad (2.20)$$

Струм первинної обмотки:

$$I_{1\phi} = \frac{I_{2\phi}}{k_{mp}} = \frac{1396,63}{13,46} = 103,76 \text{ А}. \quad (2.21)$$

Потужність:

$$S_1 = 3I_{1\phi} \cdot U_{1\phi} = 3 \cdot 103,76 \cdot 3464,1 = 1078,305 \text{ кВА},$$

$$S_2 = 3I_{2\phi} \cdot U_{2\phi} = 3 \cdot 1396,63 \cdot 257,35 = 1078,268 \text{ кВА},$$

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{1078,305 + 1078,268}{2} = 1078,268 \text{ кВА}.$$

Беремо трансформатор ТНЗП-1000/10РУ2 [12] з параметрами:

Марка	Мережева обмотка		Вентильна обмотка	Перетворювач	
	$S, \text{кВА}$	$U, \text{кВ}$	$U, \text{В}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$
ТНЗП-1000/10РУ2	803	6	568	660	1600

Марка	$\Delta P_{\kappa 3}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{хх}}, \text{Вт}$	$u_{\kappa 3}, \%$	$i_{\text{хх}}, \%$
ТНЗП-1000/10РУ2	10600	2300	5	1,4

Додаткові параметри трансформатора:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{\kappa 3}}{m \cdot I_{1\phi}^2 \cdot k_{mp}^2} = \frac{10600}{3 \cdot 103,76^2 \cdot 13,46^2} = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

$$X_{mp} = \frac{U_{\kappa 3} \cdot U_{1\phi}}{100 \cdot I_{1\phi} \cdot k_{mp}^2} = \frac{5 \cdot 3464,1}{100 \cdot 103,76 \cdot 13,46^2} = 9,21 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \quad (2.23)$$

$$L_{mp} = \frac{X_{mp}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{9,21 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 29,33 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.} \quad (2.24)$$

2.3 Обчислення параметрів схеми заміщення ТП-Д шахтного підйомника

Представлення електричної частини ТП-Д шахтного підйомника за схемою (рис. 2.7) [8, 11]:

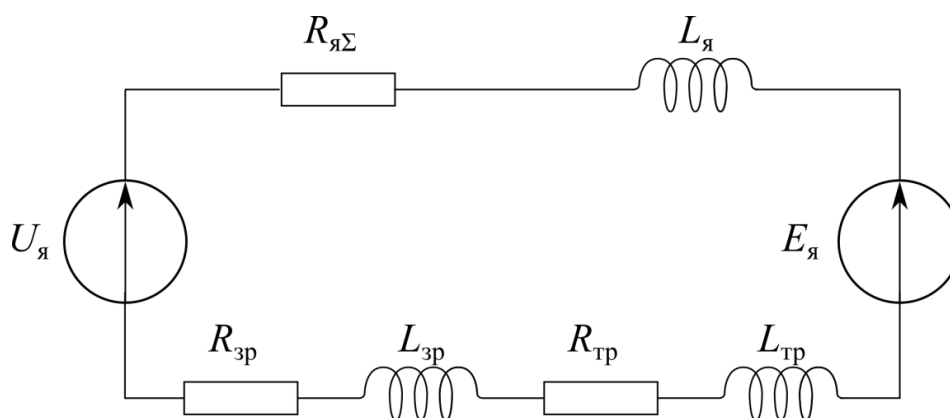


Рисунок 2.7 – Представлення електричної частини ТП-Д

Опори якоря, реактора і перетворювача:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= k_t \cdot k_r \cdot R_{\Sigma} = 1,15 \cdot 1,1 \cdot 19,5 \cdot 10^{-3} + 1,25 \cdot 10^{-3} = \\ &= 26,25 \cdot 10^{-3} \text{ Ом,} \end{aligned} \quad (2.25)$$

де $k_t = 1,15$; $k_r = 1,1$.

$$R_{зр} = 0,1 \cdot R_{я\Sigma} = 0,1 \cdot 26,25 \cdot 10^{-3} = 2,62 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} R_{пер} &= \frac{m \cdot X_{mp}}{2\pi} + 2 \cdot R_{mp} + R_{зр} = \\ &= \frac{3 \cdot 9,21 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} + 2 \cdot 1,81 \cdot 10^{-3} + 2,62 \cdot 10^{-3} = \\ &= 10,65 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Загальний опір ланцюга випрямлення [8]:

$$R_0 = R_{я\Sigma} + R_{пер} = 26,25 \cdot 10^{-3} + 10,65 \cdot 10^{-3} = 36,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} L_0 &= L_{mp} + L_{я} + L_{зр} = \\ &= 29,33 \cdot 10^{-6} + 152,3 \cdot 10^{-6} + 0,32 \cdot 10^{-3} = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Коефіцієнтів моменту, ЕРС та передачі [8]:

$$k_E = \frac{U_n - I_n R_0}{\omega_n} = \frac{520 - 1600 \cdot 36,9 \cdot 10^{-3}}{16,755} = 27,51 \frac{\text{В}}{\text{с}^{-1}}; \quad (2.30)$$

$$k_M = \frac{M_n}{I_n} = \frac{44463,91}{1600} = 27,79 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}. \quad (2.31)$$

$$k_{\partial\phi} = \frac{1}{k_E} = \frac{1}{27,51} = 0,0364 \frac{\text{с}^{-1}}{\text{В}}. \quad (2.32)$$

Коефіцієнт підсилення ТП [8]:

$$k_{ТП} = \frac{U_{дн}}{U_{кер}} = \frac{520}{5} = 104. \quad (2.33)$$

де $U_{кер} = 5 \text{ В.}$

Сталі часу

ТП:

$$T_{ТП} = 0,0034 \text{ с.}$$

Електромагнітна:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$T_e = \frac{L_0}{R_0} = \frac{0,43 \cdot 10^{-3}}{36,9 \cdot 10^{-3}} = 0,01175 \text{ с.} \quad (2.34)$$

Електромеханічна:

$$T_m = 6 \cdot J \frac{R_0}{k_M \cdot k_E} = 6 \cdot 289 \frac{36,9 \cdot 10^{-3}}{27,79 \cdot 27,51} = 0,08368 \text{ с.} \quad (2.35)$$

Оскільки $4T_e > T_m$, то динамічний процес в системі коливальний.

2.4 Характеристики тиристорного випрямляча

Основні характеристики ТП:

- фазова $\alpha = f U_{кер}$;
- регулювальна $E_d = f \alpha$ або керування $U_d = f \alpha$;
- зовнішня $U_d = f I_d$ або $E_d = f I_d$.

Фазова характеристика тиристорного випрямляча показує залежність середнього значення випрямленої напруги від кута керування тиристорами (альфа). Вона є основою для керуваності випрямляча: при збільшенні кута відкривання тиристорів вихідна напруга зменшується, оскільки тиристиори починають проводити струм із затримкою по відношенню до початку півперіоду змінної напруги. Таким чином, фазова характеристика відображає фізичну суть фазового керування [14].

Регулювальна характеристика демонструє зміну середнього значення вихідної напруги залежно від кута керування при сталому навантаженні. Вона подібна до фазової, але враховує вплив конкретного типу навантаження (активного, індуктивного тощо). Ця характеристика дає змогу оцінити ефективність регулювання випрямляча в реальних умовах експлуатації [14].

Зовнішня характеристика відображає залежність вихідної напруги від струму навантаження при фіксованому куті керування. Вона показує, як змінюється напруга під навантаженням і характеризує жорсткість джерела живлення. Для тиристорних випрямлячів така характеристика зазвичай є

спадною: при зростанні струму напруга зменшується через падіння на внутрішньому опорі та вплив реактивних елементів.

2.4.1 Фазова характеристика

Фазова характеристика $\alpha = f U_{кер}$ СІФК залежить від форми задаючого сигналу [14]:

$$\frac{\alpha_{поч} - \alpha}{U_{кер}} = \frac{\pi}{2U_{он}},$$

звідки:

$$\alpha = \alpha_{поч} - \frac{\pi U_{кер}}{2 U_{он}}.$$

У СІФК кут регулювання обмежений.

$$\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}.$$

Максимальний кут керування [14]:

$$\begin{aligned} \alpha_{max} \leq 180^\circ - \alpha_{min} &= 180^\circ - \gamma + \delta + \Delta\alpha = \\ &= 180^\circ - (5,48 + 2,7 + 3) = 168,82 \text{ ел. град.} = 2,946 \text{ рад.}, \end{aligned} \quad (2.36)$$

де:

$$\Delta\alpha = 0,052 \text{ рад} = 3 \text{ ел. град.},$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \arccos \left(\cos \alpha_{ном} - \frac{X_{тр} \cdot I_{ном}}{\sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{m} \right)} \right) - \alpha_{ном} = \\ &= \arccos \left(\cos 0,417 - \frac{9,21 \cdot 10^{-3} \cdot 1600}{\sqrt{2} \cdot 257,35 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{3} \right)} \right) - 0,417 = \\ &= 0,096 \text{ рад} = 5,48 \text{ ел. град.}, \end{aligned} \quad (2.37)$$

де:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$E_2 = U_{2\phi},$$

$$\alpha_{ном} = \arccos \left[\frac{U_{ном} + \left(R_{mp} + \frac{p \cdot X_{mp}}{2\pi} \right) \cdot I_{ном} + \Delta U_B}{E_{d0}} \right] =$$

$$= \arccos \left[\frac{520 + \left(1,81 \cdot 10^{-3} + \frac{6 \cdot 9,21 \cdot 10^{-3}}{2\pi} \right) \cdot 1600 + 1,8}{602,2} \right] =$$

$$= 0,463 \text{ рад} = 26,53 \text{ ел. град.},$$

$$\delta = \frac{2\pi f}{\pi} 180^\circ \frac{\pi}{180^\circ} \cdot t_{вкл} = \frac{314}{3,14} \cdot 180 \cdot 150 \cdot 10^{-6} = 0,047 \text{ рад} = 2,7 \text{ ел. град.},$$

$$\text{де } t_{вкл} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

Мінімальний кут керування:

$$\alpha_{\min} = \gamma + \delta + \Delta\alpha = 5,48 + 2,7 + 3 = 11,18 \text{ ел. град.} = 0,195 \text{ рад.}$$

Фазова характеристика перетворювача ТЕП-2500/660 у режимі тривалих струмів продемонстрована на рис. 2.8.

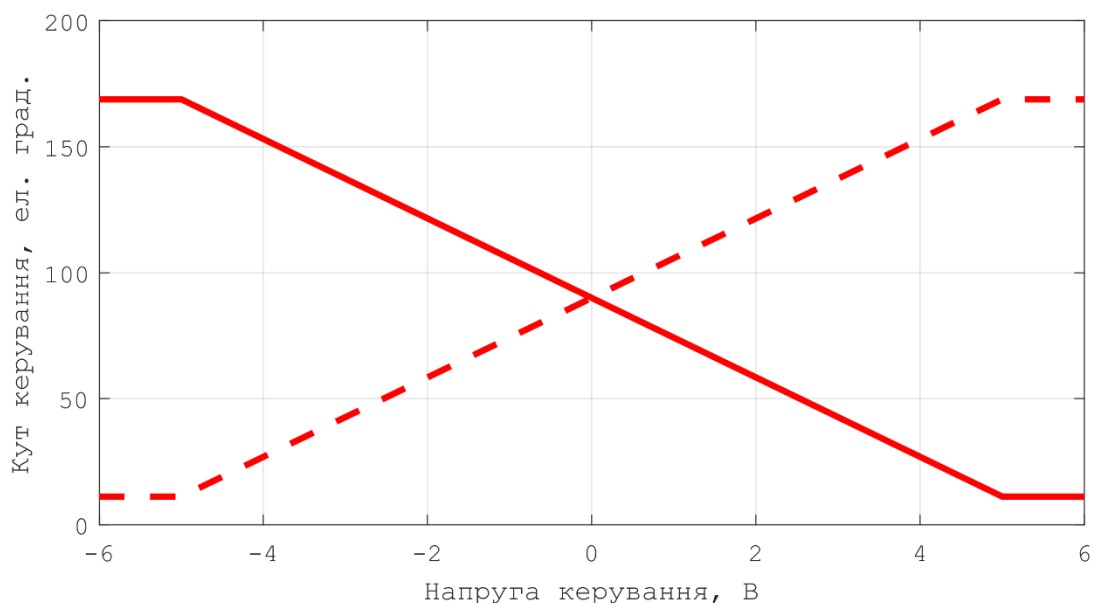


Рисунок 2.8 – Фазова характеристика ТЕП-2500/660

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.4.2 Регулювальні характеристики

Регулювальна характеристика в режимі тривалих струмів [14]:

$$E_d = \frac{m}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{m}} E_{2m} \cdot \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \alpha\right) d\omega_0 t = E_{d0} \cdot \cos \alpha, \quad (2.38)$$

Характеристика керування в режимі тривалих струмів [14]:

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - I_{ном} \cdot R_{пер},$$

Регулювальні характеристики показані на рис. 2.9.

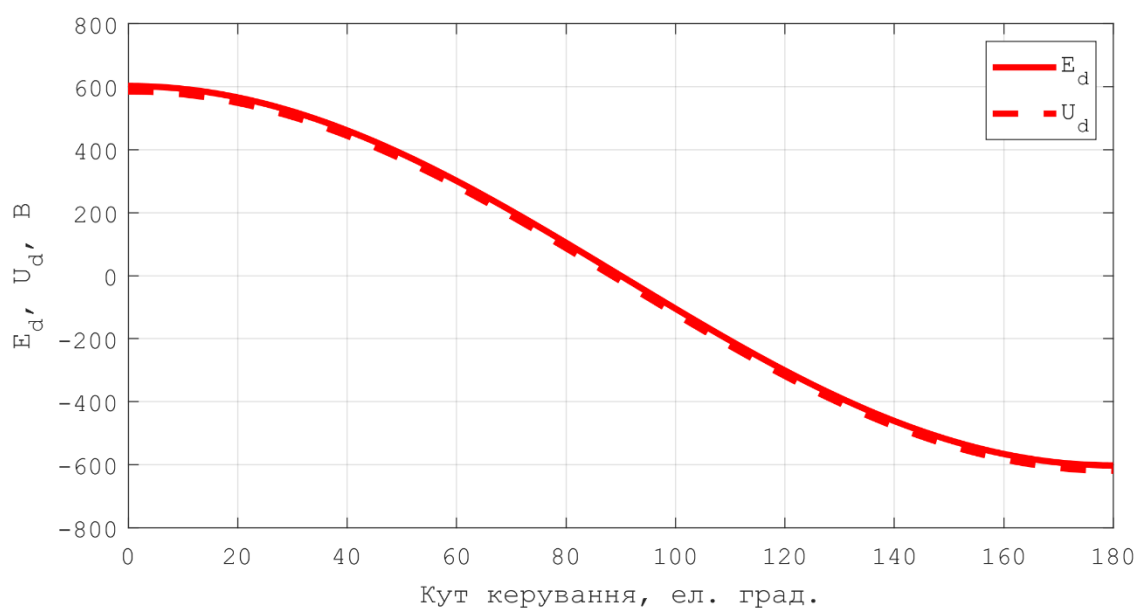


Рисунок 2.9 – Регулювальна характеристика перетворювача ТЕР-2500/660

2.4.3 Зовнішня характеристика

Зовнішні характеристики в режимі тривалих струмів [14]:

$$U_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_B - \left(R_{mp} + \frac{p \cdot X_{mp}}{2\pi} \right) \cdot I_d. \quad (2.39)$$

Межа безпечного режиму інвертування:

$$U_d = -E_{d0} \cdot \cos \delta + \Delta \alpha + \frac{p \cdot X_{mp}}{2 \cdot \pi} \cdot I_d.$$

Зовнішні характеристики перетворювача ТЕП-2500/660 у межах зміни кута α показані на рис. 2.10.

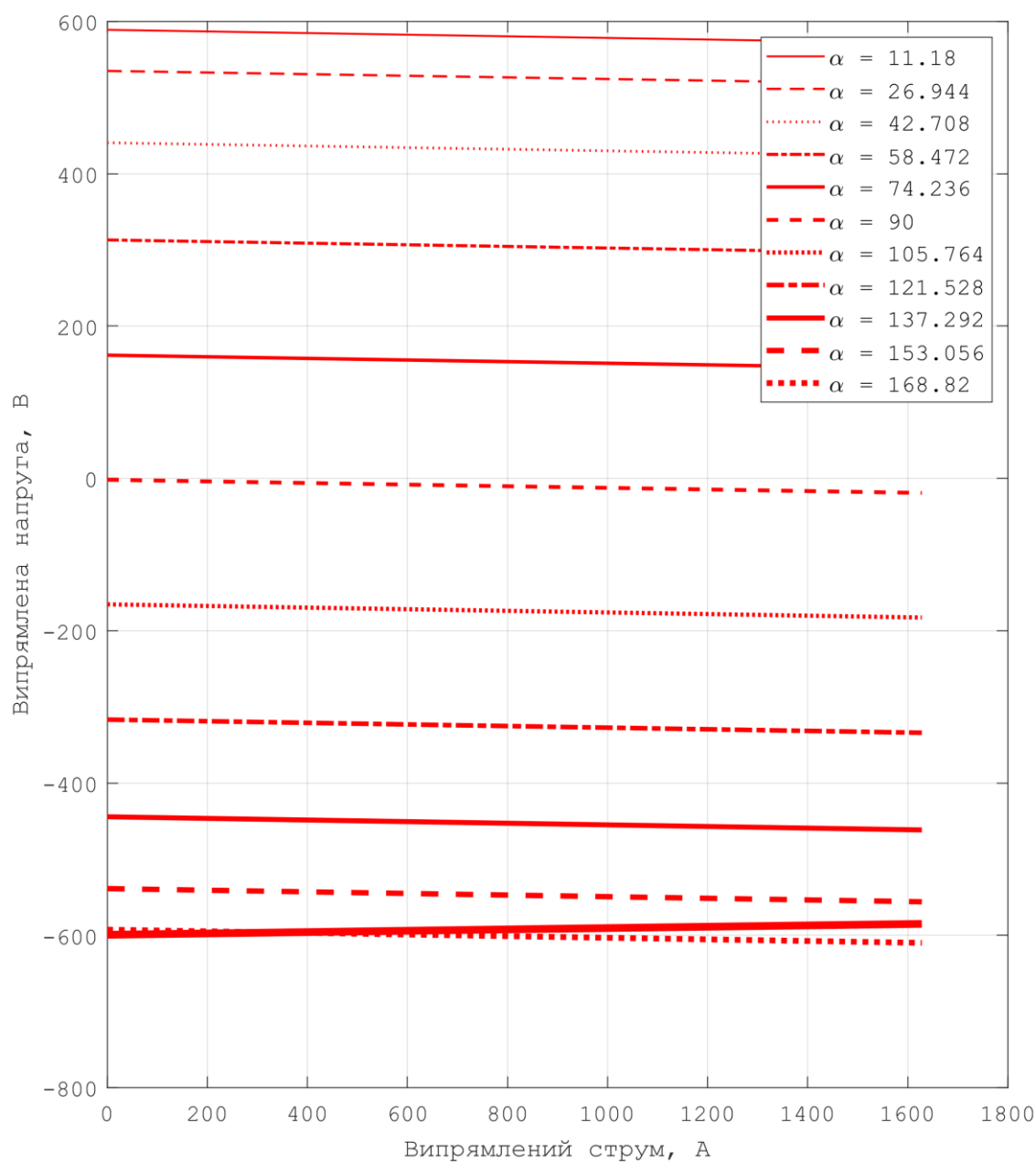


Рисунок 2.10 – Зовнішні характеристики перетворювача ТЕП-2500/660

2.5 Система ТП-Д шахтного підйомника в статиці та динаміці

Рівняння статичних характеристик привода шахтного підйомника для режиму тривалих струмів:

$$\omega I = \frac{E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_{\epsilon}}{k_E} - \frac{IR_0}{k_E}; \quad (2.40)$$

$$\omega M = \frac{E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_{\epsilon}}{k_E} - \frac{MR_0}{k_E k_M}. \quad (2.41)$$

Швидкість ідеального х.х.:

$$\omega_{0xx} = \frac{E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_{\epsilon}}{k_E}.$$

При роботі тиристорних перетворювачів спостерігається характерне явище переривчастого струму в області малих навантажень. Особливість цього режиму полягає в тому, що при певних кутах керування середнє значення струму не досягає нульової позначки, утворюючи зону переривчастої провідності, яка розширюється пропорційно зростанню кута відкриття тиристорів.

Фізична природа цього явища обумовлена динамікою взаємодії між випрямленою напругою перетворювача та зустрічною ЕРС двигуна. У моменти, коли випрямлена напруга опускається нижче рівня ЕРС, теоретично струм повинен змінити напрямок. Однак через однобічну провідність вентилів ланцюг розривається, і струм падає до нуля, доки напруга знову не перевищить значення ЕРС. Це призводить до характерних перерв у протіканні струму.

При значних навантаженнях картина принципово змінюється - навіть у періоди, коли випрямлена напруга нижча за ЕРС, струм залишається безперервним. Це пояснюється накопиченням значного запасу електромагнітної енергії в колі, де ЕРС самоіндукції, що з'являється при зменшенні струму, у поєднанні з випрямленою напругою перевищує зустрічну ЕРС двигуна. У таких умовах різниця потенціалів залишається додатною, запобігаючи розриву струму.

Між цими двома режимами існує перехідний стан - так званий початково-безперервний режим, який слугує своєрідною межею між

областями переривчастого та безперервного струмів. Цей граничний режим має особливе значення для аналізу роботи системи та проектування заходів щодо стабілізації її роботи в різних навантажувальних режимах.

Величина граничного струму:

$$I_{d, \text{гп}} = \frac{E_{d0} \sin \alpha}{X_{mp} + 2\pi f \cdot L_0} \left(1 - \frac{\pi}{p} \cot \left(\frac{\pi}{p} \right) \right) = \frac{E_{d0} \sin \alpha}{\omega \cdot L_{\text{я}}} \left(1 - \frac{\pi}{p} \cot \left(\frac{\pi}{p} \right) \right).$$

Граничні величини лежать на дузі [11, 14].

У зоні переривчастих струмів електромеханічні та механічні характеристики втрачають чіткий аналітичний вираз, що ускладнює їх точний опис. Зі зменшенням навантаження спостерігається зростання швидкості двигуна, що призводить до підвищення його зустрічної ЕРС. Як наслідок, струм навантаження перетворювача зменшується, а разом з ним знижуються втрати напруги на опорах схеми й комутаційні втрати. Це сприяє подальшому зростанню вихідної напруги.

У режимі ідеального холостого ходу, коли струм практично відсутній, падіння напруги на ключах та внутрішніх опорах стає мінімальним, що ще більше підвищує вихідну напругу. У такому випадку напруга на двигуні під час імпульсів струму наближається до амплітуди вхідної змінної напруги, що забезпечує додаткове зростання швидкості. Саме тому в області малого та нульового навантаження механічні характеристики двигуна підйомника набувають м'якого, нелінійного характеру, що відрізняється від жорстких характеристик, властивих режиму безперервного струму.

Ця особливість роботи системи обумовлена динамікою взаємодії між перетворювачем і двигуном, де зміни струму та напруги в зоні переривчастої провідності суттєво впливають на електромеханічні властивості приводу. В результаті характеристика швидкості в цій області демонструє значну залежність від навантаження, що необхідно враховувати при проектуванні систем керування та забезпеченні стабільності роботи електропривода.

Тоді швидкість ідеального холостого ходу:

$$\begin{cases} \omega_{0xx} = \frac{E_{2\phi\max} - \Delta U_{\epsilon}}{k_E} \text{ при } 0 < \alpha < \frac{\pi}{p}; \\ \omega_{0xx} = \frac{E_{2\phi\max} \cos \alpha - \pi/p - \Delta U_{\epsilon}}{k_E} \text{ при } \alpha > \frac{\pi}{p}. \end{cases}$$

Побудуємо статичні характеристики приводу підйомника.

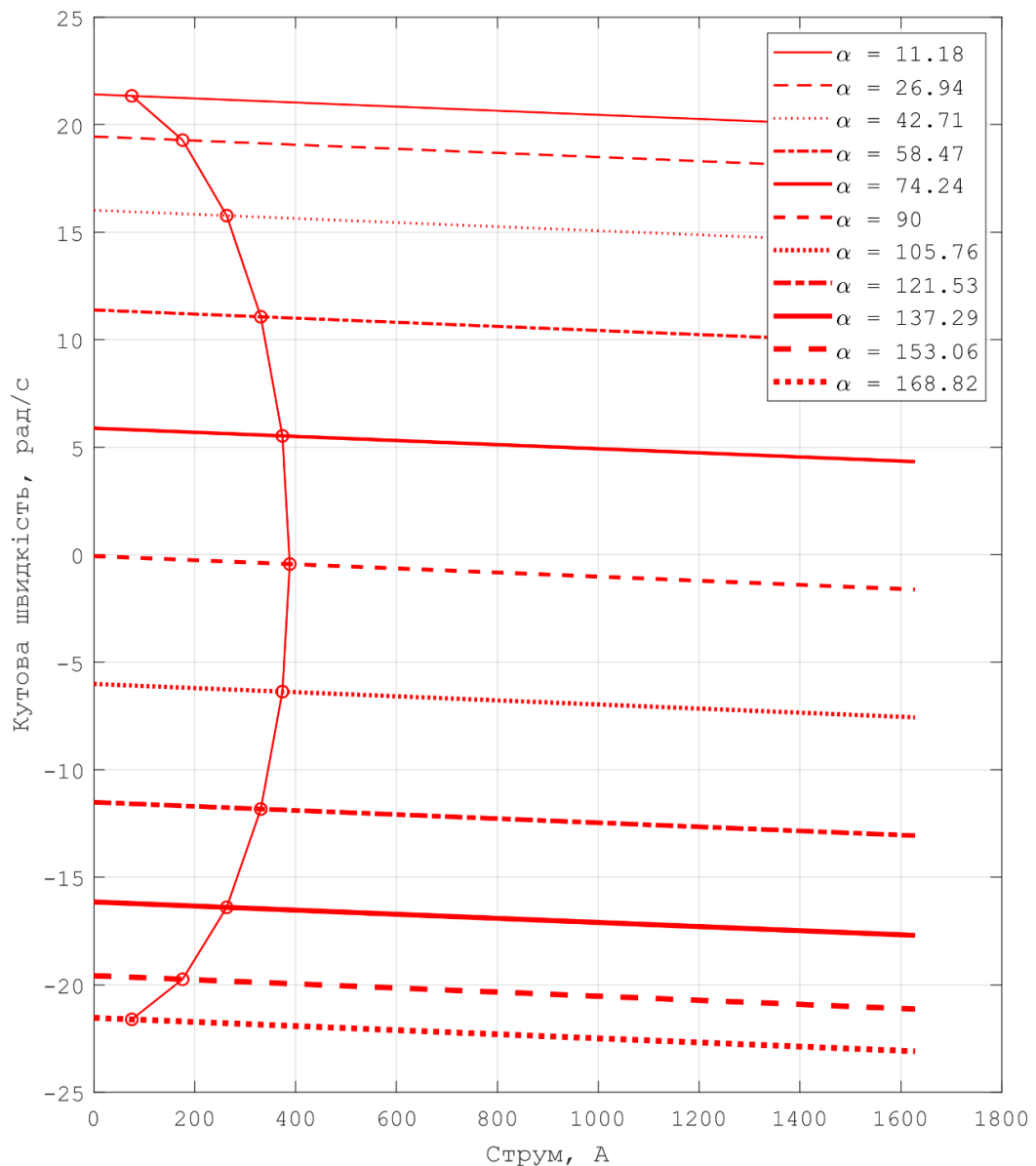


Рисунок 2.11 – Електромеханічні характеристики для ТП-Д клітьового підйомника шахти

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10

Арк.

51

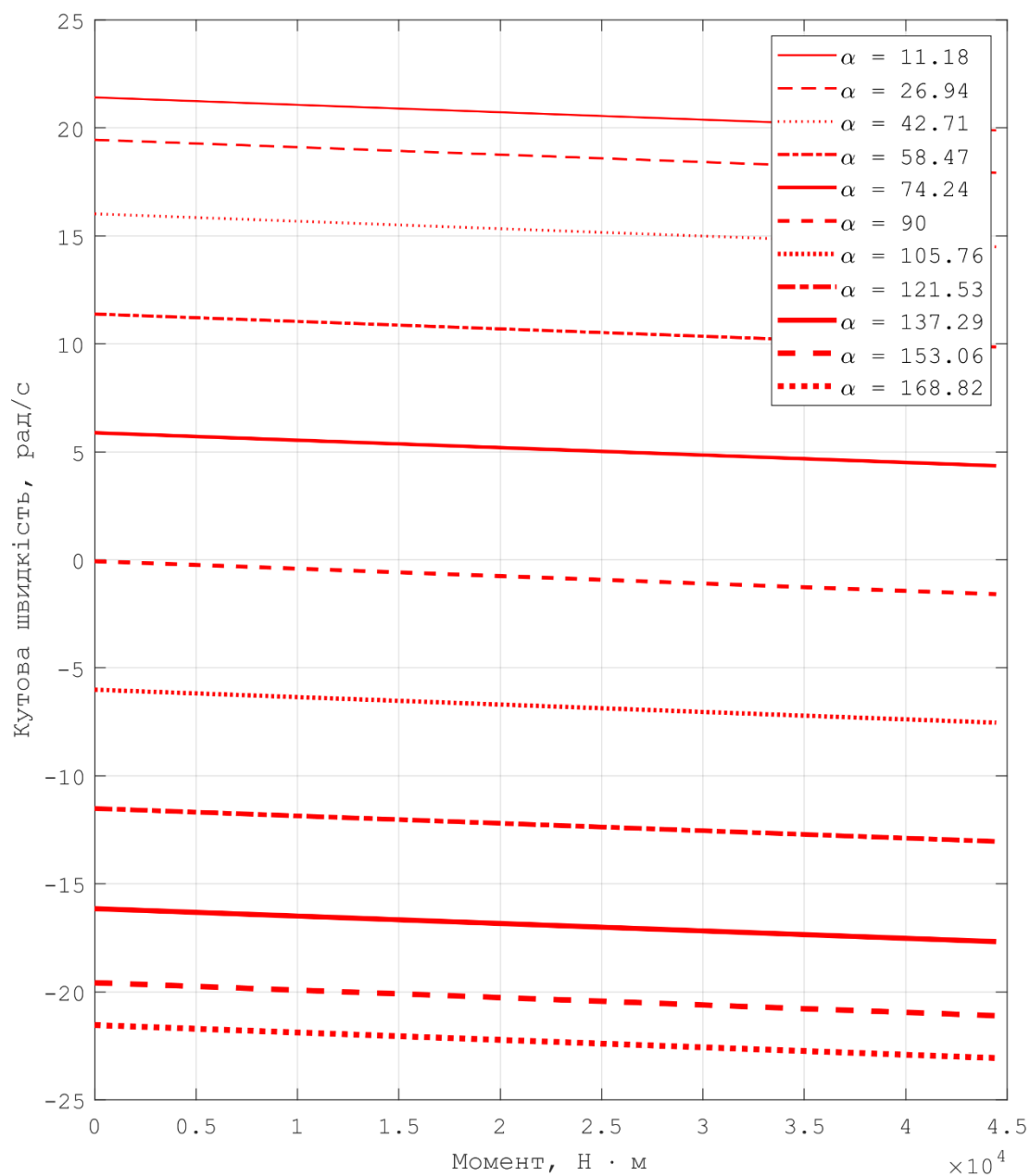


Рисунок 2.12 – Механічні характеристики для ТП-Д клітьового підйомника шахти

Математична модель ТП-Д клітьового підйомника і її симуляції у MATLAB/Simulink показані на рис. 2.13 і рис. 2.14.

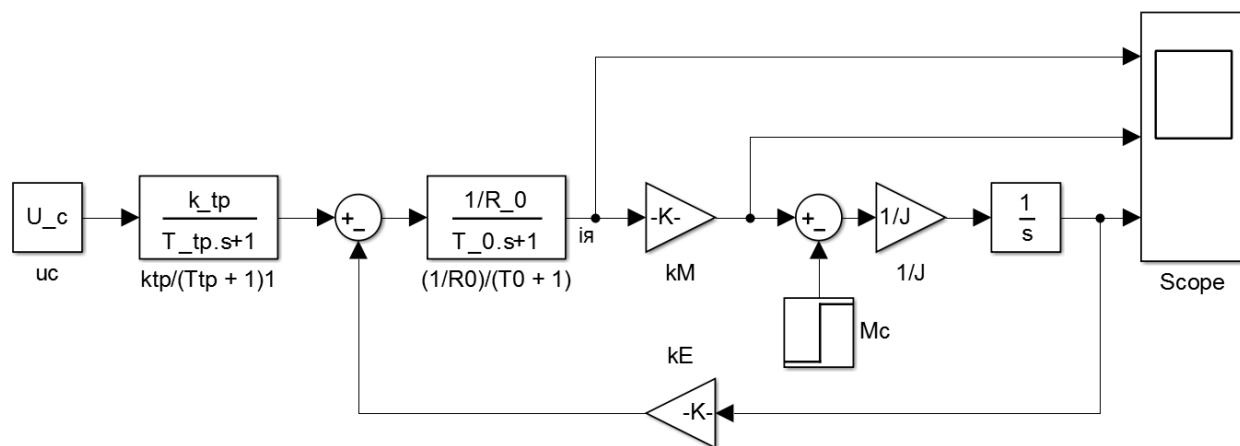


Рисунок 2.13 – Модель ТП-Д клітьового підйомника шахти

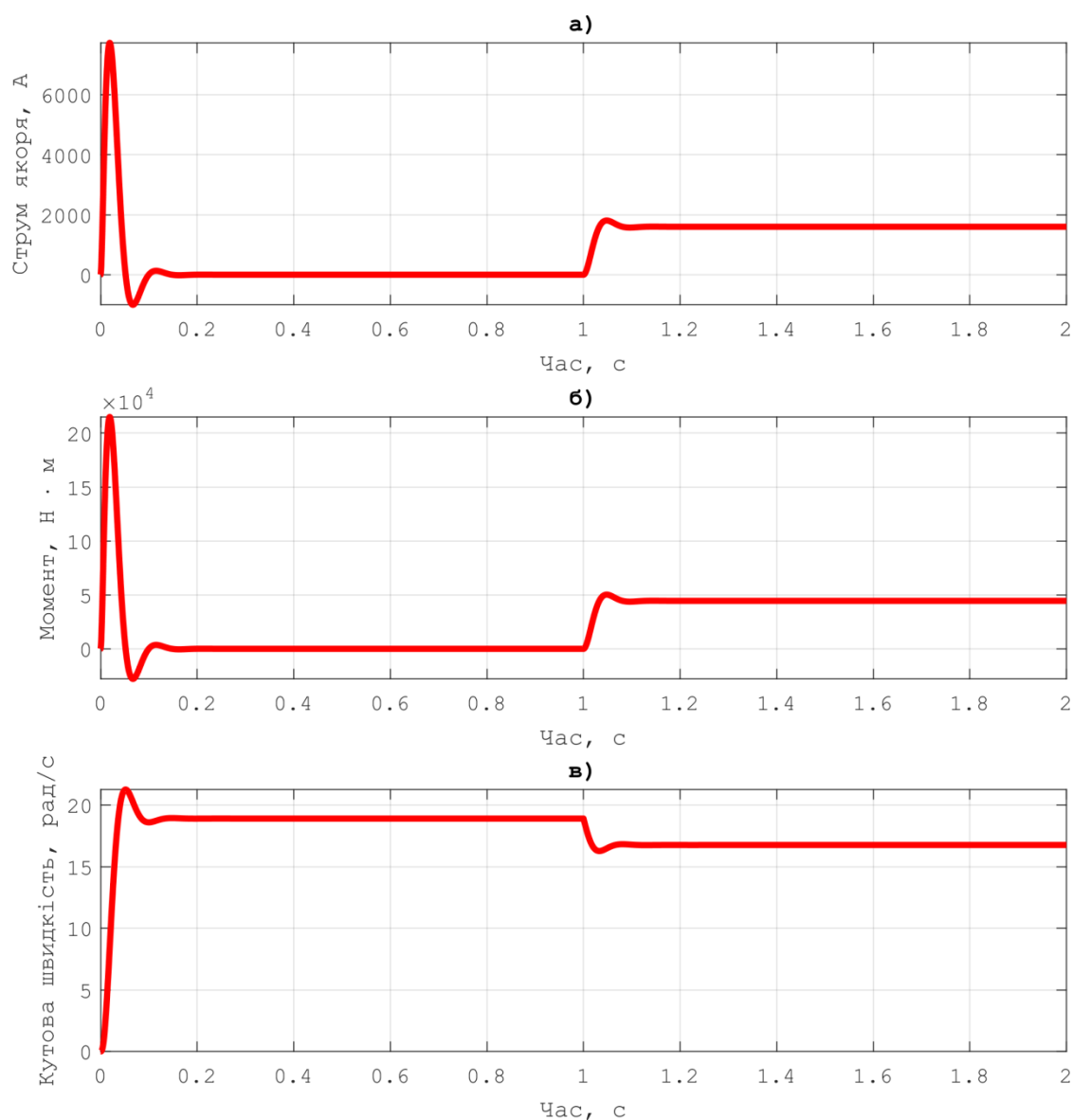


Рисунок 2.14 – Динаміка ТП-Д приводу клітьового підйомника шахти:

а) струм; б) момент; в) швидкість

Аналіз графіків вказує, що при застосуванні ТП-Д відбувається зниження струму ($I_{\max} = 7,621 \cdot 10^3 \text{ A}$) і моменту ($M_{\max} = 213002 \text{ Н} \cdot \text{м}$) при пуску співсталяючи з включенням двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5 через діодний випрямляч. Динаміка за кутовою швидкістю не має перерегулювання.

Під час симуляцій визначено якість регулювання (див. табл. 2.1) у системах нерегульованого й регульованого електроприводу (рис. 2.5 і рис. 2.14).

Таблиця 2.1 – Якість керування у нерегульованому і регульованому електроприводі клітьового підйомника

Показник	ДПТ НЗ	ТП-Д
$t_{\text{ПП}}, \text{сек}$	0,08	0.1742
$e_{\text{ст}}, \text{рад/с}$	0	0,01
$e_{\text{ст}}, \%$	0	0,019

Дослідження роботи системи ТП-Д для клітьового підйомника виявило відсутність перерегулювання, проте зафіксувало незначні статичні відхилення. Порівняльний аналіз показав, що нерегульований електропривод хоча й забезпечує швидші перехідні процеси, але супроводжується критичним зростанням пускових параметрів – струм збільшується на 85%, а момент на 84% порівняно з регульованою системою. Такі екстремальні пускові навантаження суперечать технічним вимогам до експлуатації двигунів шахтного підйомника і створюють реальну загрозу для цілісності механічних вузлів підйомної установки, що може призвести до небезпеки для робітників шахти.

Враховуючи необхідність підвищення безпеки та надійності підйомних операцій, особливо при транспортуванні людей та вантажів на поверхню, впровадження регульованого тиристорного електроприводу виявляється технічно та економічно обґрунтованим рішенням. Така система не лише усуває небезпечні пускові навантаження, але й забезпечує плавність роботи, точність позиціонування та енергоефективність у всіх режимах експлуатації.

Додатковими перевагами регульованого приводу є можливість реалізації програмного керування, автоматизації технологічних процесів та інтеграції в сучасні системи моніторингу, що суттєво підвищує рівень безпеки та ефективності роботи підйомних установок у цілому.

Висновки за розділом 2

Другий розділ присвячено дослідженню клітьової підйомної установки, включно з розробкою моделі двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5 на базі диференційних рівнянь, перетворених у операторну форму. Для регулювання швидкості запропоновано тиристорний електропривід з реверсом у ланцюзі якоря, що включає трансформатор, реверсивний тиристорний блок з подвійною шестипульсною схемою та згладжуючий реактор.

Проведена комплексна симуляція, яка показала переваги для клітьового підйомника регульованого приводу перед нерегульованим. Отримані показники динамічних процесів за швидкістю, моментом і струмом підтвердили більш високі експлуатаційні характеристики системи з тиристорним перетворювачем. Отже ефективність запропонованого рішення для підвищення продуктивності шахтних підйомних установок підтверджується.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 3. Створення цифрової системи керування швидкістю електроприводу шахтного підйому

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	<i>Створення цифрової системи керування швидкістю електроприводу шахтного підйому</i>	<i>Літ.</i>		<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Янча О.П.</i>					<i>Н</i>		56	
<i>Перевір.</i>	<i>Михайленко О.Ю.</i>					<i>ЕІ ЗЕЕМ-22ск</i>			
<i>Конс.</i>									
<i>Н.контр.</i>	<i>Михайленко О.Ю.</i>								
<i>Затверд.</i>	<i>Пересунько І.І.</i>								

3.1 Обґрунтування розробки цифрового регулятора для шахтного підйомника

Застосування цифрового ПІ-регулятора в системі керування електроприводом шахтного клітьового підйому є обґрунтованим як з позиції динаміки об'єкта, так і з урахуванням вимог до надійності, точності та безпеки в умовах гірничого виробництва. Шахтний підйом є складним електромеханічним об'єктом, що вимагає стабільного, плавного та точного регулювання швидкості і положення кліті в умовах значних змін навантаження та високих інерційних мас. Електропривод, що використовується для цього процесу, повинен забезпечувати точне слідування заданим траєкторіям, а також гарантувати безпечне гальмування і тримання кліті у статичному положенні. У цьому контексті цифровий ПІ-регулятор дозволяє ефективно реалізувати завдання автоматичного регулювання швидкості або положення за рахунок поєднання пропорційної та інтегральної дії, де пропорційна складова забезпечує адекватну швидкодію, а інтегральна – нульову статичну похибку у сталому режимі [15, 16].

Цифрова реалізація такого регулятора дозволяє легко адаптувати його до вимог сучасних систем автоматизації, реалізованих на програмованих логічних контролерах або цифрових сигнальних процесорах. Це забезпечує більшу гнучкість у переналаштуванні параметрів регулювання в реальному часі, підвищує точність дискретизації, дозволяє фільтрувати виміряні сигнали, а також легко реалізовувати алгоритми обмеження сигналів, захисту від перенапруги або перевантаження. Крім того, цифровий ПІ-регулятор дозволяє здійснювати автоматичну самоналаштування або адаптацію до зміни навантаження, що особливо важливо в умовах шахтного транспорту, де маса вантажу у кліті може змінюватись від порожньої до повністю навантаженої, що суттєво впливає на динаміку системи. Також варто враховувати вимоги до безперервного моніторингу параметрів підйому, інтеграції з системами диспетчерського управління, що легко реалізується саме у цифрових структурах.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

З урахуванням безпечного функціонування шахтного підйомника, цифровий ПІ-регулятор може бути доповнений функціями діагностики, контролю цілісності зворотного зв'язку, а також вбудованими алгоритмами аварійного відключення при виявленні небезпечних режимів.

3.2 Цифрова модель електродвигуна шахтного підйомника

Для розробки цифрової системи керування з ПІ-регулятором для двигуна постійного струму шахтного підйомника залучимо математичну модель двигуна, яку вже виводили раніше. Проте спростимо її.

Двигун описується рівняннями рівноваги для електричної і механічної частин.

Електричне рівняння якоря:

$$u_{\text{я}}(t) = i_{\text{я}}(t) R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} + e_{\text{я}}(t), \quad (3.1)$$

де $e_{\text{я}} = k_e \omega$ – ЕРС, пропорційна швидкості.

Механічна частина описується рівнянням

$$M(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t), \quad (3.2)$$

де $M = k_M i_{\text{я}}(t)$ – момент.

Для спрощення не беремо до уваги механічне тертя ($B \approx 0$).

Тоді з (3.1) і (3.2) можна вивести передаточну функцію:

$$\begin{aligned} U_{\text{я}}(s) &= L_{\text{я}} s I_{\text{я}}(s) + R_{\text{я}} I_{\text{я}}(s) + k_E \omega(s); \\ Js\omega(s) &= k_M I_{\text{я}}(s). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Виразимо:

$$I_{\text{я}}(s) = \frac{Js\omega(s)}{k_M}. \quad (3.4)$$

І підставимо:

$$U_{я\ s} = L_{я}s \frac{Js\omega\ s}{k_M} + R_{я} \frac{Js\omega\ s}{k_M} + k_E\omega\ s. \quad (3.5)$$

Ще виразимо:

$$U_{я\ s} = L_{я}Js^2 + R_{я}Js + k_Mk_E \frac{\omega\ s}{k_M}. \quad (3.6)$$

Звідки передавальна функція:

$$W_{\text{двиг}}\ s = \frac{\Omega\ s}{U_{я\ s}} = \frac{k_M}{L_{я}Js^2 + R_{я}Js + k_Ek_M}. \quad (3.7)$$

Для реалізації системи керування у цифровому контролері ця безперервна модель має бути перетворена в дискретну. Найнадійнішим способом такого перетворення є метод Тастіна. Його суть полягає в заміні похідної у частотній області за Лапласом на апроксимацію у z-області, що дозволяє перейти від безперервного регулятора до цифрового. Основна ідея полягає у наближенні оператора Лапласа s у вигляді [15, 16]:

$$s = \frac{2}{T_\partial} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}, \quad (3.8)$$

де T_∂ – період дискретизації;

z – оператор z-перетворення.

Така заміна дозволяє відобразити всю ліву півплощину s-площини у внутрішнє коло одиничного радіуса на z-площині, що гарантує збереження стабільності: якщо система була стійка у безперервному часі, то її дискретна версія після білінійного перетворення також залишиться стійкою. На відміну від інших методів, метод Тастіна не має проблеми віддзеркалення частот, як це трапляється при прямій дискретизації методом прямого відліку. Він також не вимагає нульового порядку утримання (ZOH). Метод забезпечує адекватну апроксимацію динаміки системи навіть при порівняно великому періоді дискретизації, особливо у випадку синтезу цифрових ПІД-регуляторів. При застосуванні цього методу безперервна передаточна функція або ПІД-

регулятор записується у вигляді раціонального дробу, після чого здійснюється підстановка оператора s , що призводить до передаточної функції у z -області. Отриманий цифровий регулятор може бути реалізований в обчислювальній системі керування для формування керуючого сигналу на кожному дискретному кроці [15, 16].

Залучивши перетворення метод Тастіна для (3.7) маємо дискретизовану передаточну функції для моделі шахтного підйомника:

$$W_{\text{двиг}} z = \frac{0,003532z^2 + 0,007064z + 0,003532}{z^2 - 1,069z + 0,4579}. \quad (3.9)$$

Східчаста функція для $U_{\text{я}} = 1 \text{ В}$; $T_s = 0,01 \text{ сек}$ показана на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Ступінчастий відгук системи за швидкістю швидкістю

Після побудови моделі можна реалізувати цифровий ПД-регулятор.

3.3 Створення цифрового ПІ-регулятора для системи керування шахтним підйомником

Отримання цифрового ПІ-регулятора для дискретної передавальної функції двигуна відбувається в кілька кроків, які пов'язують класичне аналогове регулювання з його реалізацією в цифровій формі.

Спершу потрібно сформулювати ПІ-регулятор у безперервній області. Цей регулятор у частотній області додає нуль, який покращує фазовий запас і покращує динаміку системи [15, 16].

Його класичне рівняння у вигляді передавальної функції має такий вигляд [15, 16]:

$$W_{III} \ s = K_{II} + \frac{K_I}{s} = \frac{K_{II} + K_I}{s}, \quad (3.10)$$

де K_{II} – пропорційний коефіцієнт;

K_I – інтегральний коефіцієнт.

Щоб реалізувати цей регулятор у цифровій формі, потрібно задіяти з-перетворення з тим же методом Тастіна:

$$W_{III} \ z = K_{II} + \frac{K_I T_{\Delta}}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (3.11)$$

Після приведення цього виразу до раціонального вигляду отримаємо дискретну передавальну функцію:

$$W \ z = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (3.12)$$

де коефіцієнти залежать від K_{II} , K_I та періоду дискретизації T_{Δ} :

$$a_0 = K_{II} + \frac{K_I T_{\Delta}}{2}; \quad a_1 = -K_{II} + \frac{K_I T_{\Delta}}{2}. \quad (3.13)$$

Цей регулятор реалізується у вигляді рівняння різниць, яке описує дію регулятора в часовій області:

$$y \ k = y \ k-1 + a_0 e \ k + a_1 e \ k-1, \quad (3.14)$$

де $e \ k$ – похибка;

$y \ k$ – вихід регулятора.

Цей цифровий ПІ-регулятор можна безпосередньо підключити до дискретної передавальної функції двигуна $W \ z$, яку було отримано за

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

допомогою дискретизації Тастіна. Таким чином, вхідний сигнал надходить до регулятора, який видає керуючий вплив, а двигун реагує відповідною швидкістю, що в замкненій системі дозволяє реалізувати систему зворотного зв'язку з певними динамічними і статичними властивостями.

Задамо $K_P = 10$, $K_I = 10$. Регулятор тоді має форму [15, 16]:

$$W_{III} z = \frac{10,05z - 9,95}{z - 1}. \quad (3.15)$$

Проведемо симуляцію (рис. 3.2).

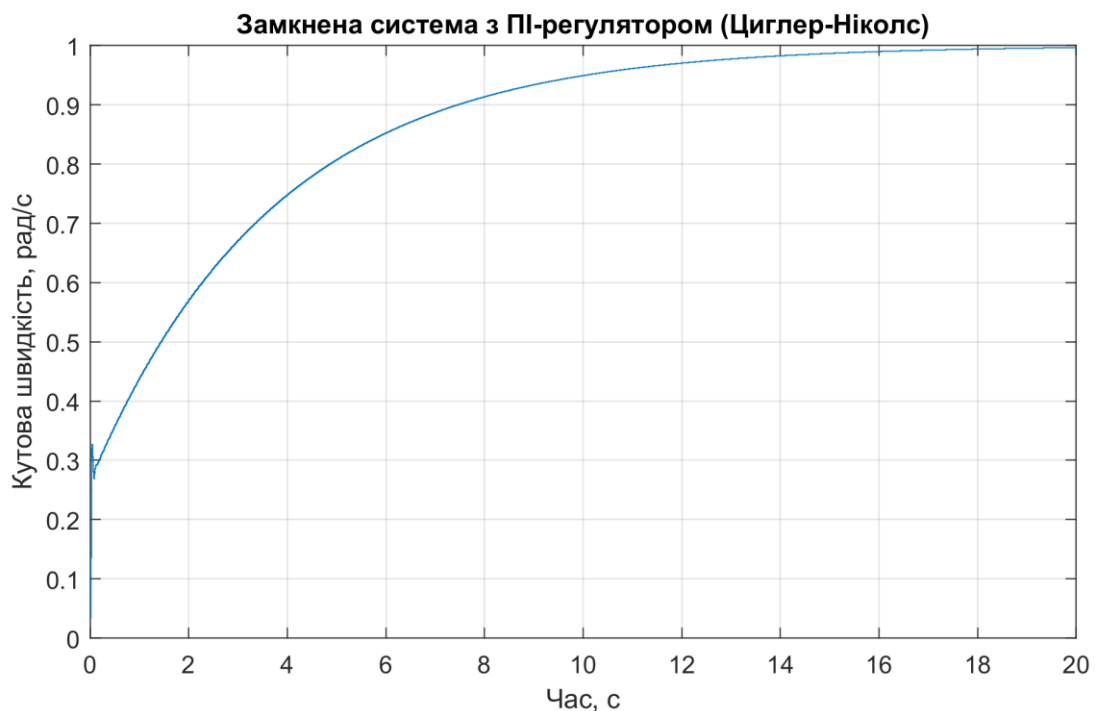


Рисунок 3.2 – Ступінчастий відгук системи за швидкістю при задіянні ПІ-регулятора

Перехідний процес хоч і без перерегулювання, проте дуже тривалий. Треба провести встановлення коефіцієнтів. Для цього скористаємося способом Циглера-Ніколса.

Спочатку нам потрібно отримати граничне підсилення K_u та граничний період коливань T_u . Це робиться за допомогою відкритої системи із чисто-пропорційним регулятором та аналізу її реакції на одиничний збурюючий сигнал. Далі ці значення підставляються у формули для ПІ-регулятора.

$$\begin{aligned}
 K_{\Pi} &= 0,45K_u; \\
 T_I &= \frac{T_u}{1,2}; \\
 K_I &= \frac{K_{\Pi}}{T_I}.
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

Спосіб Циглера-Ніколса дав нам критичні параметри:

$$K_u = 5; T_u = 0,08 \text{ сек.} \tag{3.17}$$

І такий результат для регулятора:

$$K_{\Pi} = 2,25, K_I = 32,67. \tag{3.18}$$

Регулятор тоді має форму:

$$W_{\Pi} z = \frac{2,413z - 2,087}{z - 1}. \tag{3.19}$$

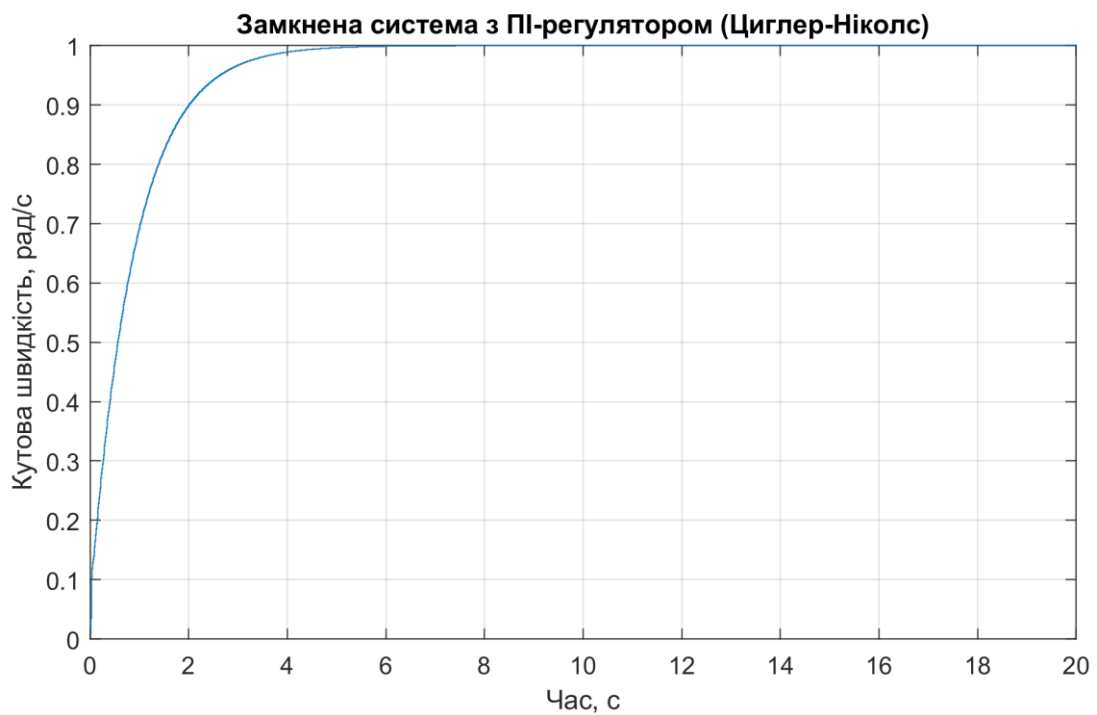


Рисунок 3.3 – Ступінчастий відгук системи за швидкістю при задіянні ПІ-регулятора підібраного способом Циглера-Ніколса

3.4 Аналіз стійкості системи керування шахтним підйомником

Перевірка отриманого ПІ-регулятора на стійкість виконується через аналіз замкненої дискретної системи у z -області. Стійкість цифрової системи визначається розташуванням коренів характеристичного рівняння або полюсів передаточної функції замкненого контуру. Система є стійкою тоді й тільки тоді, коли всі корені характеристичного рівняння мають модуль, менший за одиницю, тобто розташовані всередині одиничного кола на комплексній площині [15, 16].

Передаточна функція замкненого контуру для системи з одиничним зворотним зв'язком має вигляд:

$$W_{\text{зз}}(z) = \frac{W_{\text{ПІ}}(z) \cdot W_{\text{двиг}}(z)}{1 + W_{\text{ПІ}}(z) \cdot W_{\text{двиг}}(z)}, \quad (3.20)$$

де $W_{\text{ПІ}}(z)$ – дискретна передаточна функція ПІ-регулятора,

$W_{\text{двиг}}(z)$ дискретна модель двигуна шахтного клітьового підйомника.

Отже загальна передавальна функція для привода підйомника:

Для перевірки стійкості потрібно знайти знаменник цієї передаточної функції:

$$D(z) = 1 + W_{\text{ПІ}}(z) \cdot W_{\text{двиг}}(z), \quad (3.21)$$

обчислити його корені. Якщо всі корені полінома $D(z)$ задовольняють умову

$$\forall i \quad |z_i| < 1, \quad (3.22)$$

то система є стійкою.

У MATLAB це перевіряється командою `roots` для знаменника.

Альтернативно можна обчислити полюси вручну і перевірити, що $\max |z_i| < 1$.

Таким чином, оцінка стійкості зводиться до перевірки модуля коренів характеристичного полінома в дискретній області. Якщо ця умова

порушується хоча б для одного полюса, система втрачає стійкість, і параметри ПІ-регулятора слід переналаштувати.

Передаточна функція для нашого варіанту виглядає як:

$$W_{zz} z = \frac{0,0085z^6 - 0,008z^5 - 0,013z^4 + 0,016z^3 + 0,0013z^2 + 0,008z + 0,003}{1,009z^6 - 4,146z^5 + 7,322z^4 - 7,219z^3 + 4,228z^2 - 1,407z + 0,213}. \quad (3.23)$$

Її знаменник:

$$3 z = \frac{1,009z^3 - 2,06z^2 + 1,521z - 0,4652}{z^3 - 2,069z^2 + 1,527z - 0,4579}. \quad (3.24)$$

Полюси системи наступні:

$$z_p = \begin{bmatrix} 0,9889 + 0j \\ 0,5266 + 0,4349j \\ 0,5266 - 0,4349j \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Або візуалізовано:

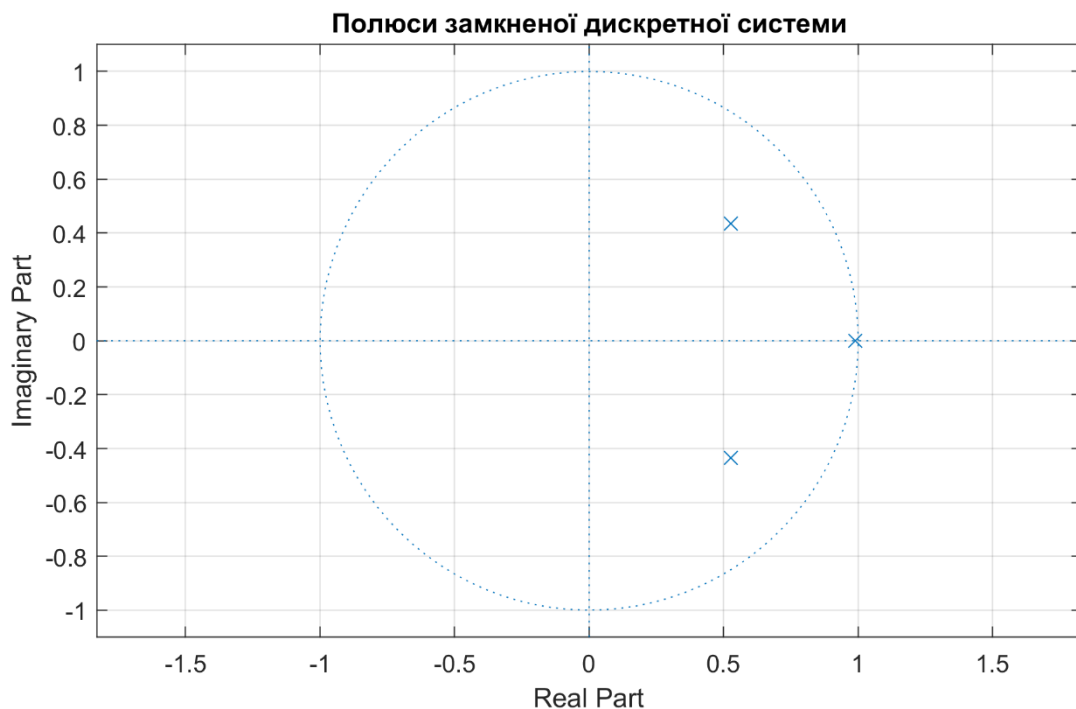


Рисунок 3.4 – Полюси системи

Отриманий результат аналізу стійкості цифрової системи керування з ПІ-регулятором свідчить про те, що замкнена система є стійкою. Це підтверджується тим, що всі полюси її передаточної функції розташовані

всередині одиничного кола в комплексній площині z . Зокрема, обчислені корені характеристичного рівняння (тобто полюси) мають абсолютне значення менше одиниці, що є необхідною і достатньою умовою для асимптотичної стійкості дискретної системи.

Форма полюсів, отриманих у вигляді комплексно-спряженої пари з невеликою уявною частиною, вказує на те, що система буде мати слабо коливальний характер перехідного процесу, але загалом залишатиметься підконтрольною і не буде демонструвати значного перерегулювання чи затягнутої реакції. Наявність уявної частини у полюсах обумовлює деяку коливальність, яка є типовою для систем із добрим балансом між швидкодією та стійкістю. Їхня віддаленість від одиничного кола додатково підтверджує, що система має достатній запас стійкості.

Таким чином, реалізований цифровий ПІ-регулятор із заданими параметрами забезпечує стійке функціонування електропривода постійного струму. Його реакція на збурення та одиничне завдання підтверджує здатність системи швидко та точно досягати бажаного значення без наростання похибки або самозбудження. У разі потреби покращення показників (наприклад, зменшення коливань або прискорення реакції) можливе подальше налаштування параметрів регулятора, однак базова структура вже відповідає критеріям стійкості і є придатною до реалізації на практиці.

Висновки за розділом 3

У результаті виконання розділу 3, присвяченого розробці цифрового ПІ-регулятора швидкості для системи електроприводу шахтного клітьового підйому, було обґрунтовано доцільність використання саме ПІ-структури регулятора, яка дозволяє забезпечити необхідну якість регулювання швидкості при змінному навантаженні та високій інерційності об'єкта. Розроблено математичну модель електропривода підйомника. Проведено дискретизацію моделі методом Тастіна для реалізації керування у цифровому вигляді, що забезпечує адекватне відображення динаміки у часовій області з урахуванням вибраного періоду дискретизації. Параметри ПІ-регулятора були визначені за

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

методом Циглера-Ніколса, що дало змогу забезпечити компроміс між швидкодією, стабільністю та відсутністю залишкової похибки у сталому режимі. Проведене моделювання замкненої системи у середовищі MATLAB підтвердило працездатність розробленого алгоритму цифрового регулювання, а також дозволило оцінити динамічні характеристики системи, такі як час перехідного процесу, перерегулювання та стійкість.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки

1. Виконано розрахунок механіки клітьового підйомника шахти, обчислені та складені триперіодні діаграми швидкостей, прискорень, рушійних зусиль та потужностей. Проведено вибір кліті підйомальної установки і машини, головних і врівноважуючих канатів, противаги. Завдяки проведеному обчисленню обрано безредукторний привід, що включає двигун постійного струму 1GH5 635-5EJ40-7MV5. Цей двигун спеціально розроблений для підйомників і пройшов перевірку на здатність витримувати перевантаження під час операцій підйому. В результаті тестувань було підтверджено достатній запас потужності, що забезпечує надійну роботу системи.

2. За принциповою схемою двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5 складено математичну модель нерегульованого електроприводу клітьового підйомника шахти і розраховані її симуляційні параметри. Побудовані природні статичні характеристики двигуна.

3. Для реалізації регульованого електроприводу обрано систему тиристорний перетворювач-двигун (ТП-Д) з реверсом у якірному ланцюзі. Конструкція передбачає роздільне керування напівпровідниковими мостами для підвищення точності регулювання. Система комплектується спеціально підібраним силовим трансформатором, реверсивним тиристорним агрегатом ТЕП-2500/660. Така схема дозволяє ефективно керувати швидкістю та напрямком обертання двигуна 1GH5 635-5EJ40-7MV5.

4. Проведено аналіз системи ТП-Д клітьового підйомника, в ході якого була розроблена еквівалентна розрахункова схема з урахуванням усіх ключових параметрів. На основі отриманих даних виконано комплексний розрахунок характеристик системи, що дозволило побудувати сімейство статичних механічних характеристик для різних режимів роботи електроприводу клітьового підйомника у всьому діапазоні регульованих швидкостей.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

5. Здійснене моделювання базових систем електроприводу клітьового підйомника й проаналізовано динаміку за швидкістю, моментом і струмом. Кращою є система регульованого електроприводу з реверсивним випрямлячем.

6. Створено повну математичну модель системи електропривода шахтного підйому з урахуванням інерційності, електричних параметрів обмотки якоря та зворотних зв'язків. Проведено дискретизацію цієї моделі за допомогою методу Тастіна, що дало змогу реалізувати її у цифровій формі, сумісній із мікропроцесорними системами керування.

7. Визначено структуру та параметри цифрового ПІ-регулятора на основі емпіричного методу Циглера-Ніколса, що дозволяє досягти стабільного та швидкого регулювання швидкості з нульовою похибкою у сталому режимі. Такий підхід забезпечив задовільну динаміку без необхідності складного налаштування.

8. На основі моделювання у середовищі MATLAB проведено оцінку динамічних характеристик замкненої системи клітьового підйомника, таких як стійкість, швидкодія та рівень перерегулювання.

9. Отримані результати свідчать про ефективність застосування цифрового ПІ-регулятора у системі керування швидкістю клітьового підйомника, що є важливим кроком до підвищення надійності, точності та безпеки гірничого транспорту.

Список використаних джерел

1. Структура АТ «Кривбасзалізрудком». АТ «Кривбасзалізрудком»: веб-сайт. URL: <https://www.krruda.dp.ua/> (дата звернення: 29.05.2025).
2. Бондарєв В.С., Колісник Н.П., Дубинець О.І., Горбатенко Ю.П., Бондарєв С.В., Барабанов В.Я. Підйомно-транспортні машини. Розрахунки підймальних і транспортувальних машин: підручник. Київ: Вища школа, 2009. 734 с.
3. Яценко О.Ф., Селівра С.О., Коломієць В.С. Шахтні підйомні установки. Навчальний посібник (для студентів ВНЗ з напрямів підготовки 6.050503 машинобудування, 7.050702 електромеханіка, 6.050301 гірництво спеціальностей 7.05050309 гірничі машини та комплекси, 7.05070205 електромеханічні системи геотехнічних виробництв, 7.05030101 розробка родовищ та видобування корисних копалин). Донецьк: ДонНТУ, 2012, 180 с.
4. Хоменко О.Є. , Кононенко М.М., Мальцев Д.В. Гірниче обладнання для підземної розробки рудних родовищ: Довідковий посібник. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2010. 340 с.
5. Колісніченко В. КЗРК у 2023 році скоротив видобуток аглоруди на 24,4% р./р. ГМК Центр: веб-сайт. URL: <https://gmk.center/ua/news/kzrk-u-2023-roci-skorotiv-vidobutok-aglorudi-na-24-4-r-r/> (дата звернення: 29.05.2025).
6. SIEMENS DC motors Sizes 100 to 630 0.45 kW to 1610 kW Catalog DA 12 – 2004 https://opis.cz/siemens/pdf/cat_da12_2004_en.pdf
7. Електрифікація гірничого виробництва: підручник для ВНЗ у 2-х т.: вид. 2-ге, перероб. та допов.; за ред. Л.О. Пучкова і Г.Г. Півняка. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2010. Т. 1. 503 с.
8. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2001. 410 с.
9. Колб А.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: навч. посібник ; 2-е вид. перероб. і доп. Дніпро: Національний гірничий університет, 2011. 540 с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

10. Гнатов А.В., Аргун Щ.В. Теорія електроприводу: методичні вказівки до практичних занять для студентів денної форми навчання що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Харків: ХНАДУ, 2020. 75 с.

11. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посібник / Київ: Либідь, 2005. 680 с.

12. Казачковський М.М. Комплектний електропривод. Дніпропетровськ: НГУ, 2003. 226 с.

13. Тиристорні електроприводи. ПАТ «Запорізький електроапаратний завод»: веб-сайт. URL: <http://www.zeaz.com.ua/home/27/89-tirprivod.html>. (дата звернення: 31.05.2025).

14. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Силова перетворювальна техніка. Конспект лекцій : навч. посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 241 с.

15. Божко С.В., Пересада С.М., Печеник М.В., Толочко О.І. Цифрове керування електромеханічними системами: підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 149 с.

16. Пархомей І.Р., Пасько В.П., Польшакова О.М., Стенін О.А. Теорія цифрових систем: навч. посібник для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», освітньої програми «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 133 с.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-10</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		