

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Електромеханічне обладнання екскаватора ЕКГ-5А управління залізничного
транспорту АТ «Кривбасзалізрудком»

Виконав: здобувач групи ЕЕМ-22ск _____ Ярослав ЯНЧИЙ

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Міла БАРАНОВСЬКА

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Міла БАРАНОВСЬКА

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

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

Кривий Ріг

2025

Реферат

Метою даної роботи є покращення головного електроприводу одноковшового екскаватора ЕКГ-5А шляхом впровадження системи тиристорного перетворювача з двигуном постійного струму, а також впровадження системи регулювання швидкості механізму підйому. У першому розділі розглянуто питання вибору обладнання силової частини електропривода. Зокрема, надано загальну характеристику екскаватора та проаналізовано технічні вимоги до приводу його основних механізмів. Виконано розрахунок потужності електропривода та обґрунтовано вибір двигуна постійного струму незалежного збудження. В якості системи керування швидкістю було прийнято тиристорний перетворювач з реверсуваням у колі якоря. Обрано трансформатор, реверсивний випрямляч на тиристорах та згладжувальний реактор.

У другому розділі створено заступну схему ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А та проведено її розрахунок. Побудовано природні та штучні механічні і швидкісні характеристики в робочому діапазоні регулювання швидкості, а також графіки зміни коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності. На основі отриманих даних реалізовано моделі двигуна та системи тиристорного перетворювача у середовищі MATLAB/Simulink, після чого проведено моделювання функціонування системи в умовах розімкненого керування. Результати моделювання свідчать про наявність значних коливань струму і моменту в перехідних процесах.

У третьому розділі розроблено структурну схему підлеглого керування швидкістю підйому екскаватора. Спроектовано регулятори струмового та швидкісного контурів і наведено відповідні принципові схеми для їхньої реалізації. Проведено симуляції електроприводу екскаватора ЕКГ-5А на основі ТП-Д, яке засвідчило, що хоча час перехідних процесів у такій системі дещо зростає у порівнянні з розімкненими структурами, однак значення струму та моменту залишаються стабільнішими і зменшуються пікові перевантаження. Додатково виконано розрахунок схем захисту випрямляча від перевантажень та коротких замикань, що є важливою умовою забезпечення надійності електроприводу в складних експлуатаційних умовах шахт.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕКСКАВАТОР ЕКГ-5А, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ШВИДКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, СИСТЕМА ПІДЛЕГЛОГО РЕГУЛЮВАННЯ.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зміст

Реферат.....	2
Вступ.....	5
Розділ 1. Загальний аналіз електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-5А.....	7
1.1 Відомості про управління залізничного транспорту АТ «Кривбасзалізрудком»	8
1.2 Застосування ЕКГ-5А в технології видобутку руди на АТ «Кривбасзалізрудком»	9
1.3 Основні відомості про екскаватор ЕКГ-5А, кінематику і режими роботи	10
1.4 Вимоги до електропривода екскаватора ЕКГ-5А	15
1.5 Обґрунтування системи електропривода для екскаватора ЕКГ-5А.....	18
1.6 Вибір потужності двигуна головного приводу екскаватору ЕКГ-5А....	20
1.6.1 Обчислювання потужності електродвигуна для ЕКГ-5А.....	20
1.6.2 Вибір перетворювача та силової частини ТП-Д для екскаватора ЕКГ-5А.....	24
Висновки за розділом 1	27
Розділ 2. Аналіз базового варіанту електропривода екскаватора ЕКГ-5А	29
2.1 Статика головного приводу екскаватора ЕКГ-5А.....	30
2.1.1 Обчислення заступної схеми системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А..	30
2.1.2 Статика двигуна ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А.....	33
2.1.3 Статика системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А	35
2.2 Енергетичні показники електропривода екскаватора ЕКГ-5А.....	37
2.2.1 Коефіцієнт корисної дії	37
2.2.2 Коефіцієнт потужності	38

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.3	Динамічні властивості привідного двигуна екскаватора	38
2.4	Перехідні процеси в системі електроприводу екскаватора ЕКГ-5А.....	42
	Висновки за розділом 2	50
Розділ 3. Система підлеглого регулювання електропривода екскаватора ЕКГ-5А.....		51
3.1	Система керування приводом екскаватора ЕКГ-5А	52
3.1.1	Вибір системи керування приводом екскаватора ЕКГ-5А	52
3.1.2	Схема підлеглого регулювання екскаватора ЕКГ-5А	53
3.1.3	Розробка системи підлеглого керування екскаватора ЕКГ-5А	55
3.2	Моделювання динамічних властивостей системи керування приводом екскаватора	56
3.3	Принципова схема електропривода екскаватора ЕКГ-5А	61
3.4	Захист випрямлячів електропривода екскаватора	62
3.5	Вибір пристроїв захисту перетворювача	64
	Висновки за розділом 3	66
	Висновки	67
	Список використаних джерел	69

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вступ

Закритий спосіб видобутку залізної руди в шахтах вважається найбільш економічно доцільним, оскільки забезпечує гарну продуктивність при низькій собівартості робіт. У процесі навантаження руди у вагони для подальшого транспортування основну роль відіграють одноковшеві екскаватори, котрі є спеціалізованими машинами, призначені для захоплення та переміщення ґрунту або гірської породи. Експлуатація таких екскаваторів відбувається у складних умовах, що супроводжуються різкими змінами навантаження, вібрацією обладнання, коливаннями температури, підвищеною вологістю та запиленістю, що суттєво впливає на роботу механічних і електричних систем.

У таких умовах до електроприводів пред'являються високі вимоги щодо вібростійкості, ресурсу безвідмовної роботи та стійкості до впливу зовнішніх факторів. Саме тому модернізація систем електроприводу є одним із ключових напрямів підвищення надійності, ефективності та довговічності екскаваторів. Застосування сучасних технічних рішень у сфері електроприводів дозволяє оптимізувати функціонування основних механізмів машини, зменшити витрати на обслуговування та забезпечити стабільність роботи при інтенсивних навантаженнях.

Наразі на екскаваторах ще використовуються системи типу генератор–двигун, які мають низку технічних обмежень, зокрема в частині енергоефективності, габаритів та складності обслуговування. У зв'язку з цим доцільним є перехід до безредукторного приводу, що базується на двигунах постійного струму в поєднанні з реверсивними тиристорними перетворювачами. Така система забезпечує зменшення габаритів і вартості обладнання, зберігаючи при цьому необхідну точність регулювання швидкості, моменту та струму.

Використання високотехнологічних систем автоматичного керування та захисту дозволяє екскаватору адаптуватися до змінних режимів роботи, що виникають при видобутку та навантаженні різних типів гірських порід. Висока точність контролю електроприводів сприяє зменшенню енергоспоживання і

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

підвищенню загальної ефективності машини в умовах шахтної експлуатації. Таким чином, модернізація електроприводу екскаватора є актуальним технічним завданням, що має на меті підвищення рівня автоматизації та надійності процесів навантаження руди для її подальшого транспортування.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 1. Загальний аналіз електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-5А

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата								
Розроб.		Янчий Я.Ю.				Загальний аналіз електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-5А			Літ.		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Барановська М.Л.							Н			
Конс.					ЕЕМ-22СК							
Н.контр.		Барановська М.Л.										
Затверд.		Пересунько І.І.										

1.1 Відомості про управління залізничного транспорту АТ «Кривбасзалізрудком»

Управління залізничним транспортом АТ «Кривбасзалізрудком» виконує ключову роль у забезпеченні безперебійного функціонування всього виробничого циклу. Основне призначення даної системи полягає в ефективній організації переміщення залізрудної сировини від видобувних дільниць споживачів, якими насамперед є металургійні і гірничо-збагачувальні підприємства України. Технологічний процес за який відповідає управління залізничного транспорту охоплює весь комплекс транспортних операцій – від навантаження руди у спеціалізовані вагони до точної синхронізації графіків руху з роботою основних виробничих підрозділів.

Функціональні завдання системи включають координацію взаємодії перевезення руди між шахтами та магістральними залізничними перевезеннями від них. Особливу увагу приділяється оптимізації вантажопотоків, що передбачає точний розрахунок потрібної кількості рухомого складу, розробку ефективних маршрутів та забезпечення ритмічності перевезень. Важливим аспектом є підтримання технічної готовності навантажувачів, тягового складу та колійного господарства, що здійснюється через систему планово-попереджувальних ремонтів.

Особливістю роботи є необхідність врахування специфічних виробничих умов шахти, включаючи обмежений простір для маневрування, великі обсяги однотипних вантажів та високі вимоги до точності виконання графіків. Управління транспортом здійснюється на основі систем диспетчеризації, що дозволяють в відстежувати місцезнаходження составів, контролювати виконання планових показників та оперативно реагувати на можливі відхилення. Використання систем вагового контролю забезпечує дотримання норм завантаження та запобігає перевитратам.

Економічна ефективність функціонування залізничного транспорту досягається через раціональне використання навантажувальної техніки, що дає мінімізацію простоїв рухомого складу та оптимізацію енерговитрат. Важливим

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

напрямок розвитку є впровадження цифрових технологій управління, що дозволяють підвищити точність планування та оперативність прийняття управлінських рішень. Система роботи управління залізничного транспорту АТ «Кривбасзалізрудком» постійно вдосконалюється шляхом модернізації інфраструктури, оновлення парку навантажувачів, локомотивів та впровадження інноваційних методів організації перевезень.

1.2 Застосування ЕКГ-5А в технології видобутку руди на АТ «Кривбасзалізрудком»

Екскаватор ЕКГ-5А є важливим обладнанням у технологічному циклі залізрудних шахт АТ «Кривбасзалізрудком», виконуючи ключову роль у ланцюзі переробки корисних копалин. Ця гірнича машина, оснащена ковшом ємністю 5 кубічних метрів, виступає основним технологічним інтерфейсом між процесами видобутку сировини та її подальшого транспортування до збагачувальних фабрик Криворізького регіону або безпосередньо споживачам.

На вантажних майданчиках шахт ЕКГ-5А демонструє добру адаптивність при роботі з різноманітними типами матеріалів. Від сипкої дрібнодисперсної руди з високим вмістом заліза до крупнокускової породи з підвищеною абразивністю – машина справляється з усіма видами навантажень. Її конструкція дозволяє не просто механічно переміщувати матеріали, а й проводити їх технологічне усереднення безпосередньо на майданчику. Ця функція особливо важлива для забезпечення стабільного хімічного складу сировини, що надходить на подальші стадії переробки.

Однією з найважливіших операцій, яку виконує ЕКГ-5А, є точне навантаження руди у залізничні напіввагони. Завдяки вдосконаленій гідравлічній системі та прецизійній керованості, машина забезпечує ідеально рівномірний розподіл матеріалу по всьому об'єму вагона. Це дозволяє досягати оптимального коефіцієнта заповнення, дотримуватись встановлених норм завантаження та мінімізувати простої залізничного транспорту. Важливо відзначити, що сучасні модифікації екскаватора обладнані автоматизованими

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

системами вагового контролю, що дозволяє точно дозувати кількість матеріалу, що завантажується [1].

Інноваційні технології, впроваджені в останніх версіях ЕКГ-5А, значно розширили його функціональні можливості. Системи дистанційного моніторингу стану вузлів, GPS-навігація для точного позиціонування на майданчику, автоматизовані алгоритми планування робочих циклів - все це дозволяє оптимізувати роботу обладнання в умовах обмеженого простору вантажних майданчиків. Особливу увагу варто приділити системам безпеки, які забезпечують захист оператора та оточуючого персоналу під час виконання складних операцій.

Важливим аспектом роботи є забезпечення економічної ефективності транспортних операцій. Раціональне використання навантажувальної техніки дозволяє скоротити час навантажувальних операцій на 25...30%, знизити витрати на перевантаження кожної тонни руди та підвищити коефіцієнт використання вагонного парку. При цьому особлива увага приділяється мінімізації втрат сировини під час перевантаження, які завдяки вдосконаленим технологіям не перевищують 1,2%.

Таким чином, ЕКГ-5А в транспортному господарстві АТ «Кривбасзалізрудком» не просто виконує функції навантажувача, а є комплексним технологічним рішенням, що інтегрує в собі функції попередньої підготовки, усереднення та транспортування залізорудної сировини, забезпечуючи безперервність і ефективність всього виробничого циклу.

1.3 Основні відомості про екскаватор ЕКГ-5А, кінематику і режими роботи

Екскаватор моделі ЕКГ-5А (див. на рис. 1.1) представляє собою спеціалізоване обладнання вузькопрофільного призначення, сконструйоване для виконання конкретного технологічного процесу. Конструктивна особливість даної машини полягає у використанні єдиного типу робочого органу - механічної лопати з канатним натиском, що обумовлює її високу спеціалізацію у гірничій справі. Основна сфера застосування охоплює

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

комплекс операцій з видобутку корисних копалин, розробки вскришних порід на кар'єрах, формування технологічних відвалів та виконання складських вантажних операцій.

В процесі експлуатації даний тип екскаватора бере на себе найбільш енергоємні та трудомісткі виробничі операції, що пов'язані з безпосереднім видобутком мінеральної сировини. Особливістю робочого циклу є інтенсивне навантаження на всі вузли та агрегати машини, що супроводжується складними фізико-хімічними процесами в матеріалах конструкцій [2, 3].

Конструктивне виконання ЕКГ-5А включає три основні складові: робочий орган, поворотну платформу та ходову частину. Робоче обладнання машини складається з системи взаємопов'язаних елементів: несучої стріли, рухомої рукояті з ковшем, а також спеціального механізму для відкриття днища ковша. Ходова частина, що забезпечує маневреність агрегату, інтегрує в собі механізм пересування, розташований на спеціальному візку. Технічні параметри кожної з цих систем оптимізовані під конкретні умови експлуатації [2, 3].

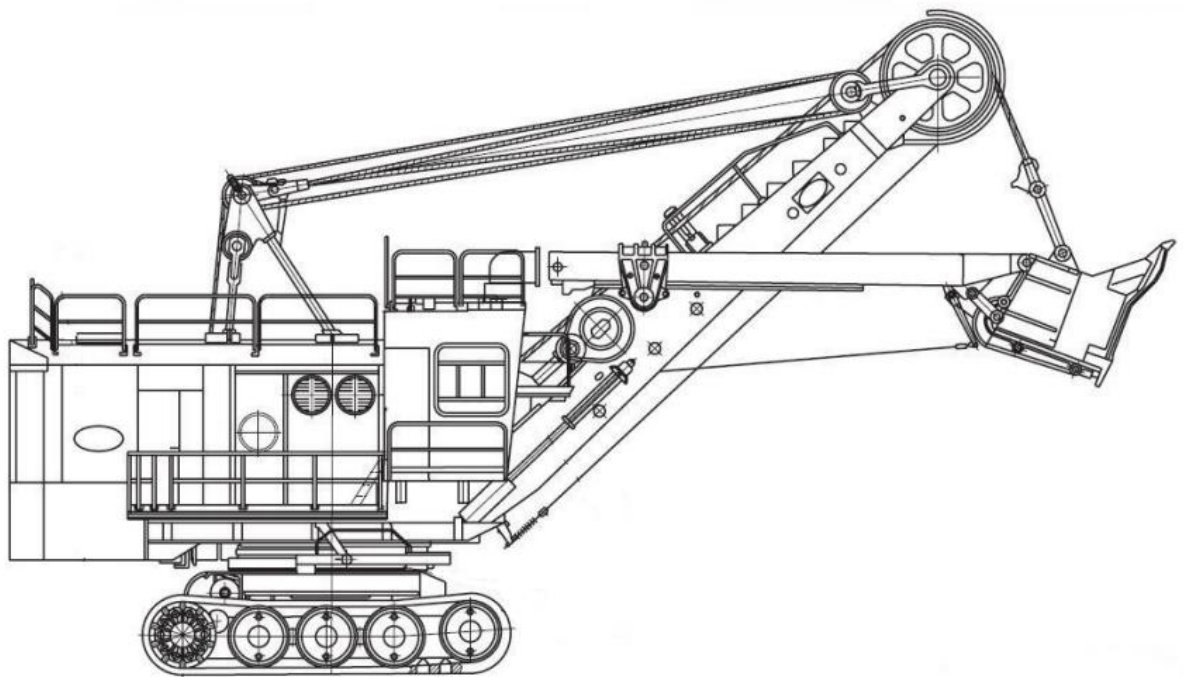


Рисунок 1.1 – Екскаватор ЕКГ-5А [4]

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Екскавація як основний технологічний процес гірничих робіт передбачає комплексне виконання операцій з руйнування гірського масиву та подальшого транспортування породи. Суть процесу полягає в циклічному повторенні операцій копання в забої з подальшим переміщенням навантаженого ковша до точки розвантаження. Для машин середньої потужності з об'ємом ковша від 2,5 до 5 кубічних метрів тривалість повного робочого циклу варіюється в межах 5-32 секунд, що визначає загальну продуктивність обладнання [2, 3].

Технологічний цикл екскавації складається з чітко послідовних операцій, які формують замкнутий виробничий процес. Перший етап передбачає безпосереднє копання та наповнення ковша гірською масою в забої. Після завершення операції черпання відбувається синхронний підйом навантаженого ковша та поворотом поворотної платформи у напрямку місця призначення вантажу. На етапі розвантаження відбувається вивільнення породи з ковша, після чого порожній ковш повертається у вихідне положення для початку нового циклу роботи [2].

Ефективність процесу екскавації значною мірою залежить від оптимальної організації кожного з технологічних етапів. Особливе значення має синхронізація роботи механізмів підйому та повороту, що дозволяє мінімізувати втрати часу між операціями. Важливим фактором є також правильний вибір траєкторії руху ковша, який забезпечує максимальне заповнення при мінімальних енерговитратах. Сучасні системи керування дозволяють оптимізувати ці параметри, адаптуючи роботу екскаватора до конкретних умов забою та характеристик гірської породи.

Екскаватор ЕКГ-5А демонструє високі технологічні характеристики, що дозволяють йому ефективно виконувати складні гірничі роботи. Основна ємність робочого ковша варіюється в межах 4,6...6,3 кубічних метрів. Конструкція стріли довжиною 11,15 метрів дозволяє маневрувати в обмежених умовах навантажувальних майданчиків шахт, забезпечуючи при цьому значний радіус дії – максимальний радіус черпання сягає 14,5 метрів, а висота черпання досягає 10,3 метра.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Особливістю роботи даного обладнання є його здатність виконувати операції вивантаження на відстані до 12,65 метрів з максимальною висотою вивантаження 5,25 метра, що особливо важливо при навантаженні на транспортні засоби або формуванні відвалів. Технологічна ефективність забезпечується тривалістю робочого циклу при повороті на 90 градусів, яка становить лише 23 секунди, забезпечуючи високу продуктивність у безперервному циклі роботи.

Мобільність машини забезпечується ходовою частиною, що дозволяє переміщення зі швидкістю 0,55 км/год по горизонтальних поверхнях. Енергетична система розрахована на роботу від трифазної мережі з напругою 6 кВ і частотою 50 Гц, що відповідає стандартам промислового електропостачання. Загальна робоча маса агрегату з ковшем становить 196 тонн, при цьому сам ковш важить 9,935 тонн, що свідчить про міцну та надійну конструкцію, здатну витримувати значні навантаження при роботі з важкими породами.

Додатковими перевагами конструкції ЕКГ-5А є система балансування навантажень, яка дозволяє знизити вібраційні впливи на ходову частину, та спеціальне антикорозійне покриття всіх критичних вузлів, що значно підвищує ресурс роботи в агресивних умовах навантажувальних майданчиків шахт. Оптимізована геометрія ковша забезпечує мінімальні втрати матеріалу при черпанні та вивантаженні, що особливо важливо при роботі з дорогоцінними рудами.

Технологічний процес копання екскаватором ЕКГ-5А починається з правильного позиціювання ковша у нижній робочій позиції. Критично важливим параметром є кут установки козирка та зубів ковша відносно площини насипаної породи, який повинен забезпечувати оптимальне початкове врізання в гірський масив. Синхронне застосування зусиль підйомного механізму через систему канатів та поступального руху рукояті ініціює робочий хід ковша ЕКГ-5А, під час якого відбувається послідовне перемішування гірської породи з одночасним наповненням ковша.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Механізм підйому ЕКГ-5А генерує необхідні динамічні параметри – величину зусилля та швидкість руху, які передаються на робочу кромку ковша. Паралельно система напору забезпечує регульовану подачу ковша. Це досягається за рахунок точної координації між підйомною та напірною системами, де кожен механізм вносить свій внесок у формування результуючої траєкторії руху ковша.

При досягненні рукояттю горизонтального положення відбувається суттєва зміна розподілу навантажень – вертикальна складова зусилля підйомного канату різко зростає, створюючи значний момент, що стискає рукоять. Цей фазовий перехід призводить до природного обмеження поступального руху рукояті. Ефективність процесу значною мірою залежить від правильного підбору кутових та лінійних параметрів руху ковша, які визначають як продуктивність, так і енергоефективність операції [2].

Технологічний цикл роботи екскаватора після завершення фази копання передбачає ініціювання поворотного руху платформи до позиції вивантаження. У цій фазі відбувається координоване переміщення ковша по вертикальній та радіальній траєкторії для досягнення оптимального положення відносно приймального пристрою. Вивантаження матеріалу здійснюється через шарнірно закріплене днище ковша, активація якого виконується спеціалізованим електроприводом з точним позиціонуванням. Під час фінальної стадії підходу до зони розвантаження виконується синхронна корекція висоти ковша за допомогою комбінованого руху рукояті відносно напірного вала, що забезпечує точне позиціонування над цільовою площиною [2].

Конструктивні особливості підйомного механізму екскаватора ЕКГ-5А включають спеціалізовану енергетичну систему, де генераторна установка живить два паралельно працюючих електродвигуни підйомної лебідки. Особливістю даної компоновки є інтеграція редукторного механізму безпосередньо в конструкцію барабана лебідки, що забезпечує компактність та підвищену надійність. Всі силові агрегати, включаючи двигуни підйомно-

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

поворотних механізмів, розміщені всередині захищеного корпусу поворотної платформи, що підвищує їх експлуатаційний ресурс.

Оптимізація процесу вивантаження в транспортні засоби передбачає мінімізацію висоти скидання матеріалу для зниження динамічних навантажень на кузов. Після завершення операції розвантаження ініціюється зворотний поворотний рух у напрямку забою, що супроводжується координованим опусканням ковша до вихідної позиції для нового циклу копання. Ця фаза характеризується одночасним втягуванням рукояті для забезпечення оптимальної траєкторії руху [2].

Робочий цикл екскаватора представляє собою безперервну послідовність взаємопов'язаних операцій, що вимагають високої координації різних механізмів. Характерною особливістю експлуатації екскаваторів для навантаження гірської породи є необхідність швидкої адаптації до змінних умов роботи, що передбачає плавні переходи між різними швидкісними режимами. Особливу складність становлять динамічні навантаження, що виникають у механізмах підйому та напору під час копання, інтенсивність яких коливається в залежності від характеристик породи, стану забою та якості попередньої підготовки масиву вибуховими методами. Сучасні системи автоматизованого управління дозволяють ефективно компенсувати ці фактори, забезпечуючи стабільність робочих параметрів у всіх фазах циклу.

Кінематичні схеми механізмів ЕКГ-5А встановлюють технічні вимоги до електропривода.

1.4 Вимоги до електропривода екскаватора ЕКГ-5А

Електрообладнання екскаватора ЕКГ-5А формує інтегровану систему енергопостачання та керування, що забезпечує функціонування всіх технологічних вузлів машини. Основне призначення електротехнічного комплексу полягає в реалізації точного керування основними та допоміжними частинами ЕКГ-5А, підтримці робочих параметрів у паспортних межах та забезпеченні безпеки експлуатації. Система включає спеціалізовані схеми контролю стану ізоляції в якірних ланцюгах головних приводів, ланцюгах

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

живлення змінного струму і ланцюгах керування, що особливо критично для роботи у важких умовах шахт.

Конструктивне виконання передбачає компактне розміщення на поворотній платформі потужного електротехнічного обладнання, що включає силові електричні машини, перетворювальні пристрої та високовольтні розподільчі пристрої. Додаткові системи забезпечують функціональне освітлення, вентиляцію, обігрів та кондиціонування операторської кабіни, створюючи комфортні умови для персоналу. Особливу увагу приділено автоматизованим системам дистанційного контролю та керування, які дозволяють точно координувати роботу всіх технологічних вузлів [5, 6].

До ключових електроприводів відносяться системи, що безпосередньо забезпечують процес екскавації: підйомний механізм, що відповідає за вертикальне переміщення ковша; поворотний привід, що забезпечує орієнтацію робочого органу; та напірний механізм, що регулює подачу ковша в забій. Енергопостачання здійснюється від трифазної мережі кар'єру через спеціалізований кільцевий струмоприймач, який забезпечує безперервну передачу електроенергії на високовольтний розподільчий пристрій платформи незалежно від її поворотного положення [5, 6].

Екскаватор живиться від зовнішньої трифазної мережі кар'єру з напругою 6 кВ через контактну систему з кільцевим струмоприймачем, який забезпечує безперервну подачу електроенергії на поворотну платформу незалежно від її положення. Живлення надходить до високовольтного розподільного пристрою, розміщеного на поворотній частині, звідки електроенергія розподіляється між основними споживачами. Кільцевий струмоприймач дозволяє безперешкодне обертання платформи на 360°, що забезпечує безперервну роботу машини. Система оснащена захистом від перевантажень і механічних пошкоджень, зберігаючи стабільність живлення в складних умовах [5, 6].

Розподільча шафа виконує функції головного вузла живлення для основних механізмів – підйому, повороту, напору та допоміжного обладнання. Енергосистема включає перетворювальні пристрої, які формують необхідні

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

рівні напруги: високовольне – для силових приводів, знижене – для керування, освітлення та допоміжних систем. Це дозволяє оптимізувати споживання електроенергії та забезпечити надійну роботу екскаватора у різних режимах.

Для ефективної роботи екскаватора головним завданням є досягнення максимальної продуктивності за умови мінімального навантаження на електричне та механічне обладнання. Це потребує відповідності системи електроприводу ряду технічних вимог. Зокрема, електропривод має надійно обмежувати момент і струм в межах допустимих значень у всіх робочих режимах, мати екскаваторну форму механічної характеристики з можливістю широкого діапазону її налаштування під умови експлуатації окремих механізмів [5, 6].

Крім того, електропривод повинен підтримувати регулювання швидкості в необхідному діапазоні та забезпечувати рекуперацію енергії, яка вивільняється під час гальмування, наприклад, при опусканні ковша чи зупинці механізму повороту. Характеристика приводу у зоні нульового положення органа керування має гарантувати повільне і контрольоване опускання ковша за допомогою електричного гальмування [5, 6].

Особливе значення має формування перехідних процесів, які повинні бути мінімальної тривалості та відповідати обмеженням за моментом, його приростом і прискоренням. Це дозволяє знизити динамічні навантаження на механічне обладнання. Електропривод має також сприяти демпфуванню механічних коливань у системі за рахунок лінійної механічної характеристики, що визначається схемою з'єднання силових ланцюгів та динамічними параметрами системи керування.

Важливою вимогою залишається простота та висока надійність конструкції. Усім зазначеним критеріям відповідає система електроприводу з безперервним регулюванням швидкості у всіх режимах, що забезпечує високу точність і якість керування основними координатами. У зв'язку з цим в індивідуальних електроприводах основних механізмів одноковшевих

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

екскаваторів використовуються двигуни постійного струму з незалежним збудженням, керування якими здійснюється шляхом зміни напруги в колі якоря через систему керований перетворювач-двигун. У ролі перетворювача може виступати генератор постійного струму або тиристорний перетворювач [5, 6].

1.5 Обґрунтування системи електропривода для екскаватора ЕКГ-5А

У рудникових умовах при завантаженні гірської маси у піввагони широко застосовується екскаватор ЕКГ-5А, електропривод якого реалізовано за схемою генератор-двигун. Така система має низку технічних переваг, серед яких варто виділити відсутність потреби у потужній комутаційній апаратурі, можливість плавного і широкого регулювання швидкості, що забезпечує високу маневреність машини, а також здатність точно реалізовувати задану швидкісну діаграму на всіх етапах робочого циклу. Крім того, система характеризується сприятливими умовами для автоматизації, оскільки дає змогу використовувати компактні пристрої керування.

Разом з тим, ця схема має і суттєві недоліки. До них належать низькі енергетичні показники: коефіцієнт корисної дії не перевищує 0,8, а коефіцієнт потужності залишається нижчим за 0,6. Це є критичним у кар'єрних умовах, де загальний середньозважений коефіцієнт потужності і без того невисокий. Окрім того, система потребує значних витрат на технічне обслуговування електромашинного агрегату типу генератор-двигун.

Альтернативним і перспективним рішенням для екскаватора ЕКГ-5А є впровадження низьковольтного комплектного пристрою, реалізованого на базі системи тиристорний перетворювач-двигун із застосуванням фільтро-компенсуючого модуля. Такий варіант, що далі розглядатиметься як система ТП-Д, дозволяє значно покращити експлуатаційні характеристики електроприводу.

Модернізація системи підйому з традиційної схеми генератор-двигун із блоком машинного управління на тиристорну систему ТП-Д здійснюється з

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

урахуванням необхідності усунення виявлених недоліків і використання переваг новітнього електропривідного обладнання.

Система «генератор-двигун» демонструє хороші динамічні властивості, дозволяє реалізовувати широкий спектр характеристик у перехідних режимах, має просте та економічне керування, а також поєднує великий діапазон за плавністю регулювання швидкості. При використанні синхронного двигуна в якості головного вона може досягати високого коефіцієнта потужності. Однак ця система має значні недоліки: низький коефіцієнт корисної дії, високу встановлену потужність і вартість обладнання, великі витрати на обслуговування через зношування рухомих елементів, значні енергетичні втрати, а також наявність агрегатів з великою електромагнітною інерцією, що погіршує динамічну поведінку та зменшує швидкодію системи.

Натомість система «тиристорний перетворювач-двигун» вигідно відрізняється високою швидкодією, точністю керування, високим коефіцієнтом корисної дії та низькою інерційністю. Вона базується на використанні статичних перетворювачів і малопотужних керуючих пристроїв, що спрощує реалізацію складних алгоритмів керування. Водночас система ТП-Д характеризується обмеженою перевантажувальною здатністю, чутливістю до механічних коливань і обмеженнями на темп наростання струму та напруги. Також можливе поступове погіршення структури силових елементів при багаторазових перевантаженнях.

З огляду на порівняння, система тиристорного перетворювача є технічно прогресивнішою, оскільки забезпечує вищу ефективність, точність і динамічну стабільність, що є критично важливим для сучасного електроприводу. Незважаючи на деякі недоліки, пов'язані з перевантажувальною здатністю, її переваги переважають, особливо в умовах, що вимагають автоматизації, енергоефективності та надійності. Тому система ТП-Д є кращим вибором для модернізації екскаваторного електроприводу.

З урахуванням технічних вимог до електроприводу екскаватора ЕКГ-5А, а також аналізу переваг і недоліків можливих варіантів, доцільним є вибір системи керування на основі тиристорного перетворювача з підключенням до

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

двигуна постійного струму. Такий підхід забезпечує оптимальне поєднання енергоефективності, точності регулювання та динамічної стабільності приводу [5, 6].

Порівняльний техніко-економічний аналіз показує, що безредукторні приводи мають значні переваги перед редукторними. Зокрема, вони характеризуються вищим коефіцієнтом корисної дії, зменшеним пусковим моментом, скороченим часом розгону та підвищеною продуктивністю при підйомі, що робить їх економічно вигіднішими для застосування в умовах інтенсивної експлуатації. Відповідно, у системах з електроприводом постійного струму доцільно впроваджувати саме безредукторні конструкції з двигунами постійного струму [5, 6].

У сучасних екскаваторах широке застосування знаходять вентильні перетворювачі, зокрема системи тиристорного типу, які поєднуються з двигунами постійного струму у конфігурації ТП-Д. У межах такого технічного рішення сформувалося кілька напрямів компонування автоматизованого електроприводу. Зокрема, це системи з одним комплектом повністю керованих (тиристорних) випрямлячів, що подають живлення на якір двигуна, конфігурації ТП-Д з реверсуванням у головному колі, а також неререверсивні схеми з реверсуванням, реалізованим у колі збудження двигуна. Така різноманітність дозволяє адаптувати систему електроприводу до конкретних умов експлуатації та забезпечити її високу ефективність [5, 6].

1.6 Вибір потужності двигуна головного приводу екскаватору ЕКГ-5А

1.6.1 Обчислювання потужності електродвигуна для ЕКГ-5А

Задля вибору двигуна проводимо обчислювання зусиль при роботі екскаватора ЕКГ-5А, які описують його механіку, з врахуванням мас та розмірів конструктивних частин [2, 5].

Розміри ковша ЕКГ-5А:

$$b_{к.л} = 1,3 \cdot \sqrt[3]{E_{л}} = 1,3 \cdot \sqrt[3]{5} = 2,223 \text{ м}; \quad (1.1)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$l_{к.л} = 0,77 \cdot b_{к.л} = 0,77 \cdot 2,223 = 1,712 \text{ м}; \quad (1.2)$$

$$h_{к.л} = 0,75 \cdot b_{к.л} = 0,75 \cdot 2,223 = 1,677 \text{ м}; \quad (1.3)$$

де $E_{л} = 5 \text{ м}^3$.

Маса ковша ЕКГ-5А $m_{к.л} = 9,935 \text{ т}$.

Вага ковша ЕКГ-5А:

$$C_{к} = 9,81 \cdot m_{к.л} = 9,81 \cdot 9,935 \cdot 10^3 = 9,746 \cdot 10^4 \text{ Н}. \quad (1.4)$$

Довжини стріли та рукояті ЕКГ-5А $L_c = 11,15 \text{ м}; L_p = 7,915 \text{ м}$.

Маса гірської породи у ковші:

$$m_{нор} = \frac{E_{л} \cdot \gamma_{нор}}{k_p} = \frac{5 \cdot 3,5}{1,3} = 12,308 \text{ т}, \quad (1.5)$$

де $k_p = 1,3$; $\gamma_{нор} = 3,25 \text{ т/м}^3$.

Маса та вага рукояті ЕКГ-5А:

$$m_p = c_p \cdot m_{к.л.} = 0,45 \cdot 9,935 = 4,471 \text{ т}, \quad (1.6)$$

де $c_p = 0,45$:

$$G_p = 4,471 \cdot 9,81 \cdot 10^3 = 4,386 \cdot 10^4 \text{ Н}. \quad (1.7)$$

Висота напірного валу ЕКГ-5А:

$$L_n = k_{лн} \cdot \sqrt[3]{m_{екс}} = 1,1 \cdot 5,809 = 6,39 \text{ м}. \quad (1.8)$$

Довжина вісі п'ятки стріли ЕКГ-5А $L_n = 2,54 \text{ м}$.

Висота черпання для ЕКГ-5А – найбільша $L_{кон} = 10,3 \text{ м}$.

Опір породи під час черпання екскаватором ЕКГ-5А:

$$N_{1л} = \frac{k_{кл} \cdot E_{л} \cdot 10^5}{L_3 k_p}, \quad (1.9)$$

де $k_{кл} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ Н}; k_p = 1,3; L_3 = L_n = 6,39$,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$N_{1л} = \frac{3,5 \cdot 5 \cdot 10^5}{6,39 \cdot 1,3} = 27,09 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Маса ковша ЕКГ-5А з пороною:

$$G_{\kappa+n} = 0,98 \cdot \left(m_{\kappa л} + \frac{E_{л} \cdot \gamma_{нор}}{k_p} \right) \cdot 10^4 \text{ Н,} \quad (1.10)$$

де $\gamma_{нор} = 3,5 \text{ м/м}^3$;

$$\begin{aligned} G_{\kappa+n} &= G_{\kappa} + G_{нор} = 0,98 \cdot (m_{\kappa л} + m_{нор}) \cdot 10^4 = \\ &= 0,981(9.935 + 12,308) \cdot 10^3 = 9,748 \cdot 10^3 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Сила тяжіння рукояті ЕКГ-5А, котра утворює момент під час копання:

$$\begin{aligned} G'_p &= \frac{G_p \cdot \frac{L_c}{2} \cdot \cos \alpha}{L_n} = \\ &= \frac{4,386 \cdot 10^4 \cdot \frac{11,15}{2} \cdot \cos 45^\circ}{2,54} = 6,807 \cdot 10^4 \text{ Н.} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Зусилля ЕКГ-5А при черпанні:

$$\begin{aligned} N_{нл} &= \frac{(N_{1л} I_1 + G_{\kappa+n} I_{\kappa} + G'_p I_p) \cdot 10^4}{I_n} = \\ &= \frac{27,09 \cdot 7 + 0,9748 \cdot 5,8 + 6,807 \cdot 2,3}{6,98} \cdot 10^4 = \\ &= \frac{278,6 + 269,4 + 94,53}{6,98} \cdot 10^4 = 30,22 \cdot 10^4 \text{ Н.} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Потужність двигуна підймання лопати ЕКГ-5А:

$$P_{нл} = \frac{N_{нл,в}}{\eta_{нл}} = \frac{30,22 \cdot 0,95}{0,85} = 337,7 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 337,7 \text{ кВт.} \quad (1.13)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зусилля ЕКГ-5А під час повороту на відвантаження:

$$\begin{aligned}
 N'_{nl} &= \frac{G_{\kappa+n} \cdot I'_{\kappa} \cdot \alpha + G_p \cdot I'_p \cdot \alpha}{I'_n \cdot \beta} = \\
 &= \frac{0,9748 + 6,2 \cdot 0,94 + 4,386 \cdot 4,5 \cdot 0,94}{8,5 \cdot \beta} \cdot 10^4 = \\
 &= 3,655 \cdot 10^4 \text{ Н.}
 \end{aligned}
 \tag{1.14}$$

Потужність ЕКГ-5А під час повороту на відвантаження:

$$\begin{aligned}
 P'_{nl} &= (0,1 \div 0,3) \frac{N'_{nl} v_{nl}}{\eta_{nl}} \cdot 10^{-3} = \\
 &= 0,2 \frac{3,665 \cdot 10^4 \cdot 0,95}{0,85} \cdot 10^{-3} = 8,17 \text{ кВт}
 \end{aligned}
 \tag{1.15}$$

Зусилля ЕКГ-5А під час повороту порожнього ковша:

$$\begin{aligned}
 N''_{n.l} &= \frac{G_k I'_k \cos \alpha + G_p I'_p \cos \alpha}{I'_n \sin \beta} = \\
 &= \frac{(9,746 \cdot 6,2 \cdot 0,94 + 4,386 \cdot 4,5 \cdot 0,94) \cdot 10^4}{8,5 \cdot 0,78} = \\
 &= 876,1 \cdot 10^4 \text{ Н.}
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

Потужність ЕКГ-5А з порожнім ковшем:

$$P''_{n.l} = 1,1 \frac{N''_{n.l} v_{nl}}{\eta_{nl}} \cdot 10^{-3} = 1,1 \frac{876,1 \cdot 10^4 \cdot 0,95}{0,85} \cdot 10^{-3} = 1077 \text{ кВт.}
 \tag{1.17}$$

Зважена потужність двигуна підймання лопати ЕКГ-5А:

$$\begin{aligned}
 P_{n.l.св} &= \frac{P_{nl} \cdot t_{\kappa l} + P'_{nl} \cdot t_{pl} + P''_{nl} t_{нк}}{23} = \\
 &= \frac{337,7 \cdot 8 + 8,17 \cdot 8 + 1077 \cdot 7}{23} = 184,4 \text{ кВт.}
 \end{aligned}
 \tag{1.18}$$

Беремо для електроприводу підймання лопати екскаватора ЕКГ-5А двигун постійного струму ДЕ-816 [7] (табл. 1.1), який спеціально спроектований для роботи в тривалому режимі на різних екскаваторах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 1.1 – Технічні дані двигуна ДЕ-816

Параметр	Значення
$P_{ном}$	200 кВт
$U_{ном}$	400 В
$I_{ном}$	490 А
$U_{зб}$	85 В
$n_{ном}$	750 об/хв
n_{max}	6500 об/хв
$M_{ном}$	2547 Н·м
$\eta_{ном}$	92%

1.6.2 Вибір перетворювача та силової частини ТП-Д для екскаватора ЕКГ-5А

Оскільки двигун підймання лопати ЕКГ-5А має потужність вище 100 кВт, і потребує як підймання, так і опускання, тому беремо як систему електроприводу схему «тиристорний перетворювач – двигун» (або далі ТП-Д). При чому ТП-Д має реверсування в колі якоря. Проведено вибір обладнання для силового каналу ТП-Д.

1.6.2.1 Тиристорний перетворювач

Для системи ТП-Д беремо комплектний перетворювач КЕР-05Г-ТЦ-У2 [8] (див. у табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Технічні дані КЕР-05Г-ТЦ-У2

Параметр	Значення
$U_{синхр}$	380 В
$U_{дном}$	440 В
$I_{дном}$	500 А

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1.6.2.2 Реактор для перетворювача

Реактори перетворювача мають обмежувати пульсації струму:

$$L_p \geq \frac{8,8U_{ТПном}}{1000 \cdot \delta_n \cdot I_{ТП}} - L_{\delta\phi}, \quad (1.19)$$

де $\delta_n = 2\%$,

$$L_{\delta\phi} = \frac{\gamma U_{\delta\phi ном}}{P_{\delta\phi ном} \cdot \omega_{ном} \cdot I_{\delta\phi ном}}, \quad (1.20)$$

де $\gamma = 0,25$.

Підставивши значення:

$$L_{\delta\phi} = \frac{0,25 \cdot 440}{175 \cdot 77,493 \cdot 410} = 2,068 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}; \quad (1.21)$$

$$L_p = \frac{8,8 \cdot 440}{1000 \cdot 2 \cdot 410} - L_{\delta\phi} = 0,0304 \text{ Гн}. \quad (1.22)$$

Беремо реактор ФРОС 500/0,5 [8] (див. у табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Технічні дані реактора ФРОС 500/0,5

Параметр	Значення
$I_{p ном}$	500А
L_p	3,25 мГн
R_p	0,0075 Ом

1.6.2.3 Трансформатор

Напруги обмоток трансформатора:

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

$$U_{2\phi} = k_u \cdot k_m \cdot k_\alpha \cdot k_T \cdot U_{dн} = 0,428 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,07 \cdot 460 = 255 \text{ В}, \quad (2.1)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\text{де } k_U = \frac{U_{2\phi}}{U_{d0}} = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} = 0,428; k_m = 1,1; k_a = 1,1.$$

Випрямлена напруга (маскимальне значення):

$$U_{d\max} = U_{2\phi} \cdot k_{cx} = 255 \cdot 2,34 = 596,7 \text{ В}, \quad (2.1)$$

$$\text{де } k_{cx} = 2,34.$$

Вторинний струм:

$$I_{2\phi} = k'_i \cdot k''_i \cdot I_{dH} = 1,1 \cdot 0,817 \cdot 490 = 449,07 \text{ А}, \quad (2.2)$$

$$\text{де } k'_i = 1,1; k''_i = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0,817.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k_{mp} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{449,07}{255} = 13,59. \quad (2.3)$$

Первинний струм:

$$I_{1\phi} = \frac{I_{2\phi}}{k_{mp}} = \frac{449,07}{13,59} = 30,05 \text{ А}. \quad (2.4)$$

Потужність трансформатора (обчислена):

$$S_1 = 3I_{1\phi} \cdot U_{1\phi} = 3 \cdot 30,05 \cdot 3464,1 = 312309,9 \text{ ВА},$$

$$S_2 = 3I_{2\phi} \cdot U_{2\phi} = 3 \cdot 449,07 \cdot 255 = 343540,9 \text{ ВА},$$

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{312309,9 + 343540,9}{2} = 327925,4 \text{ ВА}.$$

Беремо трансформатор ТНЗП-400/10, що має найближчу більшу потужність [8] (див. у табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Технічні дані трансформатора ТНЗП-400/10

Параметр		Значення	
$\Delta P_{x.x.}, \text{ Вт}$		1250	
$\Delta P_{к.з.}, \text{ Вт}$		5300	

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$u_{к.з.}, \%$	6,7
$i_{х.х.}, \%$	2,1
Мережа: $P_{ном}, кВА:$ $U_{ном}, кВ:$	362 6
Вентильна обмотка: $U_{ном}, В:$	406
Перетворювач: $I_{ном}, А:$ $U_{ном}, В:$	630 460

Для встановлення остаточно обрано трансформатор типу ТНЗП який використовує рідкий діелектрик (совтол) для системи охолодження. Його конструкція передбачена спеціально для забезпечення живлення тиристорних перетворювачів, що працюють за трифазною мостовою схемою.

Висновки за розділом 1

Перший розділ присвячено розгляду сфери застосування та основних завдань, які виконує екскаватор ЕКГ-5А у структурі управління залізничного транспорту АТ «Кривбасзалізрудком». Надано загальну характеристику конструкції машини, описано принцип її роботи, а також охарактеризовано основне електрообладнання. Проведено аналіз вимог, що ставляться до електроприводу головних механізмів, з урахуванням специфіки експлуатації. Здійснено розрахунок потужності привідного двигуна, за результатами якого обґрунтовано вибір двигуна постійного струму з незалежним збудженням для реалізації операцій підйому. Для забезпечення керування швидкістю у цій операції була обрана система електроприводу типу ТП-Д з реверсуванням у колі якоря, яка передбачає роздільне керування випрямними мостами. У складі електроприводу передбачено встановлення силового трансформатора,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

реверсивного тиристорного агрегату на базі двох шестипульсних випрямних схем, а також згладжувального реактора.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

**Розділ 2. Аналіз базового варіанту
електропривода екскаватора ЕКГ-5А**

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Янчий Я.Ю.</i>			<i>Аналіз базового варіанту електропривода екскаватора ЕКГ-5А</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Барановська М.Л.</i>				<i>Н</i>		
<i>Конс.</i>						<i>ЕЕМ-22СК</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Барановська М.Л.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

2.1 Статика головного привода екскаватора ЕКГ-5А

2.1.1 Обчислення заступної схеми системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А

Заступна схема електроприводу «тиристорний перетворювач-двигун» (ТП-Д) є важливим інструментом для аналізу та проектування, що дозволяє визначити ключові електромеханічні параметри. Основне призначення такої схеми полягає у спрощеному поданні складних електромагнітних процесів у вигляді еквівалентних електричних кіл, що дає змогу провести кількісну оцінку характеристик системи без необхідності повного фізичного моделювання.

Розрахунок заступної схеми починається з визначення основних параметрів елементів системи. Для двигуна постійного струму необхідно врахувати опір якоря ($R_{я}$), індуктивність якорного ланцюга ($L_{я}$), опір та індуктивність обмотки збудження. Тиристорний перетворювач моделюється як кероване джерело напруги з певним внутрішнім опором. Особливу увагу приділяють реактивним параметрам мережі живлення, включаючи індуктивність розсіювання трансформатора.

Методика обчислення передбачає послідовне визначення: еквівалентного опору та індуктивності всього ланцюга; постійних часу електромагнітних процесів; граничних значень струмів і напруг, а потім динамічних характеристик при різних режимах роботи.

Для статичних розрахунків використовують рівняння електричної рівноваги системи, враховуючи кут керування тиристорами.

Електрична частина приводу ЕКГ-5А за системою ТП-Д має заступну схему (див. на рис. 2.1).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

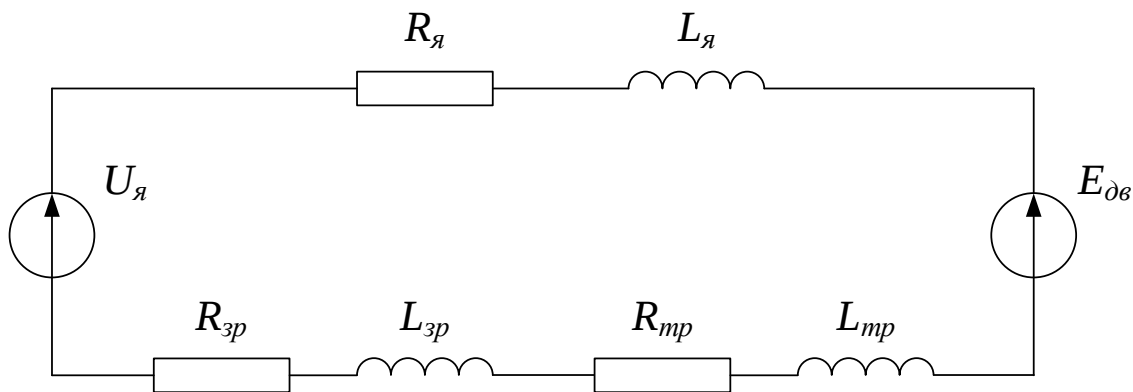


Рисунок 2.1 – Заступна схема приводу ТП-Д для ЕКГ-5А

Параметри трансформатора:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot U_{\text{лф}}^2}{S_{\text{тр}}^2} = \frac{5300 \cdot 3464,1^2}{(362 \cdot 10^3)^2} = 0,485 \text{ Ом.} \quad (2.5)$$

$$X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{кз}} \cdot U_{\text{лф}}^2}{100 \cdot S_{\text{тр}}} = \frac{6,5 \cdot 3464,1^2}{100 \cdot 362 \cdot 10^3} = 2,22 \text{ Ом.} \quad (2.6)$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{X_{\text{тр}}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2,22}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 7,073 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (2.7)$$

Опір й індуктивність якірного ланцюга [9]:

$$R_{\text{я}} = \frac{\alpha(1-\eta_{\text{н}})U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{0,3(1-0,92)400}{490} = 0,029 \text{ Ом,} \quad (2.2)$$

де $\alpha = 0,3 \dots 0,5$.

$$L_{\text{я}} = \beta \frac{U_{\text{н}}}{2p \cdot I_{\text{н}} \cdot n_{\text{н}}} = 0,2 \frac{400}{2 \cdot 1 \cdot 490 \cdot 750} = 1,088 \cdot 10^{-4} \text{ Гн,} \quad (2.8)$$

де $p = 1$; $\beta = 0,2 \dots 0,25$.

Опір й індуктивність ланцюга випрямленого струму:

$$\begin{aligned} R_{\text{а}} &= R_{\text{я}} + R_{\text{зр}} + 2 \cdot R_{\text{тр}} + \frac{m_p \cdot X_{\text{тр}}}{2\pi} = \\ &= 0,029 + 0,0075 + 2 \cdot 0,485 + \frac{6 \cdot 2,22}{2 \cdot 3,14} = 3,13 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.9)$$

де $m_p = 6$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$L_a = L_{\text{я}} + L_{\text{зп}} + 2 \frac{X_{\text{тр}}}{\omega_c} =$$

$$= 1,088 \cdot 10^{-4} + 3,25 \cdot 10^{-3} + 2 \frac{2,22}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,018 \text{ Гн.} \quad (2.10)$$

ЕРС двигуна ДЕ-816:

$$E_{\text{дв}} = U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}} = 400 - 490 \cdot 0,029 = 385,6 \text{ В.} \quad (2.3)$$

Частота обертання і момент двигуна ДЕ-816:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 750}{60} = 78,54 \text{ с}^{-1}. \quad (2.11)$$

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{200 \cdot 10^3}{78,54} = 2546,5 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.4)$$

Коефіцієнти моменту, ЕРС та передачі двигуна ДЕ-816 по керуванню:

$$c_E = \frac{E_{\text{дв}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{385,6}{78,54} = 4,91 \frac{\text{В}}{\text{с}^{-1}}; \quad (2.12)$$

$$c_M = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{2546,5}{490} = 5,197 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}. \quad (2.13)$$

$$c_{\text{дв}} = \frac{1}{c_E} = \frac{1}{4,91} = 0,204 \frac{\text{с}^{-1}}{\text{В}}. \quad (2.14)$$

Момент інерції загальний системи:

$$J_{\Sigma} = 8 \cdot J = 8 \cdot 8750 \cdot \frac{P_{\text{н}}}{n^2} = 8 \cdot 8750 \cdot \frac{200}{750^2} = 24,889 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.15)$$

Електромагнітна і електромеханічні сталі часу заступної схеми двигуна ДЕ-816:

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0,39 \cdot 10^{-3}}{11,65 \cdot 10^{-3}} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (2.16)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$T_m = \frac{J_{\Sigma} R_a}{c_M \cdot c_E} = \frac{24,889 \cdot 3,13}{4,91 \cdot 5,197} = 3,053 \text{ с.} \quad (2.17)$$

Зважаючи на те, що $4T_e \ll T_m$, то перехідні процеси мають бути аперіодичні.

Коефіцієнт і стала часу ТП [9]:

$$k_{TP} = \frac{U_{дн}}{U_{кер}} = \frac{930}{5} = 186. \quad (2.18)$$

де $U_{кер} = 5B$,

$$T_{TP} = 0,0034 \text{ сек.}$$

2.1.2 Статика двигуна ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А

Статичні характеристики двигуна постійного струму, яким є ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А, відображають установлені взаємозв'язки між основними електромеханічними параметрами в сталому режимі роботи. До ключових характеристик належить механічна характеристика, яка виражає залежність частоти обертання вала від моменту навантаження при постійній напрузі живлення. Швидкісна характеристика показує зміну частоти обертання від струму якоря при постійній напрузі та потоці збудження. Для двигунів з незалежним збудженням ця характеристика має слабо виражений падаючий характер через невелике падіння напруги на опорі якоря.

Критичним параметром є жорсткість механічної характеристики, яка визначає ступінь зміни частоти обертання при зміні навантаження. Для двигунів з незалежним збудженням характеристика є жорсткою (невелика зміна швидкості при зміні навантаження). Статичні характеристики дозволяють визначити робочі точки двигуна екскаватора при різних режимах експлуатації та є основою для проектування системи керування.

Для двигуна ДЕ-816 маємо рівняння швидкісної і механічної характеристик [10, 11]:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\omega(I) = \frac{U_H}{c_E} - \frac{IR_{я}}{c_E}; \quad (2.19)$$

$$\omega(M) = \frac{U_H}{c_E} - \frac{MR_{я}}{c_E c_M}. \quad (2.20)$$

Характерні точки характеристик двигуна ДЕ-816 [10, 11]:

$$\omega_{0EM} = \omega_{0M} = \frac{U_H}{c_E} = \frac{400}{4,91} = 81,47 \text{ с}^{-1}. \quad (2.21)$$

$$\Delta\omega_{EM} = \frac{I_H \cdot R_{я}}{c_E} = \frac{490 \cdot 0,029}{4,91} = 2,89 \text{ с}^{-1}. \quad (2.22)$$

$$\Delta\omega_M = \frac{M_H \cdot R_{я}}{c_E \cdot c_M} = \frac{2546,5 \cdot 0,029}{4,91 \cdot 5,197} = 2,89 \text{ с}^{-1}. \quad (2.23)$$

Графіки статичних характеристик двигуна ДЕ-816 наведені на рис. 2.2 і рис. 2.3.

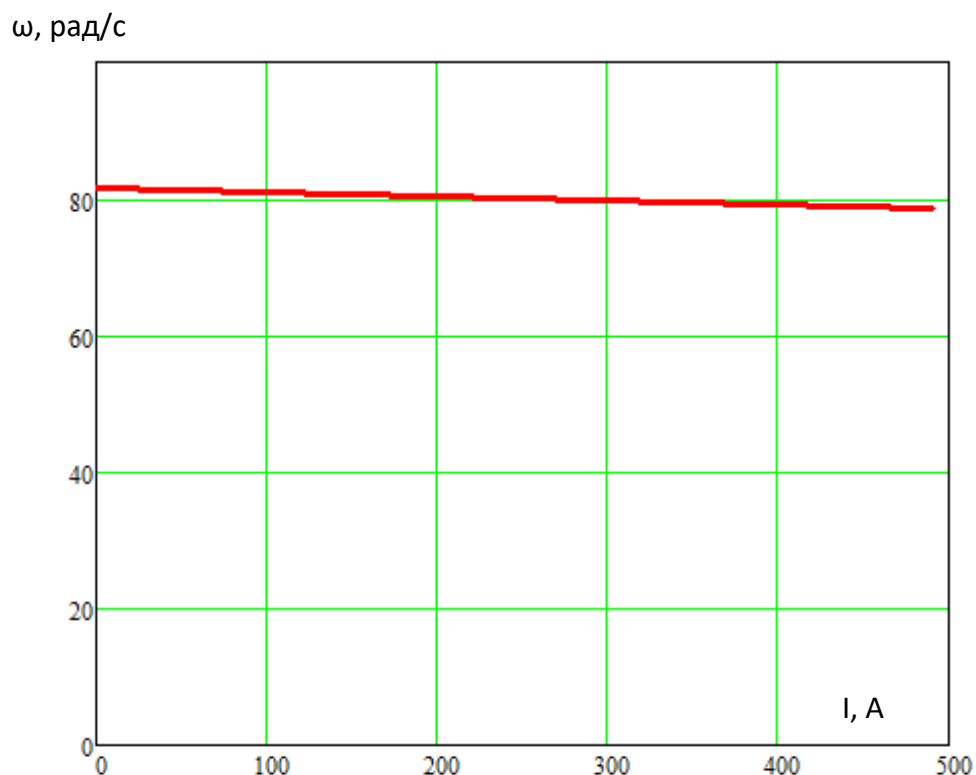


Рисунок 2.2 – Швидкісна характеристика двигуна ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

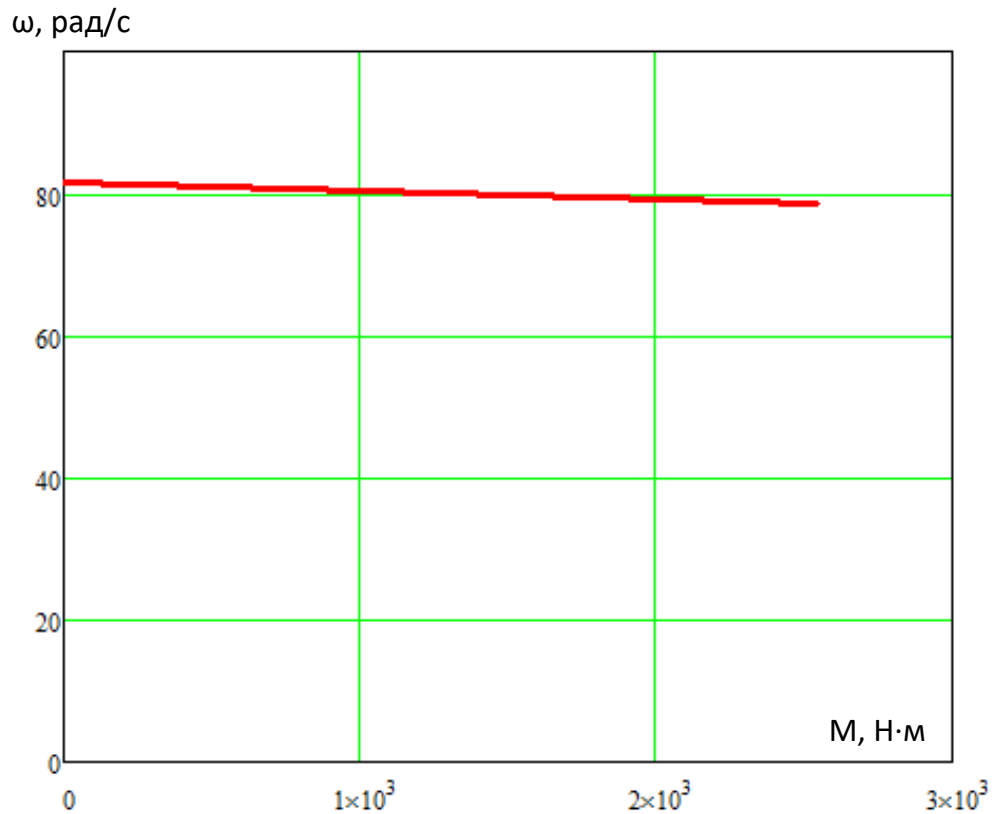


Рисунок 2.3 – Механічна характеристика двигуна ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А

2.1.3 Статика системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А

Нанесемо на графіки характеристики привода екскаватора ЕКГ-5А у статичному режимі.

Швидкісна характеристика привода екскаватора ЕКГ-5А [10, 11]:

$$\omega(I) = \frac{U_{d0} \cos(\alpha) - I_{ном} R_a}{c_E}. \quad (2.24)$$

Швидкісні характеристики робимо 3...4 значень α , як-то, $\alpha = 20 \dots 100$ ел. град. з кроком $\Delta\alpha = 20$ ел. град.

Механічна характеристика привода екскаватора ЕКГ-5А [10, 11]:

$$\omega(M) = \frac{U_{d0} \cos(\alpha) - \frac{M_{ном}}{c_M} R_a}{c_E}. \quad (2.25)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

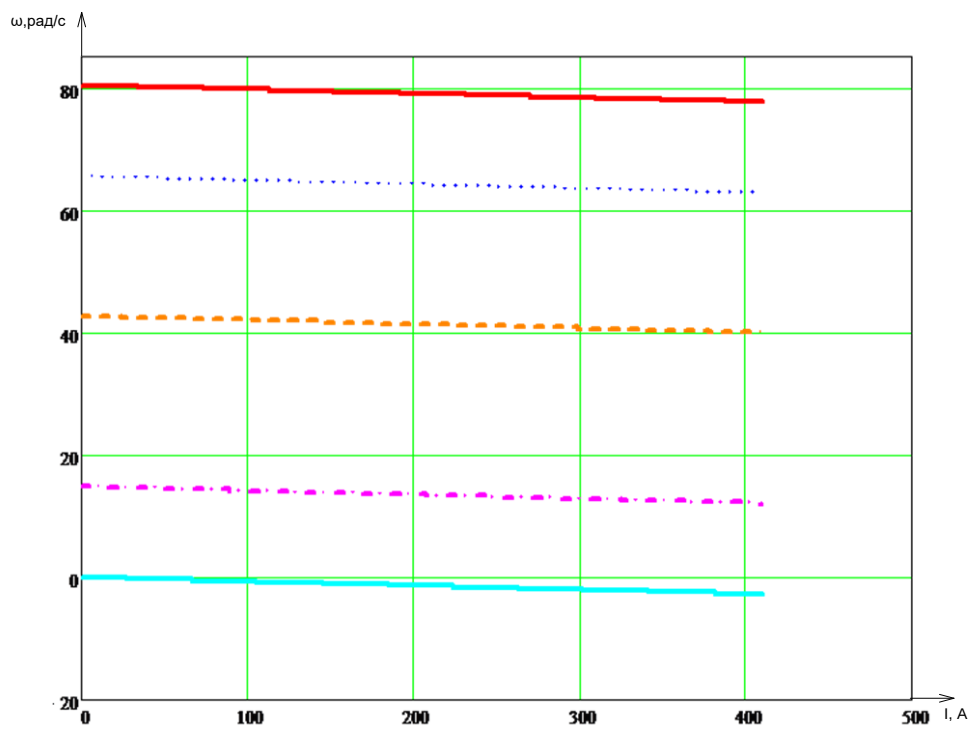


Рисунок 2.4 – Швидкісні характеристики електропривода екскаватора ЕКГ-5А

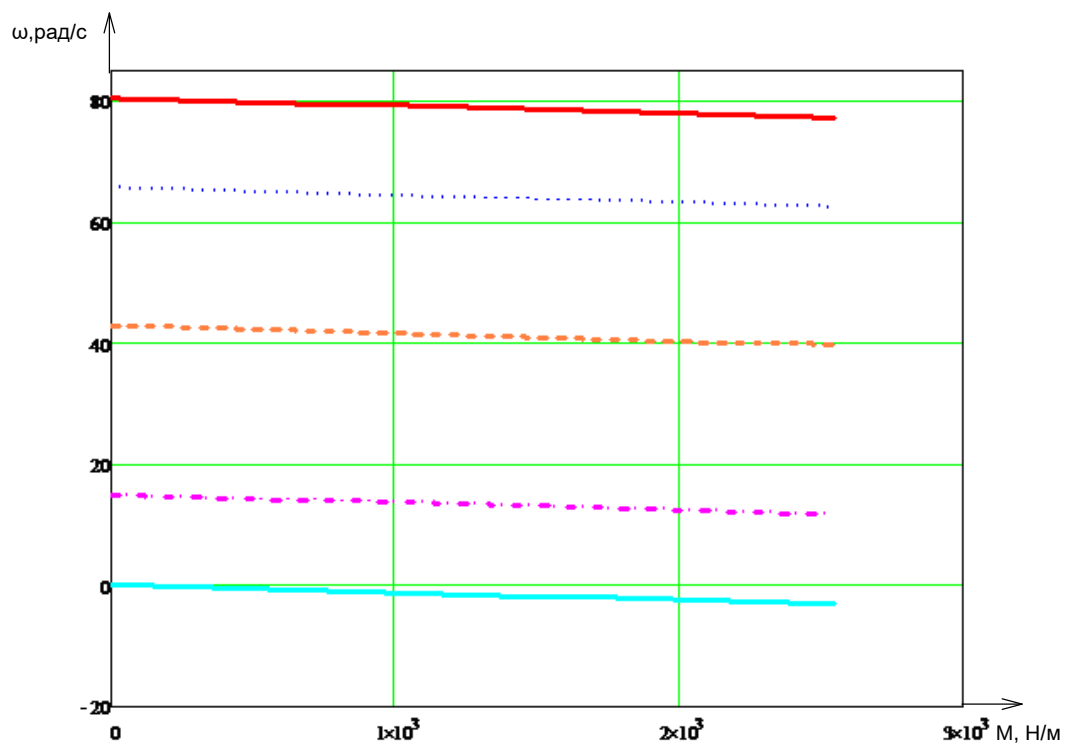


Рисунок 2.5 – Механічні характеристики електропривода екскаватора ЕКГ-5А

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.2 Енергетичні показники електропривода екскаватора ЕКГ-5А

2.2.1 Коефіцієнт корисної дії

Коефіцієнт корисної дії електропривода екскаватора ЕКГ-5А [10, 11]:

$$\eta = \frac{M \cdot \omega}{M \cdot \omega + \Delta P_{\Sigma}}, \quad (2.26)$$

де $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{змін}}$:

$$\Delta P_{\text{пост}} = k_{\text{мех}} P_{\text{ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = 0,015 \cdot 200 \left(\frac{\omega}{78,54} \right)^2, \text{ кВт}; \quad (2.27)$$

де $k_{\text{мех}} = 0,015$.

$$\Delta P_{\text{змін}} = I_{\text{дов}}^2 \cdot R_e = 490^2 \cdot 0,044 = 10,58 \text{ кВт}. \quad (2.28)$$

Характеристика $\eta = f(\omega)$ для $\alpha = 20 \dots 100$ ел. град. з кроком $\Delta\alpha = 20$ ел. град. показується на рис. 2.6.

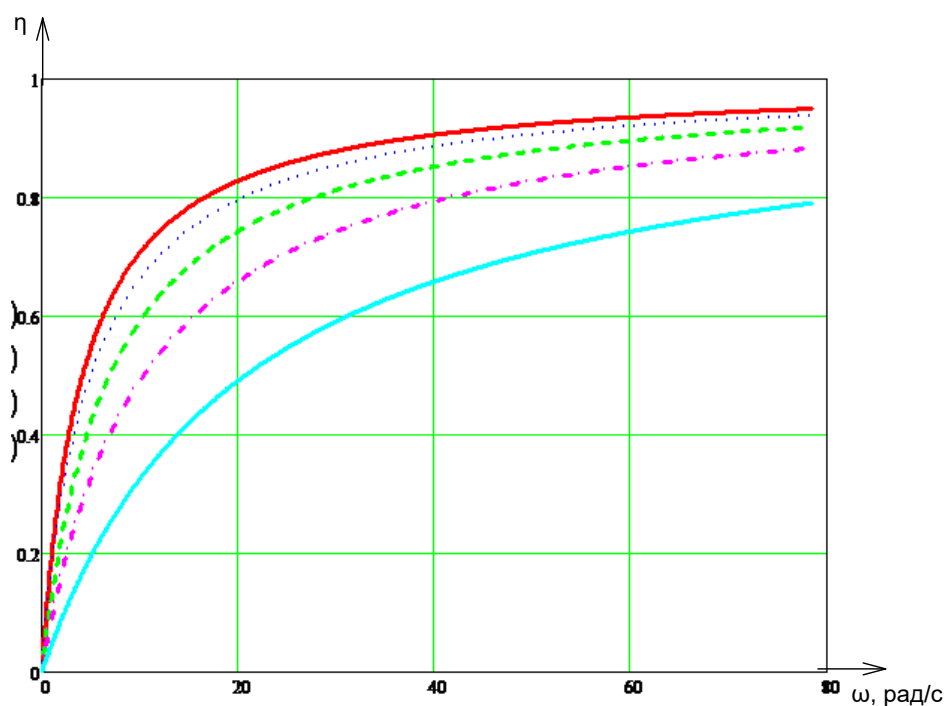


Рисунок 2.6 – Коефіцієнт корисної дії електропривода екскаватора ЕКГ-5А

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.2.2 Коефіцієнт потужності

Коефіцієнта потужності екскаватора ЕКГ-5А [10, 11]:

$$\cos \varphi = \frac{c_E \omega + \frac{M \cdot R_e}{c_M}}{U_{d0}}. \quad (2.19)$$

Характеристика $\cos \varphi = f(\omega)$ для $\alpha = 20 \dots 100$ ел. град. з кроком $\Delta \alpha = 20$ ел. град. показується на рис. 2.7.

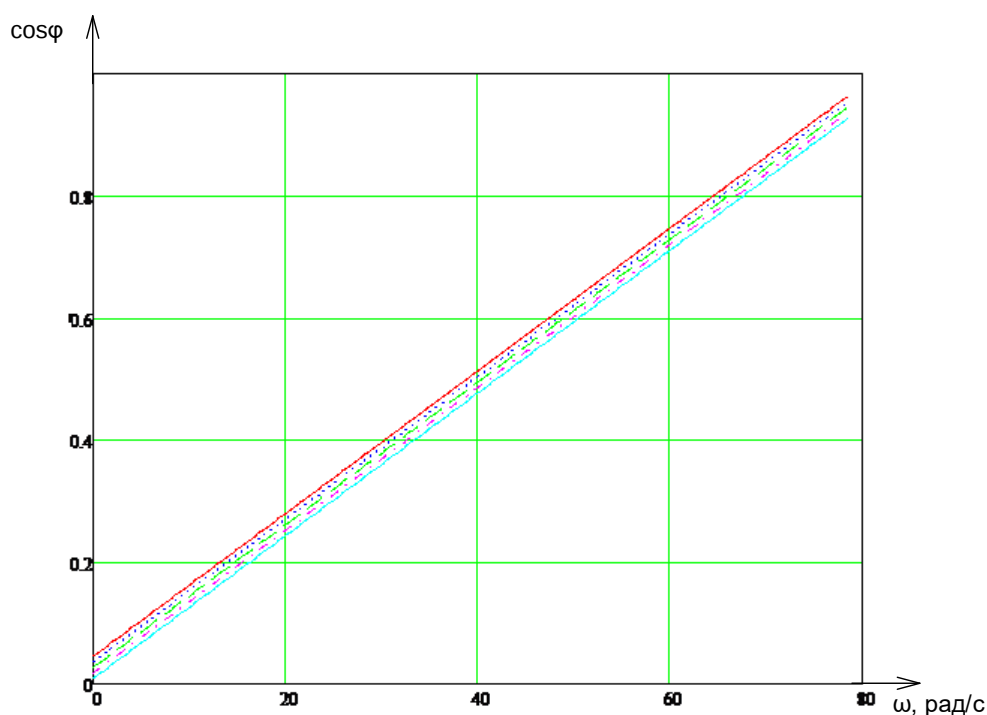


Рисунок 2.7 – Коефіцієнт потужності електроприводу екскаватора ЕКГ-5А

2.3 Динамічні властивості привідного двигуна екскаватора

Для встановлення динамічних властивостей двигуна ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А використаємо блок DC Machine з MATLAB (Simscape/Electrical/Specialized Power Systems) використовується для моделювання машини постійного струму з можливістю вибору між конструкцією з незалежним збудженням (обмоткове збудження) або збудженням від постійних магнітів. Такий підхід дозволяє гнучко моделювати різні типи електричних машин у системах електроприводів, автоматизованих комплексах та дослідженнях динаміки електромеханічних процесів [12].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У варіанті з обмоткою збудження, передбачено окремі виводи (F^+ і F^-), що забезпечують можливість використання машини як у схемі з паралельним (шунтовим), так і з послідовним збудженням. Це дає змогу враховувати вплив збуджувального струму на робочі характеристики машини. З іншого боку, вхід TL моделі дозволяє задавати зовнішній обертальний момент, що діє на вал машини, що є важливим для адекватного відображення механічних процесів [12].

Якірне коло машини (виводи A^+ і A^-) описується еквівалентною схемою, яка включає послідовне з'єднання індуктивності L_a , активного опору R_a та джерела зворотної електрорушійної сили (ЕРС) E . Значення цієї ЕРС прямо пропорційне кутовій швидкості ротора, що відповідає реальній поведінці електричної машини [12]:

$$E = c_E \omega, \quad (2.19)$$

У разі застосування моделі з незалежним збудженням, величина КЕ також пропорційна струму збудження I_z [12]:

$$c_E = L_{az} I_z, \quad (2.19)$$

де L_{az} – взаємна індуктивність між обмотками збудження та якоря.

Це означає, що при зміні струму збудження змінюється і коефіцієнт перетворення механічної енергії в електричну та навпаки.

Розвинутий момент, який створюється машиною, залежить від струму в якірному колі I_a [12]:

$$M = c_M I_a. \quad (2.19)$$

У загальному випадку c_M дорівнює c_E , що забезпечує симетричну поведінку машини при переході між режимами роботи.

Для правильного моделювання електромеханічних режимів у Simulink встановлено наступну знакову конвенцію: коли обидва моменти M і M_c додатні – машина працює у режимі двигуна; коли ж ці моменти від'ємні –

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

машина функціонує як генератор. Це дозволяє враховувати усі можливі стани електроприводу без необхідності зміни структури моделі.

У фізичній реалізації якірне коло з'єднується через виводи A^+ і A^- , а схема еквівалентної моделі включає блок вимірювання струму, джерело керованої напруги, опір R_a і індуктивність L_a .

У випадку машини з обмотковим збудженням, обмотка збудження подана у вигляді класичної RL-ланки, підключеної між виводами F^+ і F^- , що дозволяє досліджувати динаміку наростання збуджувального струму, перехідні процеси та вплив збудження на момент і ЕРС [12].

У машині на постійних магнітах струм збудження відсутній, адже магнітне поле створюється постійними магнітами, що значно спрощує модель. У цьому випадку коефіцієнти c_M та c_E є сталими і не змінюються під час моделювання, що полегшує розрахунки і дозволяє моделювати приводи з високою швидкістю.

Механічна частина моделі реалізує обчислення швидкості на основі рівняння моментів, враховуючи усі динамічні навантаження, що діють на ротор [12]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c - B_m - M_{тер}. \quad (2.19)$$

де B_m , $M_{тер}$ – коефіцієнти в'язкого і сухого тертя.

Це рівняння є основою для моделювання механічної динаміки, що дає змогу оцінити поведінку приводу під дією різних зовнішніх моментів, інерційного навантаження та тертя. Таким чином, блок DC Machine є універсальним інструментом для моделювання електроприводів постійного струму в умовах змінного навантаження, різних схем керування та широкого спектра режимів експлуатації [12].

Модель двигуна постійного струму двигуна ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А і результати симуляції показуються на рис. 2.8 і рис. 2.9.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

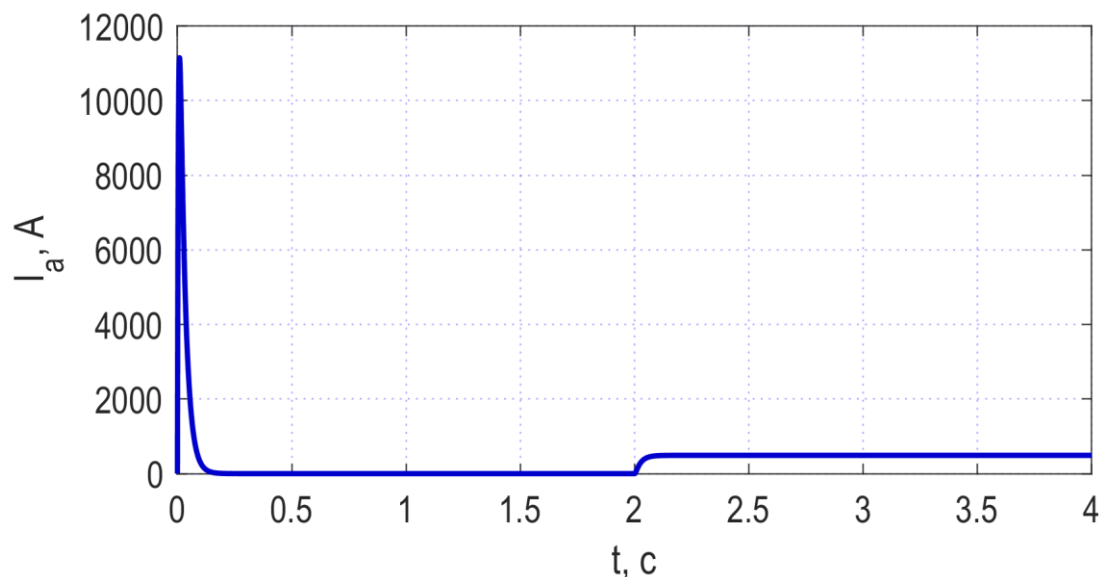


Рисунок 2.10 – Динамічні властивості двигуна ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А за струмом

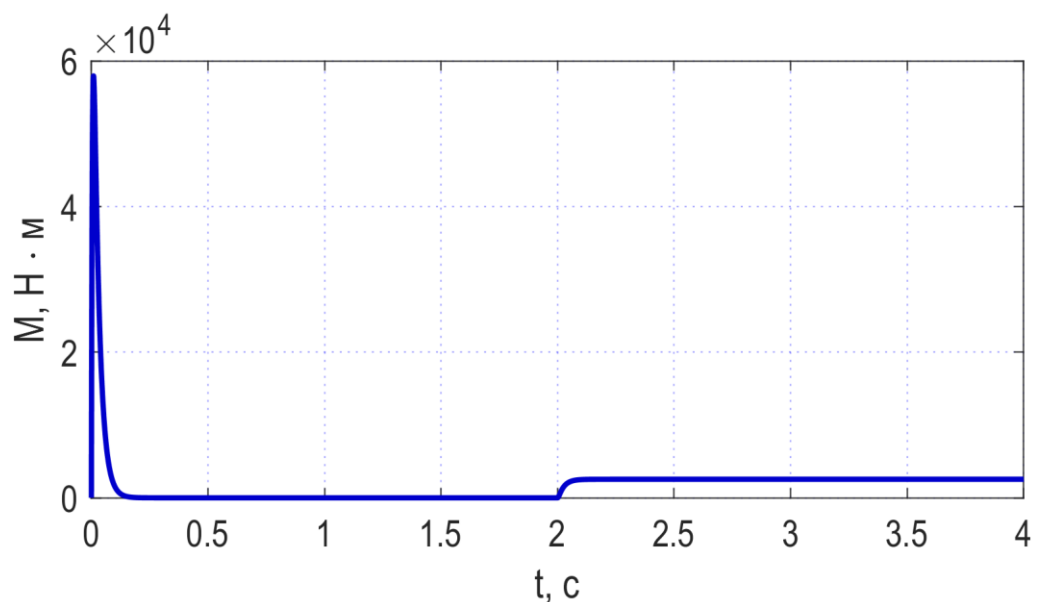


Рисунок 2.11 – Динамічні властивості двигуна ДЕ-816 екскаватора ЕКГ-5А за моментом

Маємо дуже великі пускові кидки струму й моменті. Привід екскаватора ЕКГ-5А в такому виконанні експлуатуватись не може.

2.4 Перехідні процеси в системі електроприводу екскаватора ЕКГ-5А

У MATLAB створюється модель системи тиристорного перетворювача з двигуном (ТП-Д) головного приводу екскаватора, яка представлена на

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

рис. 2.12. Використовуючи цю розроблену модель, здійснюється отримання графіків перехідних процесів, що виникають у системі ТП-Д.

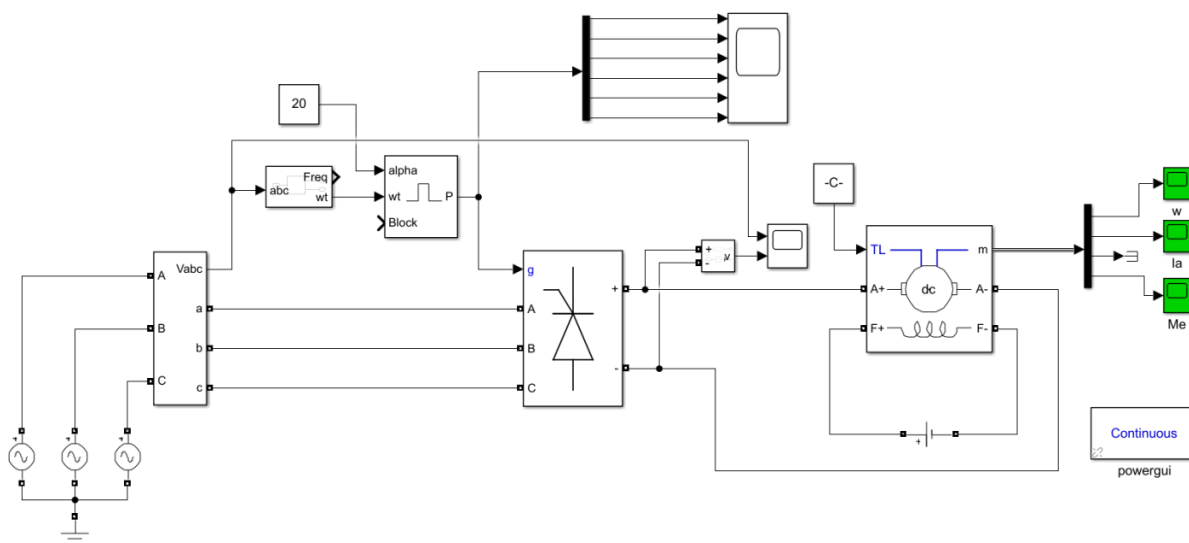


Рисунок 2.12 – Комп’ютерна модель ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А у MATLAB

Змоделюємо декілька варіантів роботи системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А у MATLAB при різних значеннях $\alpha_{кер}$. Момент у цей час буде ступінчасто змінюватись від 0 до $M_{ном}$.

Спочатку проведемо симуляцію при значенні кута $\alpha_{кер} = 0 \text{ ел. град.}$ Результати можемо бачити на рис. 2.13 – рис. 2.15. При чому $M_{max} = 22204,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $I_{max} = 4781,31 \text{ А}$.

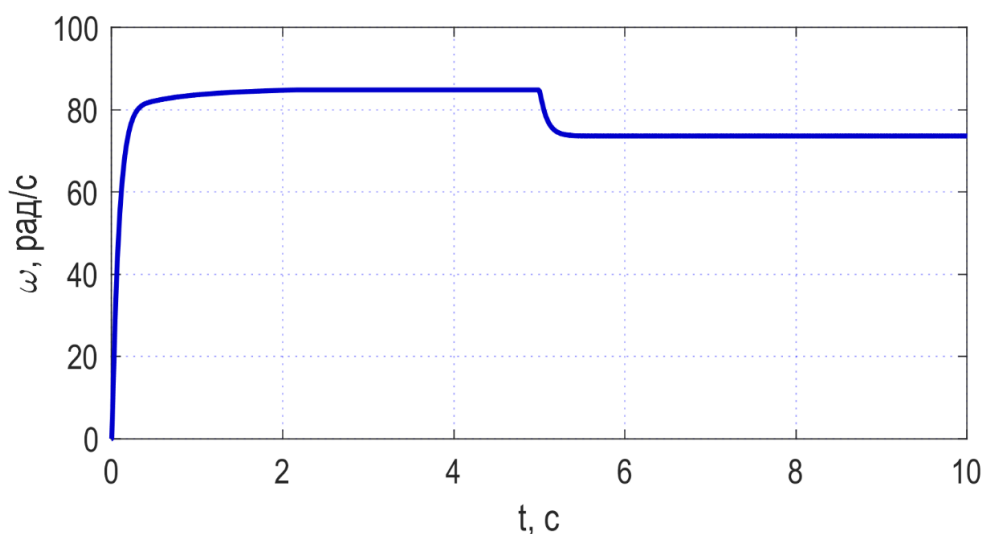


Рисунок 2.13 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за швидкістю коли $\alpha_{кер} = 0 \text{ ел. град.}$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

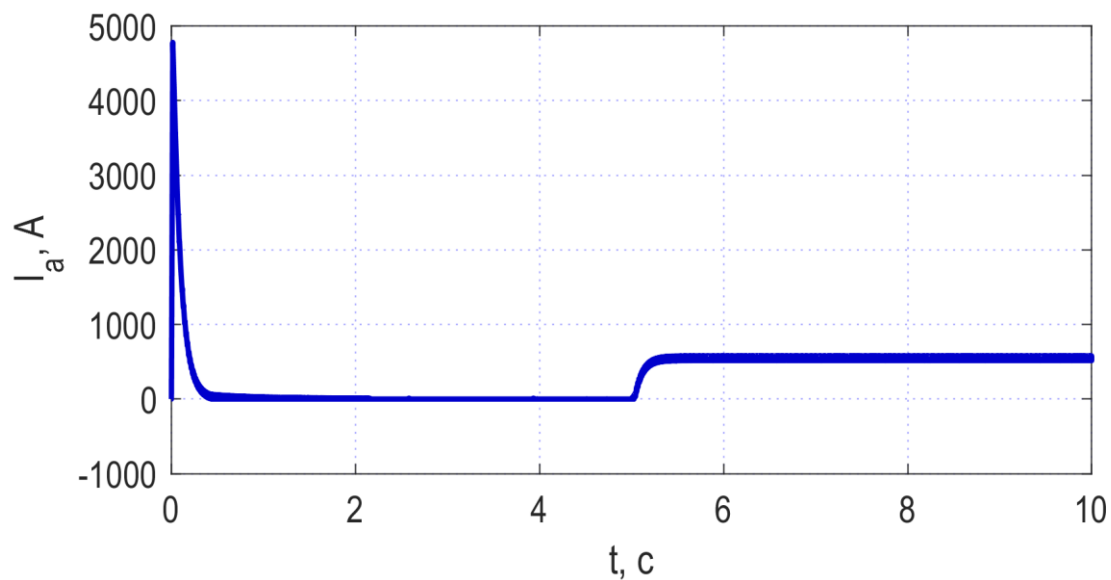


Рисунок 2.14 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за струмом
коли $\alpha_{кер} = 0$ ел. град.

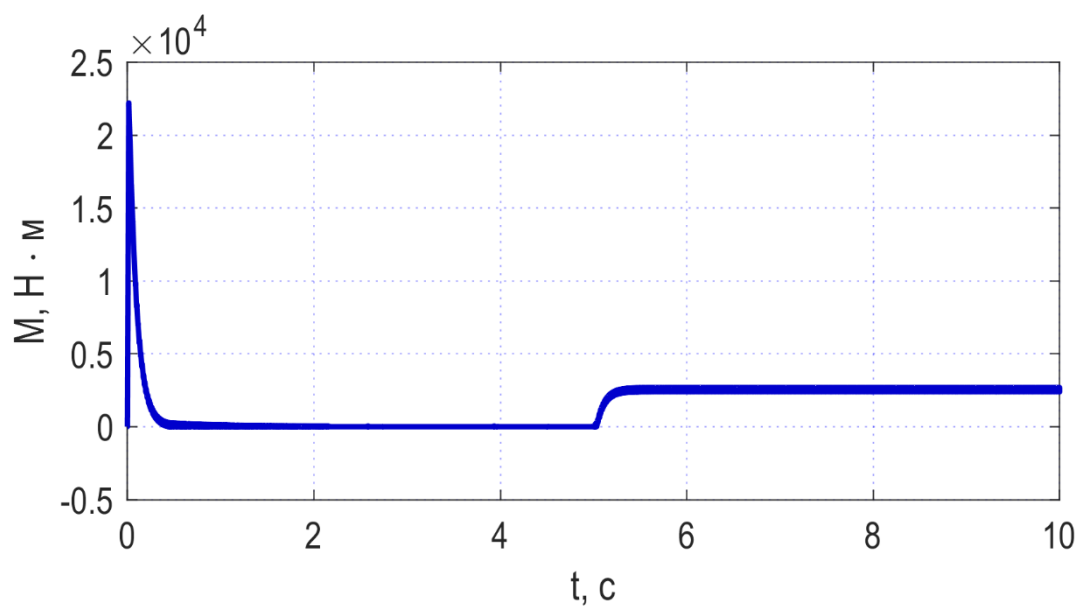


Рисунок 2.15 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за моментом
коли $\alpha_{кер} = 0$ ел. град.

Наступна симуляція при куті $\alpha_{кер} = 30$ ел. град. (рис. 2.16 – рис. 2.18).
При чому $M_{\max} = 21217,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $I_{\max} = 4556,72 \text{ А}$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

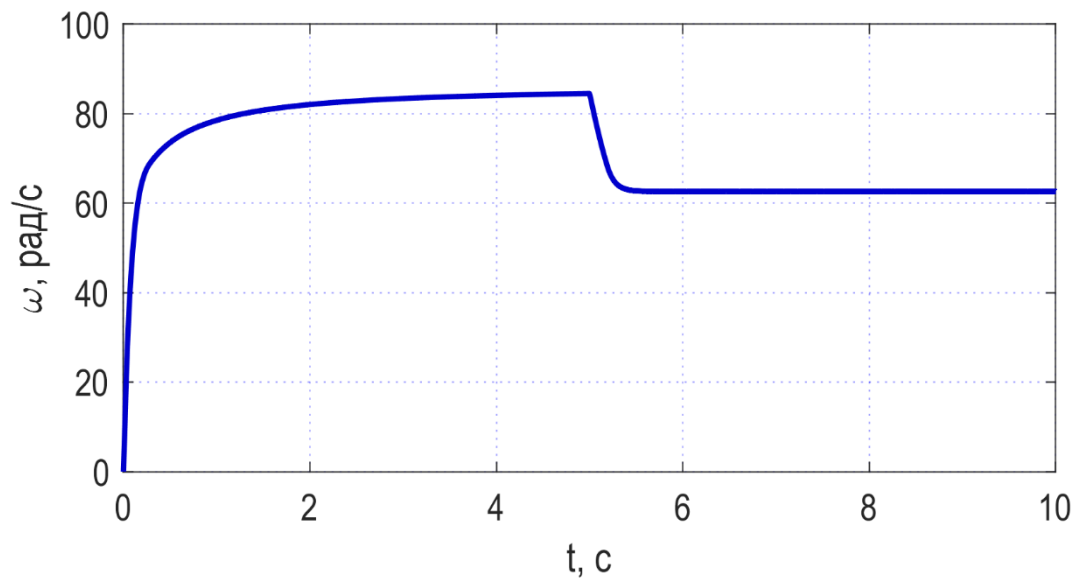


Рисунок 2.16 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за швидкістю
коли $\alpha_{кер} = 30$ ел. град.

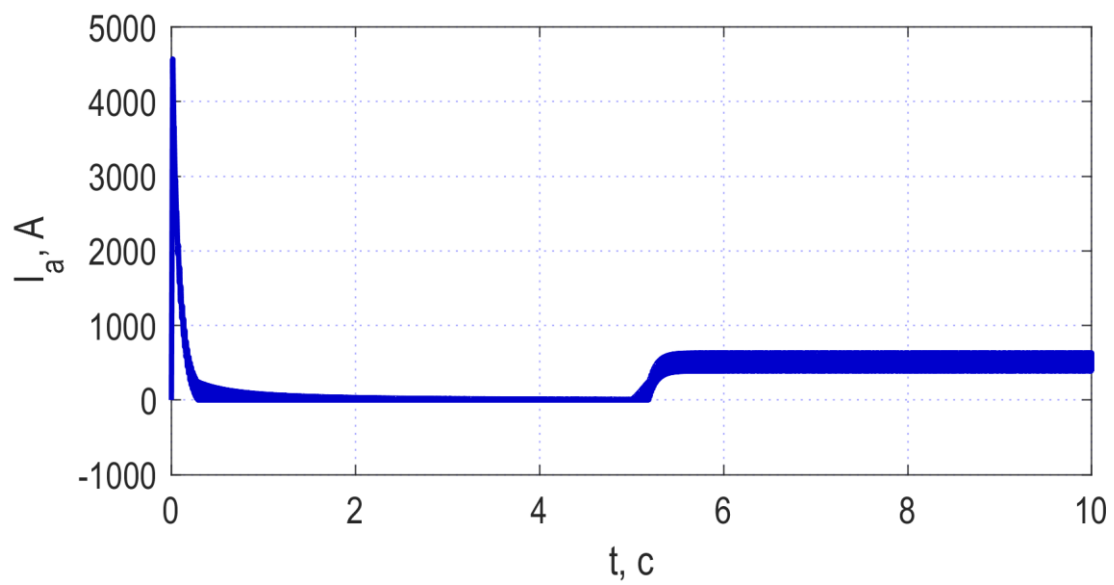


Рисунок 2.17 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за струмом
коли $\alpha_{кер} = 30$ ел. град.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

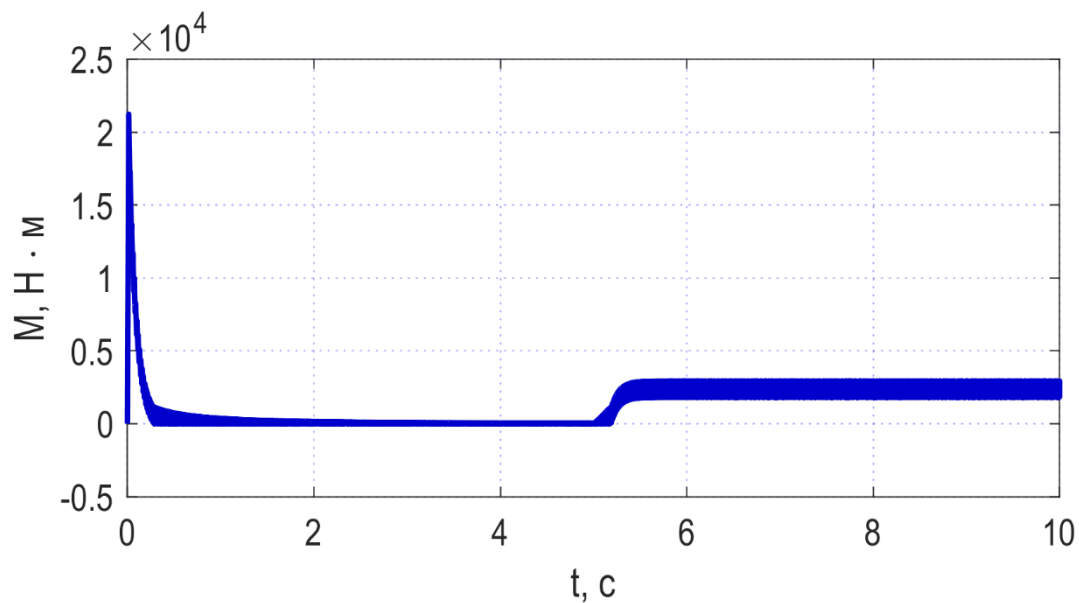


Рисунок 2.18 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за моментом
коли $\alpha_{кер} = 30$ ел. град.

Наступна симуляція при куті $\alpha_{кер} = 60$ ел. град. (рис. 2.19 – рис. 2.21).
При чому $M_{max} = 16685,9$ Н · м, $I_{max} = 3593,04$ А.

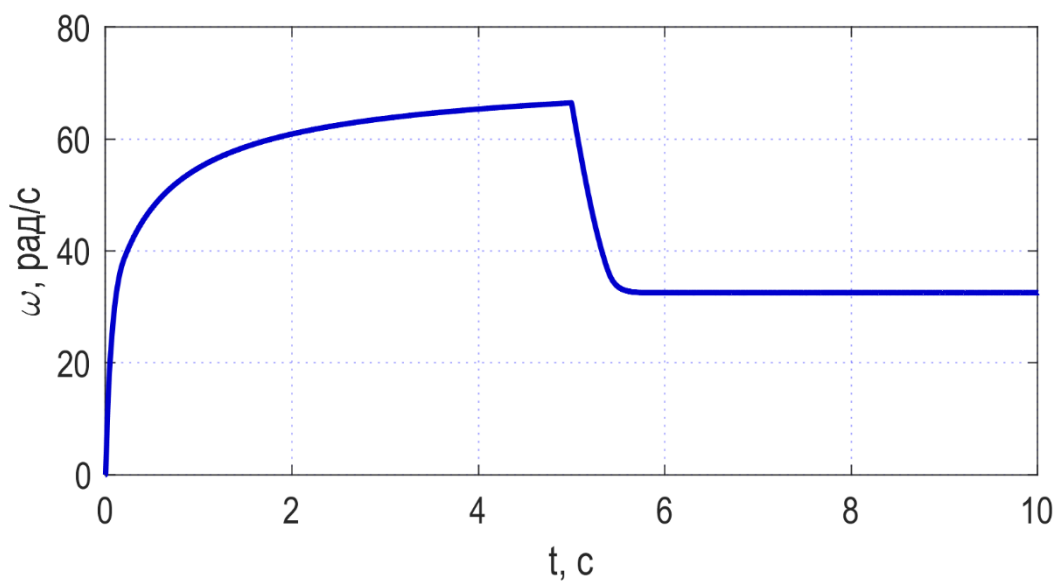


Рисунок 2.19 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за швидкістю
коли $\alpha_{кер} = 60$ ел. град.

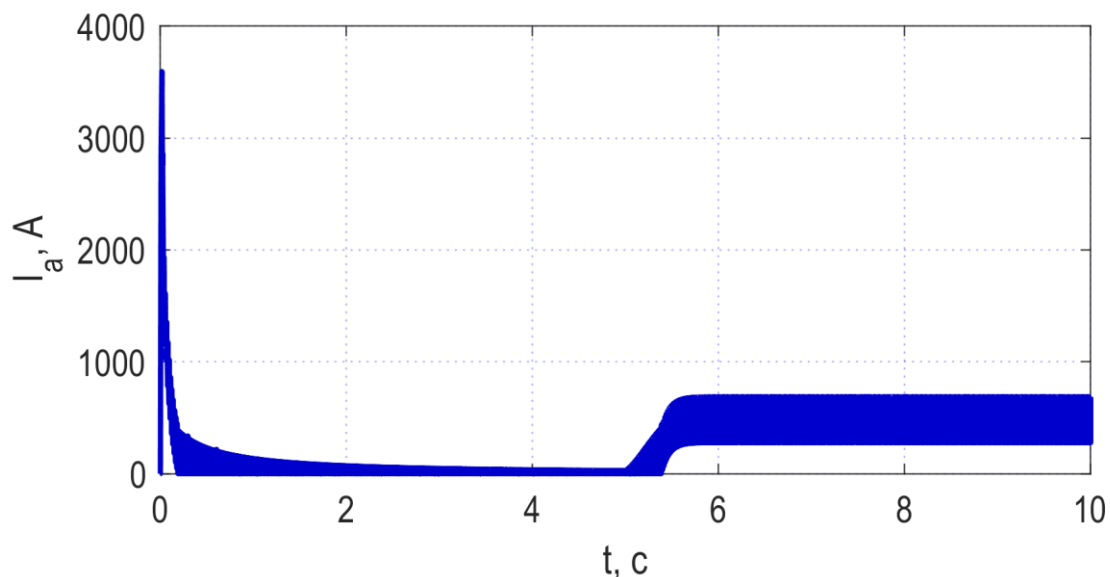


Рисунок 2.20 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за струмом
коли $\alpha_{кер} = 60$ ел. град.

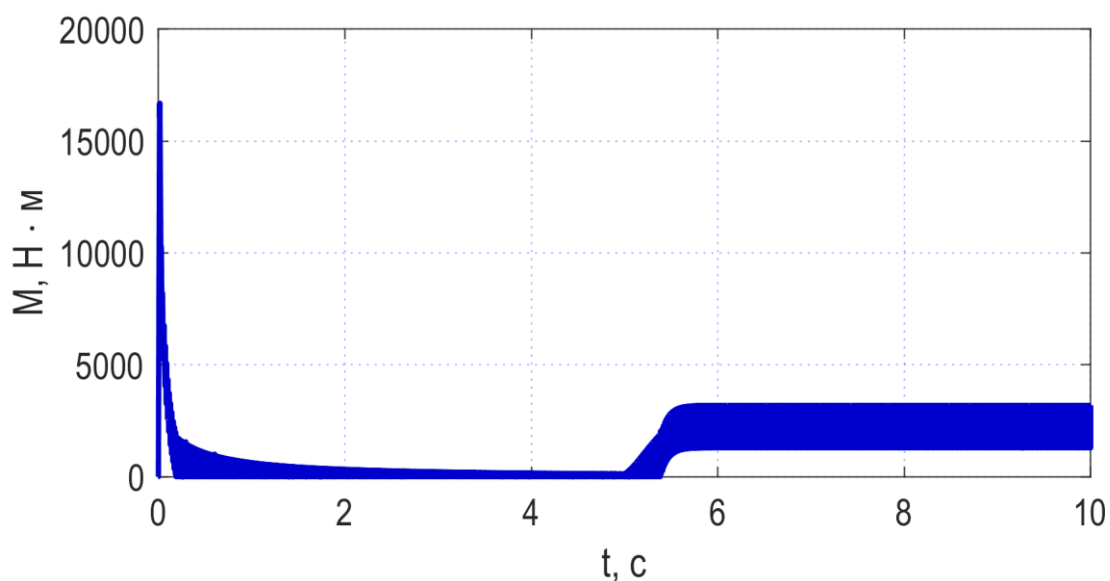


Рисунок 2.21 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за моментом
коли $\alpha_{кер} = 60$ ел. град.

Модель системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А демонструє покращення показників за збільшенням кута α . При керуванні з $\alpha_{кер} = 0$ ел. град. спостерігається найгірший результат – максимальний момент становить 22204,2 Н·м, а максимальний струм – 4781,31 А. Зі збільшенням кута до 30 ел. град. значення моменту та струму зменшуються до 21217,5 Н·м і 4556,72 А відповідно, що свідчить про покращення характеристик. Найкращий результат

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

досягається при куті 60 ел. град., коли максимальний момент знижується до 16685,9 Н·м, а струм – до 3593,04 А. Таким чином, із зростанням кута керування система працює в енергетично ефективнішому режимі, забезпечуючи менше навантаження на привід екскаватора в пусковий момент як за струмом, так і за моментом. Зниження цих показників свідчить про зменшення втрат, підвищення надійності та зменшення теплового навантаження на елементи системи, що є ознакою кращого режиму роботи.

Але при збільшенні кута падає швидкість, що неприпустимо, тому доцільно запуск робити на більших кутах, а потім його знижувати до 0.

На рис. 2.22 – рис. 2.24 показаний саме такий спосіб роботи. Тут $\alpha_{кер}$ спочатку 60 ел. град., а потім ступінчасто на 2 сек спадає до 0 ел. град.

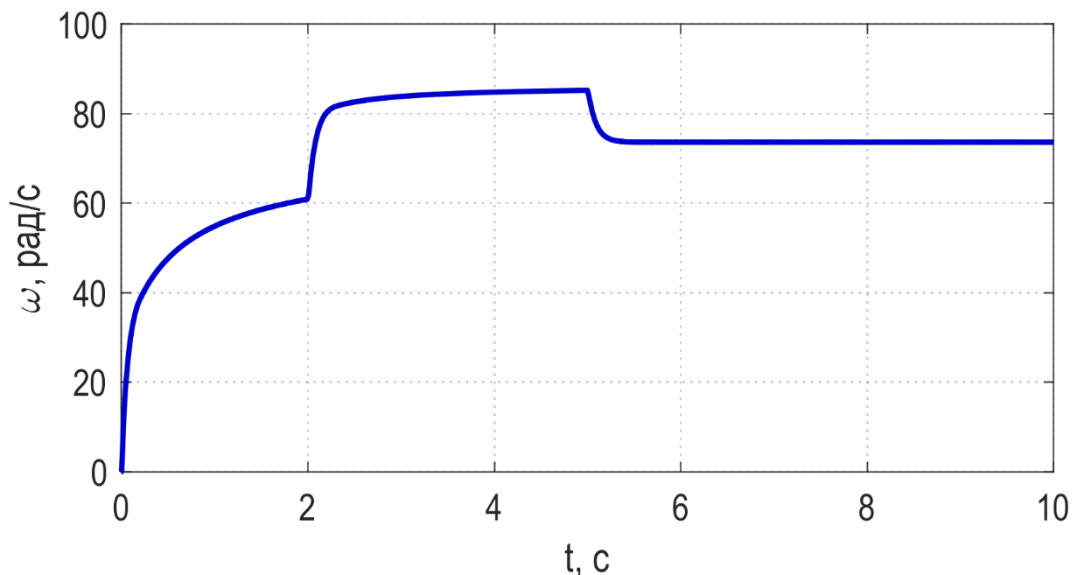


Рисунок 2.22 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за швидкістю

коли $\alpha_{кер} = \text{var}$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

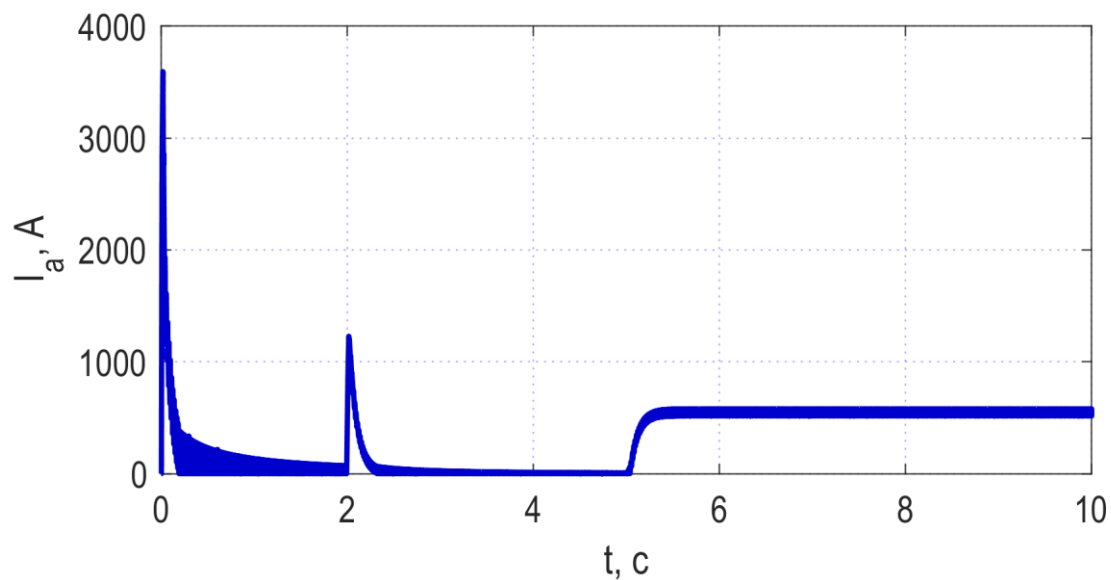


Рисунок 2.23 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за струмом
коли $\alpha_{кер} = var$

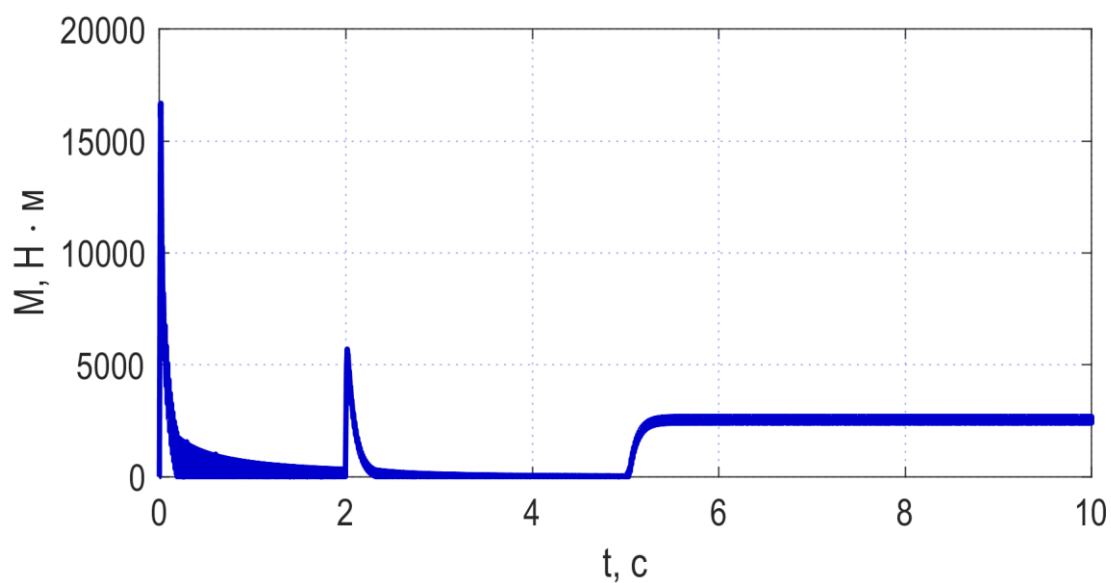


Рисунок 2.24 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за моментом
коли $\alpha_{кер} = var$

Отже на рисунках бачимо понижений момент і струм при пуску, невеликі кидки при зміні кута, але після подачі навантаження швидкість виходить на номінальні показники.

Висновки за розділом 2

У розділі аналізується система ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А з реверсуванням якірного ланцюга включало розробку схеми заміщення з подальшим розрахунком її параметрів. Були отримані природні та штучні швидкісні та механічні характеристики в робочому діапазоні регулювання, а також проаналізовані динаміки коефіцієнта корисної дії та потужності. Аналіз показав, що система має жорсткі характеристики, при цьому максимальна енергоефективність досягається в номінальних та близьких до них режимах роботи, де ККД підтримується на високому рівні.

Математичне моделювання нерегульованого електроприводу на основі системи диференціальних рівнянь у операторній формі виявило особливості перехідних процесів. В розімкненій системі час перехідних явищ становить близько 1 секунди, при цьому спостерігаються значні пускові стрибки струму та моменту, що перевищують номінальні значення. Дослідження показали, що збільшення кута керування дозволяє зменшити ці перевантаження, тому запропоновано пуск двигуна на підвищеному куті з подальшим його зниженням до нуля перед подачею робочого навантаження. Для подальшого вдосконалення системи необхідна розробка замкненого контуру керування, що дозволить стабілізувати швидкість обертання та покращити динамічні характеристики приводу.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

**Розділ 3. Система підлеглого регулювання
електропривода екскаватора ЕКГ-5А**

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Янчий Я.Ю.</i>			<i>Система підлеглого регулювання електропривода екскаватора ЕКГ-5А</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Барановська М.Л.</i>				<i>Н</i>		
<i>Конс.</i>						<i>ЕЕМ-22СК</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Барановська М.Л.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

3.1 Система керування приводом екскаватора ЕКГ-5А

3.1.1 Вибір системи керування приводом екскаватора ЕКГ-5А

Сучасні системи стабілізації швидкості та моменту класифікуються за різними критеріями, зокрема за типом живлення (двигуни постійного чи змінного струму), принципом функціонування (безперервні аналогові або дискретні імпульсні) та характером регулювання (статичні чи астатичні). Особливий інтерес становлять структурні різновиди таких систем, серед яких виділяють три основні архітектури: із загальним суматором, з вільним регулюванням параметрів та з підлеглим регулюванням параметрів.

Системи із загальним суматором характеризуються використанням комбінації безперервних та обмежених зворотних зв'язків, де спеціальні відсічки виключають вплив певних сигналів при досягненні граничних значень параметрів. У таких схемах сумарний сигнал формується шляхом алгебраїчного додавання сигналу завдання та напруг зворотних зв'язків, що надходять на вхід підсилювача. Хоча основний вихідний параметр (наприклад, швидкість) теоретично визначається лише сигналом завдання при наявності безперервного зворотного зв'язку, введення обмежень у зворотні канали призводить до того, що реальне значення регульованої величини залежить також від рівня напруги відсічки. Така особливість ускладнює використання системи, особливо при необхідності одночасної роботи з кількома параметрами, тому на практиці в подібних схемах зазвичай регулюється лише один ключовий параметр (найчастіше швидкість), що спрощує налаштування та експлуатацію пристрою.

Сучасні системи автоматизованого керування електроприводами пропонують різні підходи до регулювання технологічних параметрів. В системах з незалежним регулюванням кожен параметр має окремий регулятор і індивідуальний сигнал завдання, проте в будь-який момент часу активним залишається лише один регулятор, вибір якого здійснюється спеціальним логічним перемикачем. Незважаючи на чіткий принцип дії, такі системи не

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

отримали широкого поширення через значну технічну складність їх практичної реалізації та налаштування.

Більш перспективним виявився підхід з підлеглим регулюванням параметрів СПР, де всі регулятори об'єднані в єдину каскадну структуру. У такій архітектурі сигнал завдання для кожного наступного регулятора формується виходячи з вихідного сигналу попереднього ланцюга, що створює чітку ієрархію впливу на систему. Ця особливість дозволяє проводити послідовне налаштування кожного параметра, починаючи з внутрішніх контурів, при цьому зовнішні параметри не впливають на процес регулювання. Важливою перевагою таких систем є простота впровадження обмежень на технологічні параметри - достатньо встановити граничні значення на виході відповідного регулятора.

Саме тому для керування електроприводом екскаватора ЕКГ-5А було обрано систему з підлеглим регулюванням параметрів. Такий вибір обґрунтований можливістю точного та послідовного налаштування всіх робочих характеристик, починаючи від струму якоря до швидкості обертання, що забезпечує оптимальну динаміку роботи приводу при збереженні стабільності у всьому робочому діапазоні. Крім того, каскадна структура дозволяє ефективно обмежувати пускові струми та моменти, що особливо важливо для важкої екскаваторної техніки з частими пусками та реверсуваннями.

3.1.2 Схема підлеглого регулювання екскаватора ЕКГ-5А

Принцип побудови СПР ґрунтується на ієрархічному структурному поданні об'єкта керування, зокрема силової частини тиристорного електроприводу ТП-Д ЕКГ-5А. Ключовою особливістю таких систем є каскадна організація регулюючих контурів, де кожен наступний рівень підпорядкований попередньому. Це дозволяє реалізувати послідовне впливання на динамічні характеристики приводу, починаючи від внутрішніх параметрів (струм якоря) до зовнішніх (швидкість обертання). Узагальнена архітектура таких багатоконтурних систем (рис. 3.1 [13]), що включає основні

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

функціональні вузли та зв'язки між ними, наведена на рис. 3.1 у спеціалізованій літературі [13]. Такий підхід забезпечує високу гнучкість настроювання та ефективне обмеження технологічних параметрів у робочому діапазоні.

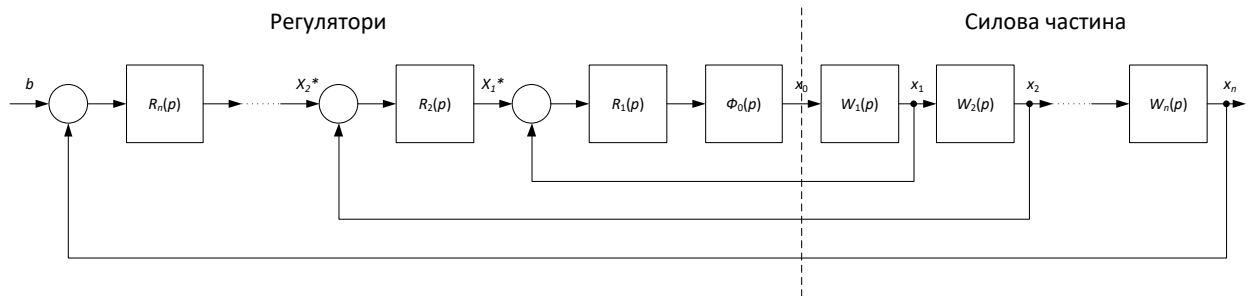


Рисунок 3.1 – 3.1.2 Схема підлеглого регулювання екскаватора ЕКГ-5А:

$x_1, \dots, x_n$ – регульовані величини; $x_1^*, \dots, x_n^*$ – завдання для регульованих величин

Модель об'єкта регулювання формується шляхом декомпозиції на послідовний ланцюг динамічних ланок спрямованої дії, кожна з яких описується власною передавальною функцією $W_i(p)$, $i=1, \dots, n$, де індекс n відображає кількість структурних елементів у поданні системи. Критерієм для такого розбиття служить виділення ключових фізичних параметрів $x_1, \dots, x_n$, які мають принципове значення для процесів регулювання та моніторингу – електричного струму в якірному колі, кутової швидкості обертання ротора, просторового положення вала та інших характеристик, що визначають функціональні властивості приводу. Таке структурне подання дозволяє ефективно аналізувати динамічні процеси в системі та синтезувати алгоритми керування, враховуючи фізичну природу кожної з контрольованих величин [13].

Структура регулюючої частини СПР створюється за чітко визначеними принципами. На початковому етапі проектування передбачається встановлення спеціального фільтру на вході об'єкта регулювання, який виконує подвійну функцію: обмежує смугу пропускання системи та захищає її

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

від впливу зовнішніх перешкод. Це забезпечує стабільність роботи всього комплексу.

Для кожної з контрольованих величин $x_1, \dots, x_n$ створюється окремий контур автоматизованого регулювання, побудований на принципі компенсації відхилень. Кожен такий контур обладнується індивідуальним регулятором $P_i(p), i=1, \dots, n$ з унікальною передавальною функцією, кількість яких точно відповідає кількості регульованих параметрів системи. Для реалізації зворотного зв'язку в кожному контурі передбачається спеціалізований датчик $D_i(p), i=1, \dots, n$, що дозволяє точно відстежувати поточний стан регульованої величини.

Особливістю архітектури є специфічне з'єднання регуляторів – вони об'єднуються послідовно, але в порядку, зворотному до послідовності ланок об'єкта регулювання. Система завдань формується каскадним способом: кожен наступний регулятор (з більшим порядковим номером) генерує управляючий сигнал для попереднього. Така організація створює вкладену структуру керуючих контурів, що й обумовило загальну назву – багатоконтурне підлегле регулювання [13].

Регульовані змінні не рівноцінні. Головною з них є величина зовнішнього контуру, у варіанті приводу екскаватора ЕКГ-5А це буде швидкість

СПР-підхід забезпечує точне узгодження всіх етапів регулювання та ефективне управління складними динамічними процесами.

3.1.3 Розробка системи підлеглого керування екскаватора ЕКГ-5А

Основне завдання випускної роботи полягає у визначенні найкращих параметрів регуляторів для багатоконтурної системи керування екскаватора ЕКГ-5А. Робота виконується за спеціально розробленою методикою, яка передбачає послідовний синтез регулюючих пристроїв, починаючи з внутрішнього контуру струму, через проміжні ланки до зовнішнього швидкісного контуру. Кожен регулятор проектується як послідовний коригуючий пристрій, що має задовольняти низку критично важливих вимог.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

При створенні регулюючих пристроїв особлива увага приділяється компенсації інерційних властивостей відповідних ланок об'єкта керування. Крім того, регулятори повинні забезпечувати астатичні характеристики системи, що гарантує нульову статичну похибку при роботі з певними типами керуючих впливів. Важливим аспектом є оптимізація динамічних процесів за обраними критеріями якості, що дозволяє досягти оптимального співвідношення між швидкодією та стабільністю системи.

У рамках даної роботи проводиться розробка регуляторів системи підлеглого регулювання швидкістю обертання електроприводу екскаватора ЕКГ-5А, побудованого на базі ТП-Д. Система повинна врахувати специфічні вимоги до роботи важкого гірничого обладнання, зокрема необхідність забезпечення плавного пуску, точного позиціонування та стійкості до змін навантаження.

3.2 Моделювання динамічних властивостей системи керування приводом екскаватора

Аналіз динамічних властивостей будемо вести за допомогою MATLAB з задіянням Control System Designer [14, 15].

Робота з налаштування багатоконтурної системи керування (Nested Multiloop Architecture) електроприводом екскаватора ЕКГ-5А в середовищі Control System Designer MATLAB починається з ретельного вивчення динамічних характеристик двигуна постійного струму. Для цього спочатку вводяться всі необхідні параметри електромеханічної системи – опір якоря, індуктивність обмоток, момент інерції, конструктивні коефіцієнти та інші технічні характеристики, отримані як з паспортних даних, так і в результаті експериментальних вимірювань.

Після введення вихідних даних створюється структурна схема вкладених контурів регулювання, де внутрішній контур струму формує основу для зовнішнього контуру швидкості. У Control System Designer кожен контур налаштовується окремо, починаючи з найбільш швидкодіючого внутрішнього контуру. Для цього використовуються інтерактивні інструменти аналізу

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

частотних характеристик, що дозволяють візуально оцінювати запаси стійкості за амплітудою та фазою.

Особлива увага приділяється вибору типу регуляторів – для внутрішнього контуру струму зазвичай вибирається ПІ-регулятор, тоді як для зовнішнього контуру швидкості може застосовуватись ПІД-регулятор з обмеженням похідної складової. Параметри регуляторів підбираються ітераційно з використанням методів частотного синтезу, при цьому враховується взаємний вплив контурів один на одного.

Після попереднього налаштування проводиться детальний аналіз перехідних процесів при різних режимах роботи – пуску, гальмуванні, зміні навантаження. Це дозволяє виявити потенційні проблеми стійкості та внести коригування в параметри регуляторів. Важливим етапом є введення обмежень на струм якоря та швидкість обертання, що забезпечує захист системи при екстремальних навантаженнях [14, 15].

Фінальна стадія налаштування передбачає комплексну оцінку якості регулювання за допомогою критеріїв інтегральної якості, аналізу чутливості системи до змін параметрів та перевірки роботи в умовах дії збурень. Отримані налаштування експортуються для подальшого використання в повноцінній моделі електропривода, що дозволяє перевірити роботу системи в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації екскаватора.

Загальна модель для налаштування демонструється на рис. 3.2.

АФЧХ, полюси контурів струму і швидкості та динаміка зміни швидкості в замкненій системі наводяться на рис. 3.3–3.7.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

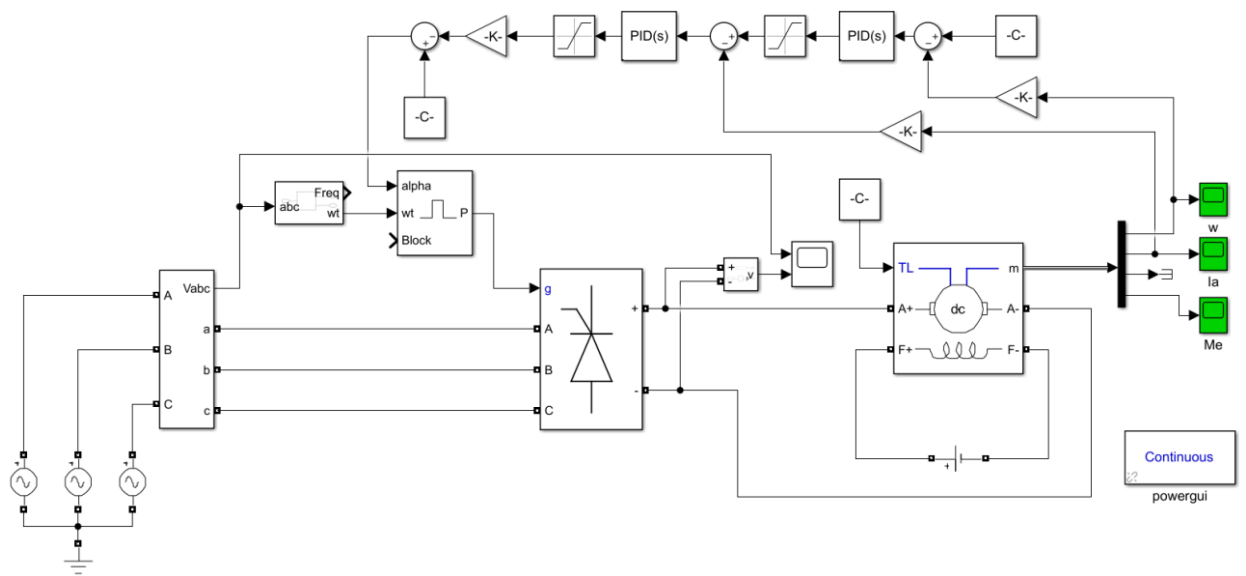


Рисунок 3.2 – Комп'ютерна модель СПР ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А у системі MATLAB/Simulink/SPS

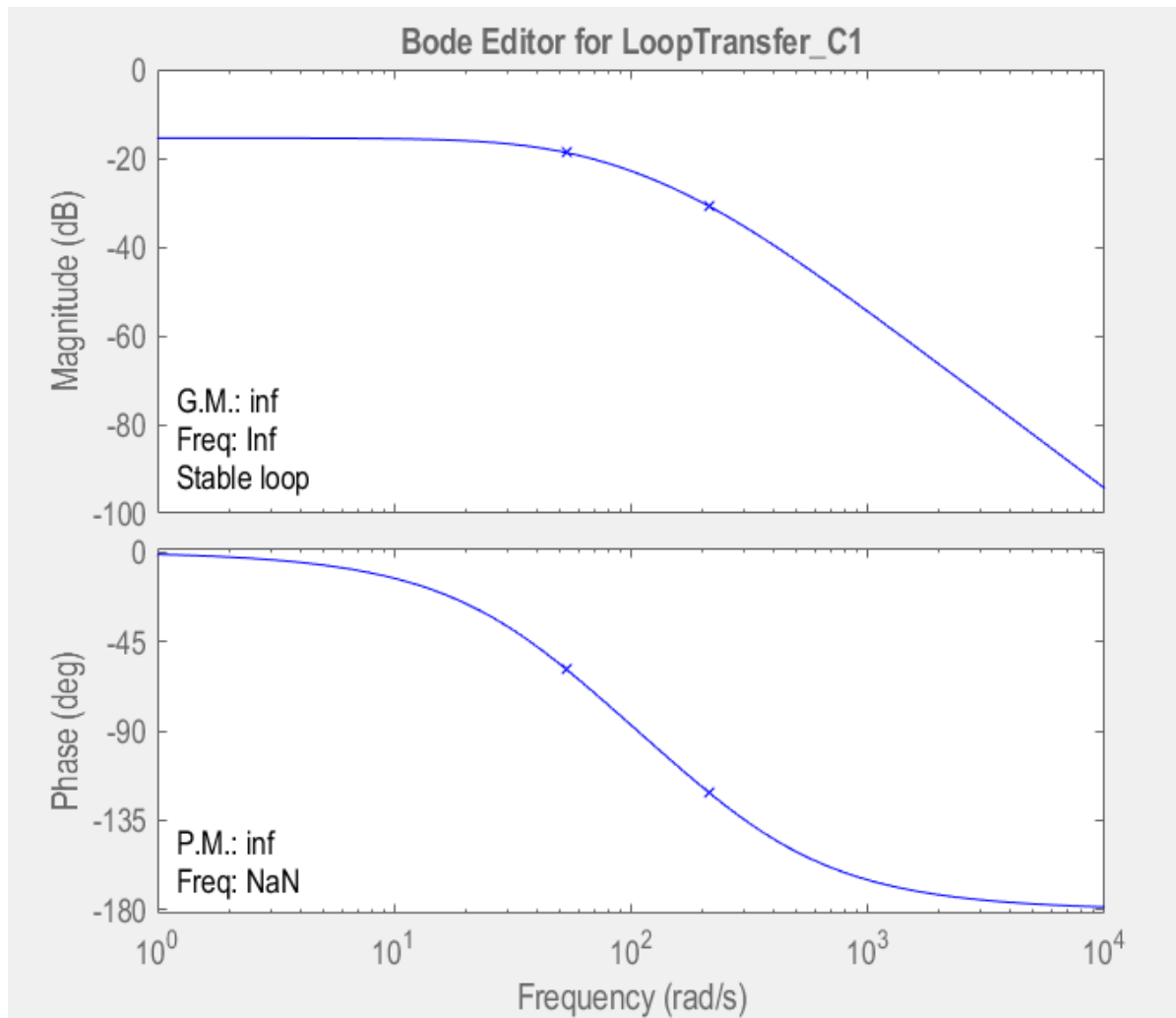


Рисунок 3.3 – Амплітудно фазо-частотні властивості внутрішнього контуру струму системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14

Арк.

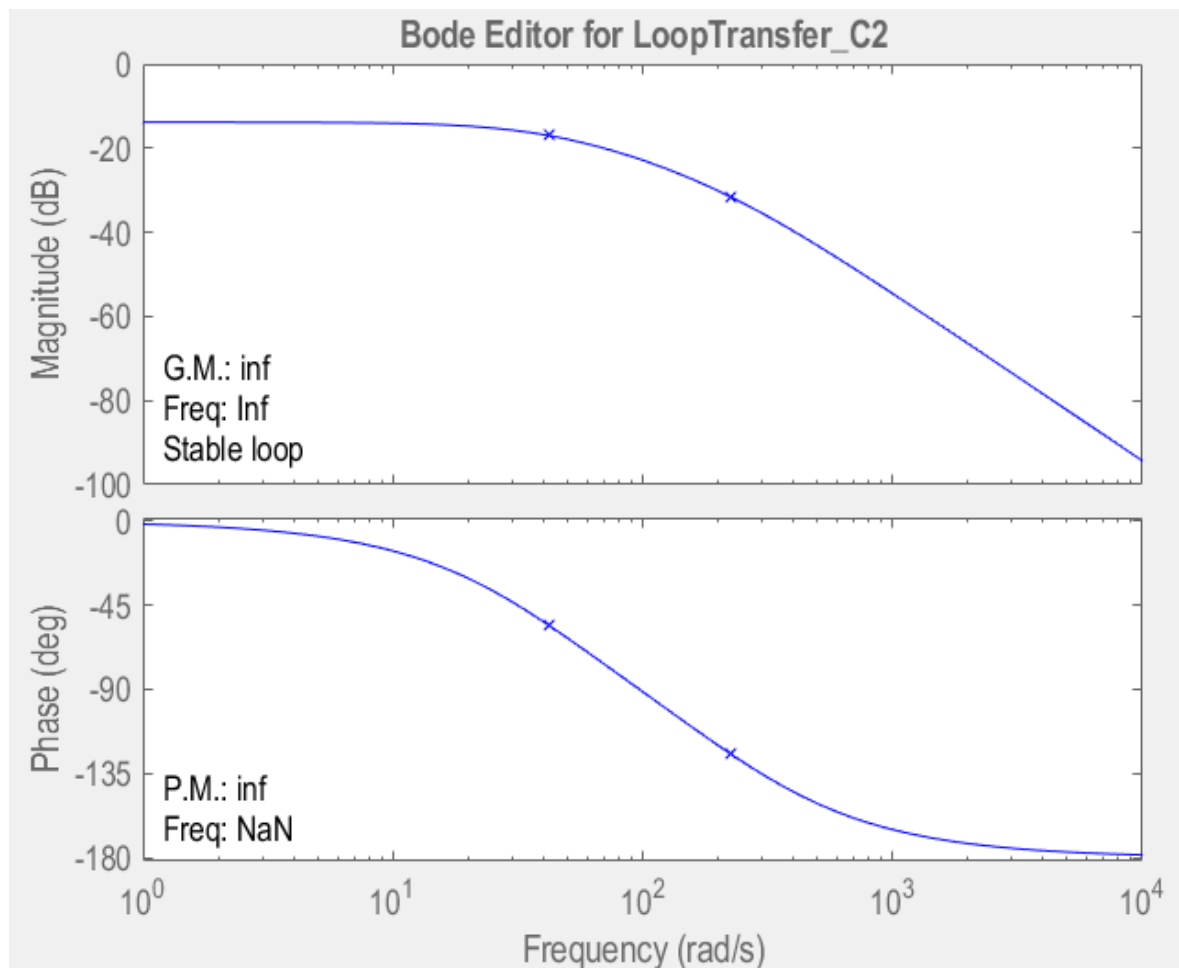


Рисунок 3.4 – Амплітудно фазо-частотні властивості зовнішнього контуру швидкості системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А

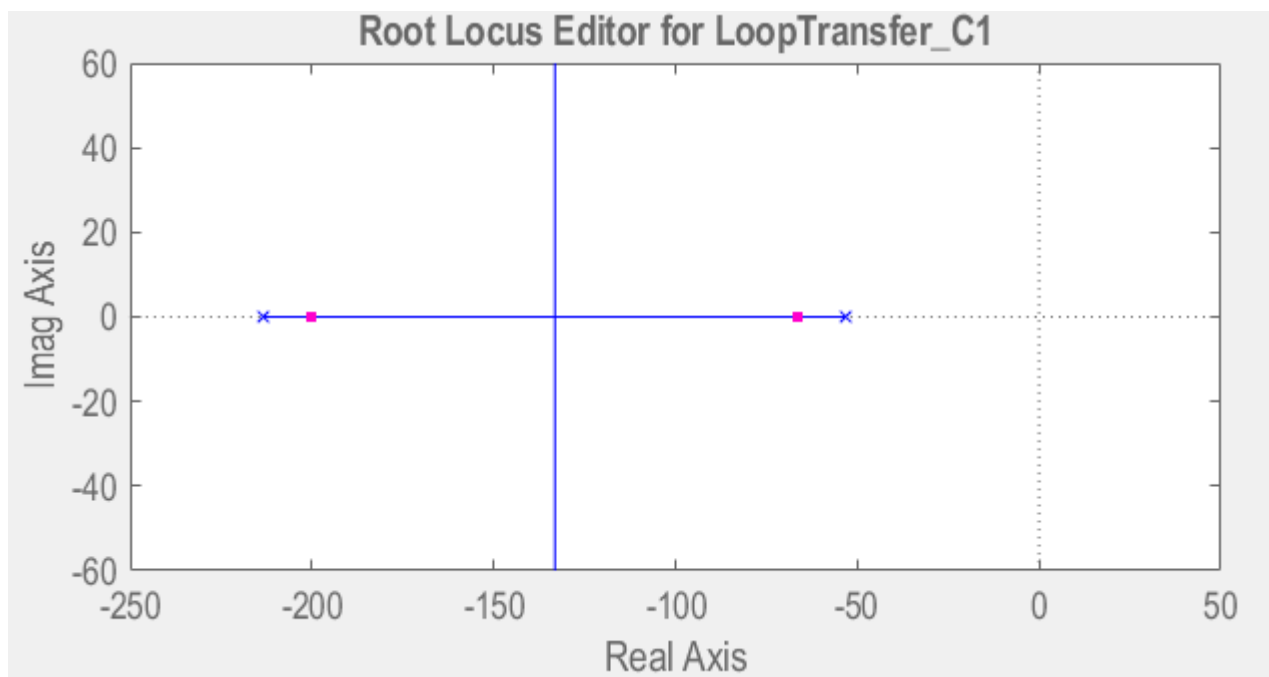


Рисунок 3.5 – Полюси внутрішнього контуру струму системи ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

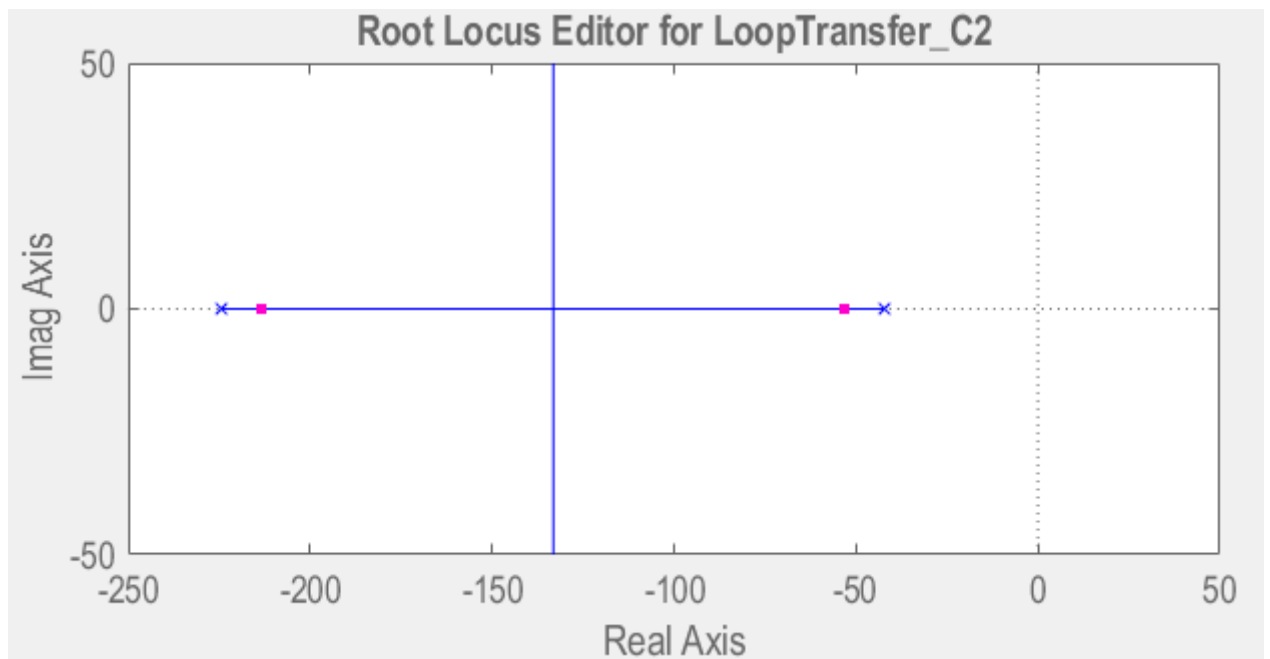


Рисунок 3.6 – Полюси зовнішнього контуру швидкості системи ТП-Д
екскаватора ЕКГ-5А

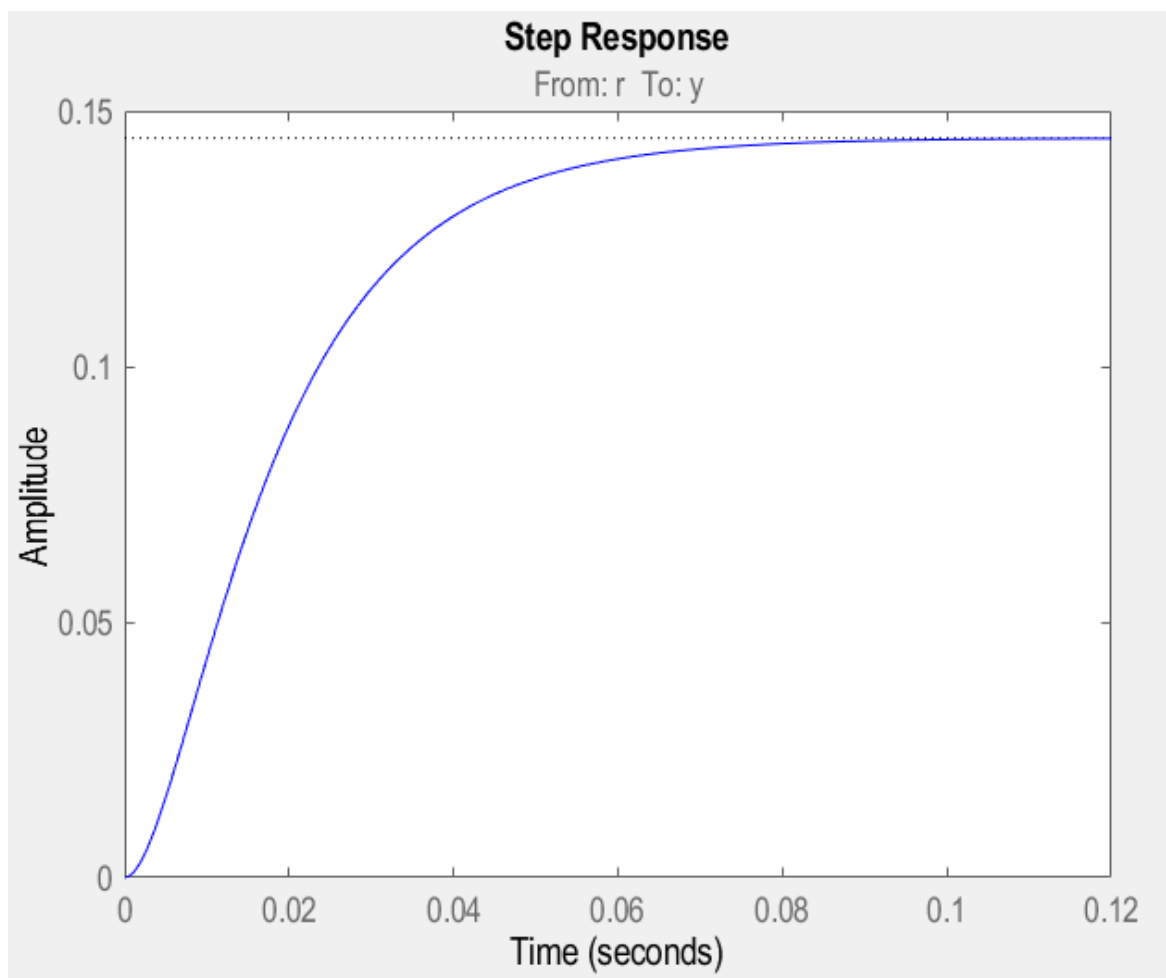


Рисунок 3.7 – Динамічні властивості ТП-Д екскаватора ЕКГ-5А за швидкістю
в СПР

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Отримані у Control System Designer матриці стану для контурів:

Струму

$$A_c = \begin{bmatrix} -266,3 & -5,428 \cdot 10^4 \\ 0,2088 & -0,008035 \end{bmatrix}; B_c = \begin{bmatrix} 9184 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (3.1)$$

$$C_c = [0 \quad 1]; D_c = 0.$$

Швидкості

$$A_c = \begin{bmatrix} -266,3 & -5,428 \cdot 10^4 \\ 0,2088 & -0,008035 \end{bmatrix}; B_c = \begin{bmatrix} 9184 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (3.2)$$

$$C_c = [0 \quad 1]; D_c = 0.$$

Контури СПР екскаватора ЕКГ-5А є стійким, тому що умови, що визначаються за амплітудно-фазовою частотною характеристикою (АФЧХ) та за полюсами системи.

З рис. 3.3 і рис. 3.4 видно, що для контурів струму, як запаси по фазі, так і запаси по коефіцієнту підсилення є позитивними, що вказує на стійкість СПР екскаватора.

За розподілами полюсів передавальних функції замкнутих контурів також видно, що СПР асимптотично стійка, так як всі полюси мають від'ємну дійсну частину, тобто розташовані в лівій півплощині комплексної площини,.

Таким чином, якщо АФЧХ показує позитивні фазні і амплітудні запаси, а полюси замкнутої системи лежать ліворуч від уявної осі, то система підлеглого регулювання є стійкою.

3.3 Принципова схема електропривода екскаватору ЕКГ-5А

Схема системи електропривода екскаватора ЕКГ-5А за схемою ТП-Д і перетворювачем виконаним на тиристорах з реверсуванням у колі якоря (рис. 3.8).

Реверсивний перетворювач керується за допомогою роздільної системи імпульсно-фазового управління. У цій системі керуючі імпульси подаються виключно на той комплект, який у даний момент проводить струм.

Керуючі сигнали на другий міст в цей час не подаються.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

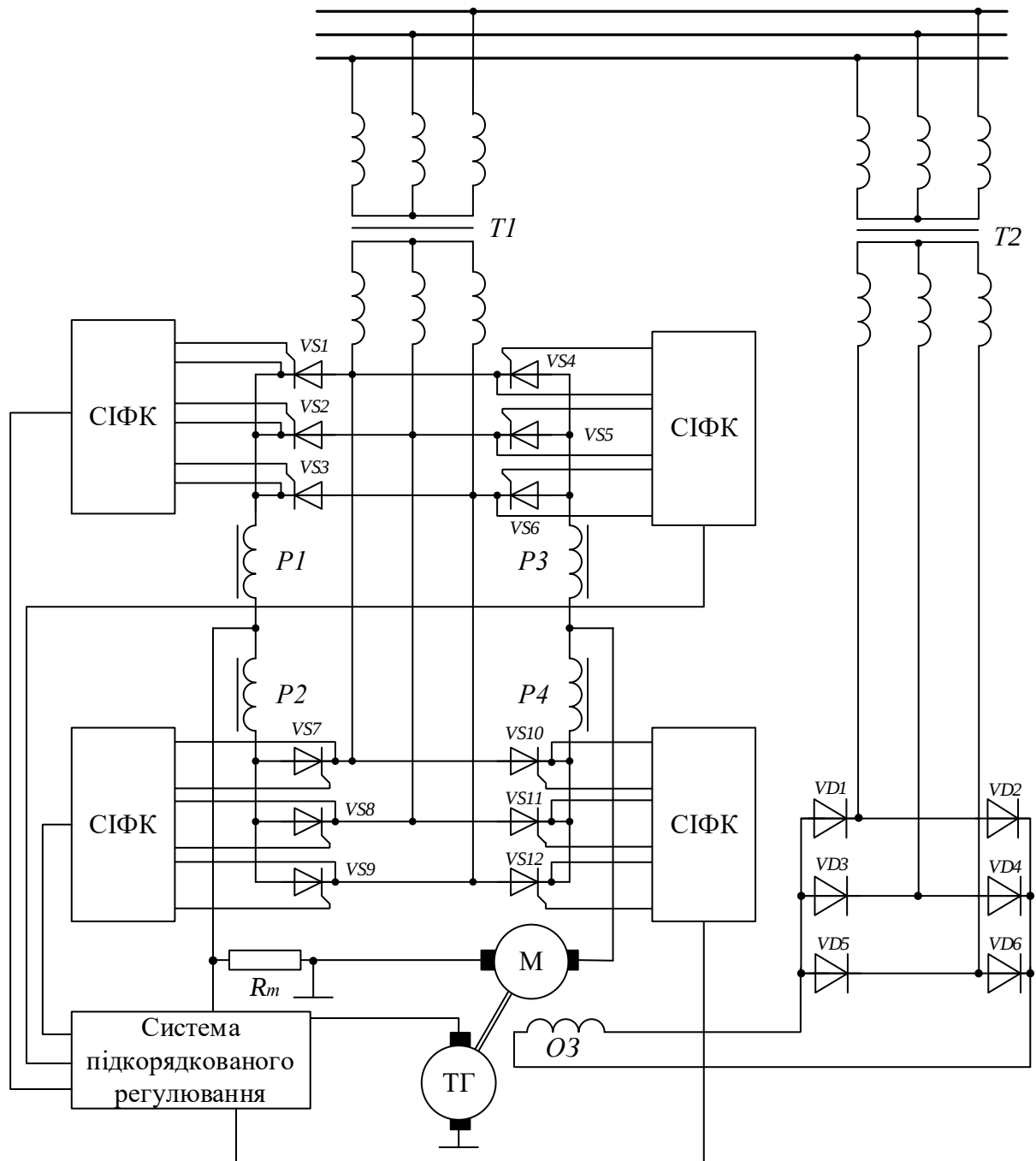


Рисунок 3.8 – Принципова схема системи ТП-Д електроприводу

3.4 Захист випрямлячів електропривода екскаватора

Струмівий захист є критично важливим елементом у схемі тиристорного перетворювача, оскільки напівпровідникові вентиля чутливі до перевантажень і струмів короткого замикання. Основна функція захисту полягає у безперервному моніторингу струму та його обмеженні в межах допустимих значень. При незначних перевищеннях номінального струму система може генерувати попереджувальний сигнал, що дозволяє оператору вручну знизити

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

навантаження або активувати автоматичний регулятор для стабілізації режиму роботи. Однак у разі критичних перевантажень або коротких замикань захист має негайно відключати перетворювач або його пошкоджену секцію, запобігаючи руйнуванню напівпровідникових елементів.

Селективність захисту забезпечує можливість локалізувати пошкодження. Наприклад, при зовнішніх коротких замиканнях або інверсійних перекиданнях відключається весь перетворювач, тоді як при внутрішніх пробоях вентилів достатньо ізолювати лише несправний компонент, продовжуючи роботу інших секцій. Для досягнення максимальної ефективності струмовий захист повинен відповідати вимогам швидкодії, чутливості та надійності.

У потужних перетворювачах із випрямленим струмом понад 1000 А застосовуються автоматичні вимикачі типу АЗ700, які захищають вентиля від зовнішніх коротких замикань і перевантажень на стороні постійного струму. Для обмеження струмів КЗ протягом часу спрацьовування автомата використовуються реактори, включені у випрямлений ланцюг. Однак реактори не забезпечують захисту від внутрішніх коротких замикань у самому перетворювачі або після реактора, тому основним методом обмеження струму при великих перевантаженнях є струмова відсічка.

Для запобігання перенапругам, що виникають під час комутаційних процесів, застосовуються RC-ланцюжки, підключені паралельно кожному тиристорі (рис. 3.9). Конденсатори обмежують швидкість зростання напруги при закритті вентиля, а послідовні резистори знижують струмові навантаження на ключові елементи. Додатково для захисту від перенапруг, спричинених комутацією трансформатора (рис. 3.10), використовуються міжфазні RC-фільтри.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

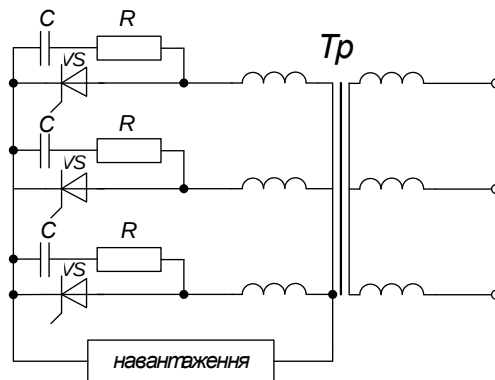


Рисунок 3.9 – Схема захисту від комутаційних перенапруг

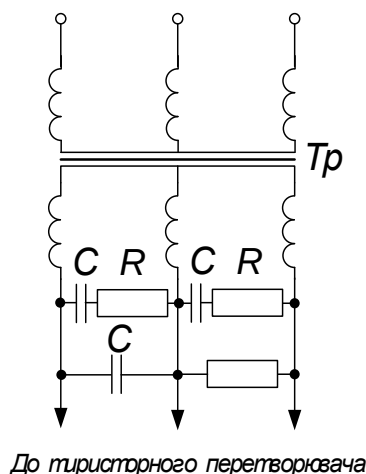


Рисунок 3.10 – Схема захисту вентилів від перенапруг під час комутацій трансформатора

Таким чином, комплексний захист тиристорних перетворювачів включає як струмове обмеження, так і захист від перенапруг, що забезпечує стабільну та безпечну роботу електронних компонентів у складних експлуатаційних умовах.

3.5 Вибір пристроїв захисту перетворювача

Запобіжники вибираємо по номінальній напрузі перетворювача і струму тиристорів.

Беремо запобіжники ПП-57-34: $I_{ном} = 250 \text{ A}$; $I_{пл.вст} = 250 \text{ A}$;
 $U_{ном} = 660 \text{ В}$.

На вторинній обмотці трансформатора застосовуємо автомат АЗ700 зі струмом розчіплювача:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$I_{н.розч} = \kappa_9 \cdot \kappa_2 \cdot \kappa_i \cdot I_d = 1,2 \cdot 0,817 \cdot 1,1 \cdot 490 = 528,43 \text{ А} \quad (3.3)$$

Уставки розчіплювача.

$$I_{уст.эм} \leq I_{Вкз} = \frac{100}{U_{\kappa} \% } I_d = \frac{100}{6,5} \cdot 490 = 7538,46 \text{ А.} \quad (3.4)$$

Беремо АЗ790Б В А $U_n = 460 \text{ В}$, $I_n = 800 \text{ А}$, $I_{уст.эм} = 4000 \text{ А}$.

Захист тиристорів від КЗ на боці постійного струму здійснює автомат ВА–53–39 $U_n = 460 \text{ В}$, $I_n = 630 \text{ А}$.

Для захисту тиристорів від перенапруг застосовуємо RC-ланцюги.

$$C_1 = \frac{10 \cdot I_{всер ном}}{U_{ном}} = \frac{10 \cdot 0,33 \cdot 490}{400} = 4,04 \text{ мкФ.} \quad (3.5)$$

$$R_1 = \frac{10 \cdot U_{ном}}{I_{TAV}} = \frac{10 \cdot 400}{528,43} = 7,57 \text{ Ом.} \quad (3.6)$$

Для зменшення перенапруг внаслідок відключення трансформаторів також беремо RC-ланцюг:

$$C_2 = \frac{55 \cdot I_{02}}{(c_{дон.е}^2 - 1) \cdot U_{2\phi}} = \frac{55 \cdot 20,42}{(1,5^2 - 1) \cdot 255} = 3,52 \text{ мкФ;} \quad (3.7)$$

$$I_{02} = 0,05 \cdot I_{1\phi} \cdot \kappa_{mp} = 0,05 \cdot 30,05 \cdot 13,59 = 20,42 \text{ А,} \quad (3.8)$$

де $c_{дон.е} = 1,5$.

$$U_{c2} \approx 2,6 \cdot U_{2\phi} = 2,6 \cdot 255 = 663 \text{ В.} \quad (3.9)$$

$$R_2 \approx 0,52 \frac{U_{2\phi}}{I_{02}} = 0,52 \cdot \frac{255}{20,42} = 6,49 \text{ Ом.} \quad (3.10)$$

Струм в розрядних ланцюгах:

$$I_R = 0,25 \cdot I_{02} = 0,25 \cdot 20,42 = 5,105 \text{ А.} \quad (3.11)$$

Потужність розсіювана на розрядних опорах.

$$\Delta P_R = I_R^2 \cdot R_2 = 5,105^2 \cdot 6,49 = 169,14 \text{ Вт.} \quad (3.12)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки за розділом 3

У третьому розділі досліджено систему підлеглого регулювання швидкістю електроприводу підйомного механізму екскаватора ЕКГ-5А. Розроблено структурну схему системи, спроектовано регулятори для контурів струму та швидкості. Для аналізу динамічних властивостей виконано симуляції замкненої системи тиристорного електропривода постійного струму екскаватора. Результати моделювання відображено у вигляді графіків перехідних процесів за швидкістю. Проаналізовані АФЧХ і полюси передавальних функцій контурів показали, що система асимптотично є стійкою.

Проведене дослідження підтвердило ефективність застосування системи підлеглого регулювання для екскаваторного тиристорного електроприводу. Отримані показники демонструють її переваги та обґрунтовують доцільність впровадження у реальних умовах використання для навантаження руди в напіввагони на шахтах. Додатково у роботі розглянуто питання захисту тиристорного перетворювача, для якого розроблено та проаналізовано схеми захисту від аварійних режимів роботи, зокрема коротких замикань та перевантажень.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки

1. У першому розділі досліджено операційні особливості екскаватора ЕКГ-5А, зокрема його функціональне призначення та роль у технологічному процесі управління залізничними перевезеннями на підприємстві АТ «Кривбасзалізрудком». Проаналізовано ключові виробничі завдання, які вирішує дана техніка у складі транспортної інфраструктури.

2. Другий розділ містить детальний огляд технічних характеристик та конструктивних особливостей екскаватора ЕКГ-5А, з акцентом на принципи роботи основного електротехнічного обладнання. Особливу увагу приділено аналізу експлуатаційних вимог до електроприводів, що забезпечують функціонування головних робочих механізмів машини.

3. У рамках дослідження виконано розрахунки потужностних параметрів двигуна для приводу підйомного механізму. В результаті обґрунтованого вибору було прийнято рішення про використання двигуна постійного струму з незалежною системою збудження, що відповідає технічним вимогам експлуатації.

4. Для реалізації ефективного регулювання швидкості підйомного механізму запропоновано застосування тиристорного електроприводу з реверсивною схемою керування в ланцюзі якоря. У ході проектування здійснено вибір ключових компонентів системи: силового трансформатора, реверсивного тиристорного блоку з двох шестипульсних випрямлячів та згладжуючого реактора.

5. На етапі симуляції розроблено еквівалентну схему тиристорного приводу, визначено необхідні параметри для її подальшого аналізу. Результати дослідження включають побудовані статичні характеристики системи, що відображають її швидкісні, механічні та енергетичні параметри в робочому діапазоні регулювання.

6. Комп'ютерна симуляція дозволило порівняти динамічні характеристики розімкнутої та замкнутої систем керування. Аналіз отриманих перехідних характеристик за струмом, моментом і швидкістю підтвердив

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

переваги тиристорного приводу, зокрема зниження пускових струмів і моментів, а також підвищення точності регулювання швидкості.

7. Окремий розділ присвячено розробці комплексної системи захисту тиристорного перетворювача, що включає ефективні схеми захисту від аварійних режимів роботи, таких як короткі замикання та перевантаження.

Результати дослідження свідчать про значні переваги системи підлеглого регулювання швидкості для тиристорного електроприводу екскаватора, що робить її перспективною для впровадження у реальних умовах кар'єрної експлуатації.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Список використаних джерел

1. Оновлення технологічного парку. АТ «Кривбасзалізрудком»: веб-сайт. URL: <https://www.krruda.dp.ua/onovlennya-texnologichnogo-parku/> (Дата звернення: 14.05.2025).
2. Бондаренко А.О. Гірничі машини для відкритих гірничих робіт : навч. посібник. Дніпро: НГУ, 2017. 123 с.
3. Бизов В.Ф., Франчук В.П. Гірничі машини. Кривий Ріг: Мінерал, 2004. 468 с.
4. Крата В.П. Автоматизований електропривод механізму напору екскаватора ЭКГ-5а: пояснювальна записка кваліфікаційної роботи ступеню магістра. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. 55 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/ef44fe0a-42d1-4261-89f6-e261958caf78/content>
5. Павленко Т.П., Донець О.В., Петренко О.М. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 132 с.
6. Коренькова Т.В., Ковальчук В.Г., Калінов А.П. Автоматизований електропривод типових промислових механізмів. Практикум і тестові завдання: навчальний посібник. 2-ге видання, перероблене і доповнене. Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2023. 190 с.
7. Двигун підйому ДЕ-816 200-220 кВ. «ТЕХНО-МАШ»: веб-сайт. URL: <https://ekg5a.com.ua/product/dvigatel-de-816-200-kvt/> (Дата звернення: 25.05.2025).
8. Казачковський М.М. Комплектний електропривод. Дніпропетровськ: НГУ, 2003. 226 с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

9. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2001. 410 с.

10. Колб А.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: навч. посібник ; 2-е вид. перероб. і доп. Дніпро: Національний гірничий університет, 2011. 540 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. DC Machine. Implement wound-field or permanent magnet DC machine. Mathworks: веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/dcmachine.html> (Дата звернення: 25.05.2025).

13. Панкратов А.І. Системи керування електроприводами. Краматорськ: ДДМА, 2018. 225 с.

14. Design Multiloop Control System. Mathworks: веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/design-multiloop-control-system.html> (Дата звернення: 25.05.2025).

15. Feedback Control Architectures in Control System Designer. Mathworks: веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/feedback-control-architectures.html> (Дата звернення: 25.05.2025).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-14	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		