

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Удосконалення системи керування електроприводом постійного струму
механізму повороту екскаватора ЕКГ-10 АТ «ПівдГЗК»

Здобувач групи ЕЕМ-23ск _____ Сергій КОШЕВОЙ

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

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

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

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

Кривий Ріг

2026

Криворізький національний університет

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *бакалавр*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Кошевого Сергія Сергійовича

1. Тема роботи: Удосконалення системи керування електроприводом постійного струму механізму повороту екскаватора ЕКГ-10 АТ «ПівдГЗК»
2. Строк подання здобувачем роботи: 10 червня 2026 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: метою роботи є побудова сучасної системи регулювання швидкості механізму повороту екскаватора ЕКГ-10 на базі двигуна постійного струму та тиристорного перетворювача для забезпечення високої точності позиціювання та покращення динамічних показників приводу.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): аналіз електромеханічного електрообладнання кар'єрного екскаватора ЕКГ-10; статика електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10; динаміка електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): загальний вигляд екскаватора ЕКГ-10; схема тиристорного електроприводу механізму повороту екскаватора ЕКГ-10; статика електродвигуна та системи електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10; динаміка системи електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10; симуляційна модель САК електроприводом механізму повороту платформи екскаватора із запізнювально-випереджувальним пристроєм

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Загальна частина	18.05.26–22.05.26
2	Спеціальна частина	23.05.26–30.05.26
3	Проектно-конструкторська розробка	31.05.26–05.06.26
4	Оформлення пояснювальної записки	06.06.26–10.06.26
5	Оформлення презентації	11.06.26–15.06.26

Дата видачі завдання: 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____

Сергій КОШЕВОЙ

Керівник роботи _____

Олексій МИХАЙЛЕНКО

РЕФЕРАТ

Робота присвячена модернізації та вдосконаленню системи автоматичного керування електроприводом механізму повороту кар'єрного екскаватора ЕКГ-10. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення продуктивності, надійності та енергоефективності гірничого обладнання, що експлуатується в умовах частих реверсів, ударних навантажень та значної інерції поворотної платформи.

Метою роботи є побудова сучасної системи регулювання швидкості механізму повороту екскаватора ЕКГ-10 на базі двигуна постійного струму та тиристорного перетворювача для забезпечення високої точності позиціонування та покращення динамічних показників приводу.

У дослідженні застосовано методи аналітичного розрахунку механічних навантажень, статичного аналізу характеристик системи «тиристорний перетворювач – двигун» (з детальним розглядом зон неперервних та переривчастих струмів), а також симуляції в MATLAB/Simulink.

Обґрунтовано вибір основного силового обладнання: двигуна постійного струму ABB 3BSM003050 DMI 315V, реверсивного тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-500/440, силового трансформатора та згладжувального реактора. Для контуру швидкості синтезовано запізнювально-випереджувальний коригувальний пристрій.

Результати симуляцій підтвердили здатність розробленої системи ефективно компенсувати стрибкоподібні зміни механічного навантаження, забезпечувати плавність перехідних процесів та суттєво знижувати динамічні навантаження на частини екскаватора ЕКГ-10. Запропоновані технічні рішення є технічно обґрунтованими та рекомендованими до практичного впровадження для модернізації екскаваторів на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: екскаватор ЕКГ-10, механізм повороту, електропривод постійного струму, тиристорний перетворювач, запізнювально-випереджувальний регулятор, динаміка електропривода.

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.00.Р	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ЗМІСТ

Розділ 1. Аналіз електромеханічного електрообладнання кар'єрного екскаватора ЕКГ-10.....	9
1.1 Технологічний процес видобутку руди в кар'єрі Північного ГЗК та застосування у ньому екскаваторів ЕКГ-10	10
1.2 Електромеханічне електрообладнання кар'єрного екскаватора ЕКГ-10	12
1.3 Прорахування механічної частини з обранням електродвигуна механізму повороту екскаватора.....	15
Висновки до розділу 1	24
Розділ 2. Статика електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10...	25
2.1 Вибір силової частини електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10	26
2.1.1 Підбір тиристорного перетворювача електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10	26
2.1.2 Прорахунок силового трансформатора	27
2.1.3 Підбір реактора.....	29
2.2 Прорахунок силової частини електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10	30
2.2.1 Прорахунок замісної схеми електропривода	30
2.2.2 Прорахунок замісної схеми двигуна 3BSM003050 DMI 315V.....	31
2.2.3 Прорахунок параметрів перетворювача КТЕ5-АС-500/440-EP2711-С01-УХЛ4	31
2.2.4 Прорахунок обмотки незалежного збудження	32
2.2.5 Прорахунок силового ланцюга обмотки незалежного збудження ..	33
2.3 Статика електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10.....	33
2.3.1 Статика електродвигуна 3BSM003050 DMI 315V.....	33

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.00.3	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.3.2	Прорахунок статички системи ТП-Д механізму повороту екскаватора ЕКГ-10.....	36
	Висновки до розділу 2	41
	Розділ 3. Динаміка електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10	42
3.1	Симуляційний аналіз динаміки електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10	43
3.2	Керування електроприводом механізму повороту екскаватора за допомогою коригувального пристрою з випереджувальною та запізнювальною ланками	44
3.2.1	Побудова запізнювальної ланки	47
3.2.2	Побудова випереджувальної ланки.....	48
3.2.3	Остаточна побудова та перевірка запізнювально-випереджувальної ланки	49
3.2.4	Симуляція роботи САК електроприводом механізму повороту платформи екскаватора ЕКГ-10	50
	Висновок до розділу 3	52

ВСТУП

Механізм повороту є одним із ключових вузлів кар'єрного екскаватора, від якого безпосередньо залежить продуктивність машини, точність виконання технологічних операцій і рівень динамічних навантажень на металоконструкції. Використання застарілих електроприводів постійного струму з релейними або електромашинними системами керування супроводжується низкою суттєвих недоліків, серед яких обмежена точність регулювання швидкості, значні втрати електроенергії, підвищене тепловиділення, а також складність технічного обслуговування через наявність зношуваних елементів.

У процесі роботи екскаватора механізм повороту піддається частим реверсам, змінним навантаженням і ударним впливам, що висуває підвищені вимоги до динамічних характеристик електропривода. Недостатня швидкодія та неточність регулювання призводять до перевантажень, вібрацій і нерівномірності руху, що, у свою чергу, спричиняє прискорений знос редукторів, підшипників та інших механічних елементів. Це збільшує ймовірність аварійних ситуацій, тривалість простоїв і витрати на ремонт. Крім того, морально застарілі системи керування не забезпечують достатнього рівня автоматизації та не дозволяють ефективно інтегрувати електропривод у сучасні автоматизовані системи керування технологічними процесами підприємства.

Сучасні тенденції розвитку електроприводів передбачають широке впровадження напівпровідникових перетворювачів, цифрових систем керування та інтелектуальних алгоритмів, що дає змогу істотно покращити якість регулювання та енергетичні показники. Модернізація електропривода механізму повороту кар'єрного екскаватора із використанням сучасних перетворювачів і мікропроцесорних систем керування дозволяє забезпечити плавний пуск і гальмування, точне підтримання заданої швидкості та моменту, зменшення пускових струмів і динамічних навантажень. Це сприяє підвищенню ресурсу як електричної, так і механічної частини обладнання.

Окремо слід відзначити питання енергоефективності, яке набуває особливої актуальності в умовах зростання вартості електроенергії та необхідності зниження експлуатаційних витрат. Сучасні системи

					<i>КНУ.РБ.141.26.250с.08.00.ВС</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

електропривода забезпечують більш раціональне використання електроенергії, зменшення втрат у перехідних режимах та можливість рекуперації енергії під час гальмування. Це дозволяє не лише знизити витрати на електроенергію, але й покращити показники якості електричної енергії в мережі підприємства.

Таким чином, модернізація електропривода постійного струму механізму повороту екскаватора ЕКГ є необхідною умовою підвищення технічного рівня гірничого обладнання, забезпечення його надійної та економічної роботи, зменшення витрат на обслуговування та ремонт, а також створення передумов для впровадження сучасних систем автоматизації та цифрового управління на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

					<i>КНУ.РБ.141.26.250с.08.00.ВС</i>	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

**Розділ 1. Аналіз електромеханічного
електрообладнання кар'єрного
екскаватора ЕКГ-10**

					<i>КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Аналіз електромеханічного електрообладнання кар'єрного екскаватора ЕКГ-10</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Кошевой С.С.</i>				<i>Н</i>	<i>9</i>	
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>ЕЕМ-23ск</i>		
<i>Конс.</i>								
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

1.1 Технологічний процес видобутку руди в кар'єрі Північного ГЗК та застосування у ньому екскаваторів ЕКГ-10

Технологічний процес видобутку залізної руди в кар'єрі Північного гірничо-збагачувального комбінату є складною багатостадійною системою, що поєднує гірничі, транспортні та переробні операції і реалізується за відкритим способом розробки родовища. Видобуток починається з підготовки гірських порід до виймання, що включає буріння свердловин у масиві та проведення буропідривних робіт, у результаті яких тверді кварцити руйнуються до стану, придатного для навантаження. Після вибуху утворюється розпушена гірнична маса, яка розміщується на уступах кар'єру і підлягає подальшому виймально-навантажувальному процесу [1].

Основну роль у цьому процесі відіграють кар'єрні екскаватори типу ЕКГ, зокрема ЕКГ-10, які є базовими машинами циклічної дії. Вони здійснюють виймання гірничої маси з вибою та навантаження її у транспортні засоби. У кар'єрі Північного ГЗК екскаватори ЕКГ-10 використовуються як на рудних, так і на розкривних роботах, а також на перевантажувальних пунктах, де формується потік гірничої маси для подальшого транспортування. Конструктивно ці машини оснащені ковшем місткістю близько 10 кубічних метрів, що забезпечує значну продуктивність при роботі з твердими породами, а їх канатно-механічна схема дозволяє ефективно працювати в умовах великих навантажень і значної глибини кар'єру.

Після навантаження екскаваторами гірнична маса транспортується різними видами транспорту залежно від прийнятої технологічної схеми. У кар'єрі Північного ГЗК застосовується комбінована система транспортування, яка включає автомобільний, залізничний та конвеєрний транспорт. Автосамоскиди великої вантажопідйомності доставляють руду до перевантажувальних пунктів або до приймальних пристроїв комплексів циклічно-потокової технології, після чого вона може передаватися на конвеєрний транспорт або залізничні склади для подальшого переміщення. Залізничний транспорт широко

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

використовується для доставки гірничої маси до дробильних установок та на відвали, що дозволяє забезпечити безперервність виробничого процесу.

Особливістю технологічного процесу є застосування циклічно-поточної технології, при якій поєднуються циклічні процеси екскавації з безперервним транспортуванням по конвеєрах [1]. Це дозволяє значно підвищити ефективність видобутку, зменшити витрати на транспортування та забезпечити стабільне завантаження збагачувальних фабрик. Доставка руди до дробильних комплексів здійснюється як з використанням автотранспорту, так і залізничних составів, після чого подрібнена руда надходить на конвеєрні лінії.

Після видобутку і транспортування руда надходить на збагачувальні фабрики, де проходить стадії дроблення, подрібнення у кульових млинах, класифікації та магнітної сепарації з метою отримання залізорудного концентрату. Відходи збагачення транспортуються у хвостосховища, а готовий концентрат після зневоднення направляється на склади та відвантажується споживачам залізничним транспортом.

У цій технологічній схемі екскаватори ЕКГ-10 виконують ключову функцію, оскільки саме вони забезпечують первинне переміщення гірничої маси та формують вантажопотоки. Від їх продуктивності, надійності та динамічних характеристик залежить ефективність роботи всього кар'єру. Вони працюють у складних умовах циклічних навантажень, частих пусків і зупинок, а також при змінних фізико-механічних властивостях порід, що вимагає високої потужності приводу та точного керування робочими органами. Використання екскаваторів цього типу дозволяє забезпечити необхідні обсяги видобутку, а їх модернізація та впровадження сучасних систем керування сприяє підвищенню продуктивності, зниженню енергоспоживання та покращенню умов праці персоналу.

Таким чином, технологічний процес видобутку руди в кар'єрі Північного ГЗК є комплексною системою, в якій екскаватори ЕКГ-10 відіграють центральну роль як основне виймально-навантажувальне обладнання, забезпечуючи зв'язок між етапами руйнування гірської маси, транспортування та подальшої переробки руди.

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1.2 Електромеханічне електрообладнання кар'єрного екскаватора ЕКГ-10

Електромеханічне обладнання кар'єрного екскаватора типу ЕКГ-10 (рис. 1.1) являє собою складний комплекс взаємопов'язаних електричних машин, силових перетворювачів, механічних передач і систем керування, що забезпечують виконання всіх робочих операцій машини. Конструктивно екскаватор складається з ходової частини, поворотної платформи та робочого обладнання, причому основні електромеханічні вузли зосереджені саме на поворотній платформі, де розміщуються приводи підйому, напору, повороту, допоміжні механізми, а також силове електрообладнання, включаючи трансформатори, розподільчі пристрої та перетворювальні агрегати.

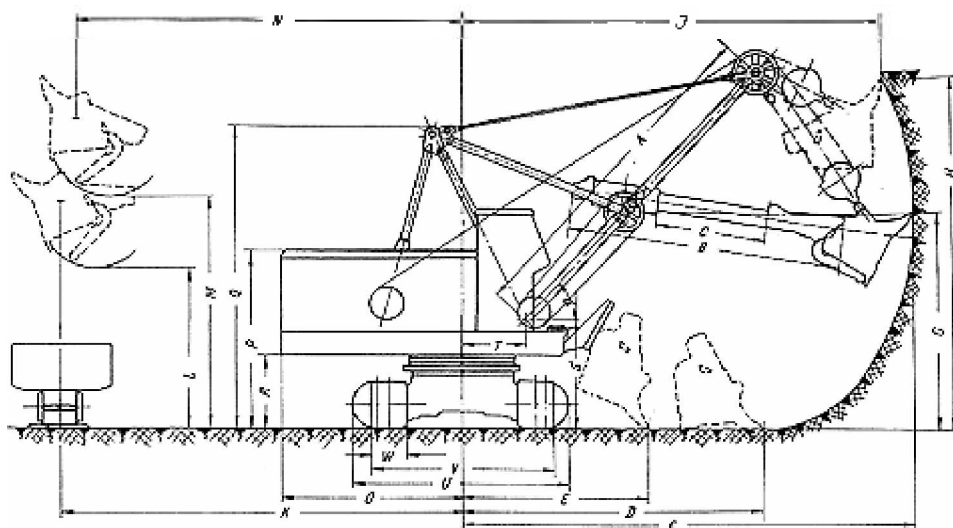


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд екскаватора ЕКГ-10 [2]

Для екскаваторів ЕКГ-10 характерне застосування індивідуального електропривода основних механізмів, коли кожен виконавчий орган має власний електродвигун. Це дозволяє забезпечити гнучке керування режимами роботи, підвищити точність регулювання та надійність функціонування в умовах змінних навантажень. Передача енергії до робочих органів здійснюється через електромеханічні системи з використанням редукторів, барабанів і канатних передач, що формують класичну схему канатного (електромеханічного) екскаватора .

Особливе місце в структурі електромеханічного обладнання займає механізм повороту, який забезпечує обертання поворотної платформи разом із робочим обладнанням і кабіною машиніста відносно ходової частини. Цей механізм є одним із найбільш навантажених, оскільки він працює в умовах великих інерційних мас, частих реверсів і змінних моментів опору. Конструктивно механізм повороту складається з електродвигуна (або декількох двигунів), редуктора повороту, зубчастого вінця (опорно-поворотного пристрою) та гальмівної системи. У важких кар'єрних екскаваторах часто застосовується двомоторний привід повороту, що дозволяє рівномірно розподілити навантаження та підвищити надійність системи. Кінематичну схему механізму повороту див. на рис. 1.2.

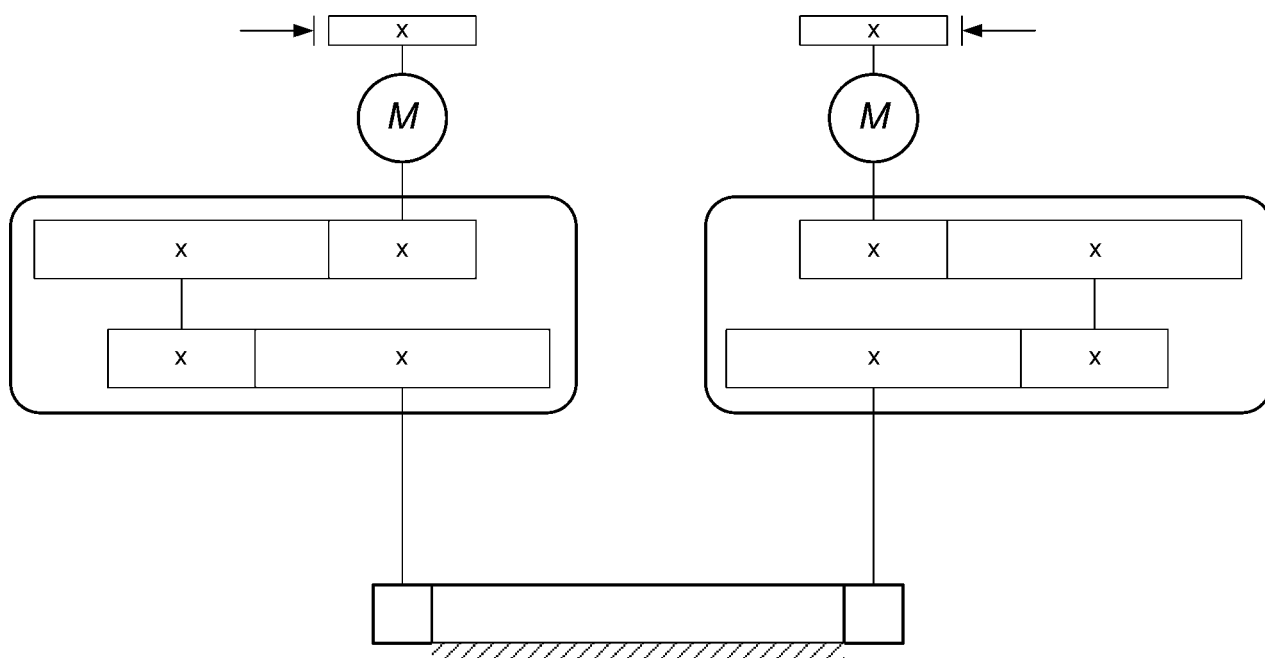


Рисунок 1.2 – Кінематична схема механізму повороту ЕКГ-10

Електропривод механізму повороту традиційно виконується на базі двигунів постійного струму, що забезпечують високі пускові моменти, широкі можливості регулювання швидкості та добру керованість у перехідних режимах. Живлення таких двигунів здійснюється від тиристорних перетворювачів або, у більш сучасних системах, від транзисторних перетворювачів з цифровим керуванням. Використання регульованого електропривода дозволяє реалізувати плавний розгін і гальмування платформи,

обмежити динамічні навантаження на зубчастий вінець і редуктори, а також забезпечити точне позиціонування ковша при розвантаженні [3].

Важливою особливістю електропривода повороту є необхідність роботи в реверсивних режимах із частими змінами напрямку обертання. Це висуває підвищені вимоги до системи керування, яка повинна забезпечувати швидке перемикавання режимів без перевантаження електродвигуна та силових елементів. Крім того, у системі застосовуються електромагнітні або електрогідравлічні гальма, що забезпечують утримання платформи у фіксованому положенні та її зупинку з необхідною точністю.

Суттєвим елементом є також опорно-поворотний пристрій, через який передається крутний момент від привода до платформи, а також сприймаються всі вертикальні та горизонтальні навантаження. Для забезпечення безперервного електроживлення при обертанні платформи використовуються контактні кільця та щіткові вузли, що дозволяють здійснювати необмежене обертання в одному напрямку [5].

У сучасних умовах спостерігається тенденція до модернізації електропривода механізму повороту шляхом заміни двигунів постійного струму на асинхронні або синхронні двигуни з частотним регулюванням, що дозволяє підвищити надійність, зменшити експлуатаційні витрати та усунути недоліки колекторних машин. Впровадження цифрових систем керування забезпечує адаптивне регулювання швидкості та моменту, зниження енергоспоживання та покращення динамічних характеристик привода.

Таким чином, електромеханічне обладнання екскаватора ЕКГ, і зокрема механізм повороту з його електроприводом, є критично важливою складовою, від якої залежить продуктивність, точність роботи та надійність всієї машини, а його технічний рівень безпосередньо впливає на ефективність видобувних процесів у кар'єрі.

					<i>КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1</i>	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1.3 Прорахування механічної частини з обранням електродвигуна механізму повороту екскаватора

Використовуючи вхідні дані $n_{об\ платф} = 2,6 \frac{об}{хв}$, $v_{пл} = 1 \frac{м}{с}$ і $t_{цикл} = 30 сек$ проведемо прорахування двигуна приводу механізму обертання екскаватора ЕКГ-10. Порядок прорахунку взято з [4].

Визначаємо довжини, маси та зусилля частин стріли екскаватора ЕКГ-10.

$$m_{екс} = k_{екс} \cdot E = 55 \cdot 10 = 550 \text{ т}, \quad (1.1)$$

де $k_{екс} = 38 \dots 55 \text{ т/м}$; E – обсяг ковша.

$$b_{кл} = 1,2 \sqrt{E_{л}} = 1,2 \cdot \sqrt{10} = 3,795 \text{ м}; \quad (1.2)$$

$$I_{кл} = 0,77 \cdot b_{кл} = 0,77 \cdot 3,795 = 2,922 \text{ м}; \quad (1.3)$$

$$h_{кл} = 0,75 \cdot b_{кл} = 0,75 \cdot 3,795 = 2,846 \text{ м}. \quad (1.4)$$

$$m_{ковиш} = 1,15 \cdot C_{ковиш} \cdot E_{л} = 1,2 \cdot 1,8 \cdot 10 = 21,6 \text{ т}. \quad (1.5)$$

$$G_{ковиш} = m_{ковиш} \cdot 9,81 \cdot 10^3 = 21,6 \cdot 9,81 \cdot 10^3 = 2,119 \cdot 10^5 \text{ Н}. \quad (1.6)$$

$$L = K_{л} \sqrt[3]{m_{екс}} = K_{л} \sqrt[3]{550} = 8,193 \cdot K_{л}. \quad (1.7)$$

$$L_{стр} = 8,193 \cdot K_{л стр} = 8,193 \cdot 1,85 = 15,16 \text{ м}, \quad (1.8)$$

де $K_{л стр} = 1,8 \dots 1,85$.

$$L_{рук} = 8,193 \cdot K_{л рук} = 8,193 \cdot 1,2 = 9,83 \text{ м}, \quad (1.9)$$

де $K_{л рук} = 1,15 \dots 1,25$.

$$m_{рук} = C_{рук} \cdot m_{ковиш} = 0,8 \cdot 21,6 = 17,28 \text{ т}, \quad (1.10)$$

де $C_{рук} = 0,8 \dots 1$.

$$G_{рук} = m_{рук} \cdot g = 17,28 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,695 \cdot 10^5 \text{ Н}. \quad (1.11)$$

$$L_{нап} = 8,193 \cdot K_{л нап} = 8,193 \cdot 1,2 = 9,83 \text{ м}, \quad (1.12)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де $K_{л\text{ нап}} = 1,1$.

$$L_{\text{нят}} = 8,193 \cdot K_{\text{нят с}} = 8,193 \cdot 0,45 = 3,687 \text{ м}, \quad (1.13)$$

де $K_{\text{нят с}} = 0,45$.

$$L_{\text{коп}} = 8,193 \cdot K_{л\text{ коп}} = 8,193 \cdot 1,7 = 13,928 \text{ м}, \quad (1.14)$$

де $K_{л\text{ коп}} = 1,7 \dots 1,8$.

Зусилля при копанні:

$$N_1 = \frac{k_{\text{кл}} \cdot E \cdot 10^5}{L_{\text{нап}} \cdot k_p} = \frac{2,5 \cdot 10 \cdot 10^5}{9,832 \cdot 1,35} = 1,884 \cdot 10^5 \text{ Н}, \quad (1.15)$$

де $k_{\text{кл}} = 2,5$; $k_p = 1,35$; $L_3 = L_{\text{нап}} = 9,832 \text{ м}$.

$$\begin{aligned} G_{\text{к нор}} &= G_{\text{к}} + G_{\text{нор}} = 0,981 \left(m_{\text{ковиш}} + \frac{E_{\text{л}} \cdot \gamma_{\text{нор}}}{k_p} \right) \cdot 10^4 = \\ &= 0,981 \left(21,6 + \frac{10 \cdot 3,5}{1,35} \right) \cdot 10^4 = 4,662 \cdot 10^5 \text{ Н}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

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

$$G'_p = \frac{G_{\text{рук}} \cdot l_m}{L_{\text{рук}}} = \frac{1,695 \cdot 10^5 \cdot 4,1}{9,832} = 7,069 \cdot 10^4 \text{ Н}. \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{коп}} &= \frac{N_1 \cdot l_1 + G_{\text{к нор}} \cdot l_{\text{к}} + G'_p \cdot l_p}{l_n} = \\ &= \frac{1,884 \cdot 10^5 \cdot 6,5 + 4,662 \cdot 10^5 \cdot 5,4 + 7,069 \cdot 10^5 \cdot 2,1}{4,1} = \\ &= 9,489 \cdot 10^5 \text{ Н}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

де $l_1, l_{\text{к}}, l_p, l_n$ – розміри з рис. 1.3 а.

Потужність витрачаєма під час копання:

$$P_{\text{коп}} = \frac{N_{\text{коп}} \cdot v_{\text{коп}}}{\eta_{\text{коп}}} = \frac{9,489 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,95} = 998,81 \text{ кВт}. \quad (1.19)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

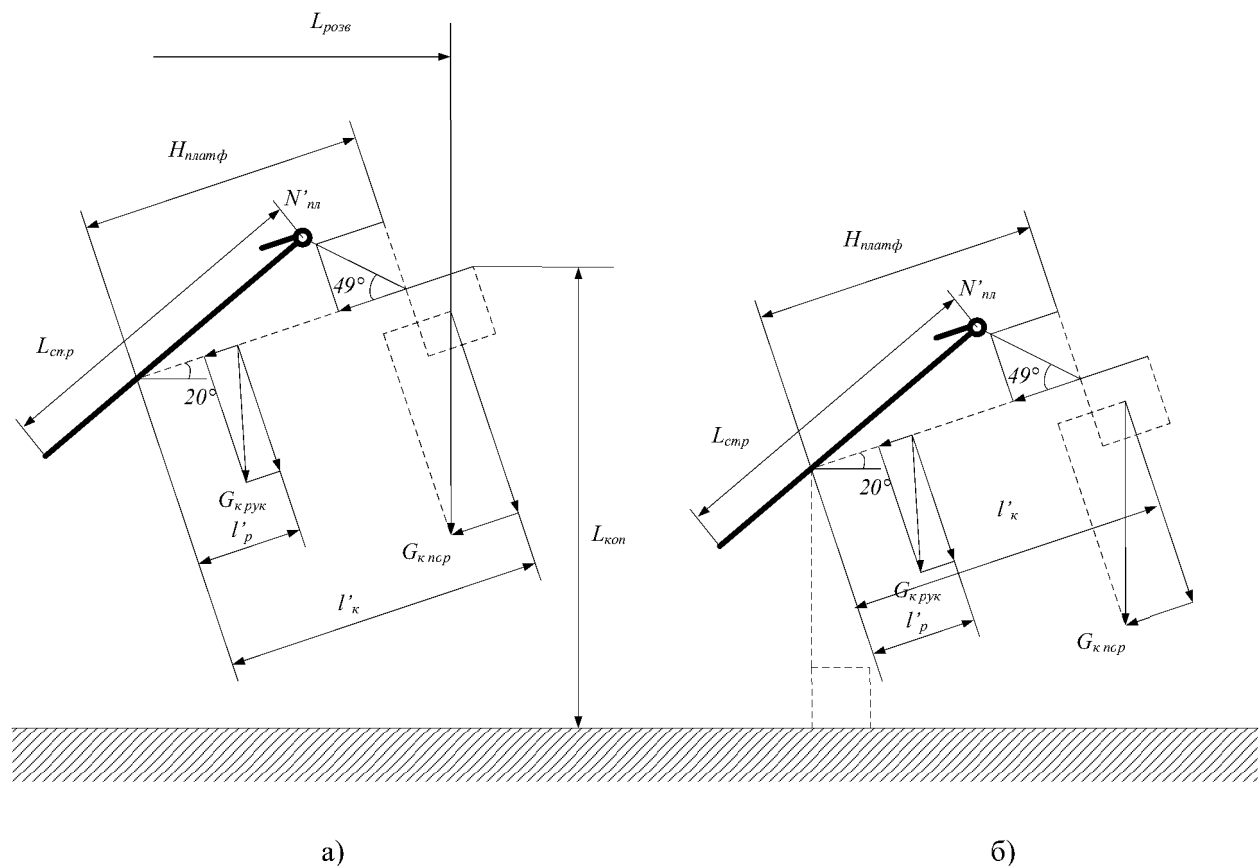


Рисунок 1.3 – Схема для прорахунку механічної частини механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

Зусилля і потужності при повороті:

$$\begin{aligned}
 N'_{нов} &= \frac{G_{кнсп} \cdot l'_к \cdot \cos \alpha + G_p \cdot l'_р \cdot \cos \alpha}{l'_н \cdot \sin \beta} = \\
 &= \frac{4,662 \cdot 10^5 \cdot 8,7 \cdot 0,94 + 1,695 \cdot 10^5 \cdot 3,8 \cdot 0,94}{7,6 \cdot 0,71} = \\
 &= 8,188 \cdot 10^5 \text{ Н},
 \end{aligned}$$

де $l'_к, l'_р, l'_н$ і $\cos \alpha = \cos 20^\circ = 0,94$; $\sin \beta = \sin 45^\circ = 0,71$ взято з рис. 1.3 б.

$$P_{нов\ розв} = 0,1 \frac{N'_{нов} v_{нов} \cdot 10^{-3}}{\eta_{пл}} = 0,1 \frac{8,188 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,95} = 86,19 \text{ кВт}. \quad (1.20)$$

$$\begin{aligned}
 N'_{нов} &= \frac{G_{кнсп} \cdot l'_к \cdot \cos \alpha - G_p \cdot l'_р \cdot \cos \alpha}{l'_н \cdot \sin \beta} = \\
 &= \frac{4,662 \cdot 10^5 \cdot 8,7 \cdot 0,94 - 1,695 \cdot 10^5 \cdot 3,8 \cdot 0,94}{7,6 \cdot 0,71} = \\
 &= 5,944 \cdot 10^5 \text{ Н},
 \end{aligned} \quad (1.21)$$

де l'_k, l'_p, l'_n і $\cos \alpha = \cos 20^\circ = 0,94$; $\sin \beta = \sin 45^\circ = 0,71$ взято з рис. 1.

$$P_{\text{пов заб}} = 1,1 \frac{N''_{\text{пов}} \nu_{\text{пл}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{пл}}} = 1,1 \frac{5,944 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,95} = 688,24 \text{ кВт.} \quad (1.22)$$

Визначаємо довжини, маси та зусилля частин платформи екскаватора ЕКГ-10.

$$L = K_{\text{л}} \sqrt[3]{m_{\text{екс}}} = K_{\text{л}} \sqrt[3]{550} = 8,193 \cdot K_{\text{л}}.$$

$$H_{\text{платф}} = K_{\text{л платф}} \cdot 8,193 = 0,9 \cdot 8,193 = 7,374 \text{ м,} \quad (1.23)$$

де $K_{\text{л платф}} = 0,85 \dots 0,95$.

$$L_{\text{зс}} = K_{\text{л зс}} \cdot 8,193 = 1 \cdot 8,193 = 8,193 \text{ м,} \quad (1.24)$$

де $K_{\text{л зс}} = 0,95 \dots 1$.

$$L_{\text{плат стр}} = K_{\text{л плат стр}} \cdot 8,193 = 0,5 \cdot 8,193 = 4,097 \text{ м,} \quad (1.25)$$

де $K_{\text{л плат стр}} = 0,4 \dots 1$.

$$L_{\text{розв}} = K_{\text{розв}} \cdot 8,193 = 2,4 \cdot 8,193 = 19,664 \text{ м,} \quad (1.26)$$

де $K_{\text{розв}} = 2,4 \dots 2,5$.

$$L_{\text{платф}} = L_{\text{зс}} + L_{\text{плат стр}} = 8,193 + 0,5 = 12,29 \text{ м.} \quad (1.27)$$

$$m_{\text{платф}} = K_{\text{м пл}} \cdot m_{\text{екс}} = 0,5 \cdot 550 = 275 \text{ т,} \quad (1.28)$$

де $K_{\text{м пл}} = 0,5$.

$$m_{\text{стр}} = K_{\text{м стр}} \cdot m_{\text{екс}} = 0,06 \cdot 550 = 33 \text{ т,} \quad (1.29)$$

де $K_{\text{м стр}} = 0,06$.

$$m_{\text{нап}} = K_{\text{нап}} \cdot m_{\text{екс}} = 0,028 \cdot 550 = 15,4 \text{ т,} \quad (1.30)$$

де $K_{\text{нап}} = 0,028$.

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$m_{\text{ковш нср}} = m_{\text{ковш}} + \frac{E_{\text{л}} \cdot \gamma_{\text{нср}}}{k_p} = 21,6 + \frac{10 \cdot 3,5}{1,35} = 47,526 \text{ м.} \quad (1.31)$$

$$\begin{aligned} J_{\text{платф}} &= J_0 + m_{\text{платф}} \cdot l_{\text{платф}}^2 = \\ &= 4707 \cdot 10^3 + 275 \cdot 10^3 \cdot 2,048^2 = \\ &= 5,861 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \end{aligned} \quad (1.32)$$

де

$$l_{\text{платф}} = \frac{L_{\text{платф}}}{2} - L_{\text{плат стр}} = \frac{12,29}{2} - 4,097 = 2,048 \text{ м;} \quad (1.33)$$

Моменти інерції елементів екскаватора ЕКГ-10:

$$\begin{aligned} J_0 &= m_{\text{платф}} \frac{(0,5 \cdot L_{\text{платф}})^2 + (0,5 \cdot H_{\text{платф}})^2}{3} = \\ &= 275 \frac{(0,5 \cdot 12,29)^2 + (0,5 \cdot 7,374)^2}{3} = 4707 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \end{aligned} \quad (1.34)$$

$$J_{\text{нап}} = m_{\text{нап}} \cdot l_{\text{нап}}^2 = 15,4 \cdot 10^3 \cdot 8,197^2 = 1,035 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (1.35)$$

де

$$l_{\text{нап}} \approx l_{\text{рук}} + L_{\text{плат стр}} = 4,1 + 4,097 = 8,197 \text{ м.} \quad (1.36)$$

Моменти інерції ковша (з породою і без), стріли та рукояті:

$$J_{\text{ковш нср}} = m_{\text{ковш нср}} L_{\text{розв}}^2 = 47,529 \cdot 10^3 \cdot 19,664^2 = 1,838 \cdot 10^7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (1.37)$$

$$J_{\text{ковш}} = m_{\text{ковш}} \cdot L_{\text{розв}}^2 = 21,6 \cdot 10^3 \cdot 19,664^2 = 8,352 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (1.38)$$

$$J_{\text{стр}} = m_{\text{стр}} l_{\text{стр}}^2 = 33 \cdot 10^3 \cdot 8,197^2 = 2,217 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (1.39)$$

$$\begin{aligned} J_{\text{рук}} &= m_p \cdot (l_p'')^2 = m_p \cdot \left(8,197 + \frac{L_{\text{платф}} \cos \alpha}{2} \right)^2 = \\ &= 17,28 \left(8,197 + \frac{12,29 \cdot 0,94}{2} \right)^2 \cdot 10^3 = 3,374 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \end{aligned} \quad (1.40)$$

Загальні моменти інерції екскаватора (з породою і без породи):

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\begin{aligned}
J_{зав\Sigma} &= J_{платф} + J_{ковш\ нср} + J_{стр} + J_{рук} + J_{нап} = \\
&= 5,861 \cdot 10^6 + 1,838 \cdot 10^7 + 2,217 \cdot 10^6 + \\
&+ 3,374 \cdot 10^6 + 1,035 \cdot 10^6 = 3,086 \cdot 10^7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;
\end{aligned}
\tag{1.41}$$

$$\begin{aligned}
J_{нср\Sigma} &= J_{платф} + J_{ковш} + J_{стр} + J_{рук} + J_{нап} = \\
&= 5,861 \cdot 10^6 + 8,352 \cdot 10^6 + 2,217 \cdot 10^6 + \\
&+ 3,374 \cdot 10^6 + 1,035 \cdot 10^6 = 2,084 \cdot 10^7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;
\end{aligned}
\tag{1.42}$$

Потужність двигуна середньозважена:

$$\begin{aligned}
P_{ов\ нов} &= \frac{(J_{зав\Sigma} + J_{нср\Sigma}) \omega_{об\ платф}^2}{t_{нов}} = \\
&= \frac{(3,086 \cdot 10^7 + 2,084 \cdot 10^7) \cdot 0,272^2}{10} 10^{-3} = 383,273 \text{ кВт},
\end{aligned}
\tag{1.43}$$

де $t_{нов} = t_{цикл} / 3 = 30 / 3 = 10 \text{ сек}$;

$$\omega_{об\ платф} = \frac{2\pi \cdot n_{об\ платф}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2,6}{60} = 0,272 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.
\tag{1.44}$$

Так як привод механізму повороту дводвигунний, то візьмемо потужність одного двигуна 200 кВт.

Намічаємо двигун АВВ 3BSM003050 DMI 315V [6] з паспортними даними див. табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри двигуна постійного струму 3BSM003050 DMI 315V

Параметр	Значення
$P_{ном}, \text{кВт}$	212
$U_{ном}, \text{В}$	400
$I_{ном}, \text{А}$	550
$M_{ном}, \text{Н} \cdot \text{м}$	7459
$n_{ном}, \text{об/хв}$	271

$R_{я}, мОм$	136,8
$L_{я}, мГн$	2,7
$J_{я}, кг \cdot м^2$	20
$\eta, \%$	80,4

Уточнений момент:

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9550 \frac{212}{271} = 7470,85 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.45)$$

$$i_{ред} = \frac{n_{ном}}{n_{об пл}} = \frac{271}{2,6} \approx 100. \quad (1.46)$$

Приведені сумарні моменти:

$$J'_{зав\Sigma} = \frac{J_{зав\Sigma}}{N_{дв} \cdot i_{ред}^2} + J_{я} = \frac{3,086 \cdot 10^7}{2 \cdot 100^2} + 20 = 1563,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (1.47)$$

$$J'_{нсп\Sigma} = \frac{J_{нсп\Sigma}}{N_{дв} \cdot i_{ред}^2} + J_{я} = \frac{2,084 \cdot 10^7}{2 \cdot 100^2} + 20 = 1061,93 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (1.48)$$

$$M_{стоп} = 1,8 \cdot M_{ном} = 1,8 \cdot 7470,85 = 13447,8 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (1.49)$$

$$M_{відс} = 0,9 \cdot M_{стоп} = 0,9 \cdot 13447,8 = 6723,76 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (1.50)$$

Прораховуємо дані для діаграм швидкостей і моментів:

$$\begin{aligned} M_{14} &= (M_{відс} - 0,1M_{ном}) + \frac{M_{стоп} - M_{відс}}{2} = \\ &= 6723,76 - 0,1 \cdot 7470,85 + \frac{13447,8 - 6723,76}{2} = 9338,56 \text{ Н} \cdot \text{м}, \end{aligned} \quad (1.51)$$

де $0,1M_{ном}$ – опір платформи.

$$\begin{aligned} M_{15} &= \frac{M_{стоп} + M_{відс}}{2} = \\ &= \frac{13447,8 + 6723,76}{2} = 10085,65 \text{ Н} \cdot \text{м}, \end{aligned} \quad (1.52)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$t_9 = J'_{зав\Sigma} \frac{\omega_{ном\ дв}}{M_{14}} = 1563,15 \frac{28,38}{9338,56} = 4,75 \text{ сек}, \quad (1.53)$$

$$\omega_{ном\ дв} = \frac{2\pi n_{ном\ дв}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 271}{60} = 28,38 \frac{рад}{с}. \quad (1.54)$$

$$\alpha_{нов\ зав} = \frac{a_{нов} \cdot t_9^2}{2} = \frac{0,06 \cdot 4,75^2}{2} = 0,67 \text{ рад}. \quad (1.55)$$

де

$$a_{нов} = \frac{\omega_{ном\ дв}}{i_{ред} \cdot t_9} = \frac{28,38}{100 \cdot 4,75} = 0,06 \frac{рад}{с^2} \quad (1.56)$$

$$\begin{aligned} M_{16} &= (M_{вiдс} + 0,1M_{ном}) + \frac{M_{смон} - M_{вiдс}}{2} = \\ &= 6723,76 + 0,1 \cdot 7470,85 + \frac{13447,8 - 6723,76}{2} = 10832,73 \text{ Н} \cdot \text{м}, \end{aligned} \quad (1.57)$$

$$t_{11} = J'_{зав\Sigma} \frac{\omega_{ном\ дв}}{M_{16}} = 1563,15 \frac{28,38}{10832,73} = 4,1 \text{ сек}, \quad (1.58)$$

$$M_{17} = M_{16} - 0,1M_{ном} = 10832,73 - 0,1 \cdot 7470,85 = 10085,65 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$\alpha_{нов\ зав\ гальм} = \frac{a_{нов\ зав\ гальм} \cdot t_{11}^2}{2} = \frac{0,07 \cdot 4,1^2}{2} = 0,58 \text{ рад}. \quad (1.59)$$

де

$$a_{нов\ зав\ гальм} = \frac{\omega_{ном\ дв}}{i_{ред} \cdot t_{11}} = \frac{28,38}{100 \cdot 4,1} = 0,07 \frac{рад}{с^2} \quad (1.60)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{нов\ зав} &= 90^\circ - (\alpha_{нов\ зав} + \alpha_{нов\ зав\ гальм}) = \\ &= 1,57 - (0,67 + 0,07) = 0,31 \text{ рад}, \end{aligned} \quad (1.61)$$

$$t_{10} = \frac{\alpha_{нов\ зав}}{\omega_{ном\ дв} / i_{ред}} = \frac{0,31}{28,38/100} = 1,11 \text{ сек}. \quad (1.62)$$

$$t_{12} = J'_{нсп\Sigma} \frac{\omega_{ном\ дв}}{M_{14}} = 1061,93 \frac{28,38}{9338,56} = 3,23 \text{ сек}, \quad (1.63)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\alpha_{пор} = \frac{a_{пор} \cdot t_{12}^2}{2} = \frac{0,09 \cdot 3,23^2}{2} = 0,46 \text{ рад.} \quad (1.64)$$

$$a_{пор} = \frac{\omega_{ном дв}}{i_{ред} \cdot t_{12}} = \frac{28,38}{100 \cdot 3,23} = 0,09 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \quad (1.65)$$

$$t_{14} = J'_{пор\Sigma} \frac{\omega_{ном дв}}{M_{16}} = 1061,93 \frac{28,38}{10832,73} = 2,78 \text{ сек,} \quad (1.66)$$

$$\alpha_{пор гальм} = \frac{a_{пор гальм} \cdot t_{14}^2}{2} = \frac{0,1 \cdot 2,78^2}{2} = 0,39 \text{ рад.} \quad (1.67)$$

де

$$a_{пор гальм} = \frac{\omega_{ном дв}}{i_{ред} \cdot t_{14}} = \frac{28,38}{100 \cdot 2,78} = 0,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \quad (1.68)$$

$$\alpha_{нов пор} = 90^\circ - (\alpha_{пор} + \alpha_{пор гальм}) = 1,57 - (0,46 + 0,39) = 0,72 \text{ рад,} \quad (1.69)$$

$$t_{13} = \frac{\alpha_{нов пор}}{\omega_{ном дв} / i_{ред}} = \frac{0,72}{28,38/100} = 2,53 \text{ сек.} \quad (1.70)$$

По діаграмі моментів прораховуємо еквівалентний момент двигуна повороту екскаватора:

$$\begin{aligned} M_{екв} &= \sqrt{\frac{M_{15}^2 t_9 + 0,1 M_{ном}^2 t_{10} + M_{15}^2 t_{11} + M_{15}^2 t_{12} + 0,1 M_{ном}^2 t_{13} + M_{15}^2 t_{14}}{t_{\text{ц}}}} = \\ &= \sqrt{\frac{10085,65^2 \cdot 4,75 + (0,1 \cdot 7470,85)^2 \cdot 1,11 + 10085,65^2 \cdot 4,1 + \dots}{30}} = \\ &= 7101,71 \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

Тривалість включення:

$$TB_{розр} = \frac{t_{роб} \cdot 100}{t_{\text{ц}}} = \frac{18,49 \cdot 100}{30} = 61,6\%, \quad (1.71)$$

де

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\begin{aligned}
 t_{роб} &= t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14} = \\
 &= 4,75 + 1,11 + 4,1 + 3,23 + 2,53 + 2,78 = 18,49 \text{ сек.}
 \end{aligned}
 \tag{1.72}$$

Перевіряємо:

$$TB_{розр} = 61,6\% \leq TB_{ном} = 80\%.$$
(1.73)

Двигун ABB 3BSM003050 DMI 315V підходить.

Еквівалента потужність

$$P_{екв} = \frac{M_{екв} \cdot n_{ном}}{9550} = \frac{7101,71 \cdot 271}{9550} = 201,52 \text{ кВт};$$
(1.74)

$$P'_{ном} = P_{ном} \sqrt{\frac{TB_{ном}}{TB_{розр}}} = 207 \sqrt{\frac{80}{61,6}} = 241,52 \text{ кВт}.$$
(1.75)

Перевіряємо:

$$P'_{ном} = 241,52 \text{ кВт} \geq P_{екв} = 201,52 \text{ кВт}.$$
(1.76)

Двигун ABB 3BSM003050 DMI 315V підходить.

Висновки до розділу 1

У розділі надано характеристику екскаватора ЕКГ-10 та опис його місця в роботі кар'єру АТ «ПівдГЗК». На основі проведених розрахунків механічної частини було обґрунтовано доцільність застосування дводвигунної схеми приводу та здійснено вибір двигуна постійного струму ABB 3BSM003050 DMI 315V потужністю 200 кВт, який повністю задовольняє вимоги за еквівалентним моментом та потужністю в заданому повторно-короткочасному режимі роботи.

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.01.Р1	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 2. Статика електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

					<i>КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Кошевой С.С.</i>			<i>Статика електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>25</i>	
<i>Конс.</i>						<i>ЕЕМ-23ск</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

2.1 Вибір силової частини електроприводу механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

Застосування реверсивного тиристорного перетворювача для електропривода механізму повороту екскаватора обумовлене специфічними умовами роботи цього вузла, який характеризується частими пусками, інтенсивним гальмуванням та постійною зміною напрямку обертання платформи. Оскільки поворотна частина екскаватора разом із заповненим ковшом має значний момент інерції, процес розгону та зупинки супроводжується великими динамічними навантаженнями. Реверсивний тиристорний перетворювач забезпечує плавне та безконтактне керування двигуном постійного струму в усіх чотирьох квадрантах механічної характеристики.

Крім того, тиристорні перетворювачі здатні витримувати значні перевантаження за струмом, які неминуче виникають при зустрічі ковша з перешкодою або під час різкого реверсування, забезпечуючи при цьому високий пусковий момент, критично важливий для зрушення масивної конструкції з місця. Відмова від використання традиційних контакторів для реверсування струму в колі якоря значно підвищує надійність системи, оскільки екскаватор працює в умовах сильної вібрації, запиленості та перепадів температур, де механічні контакти швидко виходять з ладу через підгорання та знос.

Висока швидкодія тиристорного перетворювача дозволяє системі керування миттєво реагувати на команди оператора, забезпечуючи точне позиціонування ковша та високу продуктивність екскаватора за рахунок скорочення часу робочого циклу.

2.1.1 Підбір тиристорного перетворювача електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

Вибір перетворювача провадимо за умовами:

$$U_{d\text{ ном}} \geq U_{\text{дв ном}} = 400 \text{ В.} \quad (2.1)$$

$$I_{d\text{ ном}} \geq I_{\text{дв ном}} = 500 \text{ А.} \quad (2.2)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Намічаємо реверсивний перетворювач типу КТЕ5-АС-500/440-ЕР2711-С01-УХЛ4 [7] з параметрами наведеними у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Паспортні дані перетворювача КТЕ5-АС-500/440-ЕР2711-С01-УХЛ4

Параметр	Значення
$U_{d\text{ ном}}, B$	400
$I_{d\text{ ном}}, A$	500

Головна частина схеми має два трифазних зустрічно-паралельних мостових випрямлячів. Також наявне тиристорне керування обмоткою збудження.

2.1.2 Прорахунок силового трансформатора

Прорахуємо силовий трансформатор:

$$U_{2\phi} = k_u \cdot k_r \cdot k_\alpha \cdot k_c \cdot U_{dн} = 0,428 \cdot 1,05 \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 400 B = 292 B, \quad (2.3)$$

$$I_{2\phi} = k_{i2} \cdot k_i \cdot I_{d\text{ ном}} = 0,41 \cdot 1,1 \cdot 500 A = 224,54 A, \quad (2.4)$$

$$U_{d\text{ max}} = U_{2\phi} \cdot k_{cx} = 292 \cdot 2,34 = 683,28 B, \quad (2.5)$$

$$U_{1\phi} = 6000 B / \sqrt{3} = 3464,1 B.$$

$$k_{mp} = U_{1\phi} / U_{2\phi} = 3464,1 B / 292 B = 11,86. \quad (2.6)$$

$$I_{1\phi} = \frac{k_{i1} \cdot I_{d\text{ ном}}}{k_{mp}} = \frac{0,41 \cdot 500 A}{12} = 17,21 A, \quad (2.7)$$

$$S_1 = 3 I_{1\phi} \cdot U_{1\phi} = 3 \cdot 17,21 \cdot 3464,1 = 178812,75 \text{ BA}, \quad (2.8)$$

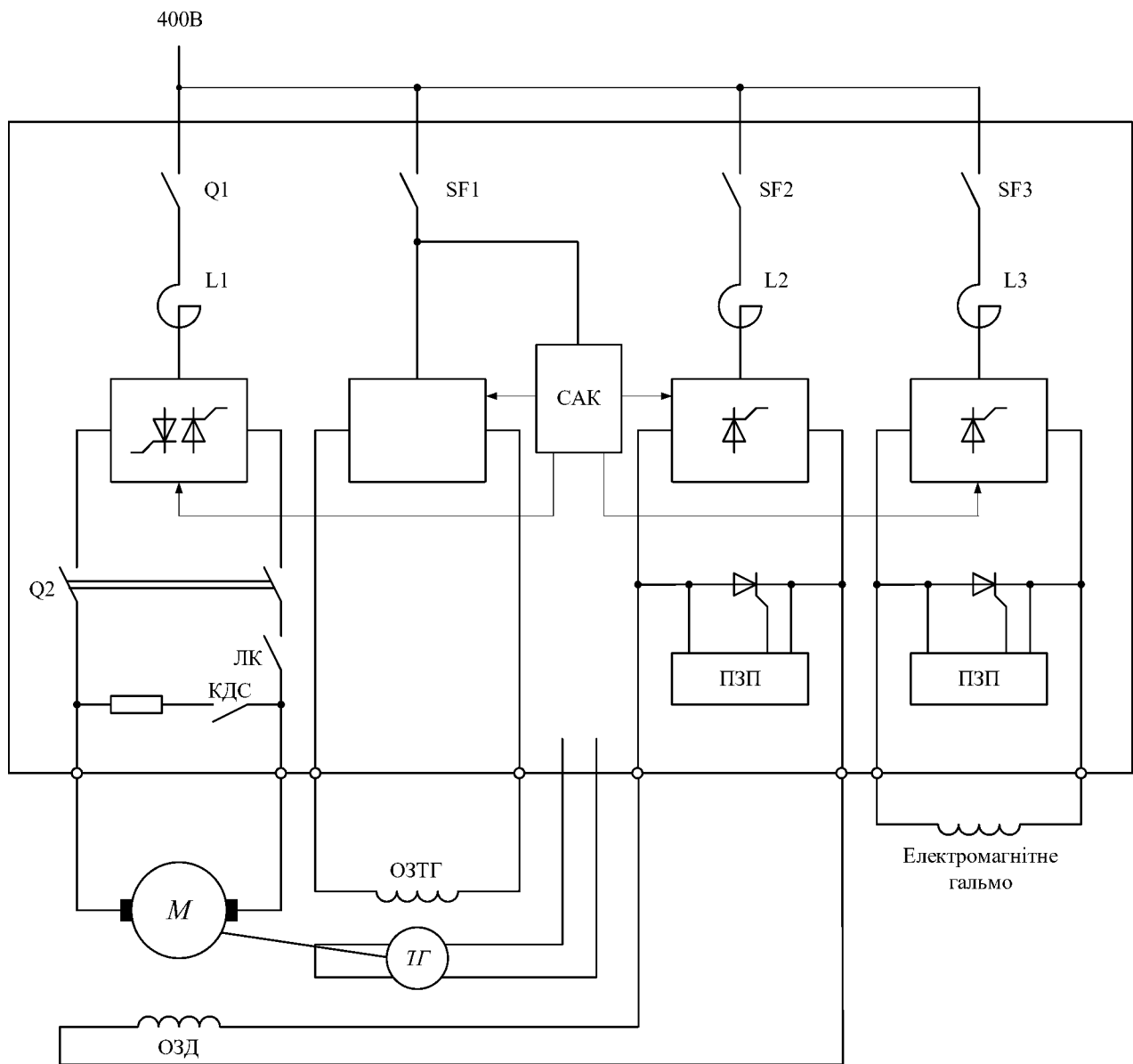


Рисунок 2.1 – Схема тиристорного електроприводу механізму повороту
екскаватора ЕКГ-10 [7]

$$S_2 = 3I_{2\phi} \cdot U_{2\phi} = 3 \cdot 224,54 \cdot 292 = 196694,03 \text{ ВА}, \quad (2.9)$$

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{178812,75 + 196694,03}{2} = 187753,39 \text{ ВА}. \quad (2.10)$$

Намічаємо трансформатор ТМ-250/6(10)/0,4 див. табл. 1.3 [8].

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2

Арк.

28

Таблиця 1.3 – Паспортні дані трансформатора ТМ-250/6(10)/0,4

Параметр	Значення
$S_{ном}, кВА$	250
$\Delta P_{xx}, кВт$	0,56
$\Delta P_{кз}, кВт$	3,7
$u_{кз}, \%$	4,5
$i_{xx}, \%$	1,7

Опори і індуктивності трансформатора:

$$Z_{mp\phi} = \frac{U_{кз\%} \cdot U_{2\phi ном}}{100 \cdot I_{2\phi ном}} = \frac{4,5 \cdot 400}{100 \cdot 500} = 0,036 \text{ Ом.} \quad (2.11)$$

$$R_{mp\phi} = \frac{\Delta P_{кз}}{n \cdot m \cdot I_{2\phi ном}^2} = \frac{3700}{2 \cdot 3 \cdot 500^2} = 2,467 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \quad (2.12)$$

$$X_{mp\phi} = \sqrt{Z_{mp\phi}^2 - R_{mp\phi}^2} = \sqrt{0,036^2 - (2,467 \cdot 10^{-3})^2} = 0,0359 \text{ Ом.} \quad (2.13)$$

$$L_{mp\phi} = \frac{X_{mp\phi}}{\omega_c} = \frac{0,0359}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.} \quad (2.14)$$

$$L_{н\epsilon p} = 2 \cdot L_{mp\phi} = 2 \cdot 1,14 \cdot 10^{-4} = 2,29 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.} \quad (2.15)$$

2.1.3 Підбір реактора

Вибір реактора провадимо згідно таких формул.

$$E_{d0(6)} = k_{cx} \cdot U_{2лн} = 2,34 \cdot 400 = 936 \text{ В,} \quad (2.16)$$

$$L_{я} = \beta \frac{U_{н}}{2p \cdot I_{н} \cdot n_{н}} = 0,2 \frac{400}{2 \cdot 2 \cdot 500 \cdot 271} = 1,48 \cdot 10^{-4} \text{ Гн,} \quad (2.17)$$

$$L_{кн} = \frac{E_{d0(6)} \cdot k_{\epsilon p \max}}{\omega_c \cdot I_{d \epsilon p \max}} = \frac{936 \cdot 0,02295}{314 \cdot 125} = 5,47 \cdot 10^{-4} \text{ Гн,} \quad (2.18)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\text{де } k_{\epsilon p \max} = \left(1 - \frac{\pi}{m_{\epsilon}} \cot \left(\frac{\pi}{m_{\epsilon}} \right)\right) \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) = \left(1 - \frac{3,14}{12} \cot \left(\frac{3,14}{12} \right)\right) \cdot 1 = 0,02295.$$

$$\frac{L_{\epsilon p}}{2} = L_{\kappa \eta} - \frac{L_{\eta \epsilon p}}{2} - L_{\gamma}; \quad (2.19)$$

$$L_{\epsilon p} = 2 \cdot (5,47 \cdot 10^{-4} - 0,5 \cdot 2,29 \cdot 10^{-4} - 1,48 \cdot 10^{-4}) = 7,18 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}. \quad (2.20)$$

Намічаємо реактори ФРОС-125/0,5У3 [9] див. табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Паспортні дані реактора

Параметр	Значення
$I_{\eta \epsilon p}, A$	500
$L_{\eta \epsilon p}, \text{Гн}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$
$R_{\epsilon p}, \text{Ом}$	$3 \cdot 10^{-3}$

Індуктивність дроселю дещо більша за розрахункову, що дає більший ступінь згладжування.

2.2 Прорахунок силовій частини електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

2.2.1 Прорахунок замісної схеми електропривода

ТП-Д електропривода повороту екскаватора ЕКГ-10 представимо як замісну розрахункову схему (рис. 2.2).

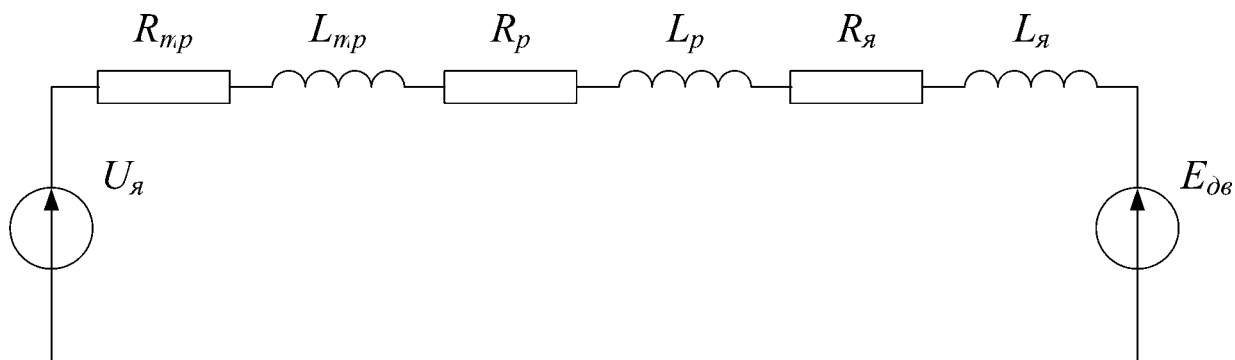


Рисунок 2.2 – Замісна схема електроприводу ТП-Д механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

2.2.2 Прорахунок замінної схеми двигуна 3BSM003050 DMI 315V

Прораховуємо параметри заступну схему в порядку [10]:

$$R_{я} = \frac{\alpha(1-\eta_n)U_n}{I_n} = \frac{0,3(1-0,804)400}{500} = 0,047 \text{ Ом}, \quad (2.21)$$

$$R_{я\text{згп}} = k_t \cdot R_{я} = 1,4 \cdot 0,047 = 0,0658 \text{ Ом}. \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} R_{я\Sigma} &= k_1 k_2 (R_{я} + R_{\text{додпол}} + R_{\text{комтобм}} + R_{\text{щ}}) = \\ &= 1,2 \cdot 1,14 (0,047 + 0,65 \cdot 10^{-3} + 1,9 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3}) = \\ &= 0,0685 \text{ Ом}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} L_{я} &= \beta \frac{U_n}{2p \cdot I_n \cdot n_n} = 0,3 \frac{400}{2 \cdot 4 \cdot 500 \cdot 271} = 7,38 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}, \\ E_{\text{дв}} &= U_n - I_n \cdot R_{я\Sigma} = 400 - 500 \cdot 0,0685 = 376,5 \text{ В}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

2.2.3 Прорахунок параметрів перетворювача КТЕ5-АС-500/440-ЕР2711-С01-УХЛ4

Прорахуємо параметри трифазного тиристорного моста:

$$L_{ТП} = L_{нр} + L_{зр} = 2,29 \cdot 10^{-4} + 7,18 \cdot 10^{-4} = 9,47 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}. \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned}
 R_{III} &= 2 \cdot R_{mp} + R_{cp} + \frac{m \cdot X_{mp}}{2\pi} = \\
 &= 2 \cdot 2,47 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} + \frac{6 \cdot 0,0359}{2 \cdot 3,14} = \\
 &= 0,0422 \text{ Ом},
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

$$\text{де } \frac{m \cdot X_{mp}}{2\pi} = R_{ком}.$$

$$\begin{aligned}
 R_0 &= R_{III} + 2(R_{я\Sigma} + 0,1R_{я\Sigma}) = \\
 &= 0,0422 + 2(0,0685 + 0,1 \cdot 0,0685) = 0,1929 \text{ Ом};
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

$$L_0 = L_{III} + 2L_{я} = 9,47 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 7,38 \cdot 10^{-5} = 3,76 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.} \tag{2.28}$$

Стала часу перетворювача КТЕ5-АС-500/440-ЕР2711-С01-УХЛ4:

$$T_{III} = \frac{1}{2 \cdot m_g \cdot f} = \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ сек.} \tag{2.29}$$

$$T_e = \frac{L_0}{R_0} = \frac{3,76 \cdot 10^{-4}}{0,1929} = 1,95 \cdot 10^{-3} \text{ сек.} \tag{2.30}$$

$$T_{ем} = \frac{J \cdot R_0}{C_e^2} = \frac{20 \cdot 0,1929}{12,89^2} = 0,1125 \text{ сек,} \tag{2.31}$$

тут:

$$k\Phi_n = c_e = \frac{U_n - I_n R_{я\Sigma}}{\omega_n} = \frac{400 - 500 \cdot 0,0685}{28,38} = 12,89 \frac{В \cdot с}{рад}. \tag{2.32}$$

$$c_m = \frac{M_n}{I_n} = \frac{7470,85}{500} = 14,94 \frac{Н \cdot м}{А}; \tag{2.33}$$

$$\text{де } 2U_{оп\max} = 8 \text{ В.}$$

2.2.4 Прорахунок обмотки незалежного збудження

Параметри обмотки незалежного збудження:

$$R_{з\text{ср}} = 1,38 \cdot R_3 = 1,38 \cdot 2,35 = 3,24 \text{ Ом.} \tag{2.34}$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$L_3 = 2pW_3 \frac{\Delta\Phi}{\Delta I_3} = 8 \cdot 150 \frac{0,005}{9} = 0,67 \text{ Гн}, \quad (2.35)$$

тут $\Delta\Phi = \Phi_H - \Phi_{\min} = 0,012 - 0,007 = 0,005 \text{ Вб}; \quad \Delta I = I_{3H} - I_{3\min} = 24 - 15 = 9 \text{ А};$
 $I_{3\min} = 15 \text{ А}.$

$$L_s = 2p \cdot W_6 \frac{\Phi_H(\sigma - 1)}{I_{3H}} = 8 \cdot 150 \frac{0,012(1,18 - 1)}{24} = 0,108 \text{ Гн}. \quad (2.36)$$

2.2.5 Прорахунок силового ланцюга обмотки незалежного збудження

Опір:

$$R_3 = R_{III3} + R_{3зcp} = 0,022 + 3,24 = 3,262 \text{ Ом}. \quad (2.37)$$

Сталі часу:

$$T_3 = \frac{L_3}{R_3} = \frac{1,47 \cdot 10^{-4}}{3,262} = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ сек}. \quad (2.38)$$

$$T_s = \frac{L_{III3} + L_s}{R_3} = \frac{1,47 \cdot 10^{-4} + 0,108}{3,262} = 0,0332 \text{ сек}. \quad (2.39)$$

$$T_{\text{вс}} = 0,1 \cdot T_3 = 0,1 \cdot 0,0332 = 0,00332 \text{ сек}. \quad (2.40)$$

Мінімальний кут перетворювача в ланцюзі незалежного збудження:

$$\alpha_{\min} \leq \arccos \frac{I_{3\text{ном}} R_3}{k_{Uc\min} E_{d0}} = \arccos \frac{24 \cdot 3,262}{6,87 \cdot 936} = 89,35 \text{ ел. град}. \quad (2.41)$$

Беремо $\alpha_{\min} = 30 \text{ ел. град}.$

2.3 Статика електроприводу механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

2.3.1 Статика електродвигуна 3BSM003050 DMI 315V

Рівняння статичних характеристик двигуна:

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\omega(I) = \frac{U_H}{k_E} - \frac{IR_{\pi}}{k_E}; \quad (2.42)$$

$$\omega(M) = \frac{U_H}{k_E} - \frac{MR_{\pi}}{k_E k_M}. \quad (2.43)$$

Прораховуємо базові точки:

$$\omega_{0EM} = \omega_{0M} = \frac{U_H}{c_e} = \frac{400}{12,89} = 31,04 \text{ с}^{-1}. \quad (2.44)$$

$$\Delta\omega_{EM} = \frac{I_H \cdot R_{\pi}}{c_e} = \frac{550 \cdot 0,047}{12,89} = 1,82 \text{ с}^{-1}. \quad (2.45)$$

$$\Delta\omega_M = \frac{M_H \cdot R_{\pi}}{c_e \cdot c_m} = \frac{7470,85 \cdot 0,047}{12,89 \cdot 14,94} = 1,82 \text{ с}^{-1}. \quad (2.46)$$

Графіки статичних характеристик 3BSM003050 DMI 315V див. на рис. 2.3 і рис. 2.4.

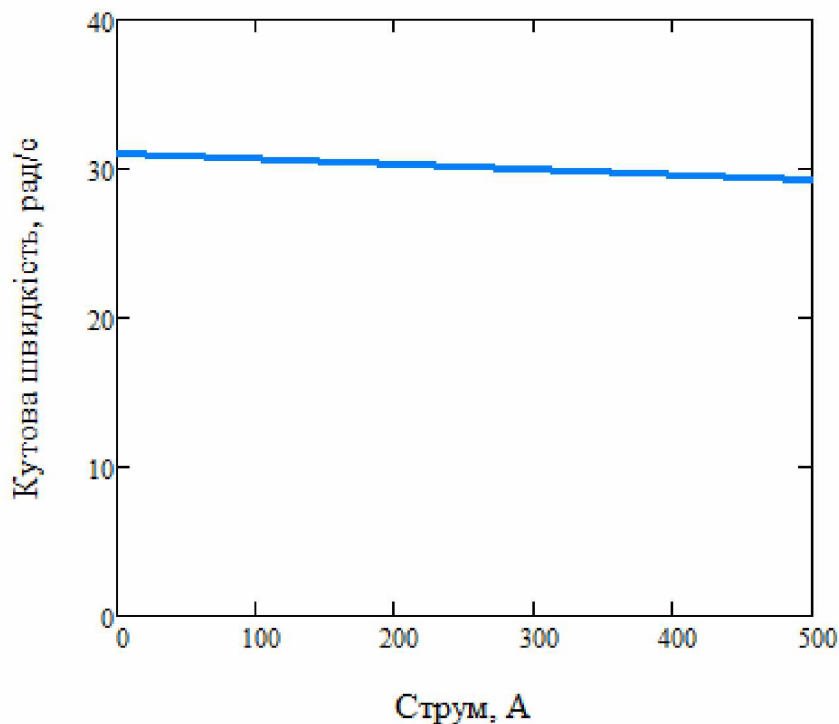


Рисунок 2.3 – Електромеханічна характеристика 3BSM003050 DMI 315V

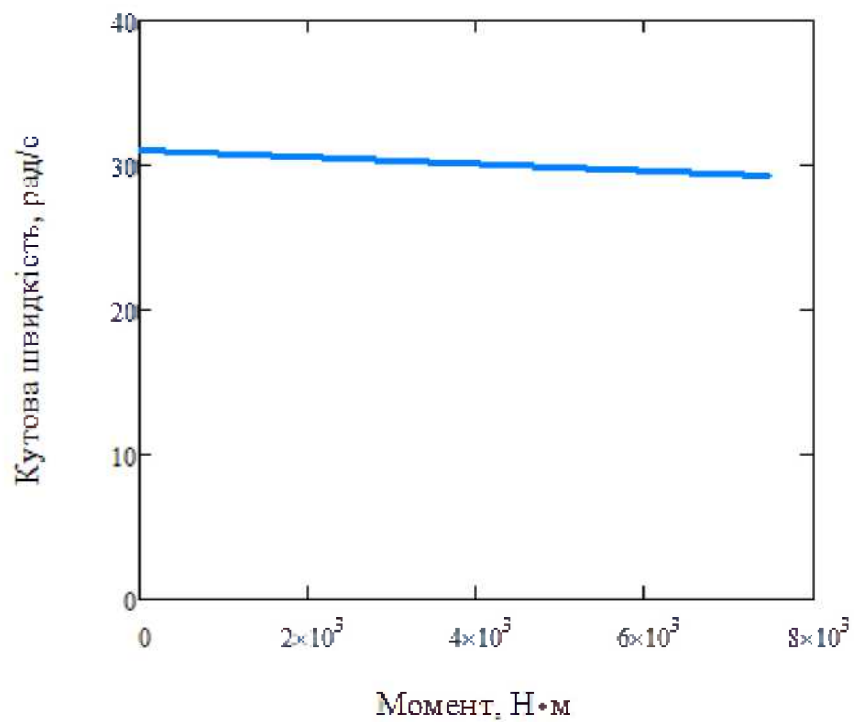


Рисунок 2.4 – Механічна характеристика 3BSM003050 DMI 315V

Енергетична характеристика двигуна:

$$\eta(I_{я}) = \frac{I_{я}}{I_{яconst}},$$

де $\Delta P_{const} = 0,5P_{ном}(1 - \eta_{ном})$.

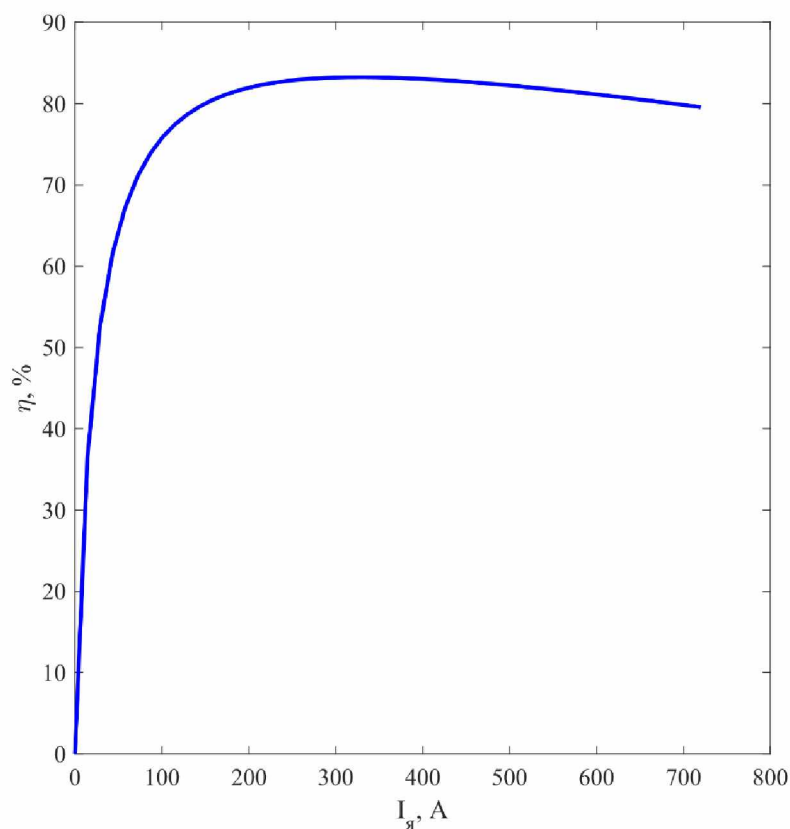


Рисунок 2.5 – Енергетична характеристика 3BSM003050 DMI 315V

2.3.2 Прорахунок статички системи ТП-Д механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

Рівняння статичних характеристик ТП-Д в області безперервних струмів:

$$\omega(I) = \frac{E_{d0} \cos(\alpha) - \Delta U_s}{k_E} - \frac{IR_0}{k_E}; \quad (2.47)$$

$$\omega(M) = \frac{E_{d0} \cos(\alpha) - \Delta U_s}{k_E} - \frac{MR_0}{k_E k_M}. \quad (2.48)$$

Напочатку прорахуємо межі варіювання кутів керування.

Кут керування (верхня межа):

$$\begin{aligned} \alpha_{\max} &\leq 180^\circ - \alpha_{\min} = 180^\circ - (\gamma + \delta + \Delta\alpha) = \\ &= 180^\circ - (3,66 + 2,7 + 3) = 170,64 \text{ ел. град.} = 2,97 \text{ рад.}, \end{aligned} \quad (2.49)$$

тут:

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\delta = \frac{2\pi f}{\pi} 180^\circ \frac{\pi}{180^\circ} \cdot t_{\text{відкл}} =$$

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

$$\gamma = \arccos \left(\cos \alpha_{\text{ном}} - \frac{X_{\text{мп}} \cdot I_{\text{ном}}}{\sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{m} \right)} \right) - \alpha_{\text{ном}} =$$

$$= \arccos \left(\cos(1,11) - \frac{0,0359 \cdot 500}{\sqrt{2} \cdot 292 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{3} \right)} \right) - 1,1 = \quad (2.50)$$

$$= 0,0554 \text{ рад} = 3,1729 \text{ ел.град.},$$

тут:

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

$$= \arccos \left[\frac{400 + \left(0,0025 + \frac{6 \cdot 0,0359}{2\pi} \right) \cdot 500 + 1,8}{2236,79} \right] =$$

$$= 1,11 \text{ рад} = 63,6 \text{ ел. град.}$$

Кут керування (нижня межа):

$$\alpha_{\text{min}} = \gamma + \delta + \Delta\alpha = 3,1729 + 2,7 + 3 =$$

$$= 8,872 \text{ ел. град.} = 0,1547 \text{ рад.} \quad (2.51)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

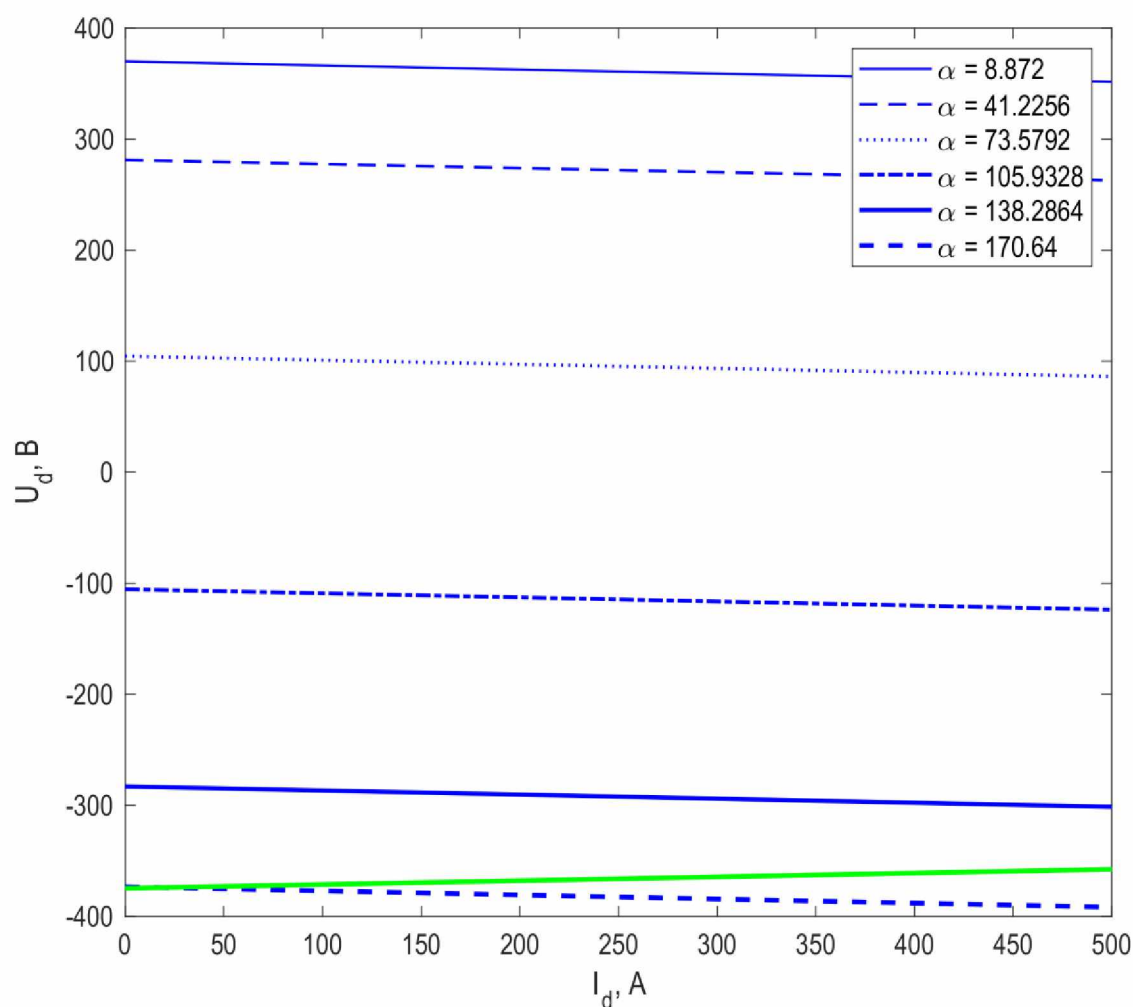


Рисунок 2.6 – Зовнішні характеристики перетворювача КТЕ5-АС-500/440-EP2711-C01-УХЛ4

Кутова частота холостого ходу:

$$\omega_{0xx} = \frac{E_{d0} \cos(\alpha) - \Delta U_e}{k_E}. \quad (2.52)$$

Зона переривчастих струмів обмежується дугою еліпсу згідно:

$$I_{d_{zp}} = \frac{E_{d0} \sin(\alpha)}{X_{mp} + 2\pi f \cdot L_0} \left(1 - \frac{\pi}{p} \cot\left(\frac{\pi}{p}\right) \right) = \frac{E_{d0} \sin(\alpha)}{\omega \cdot L_y} \left(1 - \frac{\pi}{p} \cot\left(\frac{\pi}{p}\right) \right). \quad (2.53)$$

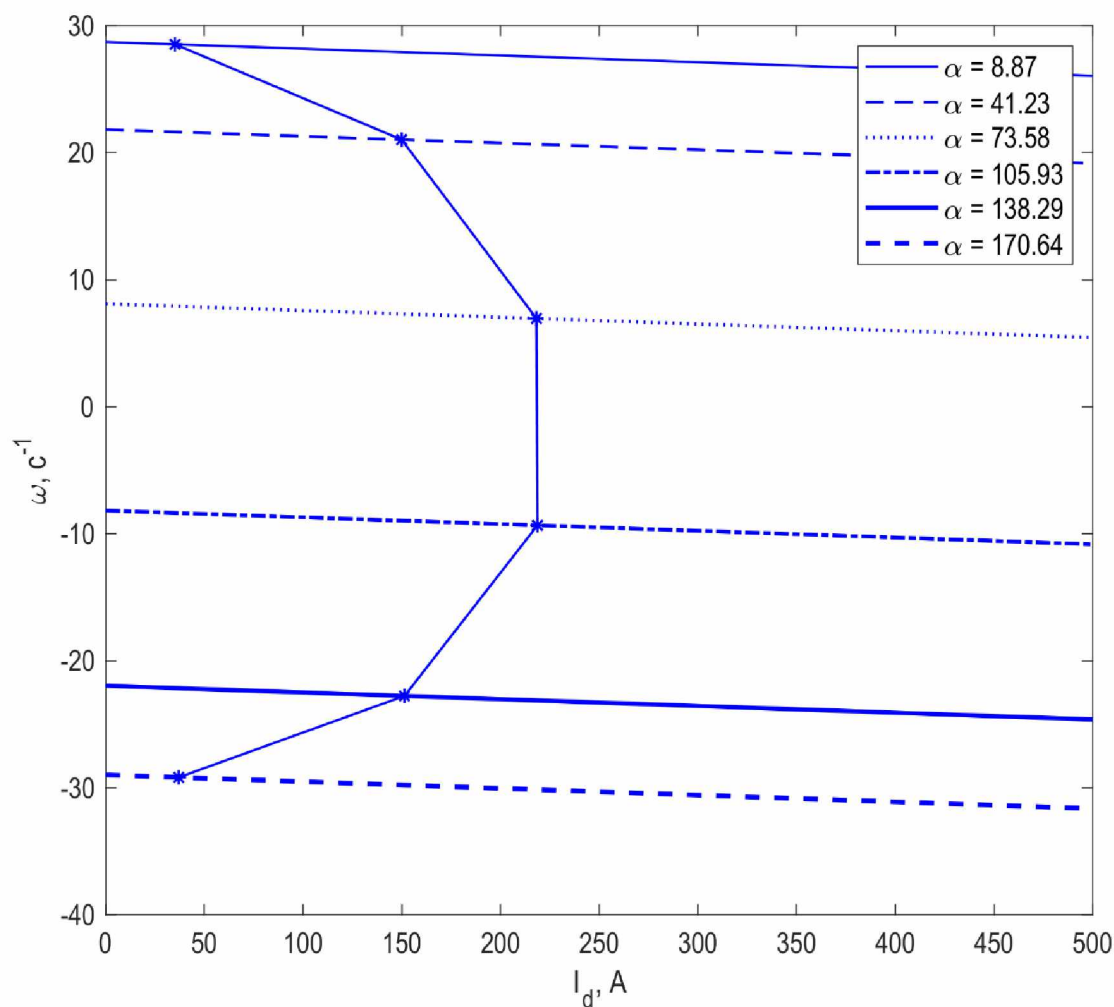


Рисунок 2.7 – Електромеханічні характеристики ТП-Д механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

Найбільш суттєвим наслідком виникнення режиму переривчастих струмів є зміна механічних характеристик електропривода. В зоні переривчастих струмів вони стають різко нелінійними та м'якими. Це означає, що навіть незначна зміна навантаження викликає непропорційно велике відхилення швидкості обертання. Крім того, в цьому режимі спостерігається фіктивне зростання швидкості ідеального холостого ходу, що зміщує робочі ділянки характеристик вгору і звужує діапазон стабільного регулювання швидкості вниз.

Через глибокі провали струму до нуля значно зростає амплітуда його пульсацій. Внаслідок цього діюче (ефективне) значення струму якоря стає

суттєво більшим за його середнє значення, що призводить до збільшення електричних втрат.

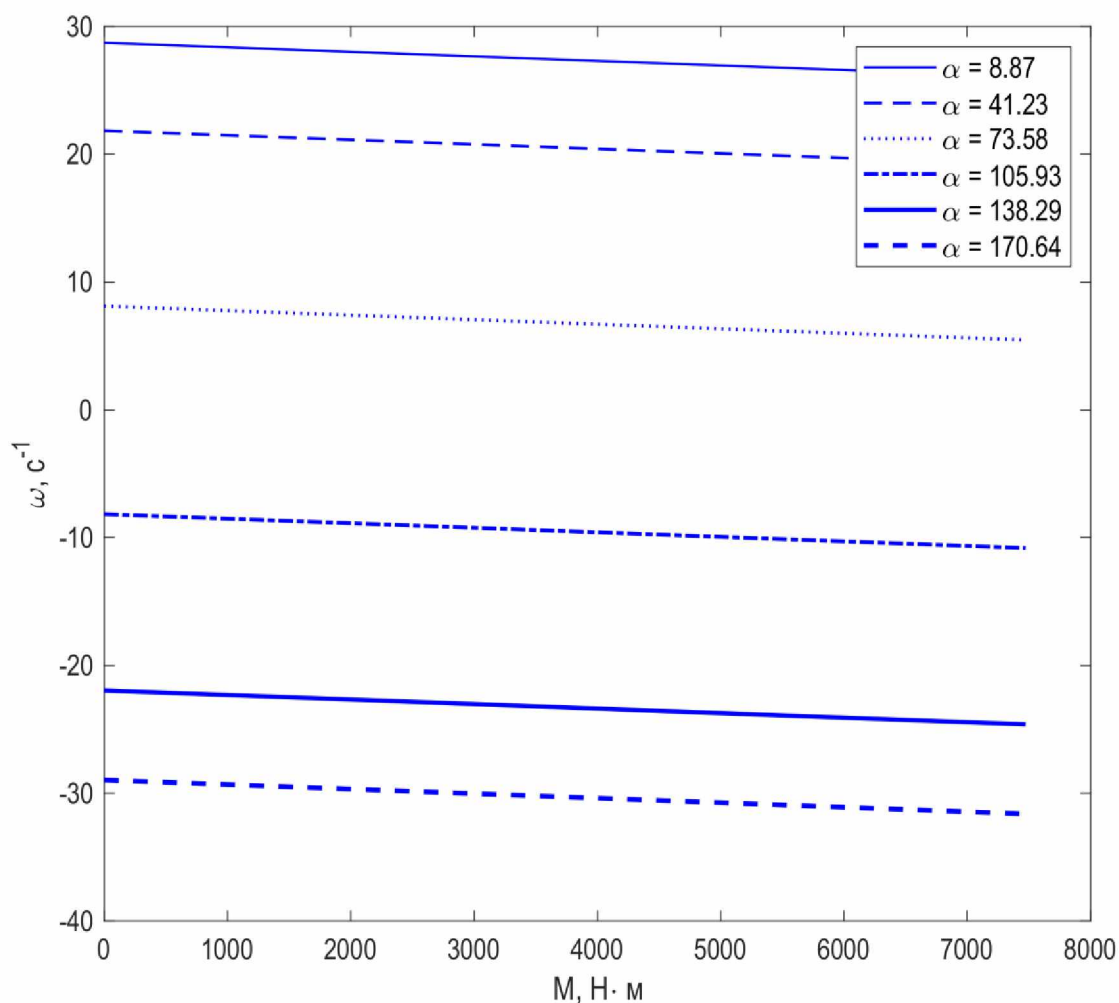


Рисунок 2.8 – Механічні характеристики ТП-Д механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

Для систем автоматичного керування (САР) електроприводом перехід у режим переривчастих струмів створює серйозні проблеми, оскільки тиристорний перетворювач втрачає свої лінійні властивості. Його коефіцієнт підсилення та сталі часу перестають бути константами і починають залежати від поточного значення струму навантаження та кута керування. Це робить об'єкт керування нелінійним і змінним, що значно ускладнює налаштування регуляторів струму і швидкості для забезпечення стійкості системи.

Якщо привід механізму повороту екскаватора переходить в переривчастий режим, то потрібно впроваджувати згладжувальні реактори підвищеної індуктивності.

Висновки до розділу 2

У розділі для живлення двигуна приводу механізму повороту екскаватора ЕКГ-10 та забезпечення бажаної динаміки електроприводу було підібрано реверсивний тиристорний перетворювач типу КТЕ5-АС-500/440-ЕР2711-С01-УХЛ4. Доповненням до силової частини електропривода стали розраховані та обрані силовий трансформатор ТМ-250/6(10)/0,4 та згладжувальний реактор ФРОС-125/0,5У3. Прораховані заступні схеми електродвигуна та електроприводу ТП-Д. Побудовані статичні характеристики приводу механізму повороту екскаватора в зоні безперервних і переривчастих струмів.

					<i>КНУ.РБ.141.26.250с.08.02.Р2</i>	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 3. Динаміка електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

					<i>КНУ.РБ.141.26.250с.08.03.РЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Кошевой С.С.</i>			<i>Динаміка електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>42</i>	
<i>Конс.</i>						<i>ЕЕМ-23ск</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

3.1 Симуляційний аналіз динаміки електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

Симуляційна модель двигуна ABB 3BSM003050 DMI 315V формується на основі системи дифрівнянь, які комплексно описують динаміку. Поведінка кола якоря підпорядковується 2-му закону Кірхгофа. Одночасно рух якоря описується рівнянням динамічної рівноваги моментів [10, 11].

Ці дві підсистеми нерозривно пов'язані, завдяки чому будь-яка зміна напруги живлення або зовнішнього навантаження ініціює зміну струму з певною електромагнітною сталою часу, формуючи новий обертовий момент, що прискорює або сповільнює якір [10, 11].

На рис. 3.1 відображено блок-схему симуляційного опису двигуна ABB 3BSM003050 DMI 315V, розроблену на підставі системи аналітичних залежностей, а на рис. 3.2 представлено підсумки її комп'ютерного дослідження, виконаного із застосуванням програмного інструментарію MATLAB/Simulink.

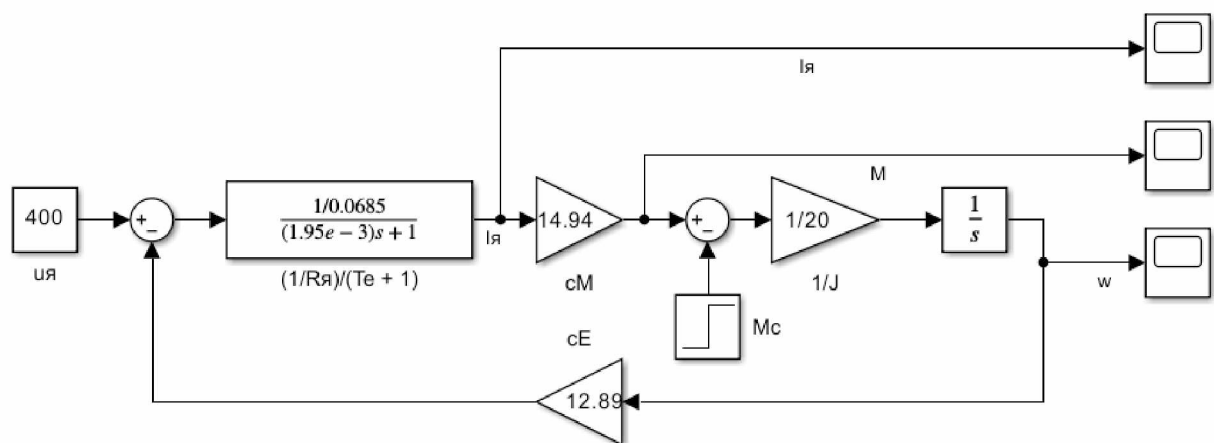


Рисунок 3.1 – Симуляційна модель двигуна ABB 3BSM003050 DMI 315V механізму повороту екскаватора ЕКГ-10

Як видно з графіків двигун має пускові коливання перехідних характеристик, як за швидкістю, так і за моментом і струмом.

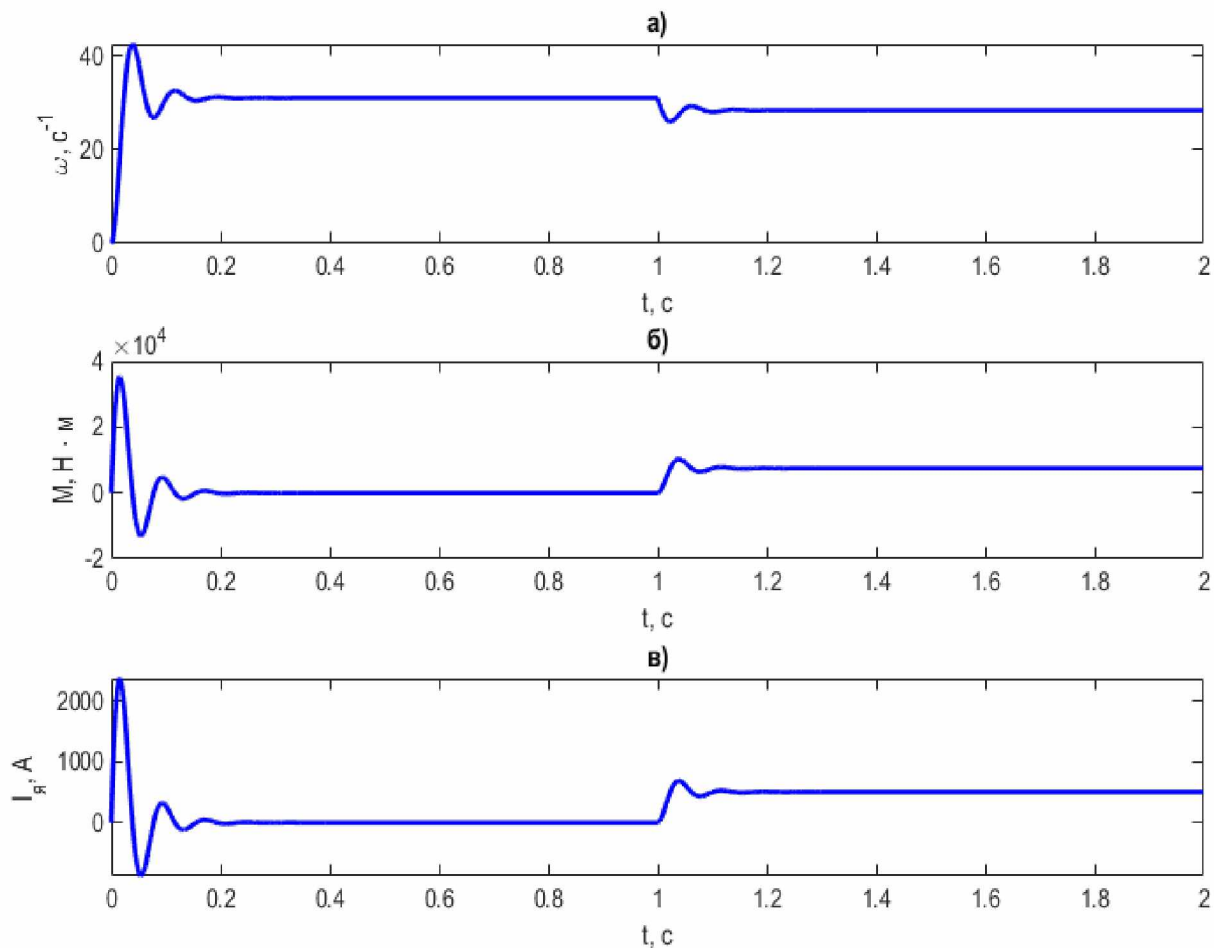


Рисунок 3.2 – Перехідні характеристики двигуна ABB 3BSM003050 DMI 315V:

а) швидкість; б) момент; в) струм якоря

Отже така система потребує побудови корегувальної ланки, яка покращить динаміку двигуна ABB 3BSM003050 DMI 315V в електроприводі.

3.2 Керування електроприводом механізму повороту екскаватора за допомогою коригувального пристрою з випереджувальною та запізнювальною ланками

У САК коригувальний пристрій з випереджувальною та запізнювальною ланками використовується для одночасного покращення якості перехідних процесів та точності системи в усталеному стані.

Випереджувальна ланка додає системі додатний фазовий зсув, що збільшує запас за фазою, покращує відносну стійкість та пришвидшує перехідний процес.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КНУ.РБ.141.26.250с.08.03.РЗ

Арк.

44

Запізнювальна ланка збільшує коефіцієнт підсилення розімкненої системи на низьких частотах, суттєво не впливаючи на високочастотну область частоти зрізу. Це зменшує усталені помилки (наприклад, для лінійних або ступінчастих вхідних сигналів), зберігаючи при цьому запаси стійкості, забезпечені випереджувальною ланкою.

Передавальна функція коригувального пристрою $W_c(p)$ є добутком запізнювальної та випереджувальної ланок:

$$W_c(p) = K_c \cdot \frac{T_1 p + 1}{\beta T_1 p + 1} \cdot \frac{T_2 p + 1}{\beta T_2 p + 1}, \quad (3.1)$$

де K_c – коефіцієнт підсилення розімкненої системи; $\beta > 1$ – визначає ослаблення запізнювальної ланки; $\alpha > 1$ – визначає фазове випередження та підсилення на високих частотах для випереджувальної ланки.

Загальна передавальна функція розімкненої системи має вигляд $W_s(p) = W_c(p)W_o(p)$, $W_o(p)$ – передавальна функція об'єкта.

Спрощено модель двигуна представимо, як:

$$W_o(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K}{(T_{em} p + 1)(T_e p + 1)} = \frac{0,0728}{(0,1125 p + 1)(1,95 \cdot 10^{-3} p + 1)}, \quad (3.2)$$

де

$$K = \frac{\omega_{ном}}{E} = \frac{28,98}{390} = 0,0728 \frac{рад/с}{В}. \quad (3.3)$$

Для контуру швидкості механізму повороту екскаватора формулюємо вимоги:

1. Вимога до точності в усталеному стані. Оскільки система типу 0, вона має скінченну усталену помилку при ступінчастому впливі. Вимагаємо, щоб коефіцієнт підсилення розімкненої системи на постійному струмі $K_{пс} \geq 50$. Це

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.03.РЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

забезпечить усталену помилку відпрацювання швидкості не більше

$$\frac{1}{1 + K_{ПС}} \approx 2\%.$$

2. Вимога до динамічної стійкості: Беремо запас за фазою 50° для запобігання коливанням масивної платформи.

АФЧХ розімкненої системи див. рис. 3.3.

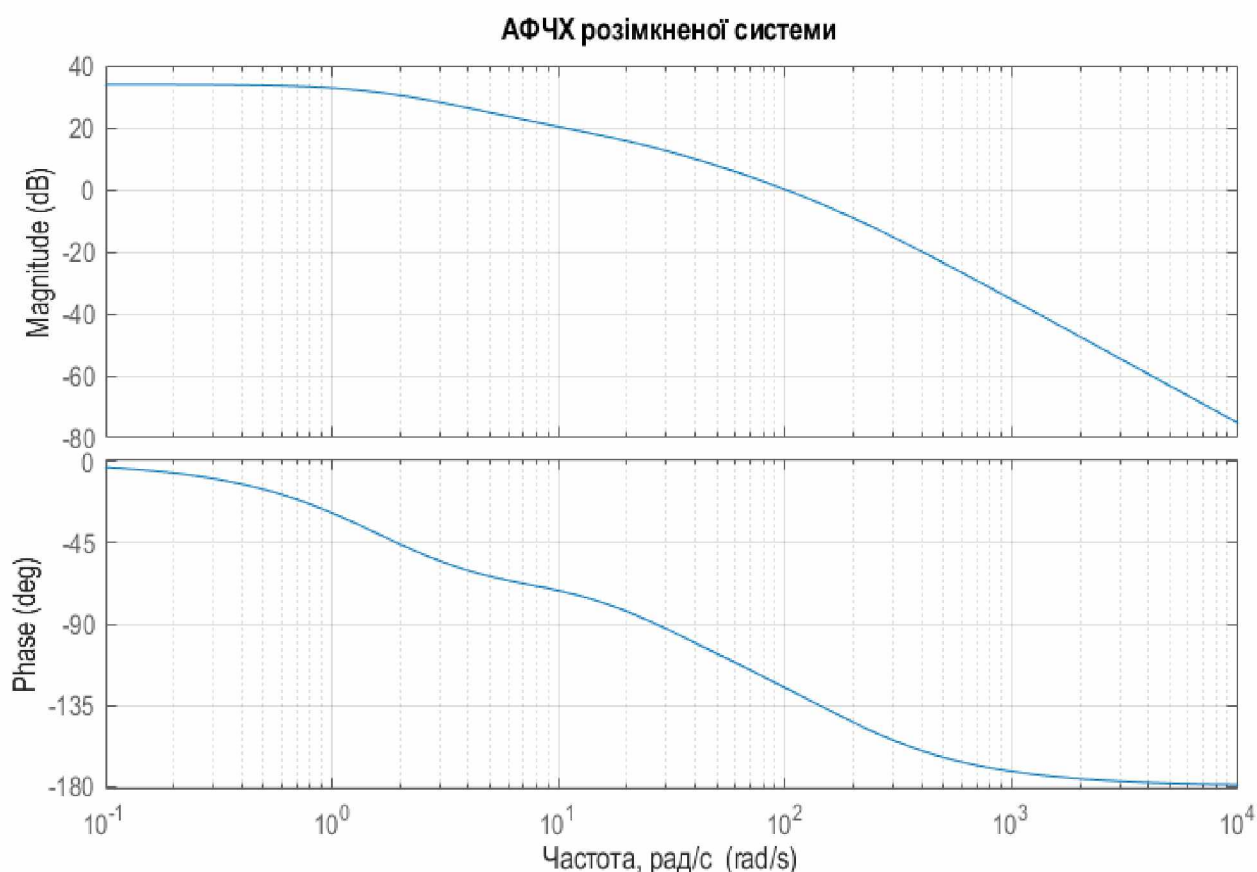


Рисунок 3.3 – АФЧХ розімкненої системи електроприводу механізму
обертання екскаватора ЕКГ-10

Налаштую коефіцієнт підсилення K_c . Щоб забезпечити $K_{ПС} = 50$ беремо пропорційний коефіцієнт:

$$K_c = \frac{K_{ПС}}{K} = \frac{50}{0,0728} = 686,81. \quad (3.4)$$

Аналіз некоригованої системи (3.2). Через дуже високий коефіцієнт підсилення (50 або 34 дБ), частота зрізу за підсиленням $|G|=1$ зміщується у

високочастотну область $\omega_z \approx 209 \text{ рад/с}$. Фаза на цій частоті $\angle G = -\text{atg}(0,1125 \cdot 209) - \text{atg}(1,95 \cdot 10^{-3} \cdot 209) = -161,7^\circ$.

Запас за фазою тоді $180^\circ - 161,7^\circ = 18,3^\circ$.

Система має низький запас стійкості і буде сильно коливальною. Необхідне коригування.

Просто додати випереджувальну ланку не має змоги, бо вона ще більше підніме високочастотне підсилення, змістить частоту зрізу праворуч (де фаза об'єкта ще більш від'ємна) і погіршить стійкість. Тому застосуємо комбінований підхід. Запізнювальна ланка сильно ослабить сигнал на високих частотах, знизивши частоту зрізу до безпечнішої зони (наприклад, $\omega_z = 100 \text{ рад/с}$). Випереджувальна ланка додасть необхідний фазовий зсув на цій новій частоті зрізу для досягнення запасу 50° .

3.2.1 Побудова запізнювальної ланки

Обчислимо амплітуду некоригованої системи на бажаній частоті

$$\begin{aligned} |K_c W_o(j100)| &= \frac{50}{\sqrt{1 + (0,1125 + 100)^2} \sqrt{1 + (1,95 \cdot 10^{-3} + 100)^2}} = \\ &= 3,87. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Щоб компенсувати це підсилення та врахувати підсилення від майбутньої запізнювальної ланки (яке зазвичай становить близько 1.5), загальне ослаблення від запізнювальної ланки має становити близько $3,87 \cdot 1,5 = 5,8$.

Розміщуємо нуль запізнювальної ланки на декаду нижче частоти зрізу $\omega_z = 10 \text{ рад/с}$:

$$T_1 = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ с}. \quad (3.6)$$

Плюс запізнювальної ланки:

$$\beta T_1 = 5,80,1 = 0,58 \text{ с}. \quad (3.7)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.03.РЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Отже передавальна функція запізнювальної ланки:

$$W_{зан}(p) = \frac{0,1p + 1}{0,58p + 1}. \quad (3.8)$$

3.2.2 Побудова випереджувальної ланки

Тепер визначимо, скільки фази потрібно додати на частоті $\omega_z = 10 \text{ рад/с}$.

Фаза об'єкта:

$$\phi_p = -\text{atg}(5,7) - \text{atg}(2,0) = -143,4^\circ. \quad (3.9)$$

Фаза запізнювальної ланки:

$$\phi_{зан} = \text{atg}(0,1 \cdot 100) - \text{atg}(0,58 \cdot 100) = -4,7^\circ. \quad (3.10)$$

Сумарна фаза без запізнювальної ланки:

$$\phi_{сум} = \phi_p + \phi_{зан} = -143,4^\circ - 4,7^\circ. \quad (3.11)$$

Для отримання загальна фаза має бути 130° .

Необхідне фазове випередження:

$$\phi_{вин} = -130^\circ - (-148,1) = +18,1^\circ. \quad (3.12)$$

Додаємо 5° запасу $\phi_{вин} = 18,1^\circ + 5^\circ = 23,1^\circ$.

Знаходимо параметр α :

$$\sin(23,1^\circ) = 0,392 = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \text{ звідки } \alpha = 0,44. \quad (3.13)$$

Розміщуємо максимум фазового випередження точно на

$$T_2 = \frac{1}{100\sqrt{0,44}} = 0,015 \text{ с}; \quad (3.14)$$

$$\alpha T_2 = 0,44 \cdot 0,015 = 0,0066 \text{ с}. \quad (3.15)$$

Отже передавальна функція випереджувальної ланки:

$$W_{вин}(p) = \frac{0,015p + 1}{0,0066p + 1}. \quad (3.16)$$

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.03.РЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.2.3 Остаточна побудова та перевірка запізнювально-випереджувальної ланки

Передавальна функція побудованого запізнювально-випереджувального регулятора швидкості:

$$W_c(p) = 687 \cdot \frac{0,1p+1}{0,58p+1} \cdot \frac{0,015p+1}{0,0066p+1}. \quad (3.17)$$

Фінальна перевірка якості контролера на частоті $\omega_3 = 100 \text{ рад/с}$.

Точність в усталеному стані:

$$K_{\text{ПС}} = W_c(p)W_o(p) = 687 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,0728 = 50,014. \quad (3.18)$$

Вимога виконана. Усталена помилка швидкості становить $\frac{1}{1+50,014} = 1,96\%$

Амплітуда:

$$|K_c W_o(j100)| = 3,87; \quad (3.19)$$

$$|W_{\text{зан}}(j100)| = \frac{\sqrt{1+10^2}}{\sqrt{1+58^2}} = \frac{10,05}{58,01} = 0,173; \quad (3.20)$$

$$|W_{\text{вин}}(j100)| = \frac{\sqrt{1+1,5^2}}{\sqrt{1+0,66^2}} = \frac{1,8}{1,19} = 1,51. \quad (3.21)$$

Загальна амплітуда $3,87 \cdot 0,173 \cdot 1,51 \approx 1,01 \approx 1(0 \text{ дБ})$. Отже частота зрізу дійсно 100 рад/с.

Стійкість:

Фаза об'єкта $-143,4^\circ$, фаза запізнювальної ланки $-4,7^\circ$, фаза випереджувальної ланки $\text{atg}(1,5) - \text{atg}(0,66) = 56,3^\circ - 33,4^\circ = +22,9^\circ$.

Загальна фаза $-143,4^\circ - 4,7^\circ + 22,9^\circ = -125,2^\circ$.

Запас за фазою $180^\circ - 125,2^\circ = 54,8^\circ$.

$54,8^\circ > 50^\circ$ вимога виконана, система добре демпфована.

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.03.РЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

При переході до контуру регулювання швидкості об'єкт втрачає інтегровальну властивість, що вимагає значного підвищення коефіцієнта підсилення для забезпечення точності. Це неминуче призводить до різкого зниження запасу стійкості некоригованої системи ($18,3^\circ$). Створений запізнювально-випереджувальний регулятор вирішує цю проблему: запізнювальна ланка знижує частоту зрізу з 209 рад/с до 100 рад/с, уникаючи зони глибоких фазових запізнювань, а випереджувальна ланка компенсує інерційність електромеханічної частини двигуна, забезпечуючи надійний запас стійкості $54,8^\circ$ для плавного та точного регулювання швидкості повороту платформи екскаватора.

3.2.4 Симуляція роботи САК електроприводом механізму повороту платформи екскаватора ЕКГ-10

Модель САК електроприводом з запізнювально-випереджувальним контролером показана на рис. 3.4, сам контролер на рис. 3.5.

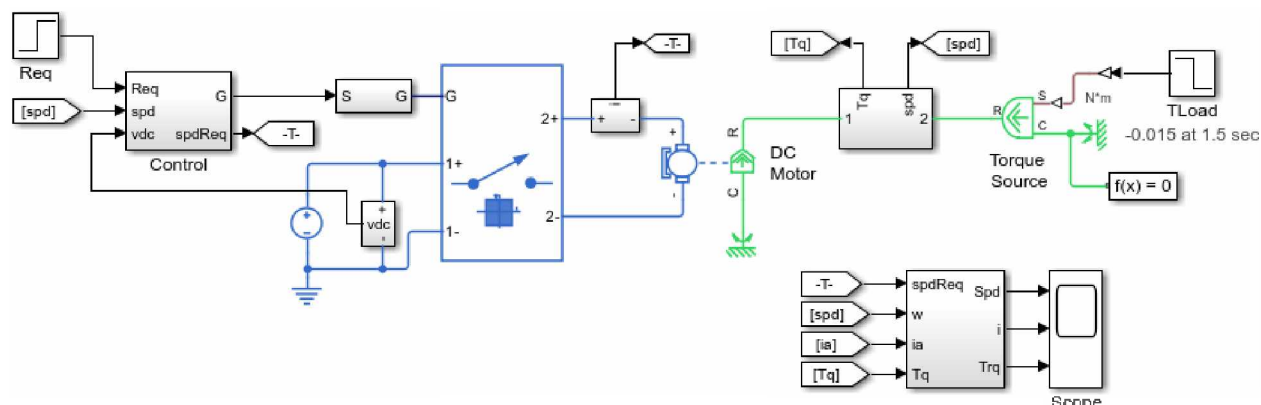


Рисунок 3.4 – Симуляційна модель електроприводу механізму повороту платформи екскаватора ЕКГ-10 [12]

Перехідні характеристики наведені на рис. 3.6.

Аналізуючи отримані графічні залежності, можна стверджувати, що в момент стрибкоподібної зміни механічного навантаження на позначці 1,5 секунди контур підлеглого регулювання успішно компенсує цей збурюючий вплив, повертаючи кутову якоря ротора до заданого номінального рівня.

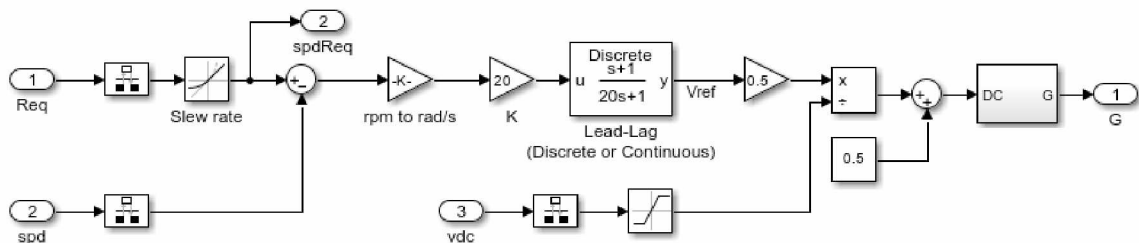


Рисунок 3.5 – Симуляційна модель САК електроприводом механізму повороту платформи екскаватора ЕКГ-10 [12]

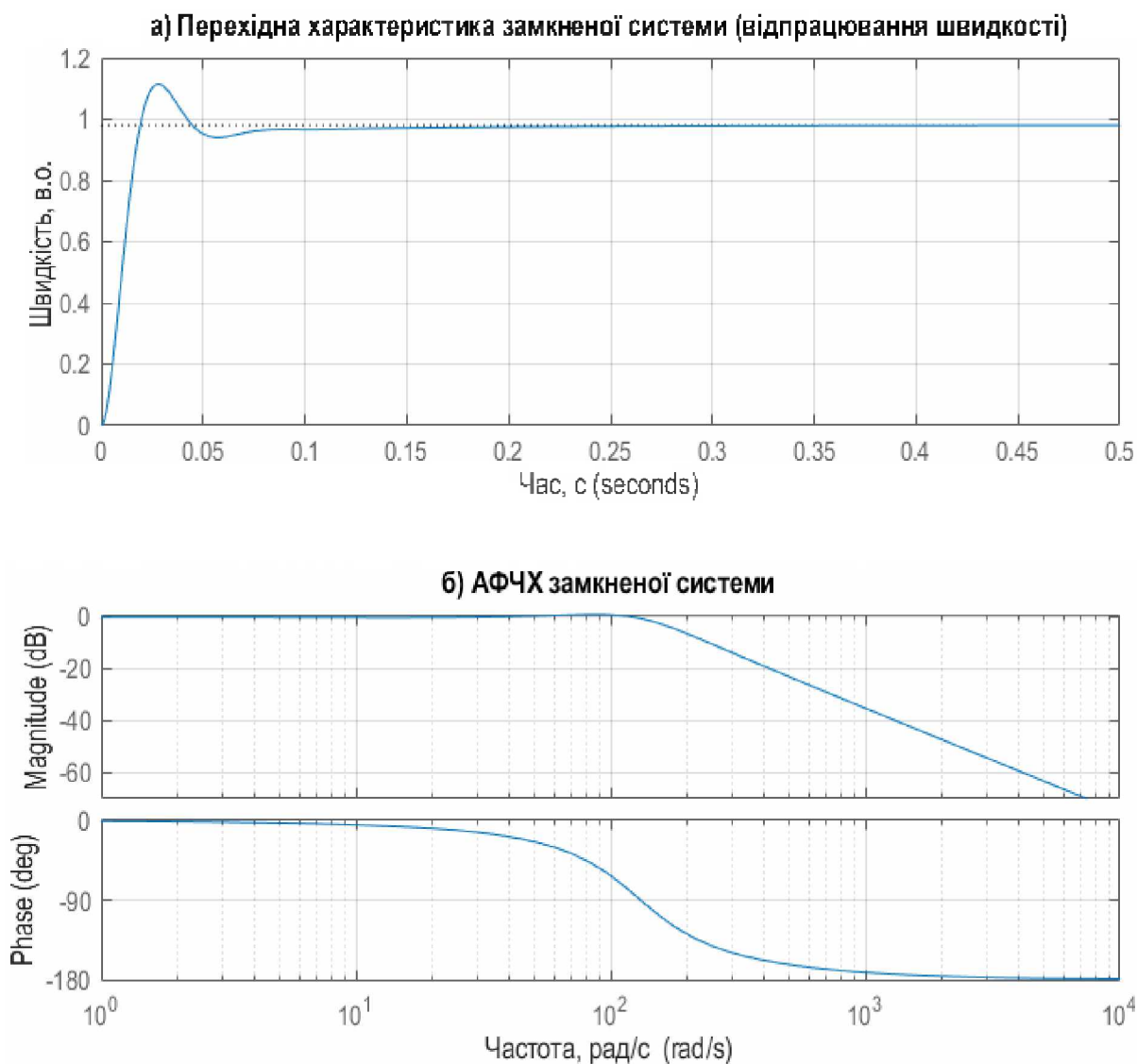


Рисунок 3.6 – Динаміка електроприводу механізму повороту платформи екскаватора ЕКГ-10 з запізнювально-випереджувальною ланкою

Окремо варто підкреслити, що застосування запропонованих рішень дозволяє суттєво скоротити коливальність та перерегулювання порівнюючи з

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КНУ.РБ.141.26.250с.08.03.РЗ

Арк.

51

рис. 3.1. Проте наявні відхилення є цілком прийнятним і не створює критичних загроз для надійного функціонування машини, оскільки реальна специфіка роботи екскаватора передбачає розгін двигуна вже з заповненим гірничою масою ковшом, що повністю нівелює можливі негативні динамічні наслідки. Підсумовуючи проведені прорахунки, цілком обґрунтованим є висновок про технічну придатність та доцільність практичного впровадження побудованої системи регулювання електропривода з запізнювально-випереджувальною ланкою в умовах експлуатації кар'єрного екскаватора моделі ЕКГ-10.

Висновок до розділу 3

У розділі на основі моделі двигуна АВВ у середовищі MATLAB/Simulink виявлено низьку динамічну стійкість некоригованого електропривода механізму повороту екскаватора ЕКГ-10. Для усунення значних коливань швидкості та струму синтезовано запізнювально-випереджувальний коригувальний пристрій, який забезпечив зниження частоти зрізу до 100 рад/с та досягнення необхідного запасу за фазою 54.8° . Це дозволило зменшити усталену помилку швидкості до 2% та гарантувати плавне демпфування перехідних процесів. Комп'ютерне моделювання підтвердило високу швидкодію системи та її здатність ефективно компенсувати стрибкоподібні зміни механічного навантаження. Незначні динамічні відхилення є цілком прийнятними, оскільки в реальних умовах масивний завантажений ківш природним чином нівелює можливі перерегулювання. Таким чином, розроблена система автоматичного керування є технічно обґрунтованою, повністю задовольняє вимоги до точності та стійкості і рекомендована до практичного впровадження на кар'єрних екскаваторах.

					<i>КНУ.РБ.141.26.250с.08.03.РЗ</i>	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу технологічного процесу видобутку руди та детального розрахунку механічних навантажень (моментів інерції, зусиль при копанні та повороті) обґрунтовано доцільність застосування дводвигунної схеми приводу механізму повороту. Здійснено вибір двигуна постійного струму ABB 3BSM003050 DMI 315V, який повністю задовольняє вимоги за еквівалентним моментом та потужністю в заданому важкому повторно-короткочасному режимі роботи екскаватора ЕКГ-10.

2. Для живлення обраного двигуна та забезпечення необхідної динаміки підібрано реверсивний тиристорний перетворювач КТЕ5-АС-500/440-ЕР2711-С01-УХЛ4, силовий трансформатор ТМ-250/6(10)/0,4 та згладжувальний реактор ФРОС-125/0,5У3. Побудовані статичні електромеханічні та механічні характеристики підтвердили, що використання реактора підвищеної індуктивності є критично необхідним для мінімізації негативного впливу режиму переривчастих струмів, який робить характеристики системи нелінійними та м'якими.

3. Шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink створено динамічну математичну модель електропривода. Аналіз перехідних процесів виявив низький запас стійкості та наявність значних пускових коливань швидкості, моменту та струму якоря в системі без коригувальних ланок, що обґрунтувало необхідність синтезу спеціалізованого регулятора для покращення якості перехідних процесів.

4. Побудовано запізнювально-випереджувальний контролер для контуру регулювання швидкості. Завдяки оптимальному поєднанню ланок вдалося знизити частоту зрізу з 209 рад/с до 100 рад/с, уникнути зони глибоких фазових запізнювань та забезпечити необхідний запас за фазою 54.8° . Це гарантує плавне демпфування перехідних процесів та зменшення усталеної помилки відпрацювання швидкості до 2%.

5. Результати імітаційного моделювання підтвердили високу ефективність запропонованої системи автоматичного керування: вона успішно компенсує стрибкоподібні зміни механічного навантаження, суттєво знижує

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.00.В	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

перерегулювання порівняно з базовою схемою та забезпечує стабільну роботу навіть при розгоні з повним ковшом. Розроблена система є технічно обґрунтованою, повністю задовольняє вимоги до точності та надійності, і рекомендована до практичного впровадження на кар'єрних екскаваторах ЕКГ-10 для підвищення їхньої продуктивності та енергоефективності.

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.00.В	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Виробнича система підприємства. АТ «ПівдГЗК». URL: <https://www.ugok.com.ua/%D0%BF%D1%80%D0%BE-%D0%BD%D0%B0%D1%81/%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B0-%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0> (Дата звернення: 19.05.2026)
2. Екскаватор ЕКГ-10. ІПП ТЕХ-МАШ. URL: <https://www.ekg.pl.ua/ekg10/index.htm> (Дата звернення: 20.05.2026)
3. 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.
4. Розрахунок електроприводу механізму повороту одноковшового екскаватора ЕКГ-4У. URL: <https://studfile.net/preview/5512888/> (Дата звернення: 20.05.2026)
5. 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.
6. DC Motors Catalog Type DMI/Type DMI/Typ DMI. ABB. URL: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BSM003046-1_1&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch (Дата звернення: 30.05.2026)
7. Перетворювачі для електроприводів постійного струму. ТОВ «НВП «Перетворювач-комплекс». URL: https://pcomplex.ua/products_pt/peretvorjuvach%D1%96-dlja-elektroprivod%D1%96v-post%D1%96jjnogo-strumu/ (Дата звернення: 31.05.2026)

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.00.Л	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55

8. Трансформатор масляний ТМ, ТМГ, ТМЗ – 250/6(10)/0,4 кВА. ПП МТС «ЕЛЕКТРОЩИТ». URL: <http://mart.dp.ua/2019/08/28/%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80-%D0%BC%D0%B0%D1%81%D0%BB%D1%8F%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D1%82%D0%BC-%D1%82%D0%BC%D0%B3-%D1%82%D0%BC%D0%B7-250-610/> (Дата звернення: 31.05.2026)

9. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом постійного струму. Курсове та дипломне проектування Д.5 Згладжувальні реактори. ВНТУ. https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feeem/8grabko_systemi_keruv_elektroprivod_rozrah_syst_pidporyadkovanogo/image/Dod_D_4.htm (Дата звернення: 01.06.2026)

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

11. Теорія електропривода: підручник / М.Г. Попович, М.Г Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. Київ: Вища школа, 1993. 494 с.

12. DC Motor Control (Lead-Lag). MATLAB Help Center. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/dc-motor-control-lead-lag.html> (Дата звернення: 05.06.2026)

					КНУ.РБ.141.26.250с.08.00.Л	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56