

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри


(підпис)

Інна НЕФЬОДОВА
(ім'я, прізвище)

«05» з грудня 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти другий (магістерський)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

освітньо-професійна Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

тема «Синтез електромеханічної системи із двигуном постійного струму і підпорядкованим керуванням по системі тиристорний перетворювач-двигун»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БЗ-П23мг
(шифр групи)

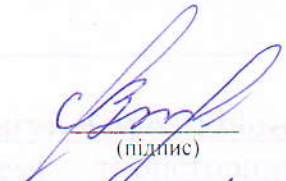
Сергій РЕЗЕПКІН
(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Тетяна НІКІТІНА
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

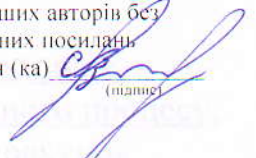
Рецензент роботи

к.т.н., доц. Юрій ЗАЧЕПА
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)


(підпис)


(підпис)


(підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) 
(підпис)

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет/ННІ Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститутКафедра Електромеханічних та комп'ютерних системРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханікаОсвітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ


(підпис)

Завідувач кафедри

Інна НЕФЬОДОВА

(ім'я, прізвище)

«08» листопада 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)

Резепкін Сергій Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Синтез електромеханічної системи із двигуном постійного струму і підпорядкованим керуванням по системі тиристорний перетворювач-двигун

керівник роботи Нікітіна Тетяна Борисівна, д. т. н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «08» жовтня 2024 року № 5101-5/3232

2. Строк подання здобувачем роботи «02» грудня 2024 р.

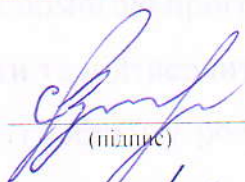
3. Перелік питань, які потрібно розробити: В пояснювальній записці необхідно відобразити аналітичний огляд та опис технологічного процесу, формулювання вимог до електроприводу, енергосиловий розрахунок параметрів технологічного об'єкта, обґрунтування вибору потужності двигуна, вибір електродвигуна та силового електрообладнання, математична модель електромеханічного об'єкта, розрахунок статичних та динамічних параметрів електроприводу, синтез системи керування та дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи шляхом моделювання.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел, нових розробок, опублікованих даних та іншої інформації, пов'язаної з темою роботи
2	Обґрунтування теоретичної бази обраної проблеми.
3	Характеристика об'єктів галузі: стан і стратегії розвитку
4	Дослідження синтезу електромеханічної системи із двигуном постійного струму і підпорядкованим керуванням по системі тиристорний перетворювач-двигун
5	Розробка електромеханічної системи із двигуном постійного струму і підпорядкованим керуванням по системі тиристорний перетворювач-двигун
6	Оформлення першого варіанту тексту, подання його на ознайомлення науковому керівнику
7	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення дипломної роботи
8	Подання роботи на кафедру, перевірка на плагіат та зовнішнє рецензування роботи
9	Захист дипломної роботи у ЕК

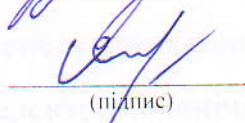
5. Дата видачі завдання «08» жовтня 2024 р.

Здобувач(ка)


(підпис)

Сергій РЕЗЕПКІН
(ім'я, прізвище)

Керівник роботи


(підпис)

Тетяна НІКІТИНА
(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У роботі детально розглянуто питання енергоспоживання електроприводу при переході від системи Г-Д до системи ТП-Д. Проведено розрахунки параметрів схеми заміщення, а також електромеханічних і енергетичних характеристик електроприводу в обох системах. Особлива увага приділяється впливу двоконтурної системи регулювання швидкості на вирівнювання навантажень у двохдвигуновому електроприводі.

В рамках дослідження застосовувалися різноманітні методи, включаючи математичні розрахунки, графічні побудови, математичні залежності та теоретичні положення з курсів «Теорія електропривода», «Електричні машини», а також «Теоретичні основи електротехніки». Окрім цього, виконано моделювання роботи електропривода за допомогою програмного пакета MATLAB, що дозволило візуалізувати результати та підтвердити отримані теоретичні дані.

Таким чином, робота сприяє глибшому розумінню впливу різних конструкцій електроприводів на їхню енергоефективність, відкриваючи нові перспективи для оптимізації роботи електромеханічних систем у промисловості. Результати дослідження можуть бути корисними для подальших розробок у сфері електротехніки та автоматизації, зокрема для зменшення витрат електроенергії та покращення експлуатаційних характеристик.

**ЕЛЕКТРОПРИВОД, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ – ДВИГУН,
СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, ДВОКОНТУРНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ВИРІВНЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ.**

ABSTRACT

The paper examines in detail the issue of power consumption of an electric drive when switching from a G-D system to a TP-D system. Calculations of the parameters of the equivalent circuit, as well as the electromechanical and energy characteristics of the electric drive in both systems, were carried out. Particular attention is paid to the influence of a dual-loop speed control system on load balancing in a dual-motor electric drive.

Various methods were used in the research, including mathematical calculations, graphical constructions, mathematical dependencies and theoretical provisions from the courses "Theory of Electric Drive", "Electric Machines", and "Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering". In addition, modeling of the operation of the electric drive was performed using the MATLAB software package, which allowed us to visualize the results and confirm the obtained theoretical data.

Thus, the work contributes to a deeper understanding of the influence of various designs of electric drives on their energy efficiency, opening up new prospects for optimizing the operation of electromechanical systems in industry. The results of the study may be useful for further developments in the field of electrical engineering and automation, in particular for reducing electricity costs and improving operational characteristics.

ELECTRIC DRIVE, THYRISTOR CONVERTER - MOTOR, SUBSTITUTION SCHEME, TWO-CIRCUIT CONTROL SYSTEM, MATHEMATICAL MODEL, LOAD BALANCING

ВСТУП

У зв'язку з прагненням України інтегруватися в європейську спільноту, виникає необхідність об'єднання технологічних, виробничих, фінансових та інформаційних потоків. У радянські часи розвиток народного господарства відбувався за методами, які значно відрізнялися від сучасних європейських стандартів. Закостенілий менталітет в окремих об'єктах та галузях ускладнює адаптацію до нових тенденцій, включаючи максимальну наукоємність виробництв.

На жаль, українське виробництво є одним з найбільш енергоємних у світі. Тому впровадження раціональних підходів до вирішення цієї проблеми, враховуючи рівень її розвитку, може привести до значних покращень у короткі терміни. Одним із найбільших споживачів електроенергії в промисловості є електропривод, зважаючи на що питання модернізації електроприводу заслуговує на особливу увагу.

Найбільш поширеним, незважаючи на його недоліки, є асинхронний електропривод, зокрема з короткозамкнутим ротором, який вважається простим і надійним. Пускові режими таких двигунів мають важливе значення для їх експлуатації.

Протягом дослідження побудованої віртуальної моделі механізму обробки вібраційного люка з урахуванням специфічних умов експлуатації були отримані результати, які підтверджують ефективність нових технологій. Розрахунки показали, що потужність двигуна має відповідний запас. Дебаланс у механізмі забезпечує достатню збурюючу силу для транспортування сипучих матеріалів, а вали та підшипники мають достатні запаси міцності.

Для виявлення причин перегріву асинхронного двигуна була розроблена віртуальна модель електроприводу в MATLAB. Проведене моделювання виявило, що перехідний процес під час пуску триває 0,2 секунди, а струм у цей період перевищує номінальне значення в 10 разів. У моменти, коли великі

шматки гірничої маси потрапляють на робочий орган, струм може збільшуватися вдвічі від номіналу, залишаючи цей стан нетривалим.

Аналіз отриманих результатів показує, що пускові струми впливають на швидке старіння ізоляції, призводячи до згорання обмоток двигуна. Для аналізу теплових процесів у приводному двигуні була створена модель, основана на диференціальних рівняннях теплопровідності, з початковою температурою 22 °С.

В процесі моделювання, яке тривало одну хвилину, були виконані три пуски і зупинки з різними інтервалами. Протягом експерименту температура двигуна досягла 77 °С, під час пуску спостерігалось підвищення на 14 °С, а в процесі роботи протягом 10 секунд температура підвищилася на 5 °С. Під час вимкнення охолодження за 10 секунд температура знизилася на 1 °С.

На основі результатів моделювання, які показали, що термін служби двигуна із застосуванням глибокопазних АД істотно збільшується, було прийняте рішення про їх використання. Багатообігове використання приводів з глибокопазними АД не потребуватиме суттєвих змін в електроприводі, що дозволяє замінювати звичайні асинхронні двигуни на ці нові моделі під час виходу їх з ладу.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Уинковому середовищі активно використовуються вібраційні люки, які призначені для розвантаження шахтних вагонеток. Однак, їхня надійність залишається низькою, що спонукає до необхідності вдосконалення електромеханічного обладнання. Експлуатаційні умови, зокрема високий рівень пилу, підвищена вологість, обмежений простір для монтажу та постійні вибухи, створюють виклики для функціонування асинхронних електроприводів.

У роботі проведено перевірочні розрахунки електричного і механічного обладнання шахтного вібраційного люка. Результати показують, що потужність двигуна має достатній запас. Дебаланс забезпечує необхідну збурюючу силу для транспортування сипучих матеріалів, а деталі, такі як вали та підшипники, мають відповідні резерви міцності. Пружна система гарантує потрібну амплітуду коливань робочого органу та стійкість до зруйнування.

Для виявлення причин перегріву асинхронного двигуна була розроблена віртуальна модель електроприводу в середовищі MatLab. Моделювання продемонструвало, що перехідний процес під час пуску триває 0,2 секунди, із струмом, що перевищує номінальне значення в 10 разів. У моменти, коли на робочий орган вібраційного люка попадають великі шматки гірничої маси, струм може збільшуватися вдвічі, але цей стан залишається нетривалим.

Результати виявили, що пускові струми суттєво впливають на швидке старіння ізоляції, що веде до згоряння обмоток асинхронного двигуна. Для аналізу теплових процесів в приводному двигуні була створена модель на базі диференціальних рівнянь теплопровідності, з початковою температурою 22 °C.

У ході моделювання, яке тривало одну хвилину, було здійснено три пуски та зупинки з різними інтервалами. Протягом дослідження температура двигуна підвищилася до 77 °C, під час пуску зафіксовано підвищення на 14 °C,

а під час роботи протягом 10 секунд — на 5 °С. Під час вимкнення охолодження температура знизилася на 1 °С. Повторний пуск показує аналогічні результати.

Тривалість другого циклу роботи становить 20 секунд, за які температура двигуна досягає 62 °С, що свідчить про підвищення на 8 °С. Така інформація підтверджує гіпотезу про негативний вплив пускових струмів на швидке старіння ізоляції, внаслідок чого було ухвалено рішення про впровадження глибокопазних асинхронних двигунів. Експеримент підтверджує, що завдяки ефекту витіснення струму в пазах ротора, значення струму можуть зменшитися до шестикратного відносно номінального. Модель глибокопазного АД у MatLab підтверджує цю характеристику і водночас забезпечує збільшення пускового моменту.

Враховуючи отримані дані, можна стверджувати, що термін служби двигуна при використанні глибокопазних АД значно зростає. У зв'язку з відсутністю суттєвих змін в електроприводі, це дозволяє поступову заміну звичайних асинхронних двигунів на глибокопазні під час їх виходу з ладу.

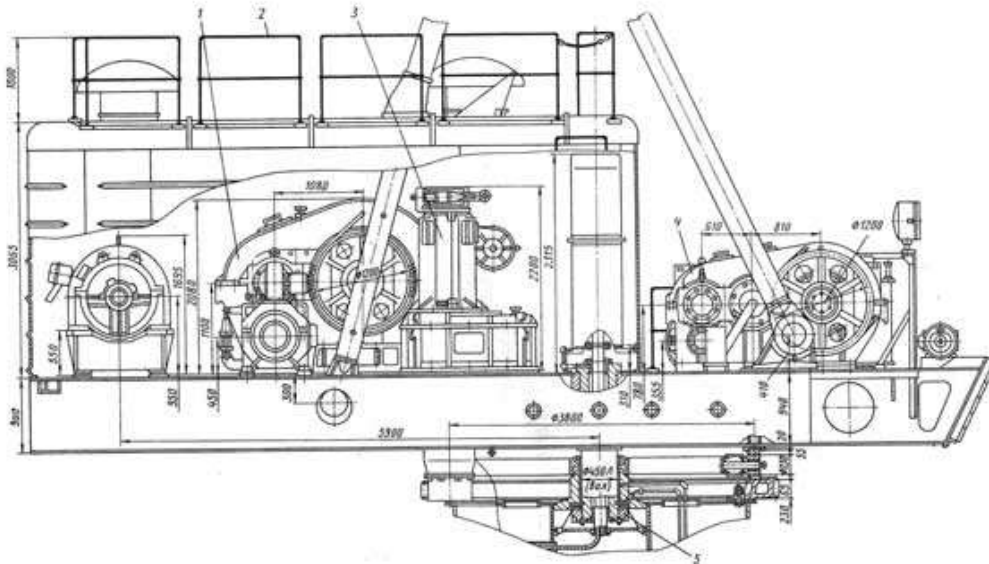


Рисунок 1.1 Схема розташування обладнання на поворотній платформі.

Напізм служить для передачі зворотно-поступального руху на рукоять. Цей механізм складається з напірної лебідки та канатів. Лебідка з'єднана з електродвигуном через редуктор і фрикційну муфту, що обмежує момент. На вихідні вали редуктора встановлені барабани. Гальмування напірного механізму відбувається за рахунок протитечії. Для загальмовування при зупинці машини та знеструмлення екскаватора передбачене колодкове пневматичне гальмо, яке уніфіковане з гальмами підйомного механізму.

В свою чергу, підйомний механізм призначений для підйому і опускання ковша. Він складається з підйомної лебідки та канатів. Лебідка приводиться в рух двома електродвигунами, кожен з яких з'єднаний з редуктором через пружні муфти. На вихідні вали редуктора також насаджені барабани, на яких закріплені підйомні канати. Гальмування підйомного механізму здійснюється за рахунок протитечії. Для зупинки механізму при знеструмленні екскаватора встановлені два колодкових пневматичних гальма, уніфіковані з гальмами напірного механізму.

Поворотний механізм екскаватора відповідає за обертання поворотної платформи з механізмами та робочим обладнанням. Привід повороту реалізується двома однаковими механізмами, кожен з яких складається з електродвигуна і редуктора. На верхньому конічному кінці вала кожного з електродвигунів встановлено гальмівний шків для колодкового гальма, що забезпечує гальмування під час пересування екскаватора, стоянки або аварійного знеструмлення. На нижньому кінці закріплена шестерня, що є провідною шестернею редуктора повороту. Консольний вихідний вал редуктора закінчується бігунковою шестернею, що зчеплена з нерухомим зубчастим вінцем на нижній рамі ходового візка екскаватора.

Пневматична схема забезпечує управління гальмами для повороту, підйому та напору, а також обдування електрообладнання та механізмів стисненим повітрям, управління вхідними сходами, подачу сигналів та живлення

механізму ходу. Зубчасті передачі всіх механізмів захищені пилонепроникними масляними ваннами, а їх вали змонтовані на підшипниках кочення.

Механізми, що розміщені на поворотній платформі, за винятком напірного, накріті металевим кузовом, що забезпечує примусову вентиляцію та внутрішнє освітлення. Піднята кабіна машиніста надає хороший огляд та просторе, герметичне середовище, оснащене системою опалення, вентиляції та обігріву скла.

Екскаратор має різноманітні допоміжні механізми, які дозволяють виконувати ремонтні та монтажні роботи. У разі потреби екскаратор ЕКГ-8И може бути переобладнаний у ЕКГ-4У або ЕКГ-6.3УС, для чого потрібно лише замінити робоче обладнання (стрілу, рукоять, ківш, підважувальні стріли). Основні вузли є уніфікованими з відповідними елементами екскараторів ЕКГ-4У та ЕКГ-6.3УС. Кожен екскаратор комплектується наборами інструментів і запасних частин. Рекомендовані сорти мастила наведені в таблиці 14. Маса інструментів і пристосувань становить 1040 кг, запасних частин механічної частини — 7400 кг, запасного електрообладнання — 1300 кг, а противага (що не поставляється заводом) — від 27 до 33 тон.

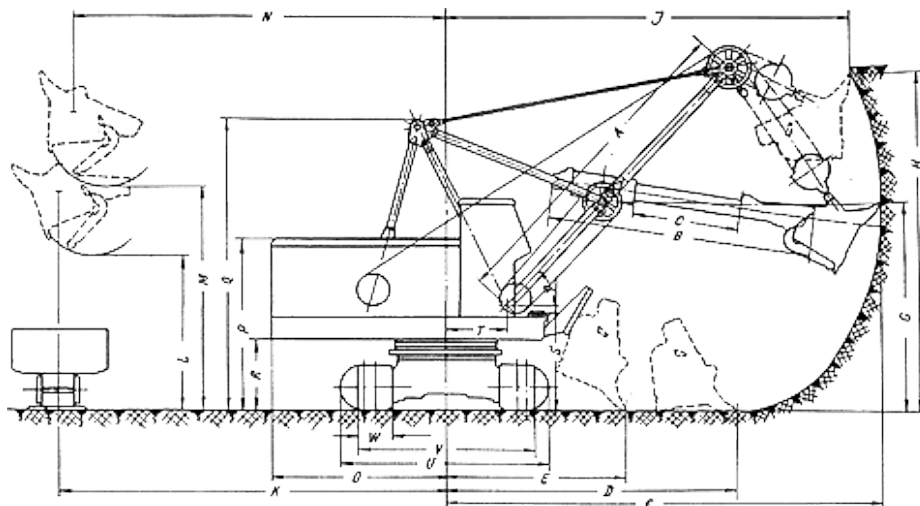


Рисунок 1.3. Схема робочих розмірів екскаратора ЭКГ-8И

Таблиця 1.1

Робочі розміри екскаватора ЭКГ-8И [3]

Параметри	ЭКГ 8И
Ємність ковша для важких вантажів	8
Ємність ковша для середніх вантажів	10
Тривалість циклу при роботі у відвал на 90°	28
Швидкість переміщення екскаватора по горизонтальному майданчику	0.42-0.45
Найбільший підйом, подоланий екскаватором при твердому ґрунті град	12
Середній тиск на ґрунт при пересуванні кгс/см ²	2.05
Потужність мережевого електродвигуна	520
Напруга живлення, В	6000/3000
Маса екскаватора з насипною противагою	373.0
Вага противаги м	27-33
А - Довжина стріли м	13.35
а - Кут нахилу град	47
В - Довжина рукояті м	11.425
С - Хід рукояті м	4.3
D - Найбільший радіус черпання на рівні стоянки екскаватора м	12
Е - Найменший радіус черпання на рівні стоянки екскаватора м	7.2
F - Найбільший радіус черпання м	18.34
G - Висота копання при найбільшому радіусі копання	8.30
Н - Висота черпання найбільша м	13.16
К - Найбільший радіус вивантаження м	16.3
L - Висота вивантаження при найбільшому радіусі вивантаження м	6.10
М – Найбільша висота вивантаження м	9.2
N - Радіус вивантаження при найбільшій висоті вивантаження м	14.7
О - Радіус обертання хвостової частини м	7.26
Габаритна ширина кузова м	6.512
Q - Габаритна висота екскаватора без стріли м	11.545
R – Просвіт під поворотною платформою	2.765
S – Висота осі п'яти стріли , м	4.095
T – відстань від осі п'яти стріли до осі обертання	2.4
U – довжина гусеничного хода ,м	7.95-8,23
V – ширина гусеничного хода ,м	6,98
W – ширина гусеничного кола	1,4

Ескаватори є виїмковими вантажними машинами циклічної дії, призначеними для видобутку породи або ґрунту, після чого їх вантажать на транспортні засоби. За метою використання ці машини діляться на два типи: гірські та будівельні. Гірські ескаватори, на відміну від їх будівельних аналогів, характеризуються більшою масою, габаритами та потужністю, а також працюють в складніших умовах.

В умовах роботи в кар'єрах до ескаваторів висуваються специфічні вимоги, особливо щодо безпеки в зв'язку з можливістю загазованості. Через це дизельні приводи використовуються не так широко, а більшість кар'єрних ескаваторів працюють на змінному трифазному струмі з напругою 6 кВ або більше, зокрема 10-35 кВ. В деяких кар'єрах використання дизельних ескаваторів зменшує потребу в складній електричній мережі та сприяє зменшенню простою обладнання через часті відключення електропостачання.

Кар'єрні гусеничні ескаватори зазвичай оснащені багатодвигунним приводом, який включає в себе основні механізми—напірні, підйомні, поворотні та ходові, а також допоміжні системи для компресорів, насосів і вентиляторів. У цьому контексті електроприводи можуть бути як постійного, так і змінного струму, причому на малих потужностях зазвичай використовують змінний струм, тоді як для середніх і великих потужностей характерний постійний струм.

Для електроприводу постійного струму передбачена установка, що включає мережевий двигун і групу генераторів постійного струму або тиристорний перетворювач. Допоміжні механізми зазвичай живляться асинхронними двигунами з короткозамкнутим ротором. Напруга 6 кВ подається на пристрій через гнучкий кабель КГЕ або КШВГ (Е) (ХЛ) від розподільного пункту, живленого від кабельної або повітряної лінії кар'єрних мереж. Схему електропостачання ескаватора можна переглянути на рис. 1.4.

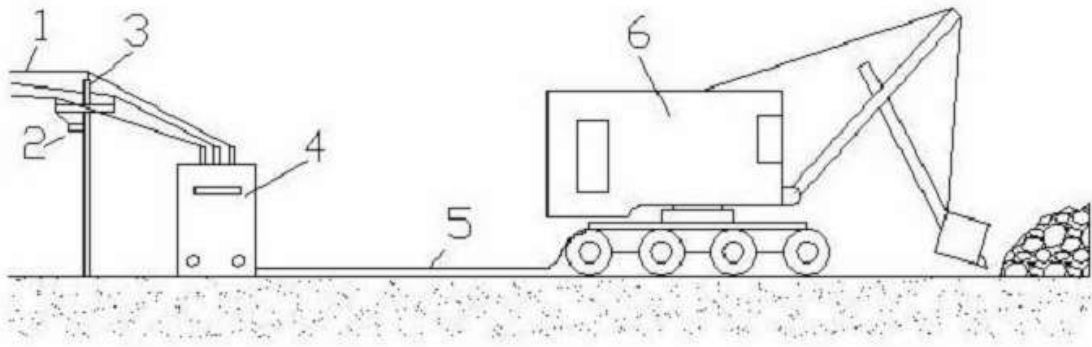


Рисунок 1.4 - Схема живлення кар'єрного екскаватора: 1 Повітряна лінія 6-10 кВ, 2 Розрядники, 3 Опора, 4 Високовольтний приключення пункт, 5 Високовольтний гнучкий кабель, 6 Екскаватор, 7 Опорні ізолятори ввідної коробки, 8 Високовольтний кільцевий струмоприймач, 9 і 10 Перша і друга високовольтні кабельні перемички

Кар'єрні екскаватори використовують двигуни постійного струму, які основні робочі механізми отримують від генераторів цієї ж системи. Двигуни можуть бути розташовані на одному валу з високовольтним приводом, використовуючи асинхронні або синхронні мотори, або ж працювати від тиристорно регульованих перетворювачів.

Для забезпечення ефективності роботи, головні механізми часто оснащуються декількома двигунами, які живляться від окремих генераторів. Це гарантує рівномірний розподіл навантаження та дозволяє налаштувати схему

з'єднання так, щоб зменшити динамічні навантаження на електродвигуни. Індивідуальне живлення відіграє ключову роль, зменшуючи потужності, що навантажують двигуни під час перехідних процесів, таких як розгін чи гальмування. У цей період струм в якірі залишається на низькому рівні, а негативна зворотна зв'язок елементарно пом'якшує перепади навантажень, що забезпечує плавність роботи.

Проте, в конфігураціях з окремими генераторами для кожного двигуна можуть виникати труднощі з вирівнюванням навантажень. Для подолання цього виклику двигуни об'єднують у групи по два, з одним або двома генераторами. При такому з'єднанні якірні ланцюги працюють паралельно, що забезпечує сталість струму та моментів, згенерованих двигунами. Хоча незначні різниці в потоках можуть існувати, їх вплив на моменти буде мінімальним. З метою точної настройки навантаження, обмотки збудження генераторів з'єднують так, щоб було можливим управління навантаженнями двигунів.

Параметри, які враховують при підборі двигунів для таких груп, включають геометрію редукторів, жорсткість механізму, передаточні відношення, а також характеристики системи управління. Для гнучкості управління навантаженнями обмотки збудження підключають послідовно-паралельно, що значно спрощує конструкцію. Одним із найбільш поширених рішень є схема з одним генератором, що живить два електродвигуни.

Оптимізація кількості генераторів сприяє більш зручному розміщенню обладнання в перетворювальних агрегатах та на поворотних платформах. Таким чином, схема живлення головних систем екскаватора ЕКГ-8И демонструє ефективний підхід до управління електроприводами.

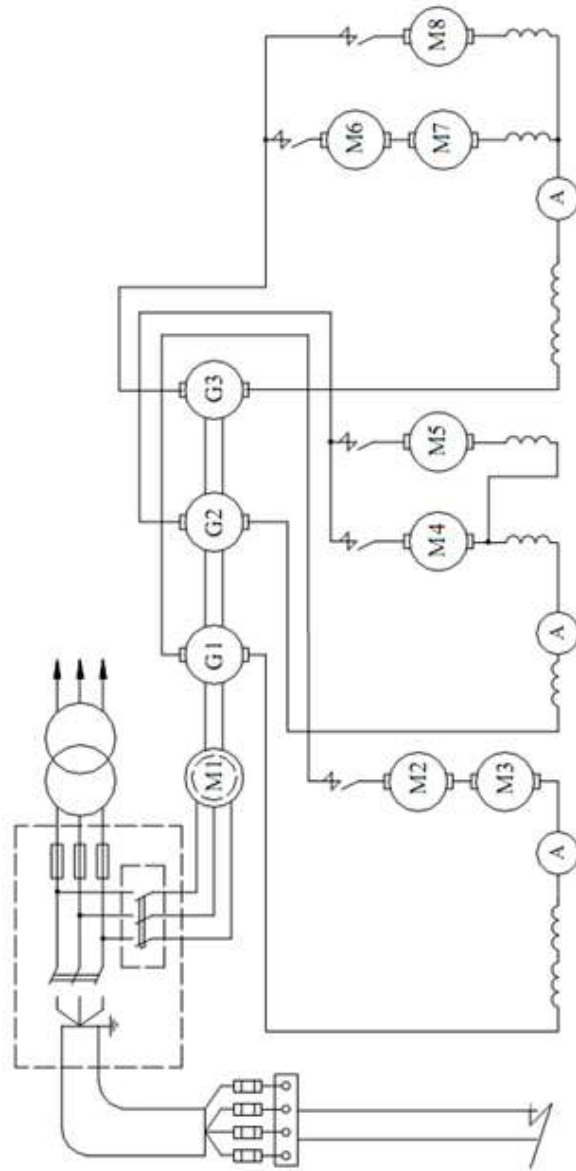


Рисунок 1.5 Схема живлення головних кіл екскаватора ЕКГ-8И

Робочий цикл екскаватора в процесі видобутку і навантаження корисних копалин представлений на рис.1.6.

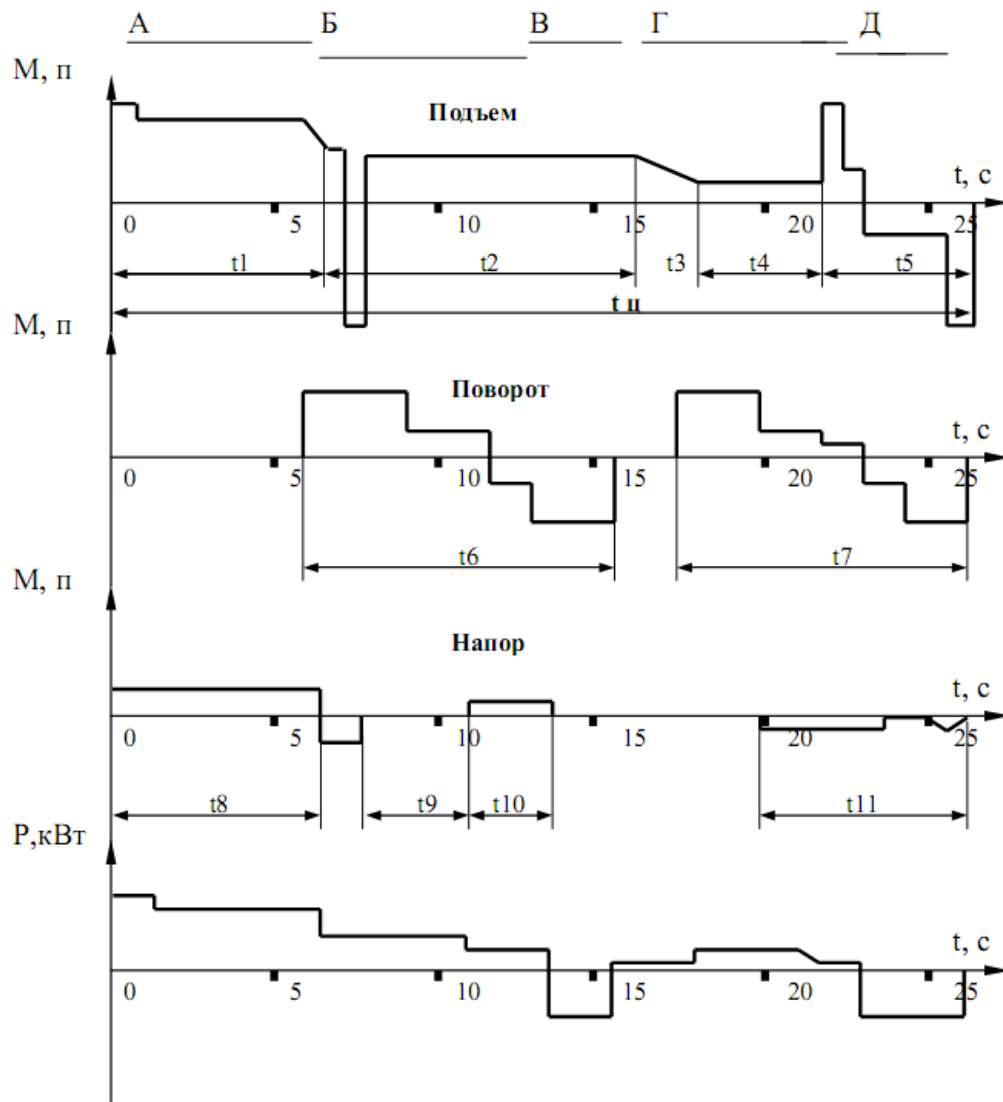


Рисунок 1.6 - Навантажувальні діаграми основних механізмів екскаватора.

Екскаватори виконують робочий цикл, що складається з декількох етапів: впровадження ковша в породу, поворот для розвантаження, безпосереднє розвантаження ковша, поворот назад у забій, а також опускання ковша в забій. Ці етапи можна детально розглядати через різні періоди, які включають копання, підйом навантаженого ковша і утримання його в рівноважному стані, розвантаження, а також утримання порожнього ковша під час повернення до місця копання. Також варто відзначити період опускання порожнього ковша з використанням гальм.

Привід повороту виконуватиме розгін і гальмування поворотної платформи в умовах навантаженого ковша, а також повторять цей процес з порожнім ковшем. Окрім цього, привід напору включає дії, пов'язані з напором при копанні, поверненням рукояті з навантаженим ковшем, переміщенням рукояті під час повороту на розвантаження і витягуванням рукояті з порожнім ковшем у забій.

Зі схематичних діаграм видно, що робота основних приводів екскаватора характеризується частими змінами навантаження. Це вимагає від механізмів екскаватора м'яких робочих та регульовальних характеристик. Відповідно до цих вимог, двигуни постійного струму є найкращим рішенням для приводу основних механізмів екскаватора. Зокрема, на екскаваторах зазвичай використовують спеціалізовані двигуни постійного струму марок ДП, ДПЕ та ДПВ.

Приводний синхронний двигун

Паспортні дані приводного синхронного двигуна приведено в табл. 2.

Таблиця 1.2

Паспортні дані двигуна СДЭ 2-15-34-6У2.

Модель двигуна	СДЭ 2-15-34-6У2
Потужність, кВт	630
Номинальна напруга статора, В	6000
Номинальний струм, А	357
Номинальна частота обертання, об/хв	1000
ККД, %	93,8

Генератори постійного струму екскаватора ЕКГ-8И

Генератори постійного струму розроблені для живлення двигунів, які забезпечують роботу механізмів екскаватора. У найближчі роки відбудеться припинення випуску більшості типів цих генераторів, дані про які наведені у таблиці. На даний момент генератори виготовляються відповідно до технічних умов ТУ 16-514.179-74.

Ці генератори мають кліматичні виконання, такі як У, ХЛ і Т, та класифікацію категорії 2, що відповідає стандарту ГОСТ 15150-69. Вони призначені для безперервної роботи в режимі S1. Дозволена ступінь існування під щітками складає 1, а ізоляція обмоток відноситься до класу нагрівостійкості F. Більшість генераторів, за винятком моделі 2МП 542-1/2М, оснащені підшипниками кочення.

Для захисту ізоляції від вологи в генераторах кліматичних виконань ХЛ і Т (за винятком моделі МП 542-1/2М) вбудовані електронагрівачі типу ТЕН-78А 13/0,5, які працюють на напрузі 220 В (формально затверджені за ГОСТ 13268-83). Ці нагрівачі активуються під час зупинки генераторів.

Коефіцієнт готовності генераторів протягом перших двох років експлуатації становить не менше 0,996, а в подальші три роки - не менше 0,97. Термін служби генераторів до моменту їх списання може досягати 20 років.

Висновки

Представлено технічні характеристики екскаватора ЕКГ-8И, а також проаналізовано типові навантажувальні діаграми, що ілюструють роботу основних механізмів цього екскаватора. Крім того, у розділі наведено специфікації електрообладнання, а також детальні технічні характеристики генераторів постійного струму і приводних двигунів, що забезпечують роботу всіх механізмів екскаватора ЕКГ-8И.

2. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

У приводі повороту використовується генератор ПЭМ-141-4К з наступними параметрами:

Номинальна потужність

$$P_{Г.н.} = 250 \text{ кВт}$$

Номинальна напруга

$$U_{Г.н.} = 630 \text{ В}$$

Номинальний струм якоря

$$I_{Г.н.} = 397 \text{ А}$$

Номинальна швидкість обертання

$$N_{НОМ.Г.} = 1000 \text{ об/хв}$$

Кількість пар полюсів $2p = 4$

Опір обмотки якоря при температурі 20° C

$$R_{я} = 0,0355 \text{ Ом}$$

Опір додаткових полюсів при температурі 20° C

$$R_{ДП} = 0,0054 \text{ Ом}$$

Опір якорного кола генератора, приведений до температурі 75° C

$$R_{я} = 1,22 \cdot (0,0355 + 0,0054) = 0,05 \text{ Ом}$$

Індуктивність якорного кола

$$L_{яг} = 0,6 \frac{U_{н.}}{p \cdot I_{н.} \cdot \omega_{н.}} = 0,0023 \text{ Гн}$$

У приводі повороту використовується двигун ВЭ-812 з наступними параметрами:

Номинальна потужність

$$P_{ДН} = 100 \text{ кВт}$$

Номинальна напруга

$$U_{ДН} = 305 \text{ В}$$

Номинальний струм якоря

$$I_{нд} = 360 \text{ А}$$

Номинальна швидкість обертання

$$N_{дн} = 750 \text{ об/хв}$$

Число пар полюсів

$$2p = 2$$

Момент інерції двигуна

$$J_a = 70 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Опір обмотки якоря при температурі 20° С

$$R_{я} = 0,014 \text{ Ом}$$

Опір додаткових полюсів при температурі 20° С

$$R_{дп} = 0,009 \text{ Ом}$$

Опір якорного кола двигуна, приведений до температури 75° С

$$R_{яд} = 1,22 \cdot (0,014 + 0,009) + 2/360 = 0,034 \text{ Ом}$$

Індуктивність якорного кола двигуна

$$L_{яд} = 0,3 \frac{U_H}{p \cdot I_H \cdot \omega_H} = 0,0016 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт ЕРС двигуна

$$k_e = \frac{U_H - I_H \cdot R_{яд}}{\omega_H} = 3,718 \text{ В}\cdot\text{с}$$

Номинальний електромагнітний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = 1269,84 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Коефіцієнт моменту двигуна

$$k_m = \frac{M_H}{I_H} = 3,527 \text{ В}\cdot\text{с}$$

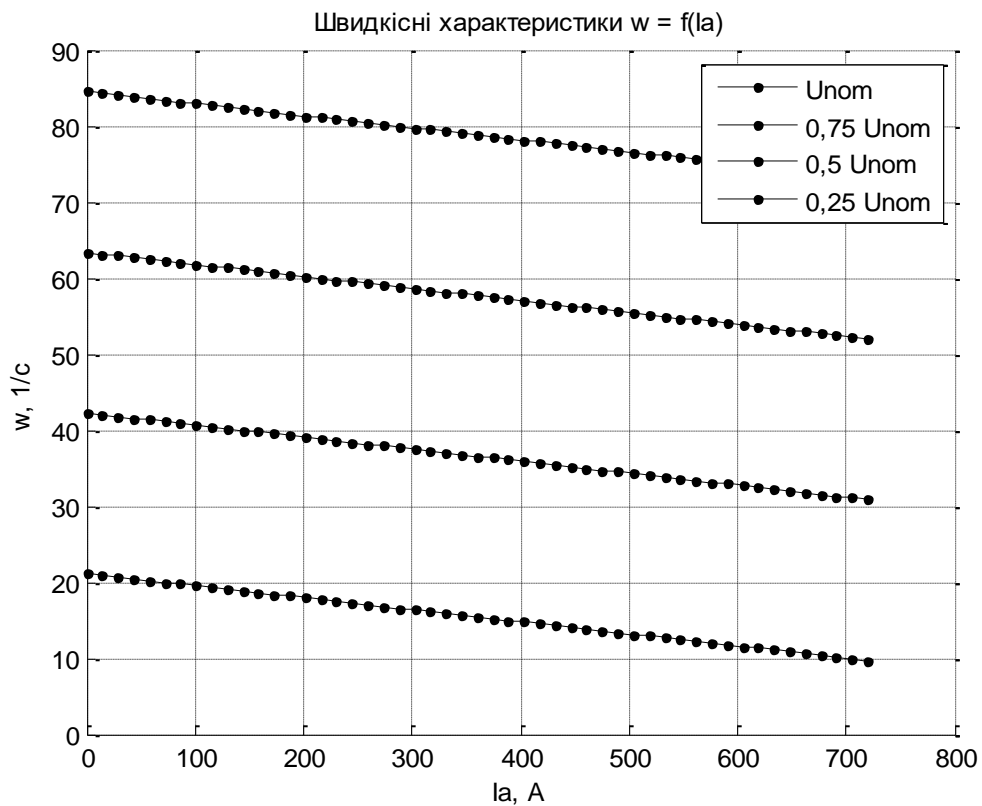
Швидкісні та механічні характеристики електроприводу постійного струму можуть бути розраховані за наступними формулами:

$$\omega(I_a) = \frac{U_a - I_a \cdot R_{a\Sigma}}{k_e}$$

$$\omega(M_{\text{эм}}) = \frac{U_a - \frac{M_{\text{эм}}}{k_m} \cdot R_{a\Sigma}}{k_e}$$

До наведених формул, ми проведемо розрахунки швидкісних та механічних характеристик електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8И, зважаючи на параметри схеми заміщення приводного двигуна і генератора, описані в розділі 2.1. Важливо відзначити, що електропривод повороту має двохдвигунну конфігурацію з послідовним з'єднанням якірних кіл окремих двигунів.

Тому при обчисленні коефіцієнтів електрорушійної сили (ЕРС) та моменту електроприводу необхідно враховувати кількість приводних двигунів, які беруть участь у роботі. Розрахунки, виконані за вказаними формулами, були здійснені з використанням програми MATLAB. Результати розрахунків, що стосуються статичних і енергетичних характеристик електродвигуна, представлені на рисунках 2.1 і 2.2.



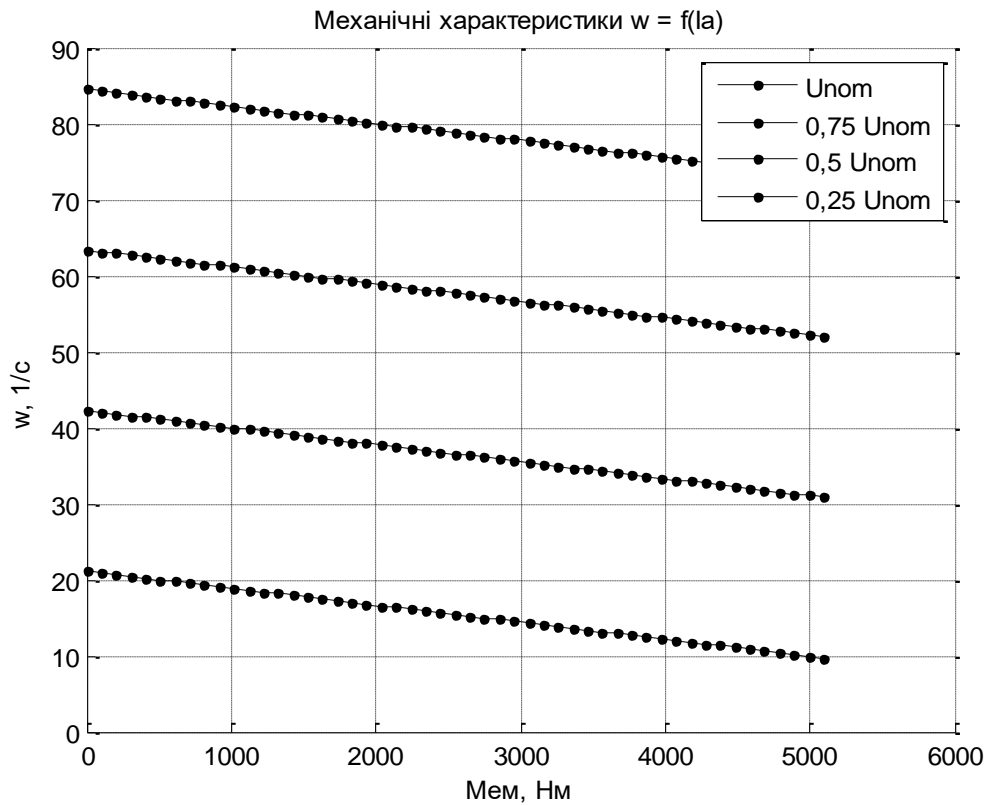


Рисунок 2.1 Електромеханічні характеристики електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8И по системі Г-Д

Текст програми розрахунку статичних характеристик наведено нижче.

$$K_e = 2 \cdot (U_{nom} - I_{nom} \cdot R_a) / \omega_{nom};$$

$$M_{nom} = 1000 \cdot P_{nom} / \omega_{nom};$$

$$K_m = 2 \cdot M_{nom} / I_{nom};$$

%

$$dP = 2.4 \cdot 0.5 \cdot 1000 \cdot (1 - k_{pdnom}) \cdot P_{nom};$$

$$U_{dmax} = 630;$$

$$\% T_e = L_a / R_a; \quad T_m = J_a \cdot R_a / (K_e \cdot K_m);$$

%

$$k = 51;$$

```

a1 = 1; a2 = 0.75; a3 = 0.5; a4 = 0.25;
ia = zeros(1, 51); v1 = zeros(1, 51); v2 = zeros(1, 51); v3 = zeros(1, 51); v4 = ze-
ros(1, 51);
m1 = zeros(1, 51);
for m = 1:k
    c = (m-1)*2*Inom/(k-1);
    ia(m) = c;
    v1(m) = (Udmax*a1 -c*Ra)/Ke;
    v2(m) = (Udmax*a2 -c*Ra)/Ke;
    v3(m) = (Udmax*a3 -c*Ra)/Ke;
    v4(m) = (Udmax*a4 -c*Ra)/Ke;
    m1(m) = c*Km;
end;

figure;
hold on
plot(ia, v1, '-k'), grid on;
plot(ia, v2, '-k'), grid on;
plot(ia, v3, '-k'), grid on;
plot(ia, v4, '-k'), grid on;

title(w = f(Ia));
xlabel('Ia, A');
ylabel('w, 1/c');
legend('Unom', '0,75 Unom', '0,5 Unom', '0,25 Unom', 'Location','northeast');

figure;
hold on
plot(m1, v1, '-k'), grid on;

```

```

plot(m1, v2, '-k'), grid on;
plot(m1, v3, '-k'), grid on;
plot(m1, v4, '-k'), grid on;

title(w = f(Ia));
xlabel('Mem, Hм');
ylabel('w, 1/c');
legend('Unom', '0,75 Unom', '0,5 Unom', '0,25 Unom', 'Location','northeast');

%
kpd1 = zeros(1, 51); kpd2 = zeros(1, 51); kpd3 = zeros(1, 51); kpd4 = zeros(1, 51);
for m = 1:k
    c = (m-1)*2*Inom/(k-1);
    kpd1(m) = 100*(Km*c*v1(m))/(Udmax*a1*c+dP);
    kpd2(m) = 100*(Km*c*v2(m))/(Udmax*a2*c+dP);
    kpd3(m) = 100*(Km*c*v3(m))/(Udmax*a3*c+dP);
    kpd4(m) = 100*(Km*c*v4(m))/(Udmax*a4*c+dP);
end;
figure;
hold on
plot(ia, kpd1, '-k'), grid on;
plot(ia, kpd2, '-k'), grid on;
plot(ia, kpd3, '-k'), grid on;
plot(ia, kpd4, '-k'), grid on;

title(κκД = f(Ia));
xlabel('Ia, A');
ylabel('κκД, %');
legend('Unom', '0,75 Unom', '0,5 Unom', '0,25 Unom', 'Location','northeast');

```

Статизм механічної характеристики електроприводу повороту складає

$$\Delta = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} \cdot 100\% = 8,2 \%$$

Статизм механічної характеристики електроприводу повороту при мінімальній напрузі на затискачах якоря складає

$$\Delta = \frac{\omega_{0min} - \omega_{\text{ном}min}}{\omega_{0min}} \cdot 100\% = 33,5 \%$$

Залежність ККД електроприводу постійного струму від навантаження можна обчислити за наступною формулою:

$$\eta(I_a) = \frac{I_a \cdot k\Phi \cdot \omega}{I_a \cdot U_a + 2 \cdot \Delta P_{const}}$$

де ΔP_{const} – умовно постійні втрати електроенергії одного двигуна

$$\Delta P_{const} = 0,5 \cdot P_{\text{ном}} \cdot (1 - \eta_{\text{ном}}) = 0,58 \text{ кВт}$$

Залежність ККД електроприводу повороту від струму якорного кола зображена на рис.2.2.

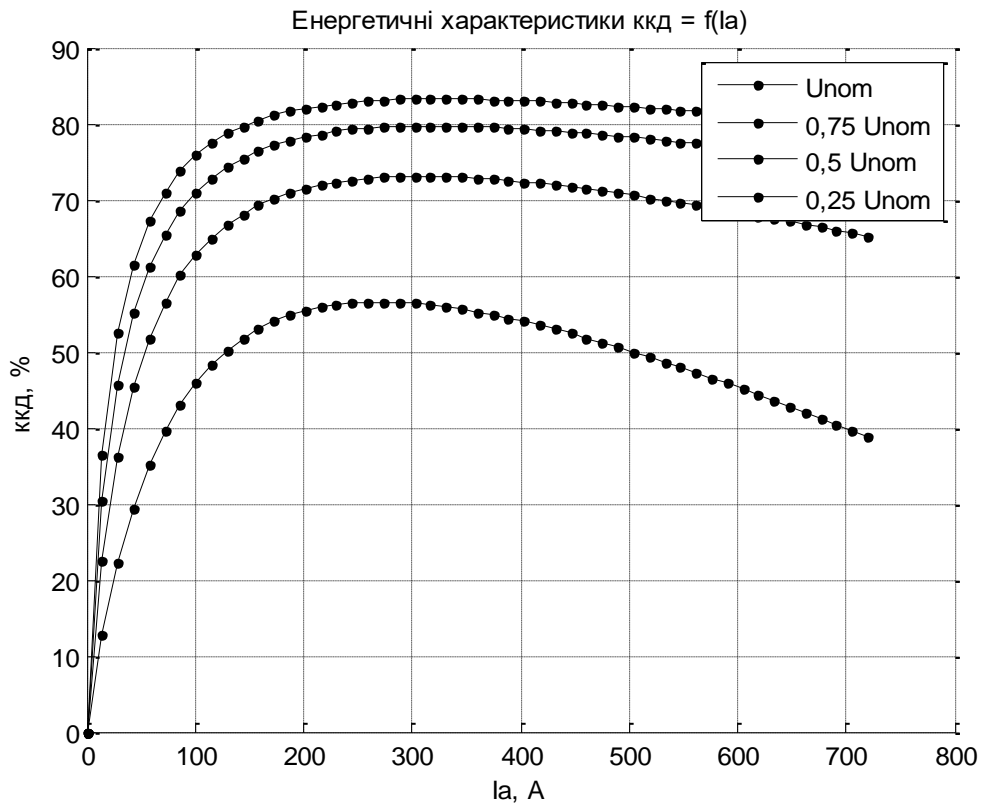


Рисунок 2.2 Енергетичні характеристики електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8И по системі Г-Д

Значення коефіцієнту корисної дії електроприводу при номінальному навантаженні складає 83%.

Проведемо розрахунок електромеханічних характеристик електроприводу повороту, при цьому якірні кола приводних двигунів живляться від індивідуальних тиристорних перетворювачів.

Результати розрахунків статичних і енергетичних характеристик електроприводу типу ТП-Д представлені на рисунках 2.3 та 2.4. Ці графіки ілюструють ефективність та продуктивність електроприводу у відповідних режимах роботи.

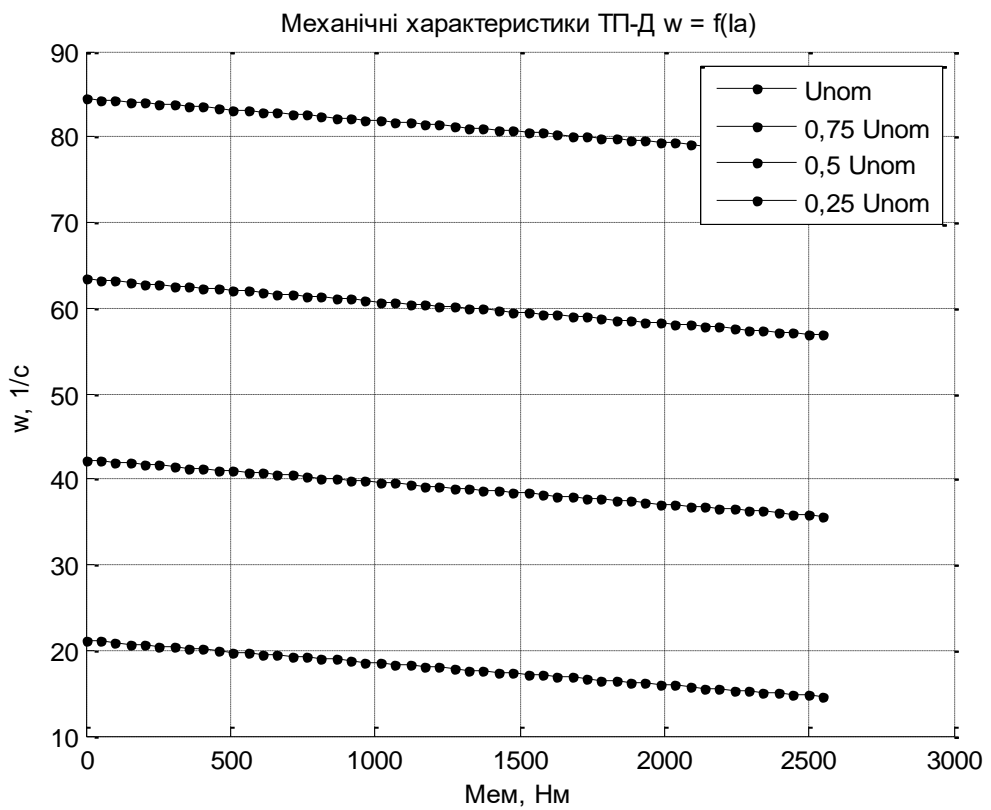
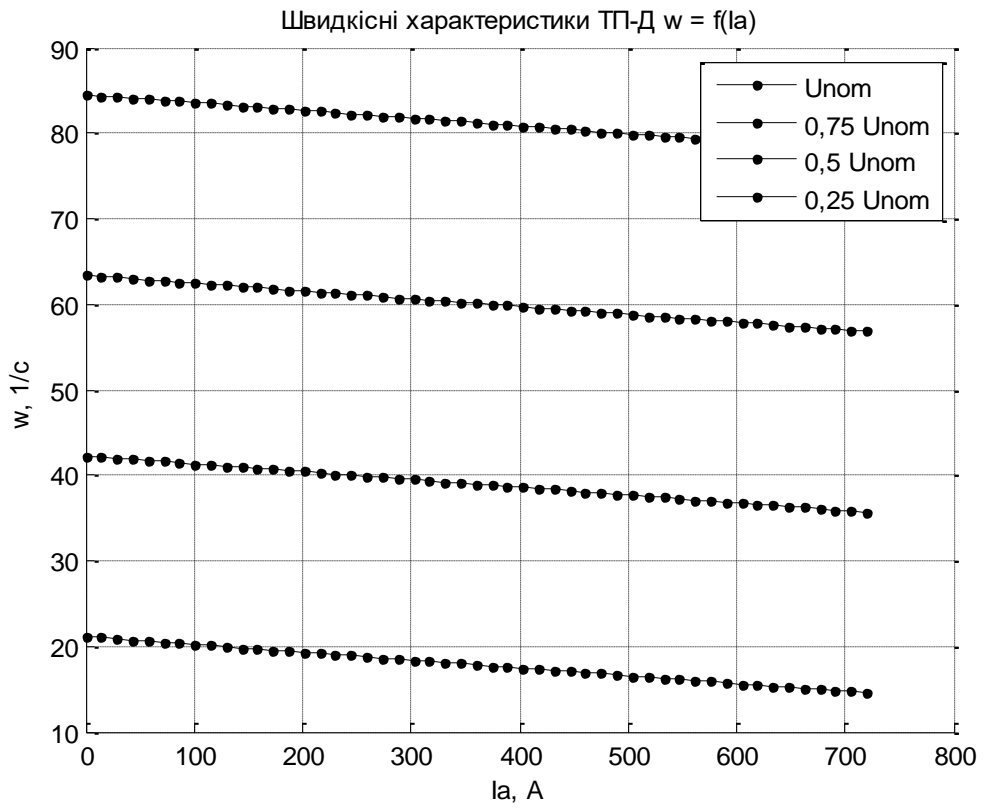


Рисунок 2.3 Електромеханічні характеристики електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8И по системі ТП-Д

Статизм механічної характеристики електроприводу повороту складає

$$\Delta = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} \cdot 100\% = 4,7\%$$

Статизм механічної характеристики електроприводу повороту при мінімальній напрузі на затискачах якоря складає

$$\Delta = \frac{\omega_{0\text{min}} - \omega_{\text{номmin}}}{\omega_{0\text{min}}} \cdot 100\% = 19,8\%$$

Залежність ККД електроприводу повороту від струму якорного кола зображена на рис.2.4.

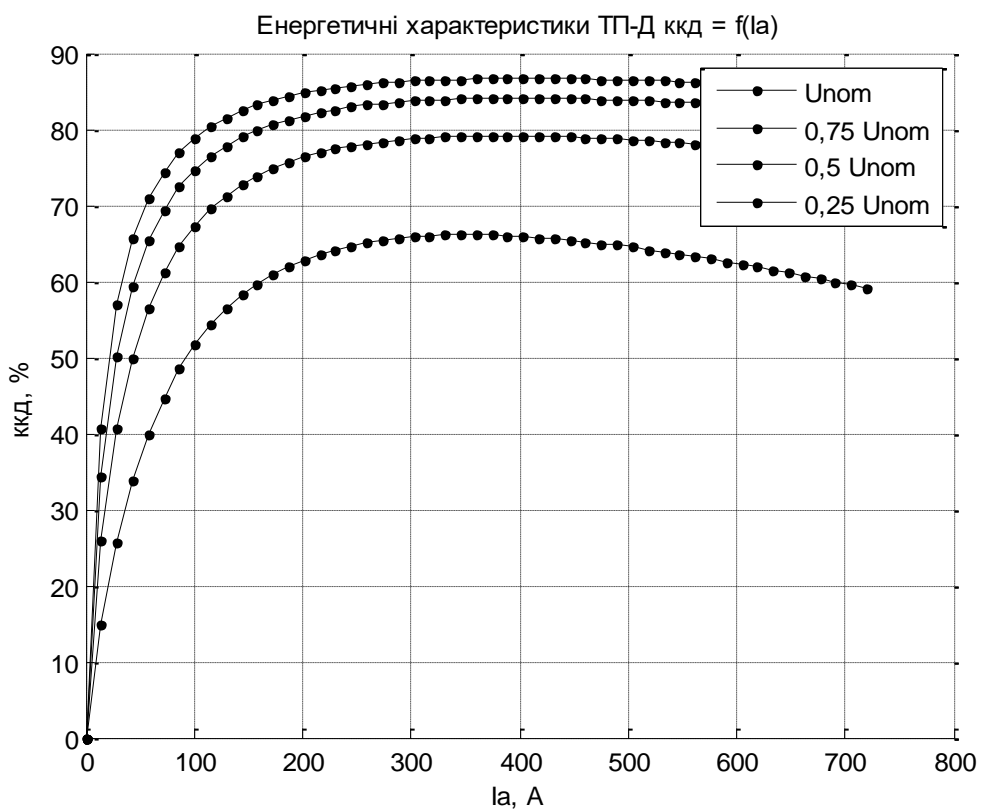


Рисунок 2.4 Енергетичні характеристики електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8И по системі ТП-Д

Значення коефіцієнту корисної дії електроприводу при номінальному навантаженні складає 87%.

Висновки

Проведено порівняльні розрахунки характеристик електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8И для двох систем: «генератор-двигун» та «тиристорний перетворювач - двигун». Характеристики електроприводу за системою Г-Д показали статизм у межах від 8,2% до 33,5% в необхідному діапазоні регулювання швидкості. У той же час, електропривід по системі ТП-Д має статизм від 4,7% до 19,8% у тому ж діапазоні.

Було також розраховано співвідношення коефіцієнта корисної дії електроприводу повороту для екскаватора ЕКГ-8И. При номінальному навантаженні коефіцієнт корисної дії електроприводу за системою Г-Д становить 83%, тоді як його значення по системі ТП-Д досягає 87%. Таким чином, впровадження системи ТП-Д замість Г-Д дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії електроприводу на 4%.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Модель електричної машини (ЕМ) незалежно від її типу формується на основі рівнянь електричної рівноваги всіх контурів машини та рівняння руху ротора.

Для більш детального розуміння структури моделі, розглянемо принципову схему, яка представлена на рисунку 3.1.а, а також схему заміщення ДПС (дослідної потужності системи), що зображена на рисунку 3.1.б. Ці схеми дозволяють проаналізувати динамічні та статичні характеристики електричної машини, а також здійснити розрахунки, пов'язані з її ефективністю та роботою в різних режимах.

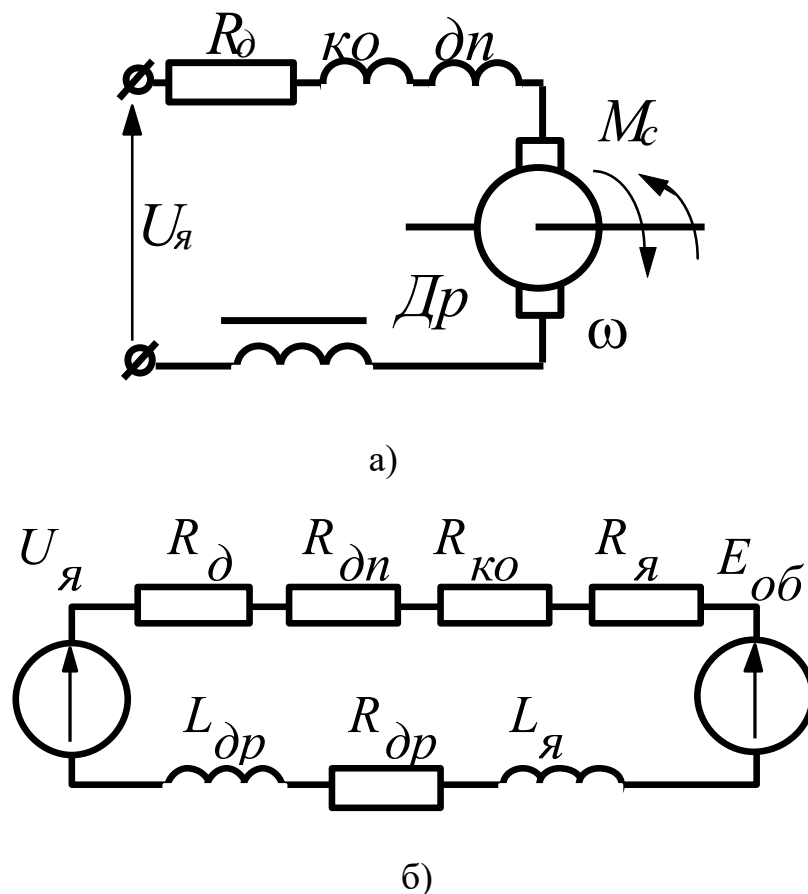


Рисунок 3.1 Схеми двигуна постійного струму: а) принципова; б) заміщення

Машини постійного струму враховують ряд ключових припущень, які спрощують подальший аналіз. Перше, що необхідно зазначити, це те, що струм збудження вважається стабільним. По-друге, зазвичай не беруть до уваги вплив насичення як у контурі основного магнітного потоку, так і в контурі розсіювання. Також не враховується дія вихрових струмів, що дозволяє зосередитися на основних аспектах моделі.

Крім того, машини вважаються повністю скомпенсованими, отже, реакція якоря не має впливу на їх роботу. З урахуванням цих спрощень, всі параметри схеми заміщення можуть вважатися сталі. Це дозволяє сформулювати рівняння електричної рівноваги відносно другого закону Кірхгофа, що описує взаємозв'язок між основними електричними величинами в системі.

Загальна форма рівняння виглядає так: напруга дорівнює електрорушійній силі плюс добуток струму на опір. Це описує, як різні електричні параметри пов'язані між собою в контексті роботи машини:

$$U_{я} = k\phi \cdot \omega + I_{я}R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI_{я}}{dt}, \quad (3.1)$$

та рівняння руху електропривода:

$$J \frac{d\omega}{dt} = k\phi \cdot I_{я} - M_c \quad (3.2)$$

Або в канонічній формі:

$$L_{\Sigma} \frac{dI_{я}}{dt} = U_{я} - k\phi \cdot \omega - I_{я}R_{\Sigma} \quad (3.3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = k\phi \cdot I_{я} - M_c \quad (3.4)$$

На зазначені раніше особливості, система рівнянь механічної системи (МПС) є лінійною, що дозволяє отримати аналітичні рішення. Однак, при детальному аналізі параметри МПС можуть змінюватися, в результаті чого система рівнянь набуває нелінійного характеру. Це, зокрема, відбувається в тих випадках, коли швидкість регулюється за рахунок варіювання величини магнітного потоку, враховуючи криві намагнічування.

При чисельному розв'язанні системи диференціальних рівнянь зміна параметрів може бути врахована завдяки введенню відповідних диференціальних або алгебраїчних рівнянь. У процесі моделювання на автоматизованих обчислювальних машинах (АОМ) або при використанні спеціалізованих програм для структурного моделювання важливо створити структурну схему МПС, яка відображає всі особливості роботи системи. Це дозволить більш точно відобразити їх взаємодію та поведінку в різних умовах експлуатації.

Розділимо рівняння електричної рівноваги на R_{Σ} і введемо позначення електромагнітної сталої часу:

$$T_e = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \quad (3.5)$$

Тоді

$$\frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \frac{dI_{\alpha}}{dt} = \frac{U_{\alpha} - k\phi \cdot \omega}{R_{\Sigma}} - I_{\alpha} \quad (3.6)$$

або в операторній формі:

$$(T_e p + 1) = \frac{1}{R_{\Sigma}} (U_{\alpha} - k\phi \cdot \omega) \quad (3.7)$$

Поклавши коефіцієнт передачі - $k_{\phi} = \frac{1}{R_{\Sigma}}$, одержимо передаточну функцію за струмом у вигляді аперіодичної ланки:

$$W_I(p) = \frac{I(p)}{U(p) - k\phi \cdot \omega(p)} = \frac{k_d}{T_e p + 1} \quad (3.8)$$

Записавши в операторній формі основне рівняння динаміки отримаємо передаточну функцію за швидкістю - передаточну функцію інтегруючої ланки:

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp} \quad (3.9)$$

З урахуванням виразів $E = k\phi \cdot \omega$ і $M = k\phi \cdot I$ складемо структурну схему у вигляді, що наведено на рис.3.3.

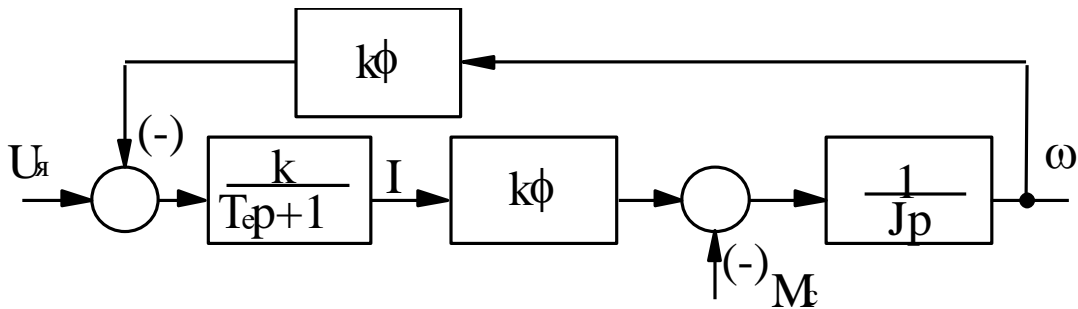


Рисунок 3.2 Структурна схема двигуна постійного струму незалежного збудження

Доповнення структурної схеми регуляторами й іншими елементами дозволяє досліджувати стійкість ЕМС та ін.

Для елювання тиристорного перетворювача на основі середнього значення випрямленої електрорушійної сили (ЕРС) можна представити його як три основні функціональні компоненти: система імпульсно-фазового керування (СІФК), силова ланка (СЛ) та ланка навантаження (ЛН), згідно з рисунком 3.3.

Система імпульсно-фазового керування призначена для перетворення аналогового сигналу керування в послідовність імпульсів. Ці імпульси мають певний фазовий зсув відносно моменту природного відкриття тиристора, що визначається кутом керування.

Вхідною величиною для тиристорного перетворювача є напруга керування, тоді як регульованою координатою виступає середнє значення випрямленої ЕРС. Це значення розраховується в межах інтервалу провідності. При цьому струм навантаження також впливає на величину середнього значення, що підкреслює взаємозв'язок між різними елементами системи та їх вплив на загальний процес керування..

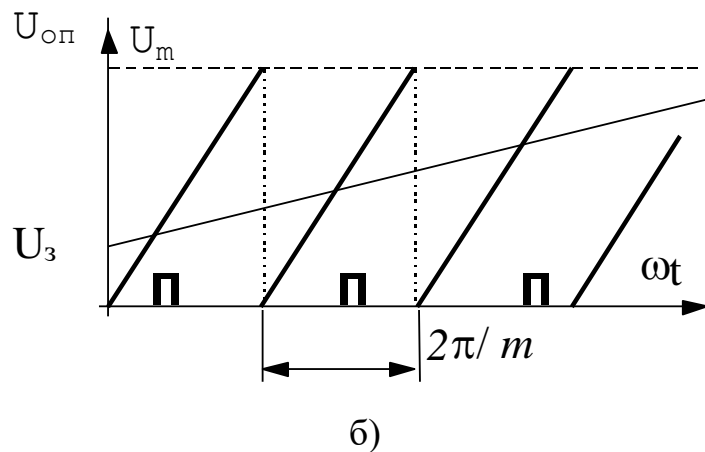
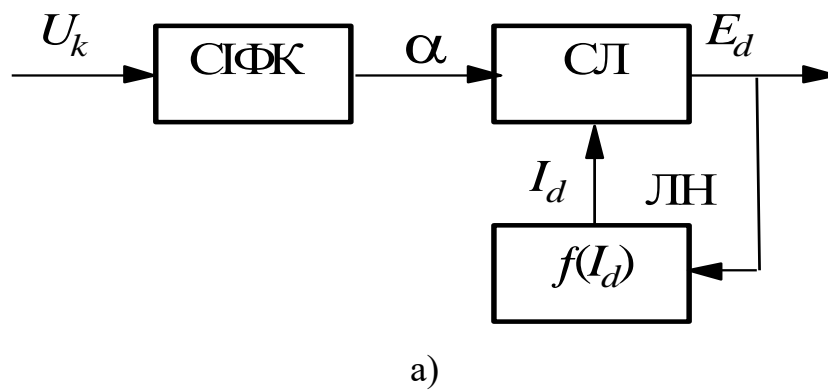


Рисунок 3.3 - Функціональна схема - а) та сигнали керування ТП – б)

В даний час найбільш часто використовують СІФК з вертикальним принципом керування. Нагадаємо суть цього принципу: пилоподібна опорна

напруга порівнюється з напругою керування і у момент, коли досягається їх рівність, формується керуючий імпульс на тиристор.

Рівняння пилоподібної напруги на ділянці провідності має вигляд:

$$U_{on} = \frac{U_m}{\pi}(\omega t) = \frac{U_m}{\lambda} \omega t, \quad (3.10)$$

де $\lambda = \frac{2\pi}{m}$ - кут провідності.

Рівність пилоподібної і керуючої напруг настає в момент часу, коли

$$U_k = \frac{U_m}{\pi}(\omega t). \quad (3.11)$$

Таким чином

$$\omega t = \pi \frac{U_k}{U_m} = \alpha = \lambda \frac{U_k}{U_m} \quad (3.12)$$

Знайдена величина є кут керування α , що відрахований від точки природної комутації тиристора.

З отриманого виразу випливає, що СІФК можна представити безінерційною (пропорційною) ланкою.

Реально, через інерційність фільтрів та інших елементів, що входять до схеми СІФК, залежність α від U_k описується диференціальним рівнянням виду:

$$T_\mu \frac{d\alpha}{dt} = \frac{U_k}{U_m} \pi - \alpha, \quad (3.13)$$

що відповідає передатній функції аперіодичної ланки.

Іноді СІФК, як динамічний об'єкт, приводять до виду ланки з чистим запізнюванням або комбінації аперіодичної і ланки запізнювання.

Нехтуючи нелінійністю регульовальної характеристики ТП одержимо наступні варіанти передатних функцій:

$$W_{mn}(p) = \frac{E_d(p)}{U_k(p)} = \frac{k_{mn}}{T_\mu p + 1} \quad (3.14)$$

$$W_{mn}(p) = k_{mn} e^{-\tau_n p}; \quad (3.15)$$

$$W_{mn}(p) = k_{mn} \frac{e^{-\tau_n p}}{T_\mu p + 1}. \quad (3.16)$$

Запізнювання в $W_{mn}(p)$ враховує той факт, що кут керування α змінюється не миттєво при зміні U_k , а тільки при наступному переключенні вентилів.

Звичайно приймають:

$$T_\mu = 0.01 \div 0.015 \text{ с};$$

$$\tau = 0.007 \div 0.015 \text{ с}.$$

Оскільки інерційність ТП мала, то її враховують тільки для малоінерційного навантаження, наприклад, для якірного ланцюга ДПС при співвідношенні $T_\mu < (4 \div 6) T_e$.

При моделюванні роботи ТП на навантаження з великою індуктивністю, наприклад, обмотку збудження, інерційністю ТП можна знехтувати і тоді

$$W_{mn}(p) = k_{mn} \quad (3.17)$$

Недоліком моделей ТП відносно середніх значень є те, що відсутня можливість урахування зони переривчастих струмів, пульсацій випрямленої ЕРС і струму.

З підпорядкованого регулювання об'єкт керування розділяється на декілька підсистем, які утворюють вкладені контури керування, де вихідний сигнал з одного контуру слугує заданим значенням для наступного. Це підхід широко використовується в більшості систем керування електроприводами механізмів технологічних об'єктів.

Зокрема, часто реалізується двоконтурна система автоматичного керування (САК) зі зворотними зв'язками за швидкістю та струмом. Структурна схема двоконтурної САК електроприводу в системі тиристорний перетворювач - двигун постійного струму (ТП-Д) складається з внутрішнього контуру регулювання струму якоря та зовнішнього контуру регулювання кута швидкості.

Для регулювання струму (I) та швидкості (V) в таких системах найчастіше використовують пропорційний регулятор (П-регулятор), який має свою характеристику у вигляді передатної функції. Цей регулятор забезпечує базове налаштування, необхідне для підтримання стабільності роботи системи та відповідності заданим параметрам.

$$W_n(p) = k \quad (3.18)$$

- пропорційно-інтегральний (ПІ-регулятор) із передатною функцією

$$W_{ni}(p) = k + b \frac{1}{p} \quad (3.19)$$

П-регулятор є частковим випадком ПІ-регулятора, при $b = 0$. Тому далі розглянемо моделювання ПІ-регулятора. Його структурна схема має вигляд,

поданий на рис.3.3.а), або у вигляді зручному для моделювання - на рис.3.3. б).

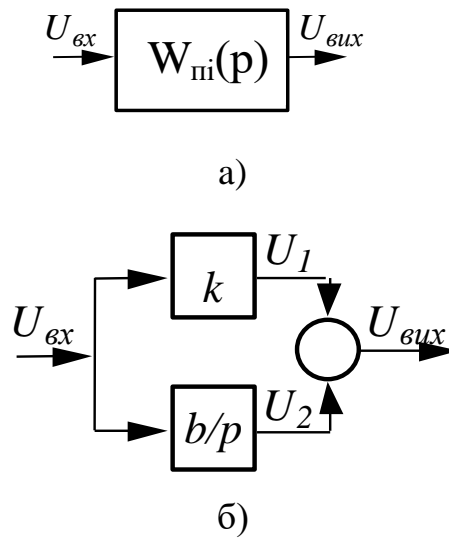


Рисунок 3.4 Структурна схема ПІ-регулятора

За останньою структурою складемо систему рівнянь регулятора:

$$\begin{cases} \frac{dU_2}{dt} = b \cdot U_{вх}, \\ U_{вих} = U_2 + U_{вх} \cdot k. \end{cases} \quad (3.20)$$

У реальному ПІ-регуляторі процеси описуються більш складною системою рівнянь. Це пов'язано з насиченням операційного підсилювача, на базі якого виконується регулятор і з наявністю елементів обмеження.

Принципова схема ПІ-регулятора має вигляд, наведений на рис.3.11.

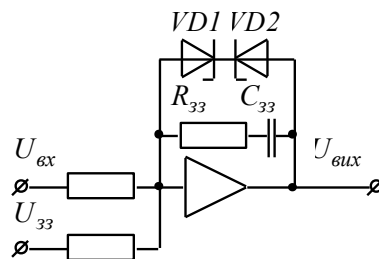


Рисунок 3.5 Принципова схема ПІ-регулятора

Упорядкованого регулювання вихідний сигнал регулятора обмежується на потрібному рівні. Це технічне завдання реалізується шляхом введення в контур зворотного зв'язку елементів, таких як стабілітрони (наприклад, стабілітрони $(D1)$ та $(D2)$). Вихідна напруга обмежується напругою пробою стабілітронів, що перешкоджає її подальшому зростанню при перевищенні цього рівня.

Таким чином, коли сигнал підвищується вище напруги пробою, напруга на виході залишається сталою і не змінюється, що гарантує стабільність системи. На структурній схемі ці нелінійності, які виникають внаслідок насичення операційного підсилювача (ОП) та обмеження, моделюються через нелінійну ланку, яка позначається як “насичення” (згідно з рисунком 3.6). Це дозволяє адекватно відобразити реальні процеси, що відбуваються в системі.

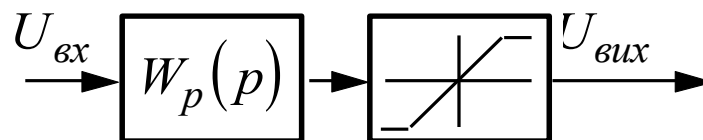


Рисунок 3.6 Структурна схема регулятора з урахуванням насичення

О таке спрощене уявлення не відображає фізичних процесів, що відбуваються в регуляторі. У реальному операційному підсилювачі (ОП) зміна виходу інтегральної частини регулятора відповідає зміні заряду конденсатора. Коли спрацьовує коло обмеження або вихід ОП потрапляє в режим насичення, заряд на конденсаторі більше не збільшується. Це свідчить про те, що інтегруюча частина перестає виконувати свою функцію, а її вихідне значення залишається незмінним.

У наданій структурній схемі не враховано дане явище, оскільки після активації обмеження сигнал на вході ланки насичення продовжує зростати, незважаючи на те, що вихід регулятора не змінюється. Щоб врахувати це у рів-

няннях ПІ-регулятора, потрібно додати алгоритм, який на кожному етапі інтегрування перевіряє вихід регулятора. Таким чином, можна створити більш точну модель, яка відображає реальні умови роботи регулятора і його реакцію на зміни в контрольованій системі.

$$\text{якщо } U_{вих} > U_{вих.max}, \text{ то } \frac{dU_2}{dt} = 0$$

При виконанні цієї умови інтегральна частина перестає змінюватися.

Крім того, необхідно обмежити і загальний вихідний сигнал регулятора шляхом введення в алгоритм наступного умовного оператора:

$$\text{якщо } U_{вих} > U_{вих.max}, \text{ то } U_{вих} = U_{вих.max}.$$

Остаточна система рівнянь ПІ-регулятора:

$$\begin{cases} \frac{dU_2}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } U_2 + kU_{вх} > U_{вих.max} \\ b \cdot U_{вх}, & \text{якщо } U_2 + kU_{вх} \leq U_{вих.max} \end{cases} \\ U_{вих} = \begin{cases} U_2 + kU_{вх}, & \text{якщо } U_2 + kU_{вх} \leq U_{вих.max} \\ U_{вих.max}, & \text{якщо } U_2 + kU_{вх} > U_{вих.max} \end{cases} \end{cases} \quad (3.21)$$

Повернемося до розгляду структурної схеми двоконтурної системи підпорядкованого регулювання за системою ТП-Д з двома ПІ-регуляторами, із від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю та струмом.

За параметрами схеми заміщення приводного двигуна, наведеними у розділі 2.1, розрахуємо параметри регуляторів системи підпорядкованого керування

Електромагнітна стала часу

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} = 0,034 \text{ с}$$

Момент інерції ДПС

$$J = 0,0015 \cdot M_{ном}^{1.5} = 70 \text{ кгм}^2$$

Сумарний момент інерції електропривода

$$J_a = 1,25 \cdot J = 84 \text{ кгм}^2$$

Електромеханічна стала часу

$$T_M = \frac{J_a \cdot R_a}{k_e \cdot k_M} = 0,2178 \text{ с}$$

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача

$$k_{\text{ТП}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{y \text{ max}}} = 32$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості

$$k_{\text{ос}} = \frac{U_{y \text{ max}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = 0.1273$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму

$$k_{\text{от}} = \frac{U_{y \text{ max}}}{2I_{\text{НОМ}}} = 0,0139$$

Інтегральна частина регулятора струму

$$I_{\text{рТ}} = \frac{R_a}{2T_M \cdot k_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{от}}} = 3,825$$

Пропорційна частина регулятора струму

$$P_{рт} = I_{рт} \cdot T_e = 0,18$$

Інтегральна частина регулятора швидкості

$$I_{рс} = \frac{T_m \cdot k_e \cdot k_{от}}{8T_\mu^2 \cdot k_{ос} \cdot R_a} = 811,86$$

Пропорційна частина регулятора швидкості

$$P_{рс} = 4T_\mu \cdot I_{рс} = 64,95$$

Математичне моделювання двохдвигунного електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8И у розімкненій системі керування

С характерних рис багатодвигунного електропривода є наявність спільної механічної частини, де різні двигуни виконують роль джерел рушійного моменту. Однією з важливих проблем, що стосуються багатодвигунних електроприводів, є нерівномірний розподіл навантажень, який викликаний відмінностями в електричних параметрах окремих електродвигунів.

Для детального вивчення цього нерівномірного розподілу навантажень необхідно розглянути математичну модель дводвигунного електроприводу, що використовується в механізмі повороту екскаватора ЕКГ-8И. Ця модель, представлена на рисунку 3.7, дозволяє проаналізувати взаємодію між двигунами та їх вплив на загальний процес роботи механізму, а також виявити причини нерівномірності навантаження.

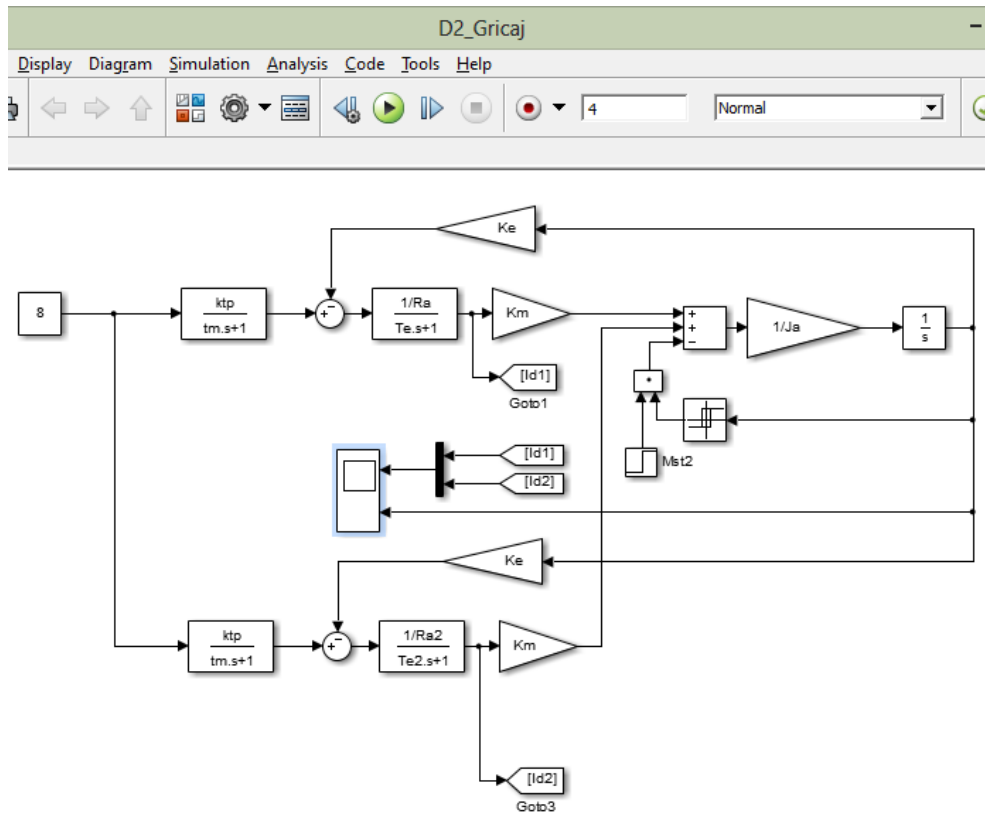
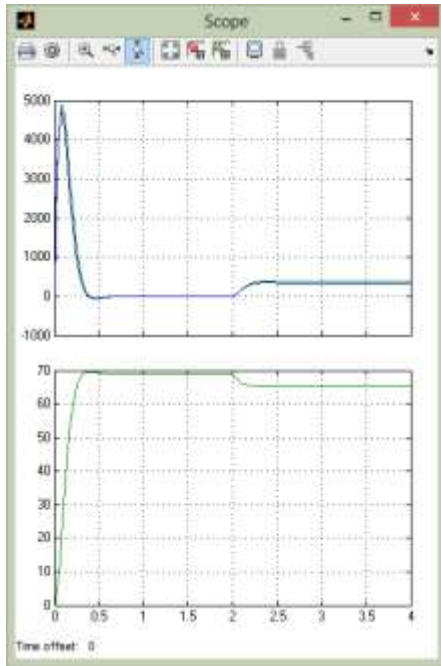


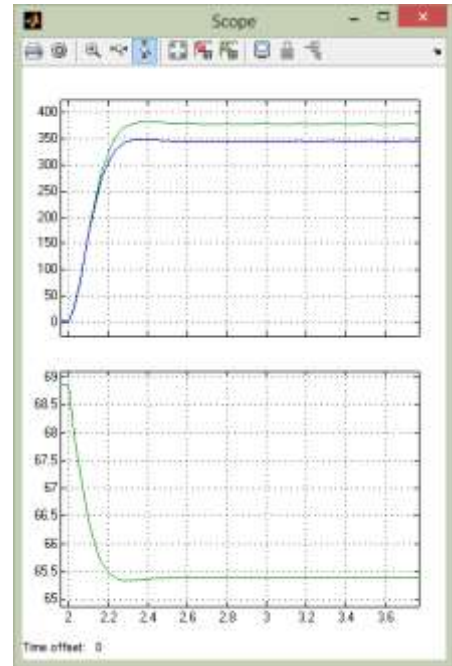
Рисунок 3.7 Математична модель дводвигунного електроприводу механізму повороту екскаватора ЕКГ-8И

З наведених моделей було досліджено, як відбувається розподіл навантажень між окремими двигунами в умовах нерівності якорних опорів, при цьому приймалася різниця опорів на рівні 10%. На рисунку 3.8 представлені графіки, які показують струми кожного з двигунів під час запуску та при збільшенні навантаження.

Ці результати дають змогу оцінити, як зміни в опорах впливають на роботу двигунів, а також виявити неефективності в процесі розподілу навантажень, що може призвести до перевантаження одного з двигунів та, відповідно, загального зниження продуктивності системи. Такий аналіз є важливим для оптимізації роботи багатодвигунних електроприводів і забезпечення їх надійності.



а) запуск електроприводу



б) збільшення навантаження

На рисунку 3.8, чітко показують нерівність розподілу струмових і механічних навантажень серед двигунів. Зазначена різниця між сталими значеннями струмів окремих двигунів становить 11,8%. Для покращення рівномірності розподілу навантажень між електродвигунами доцільно реалізувати замкнені системи керування електроприводом повороту.

На рисунку 3.9 ілюструється структурна схема роз'єднаної системи приводу, що складається з двох двигунів, які забезпечують поворот екскаватора. Наявність цієї схеми дозволяє точно регулювати струми в кожному зі струмів, що покращує їх роботу і підвищує надійність усієї системи. Індивідуальне живлення якірних кіл, запропоноване в цій схемі, забезпечує стабільну і ефективну експлуатацію кожного з компонентів електроприводу.

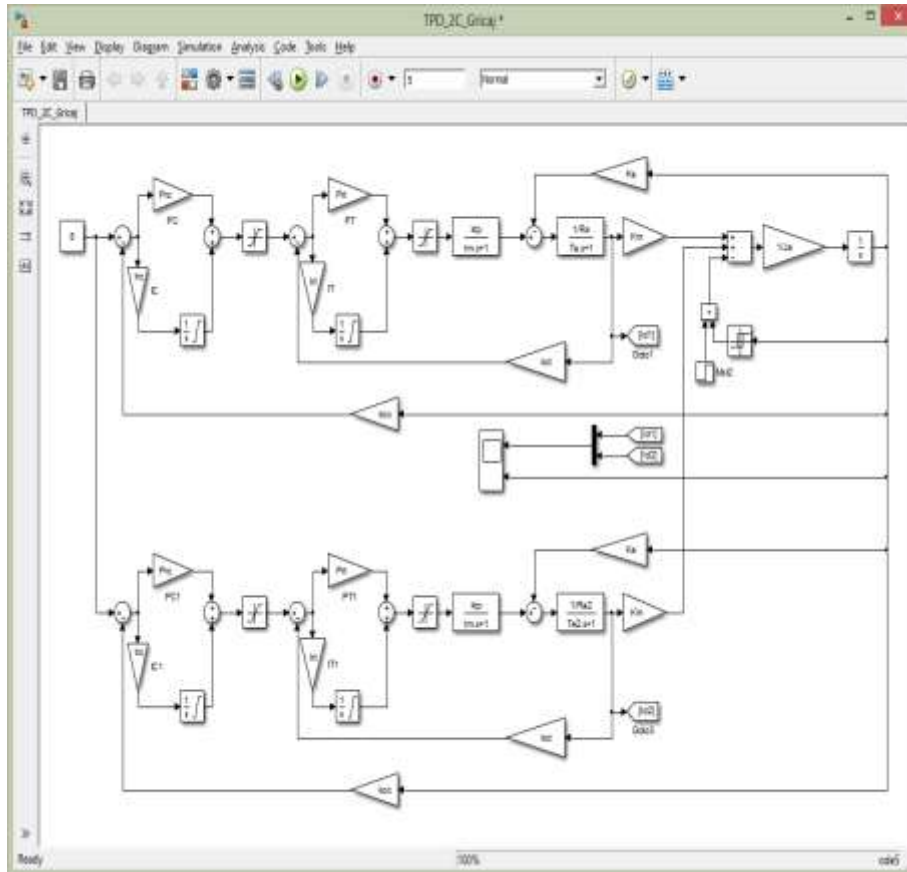
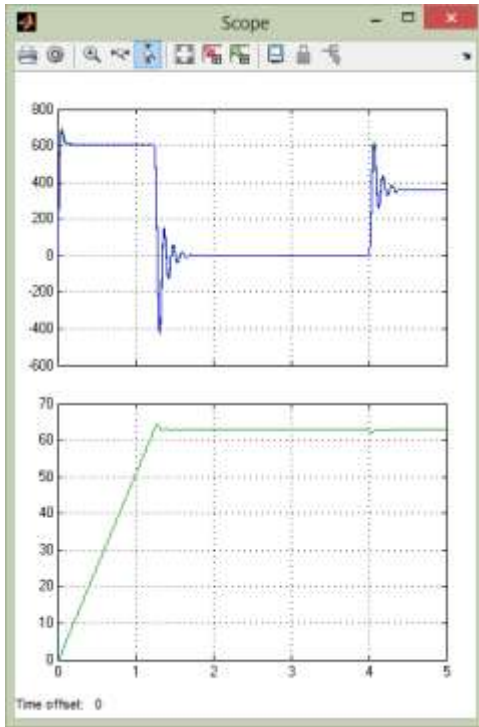


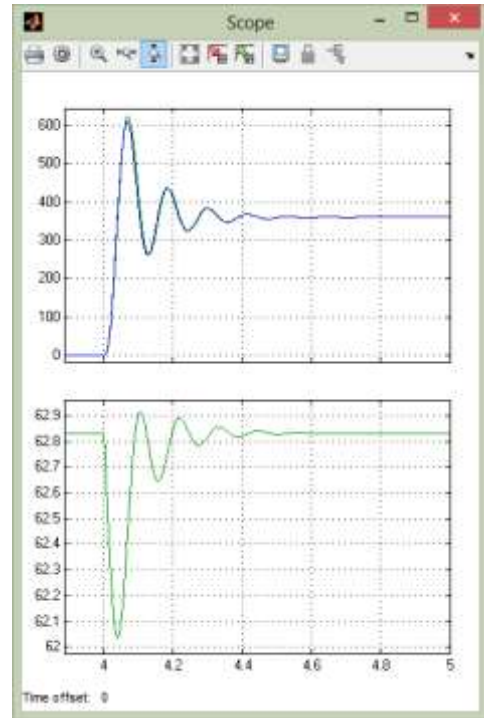
Рисунок 3.9 Структурна схема замкненої системи керування двохдвигунного приводу повороту екскаватора ЕКГ-8И

У цій моделі налаштування регуляторів системи автоматичного керування (САК) для окремих електродвигунів є спільними. Якірні опори кожного з двигунів мають різні значення.

Графіки, що ілюструють процеси запуску та збільшення навантаження, наведені на рисунку 3.10. Як видно з цього рисунка, застосування звичайної двоконтурної системи підпорядкованого управління дозволяє досягти досить точного вирівнювання струмових і механічних навантажень у двохдвигунному електроприводі. Проте, використання такої системи призводить до погіршення динамічних характеристик електроприводу, збільшуючи коливання під час трансформаційних процесів та час регулювання в порівнянні з теоретичними даними системи, оптимізованої за симетричним критерієм.



а) запуск електроприводу



б) збільшення навантаження

Рисунок 3.10 Перехідні та усталені режими двохдвигунового електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8И у замкненій системі керування

Висновки

Розглянуто типові математичні моделі електричних машин постійного струму та тиристорних перетворювачів. Особливу увагу присвячено особливостям моделювання замкнених систем підпорядкованого керування. Було розроблено математичну модель двохдвигунового електроприводу для механізму повороту екскаватора, що працює в системі ТП-Д.

Також проведено порівняльний аналіз розподілу струмових і механічних навантажень між окремими двигунами в двохдвигунному електроприводі. Встановлено, що застосування традиційної двоконтурної системи підпорядкованого керування швидкістю забезпечує прийнятне вирівнювання навантажень між двигунами, проте супроводжується незначним збільшенням часу запуску та коливальності струмів під час перехідних процесів.

4 НАЛАГОДЖЕННЯ ТА МОНТАЖ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Принципова схема допоміжних електроприводів, освітлення та обігріву представлена на рисунку 4.1. Усі електроприводи допоміжних механізмів виконані на основі асинхронних коротко-замкнуті електродвигунів, розрахованих на напругу 380 В. Захист двигунів забезпечується через максимальні реле в автоматичних вимикачах для захисту від коротких замикань, тепловими реле для захисту від перевантажень, а також приладами Ф-4106А для захисту від замикань на землю.

Двигуни насосів змащення редукторів повороту М18 і М19 підключаються автоматичним вимикачем QF4 та магнітним пускачем КМ1. Управління здійснюється кнопками SB, а захист від перевантажень реалізовано за допомогою теплових реле КХ1 і КХ2.

Компресор М3 запускається автоматом QF5 і магнітним пускачем КМ2. Управління здійснюється пакетним вимикачем SA7 і реле тиску SP.

Вентилятори М4-М9, що підтримують роботу головних двигунів, включаються автоматом QF6 і магнітним пускачем КМ3. Управління їх запитом здійснюється пакетом SA2, а захист від перевантажень забезпечується тепловими реле КК3-КК8.

Вентилятори кузова М10-М13 підключаються через автомат QF7 та пускач КМ4, з управлінням через пакетний вимикач SA1 і захистом від перевантажень за допомогою теплових реле КК9-КК12.

Двигуни вентиляторів генераторів М15-М16 та вентилятор синхронного двигуна М14 живляться від автомата QF8 через магнітні пускачі КМ5 і КМ6. Управління пускачем КМ5 здійснюється нормально-відкритим блок-контактом, що знаходиться в КРУ, у той час як пускач КМ6 керується з SA2. Захист від перевантажень включає теплові реле КК13-КК15.

Двигун допоміжної лебідки Д отримує живлення через автомат QP9 за допомогою реверсивних магнітних пускачів КВ та КН. Управління пускачами може відбуватися як безпосередньо з лебідки, так і дистанційно з кнопочного

поста. Лебідка призначена для роботи в поштовховому режимі, тому вона діє лише при натисканні кнопок 2КУ або 3КУ. Для запобігання одночасному увімкненню пускачів В і Н використовується механічна і електрична блокування. У разі необхідності аварійної зупинки передбачена кнопка "стоп", а на дистанційному посту є блок-контакт захисту БКЗ.

Двигун зварювального агрегату живиться від автомата QF11. Обігрів масла в редукторах повороту здійснюється електричними нагрівачами, які підключаються через пускачі КМ8 і КМ9 до автомата QF12. Включення та вимкнення електронагрівачів регулюється автоматично з використанням термореле, які підключені до котушок реле КV1 і КV2. Аналогічна система обігріву масла в редукторі натиску передбачає використання електричних нагрівачів, живлених пускачем КМ10 через автомат QF13, з автоматичним управлінням через термореле, підключене до котушки КV3.

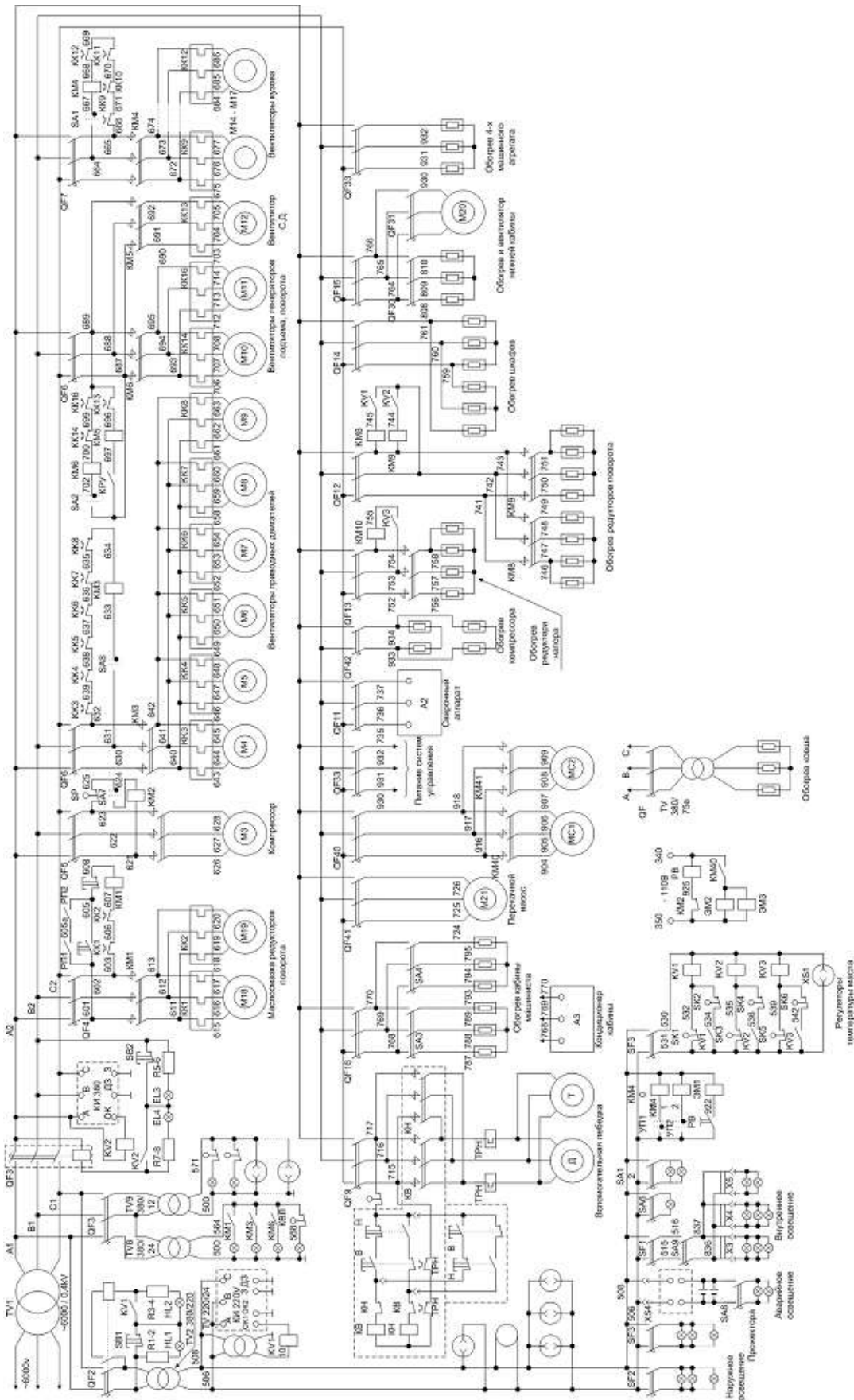


Рисунок 4.1 Принципова схема допоміжних електроприводів, освітлення та обігріву

QF1-QF3 відповідають за захист струмоприймачів, що живляться від збору шин з напругою 380 В. Ці шини живляться через автомат QF1 від понижуючого трансформатора 6/0,4 кВ, встановленого на поворотній платформі екскаватора. Автомати QF2 і QF3, які забезпечують живлення трансформатора освітлення 380/230 В та трансформатора місцевого освітлення 380/12 В, підключені до фідерного автомата QF1.

Обидва автомати QF1 і QF2 оснащені дистанційними розчеплювачами, керованими приладами контролю ізоляції. Остаточні автомати до вторинної обмотки трансформатора 380/220 В, SF1, QF2, живлять освітлення екскаватора. Автомат QF3, у свою чергу, живить котушки проміжних реле KV1-KV3, які контролюють термосигналізатори масла в редукторах. Напруга в шинах 220 В і 380 В контролюється за допомогою вольтметрів PV1 та PV2.

Для підключення ремонтного обладнання та переносних ламп освітлення є спеціальні розетки XS1 (220 В) і XS2 (12 В).

Схема головних електроприводів, представлена на рисунку 4.2, включає генератори GH, GCP і GSP, які відповідають за приводи підйому, напору та повороту. Двигуни головних приводів позначені як M1H, M2H для підйому, M1C, M2C для напору, M1S, M2S для повороту, а також M1P, M2P для ходу.

Складові частини схеми виконують такі функції: електронні блоки системи управління AH, AC, AS контролюють тиристорні збудники для приводів підйому, напору та повороту; блок регулювання головних електроприводів A1 виконує функцію регулювання; блок живлення A2 забезпечує необхідні умови для роботи системи.

Датчики струму (AHA, ACA, ASA) та датчики напруги (AHU, ACU, ASU) здійснюють моніторинг для приводів підйому, напору і повороту. Блоки регулювання збудження двигунів (AHM, ACM, ASM, ARM) забезпечують контроль за збудженням приводів.

Трансформатори TV1, TVH, TVC і TVS виконують функцію живлення та синхронізації напруги, а стабілізатор напруги TS1 забезпечує стабільність живлення релейно-контакторної апаратури.

Також в системі є ряд вимірювальних приладів, таких як PA2H, PA2C, PA2S для контролю струму якорного кола, а також вольтметри PV1H, PV1C, PV1S для моніторингу напруги генераторів головних приводів. Вольтметр PV2 контролює напругу живлення релейно-контакторної апаратури.

Шунти RS2C, RS2S використовуються для вимірювання струму якорних ланцюгів приводів напору і повороту.

Автоматичні вимикачі, такі як QF17, відповідають за захист кіл змінного струму, а автомати QF18, QF19, QF20 і QFM забезпечують живлення різних елементів системи, включаючи системи управління, випрямлячі двигунів та силову частину блоків БУТВ.

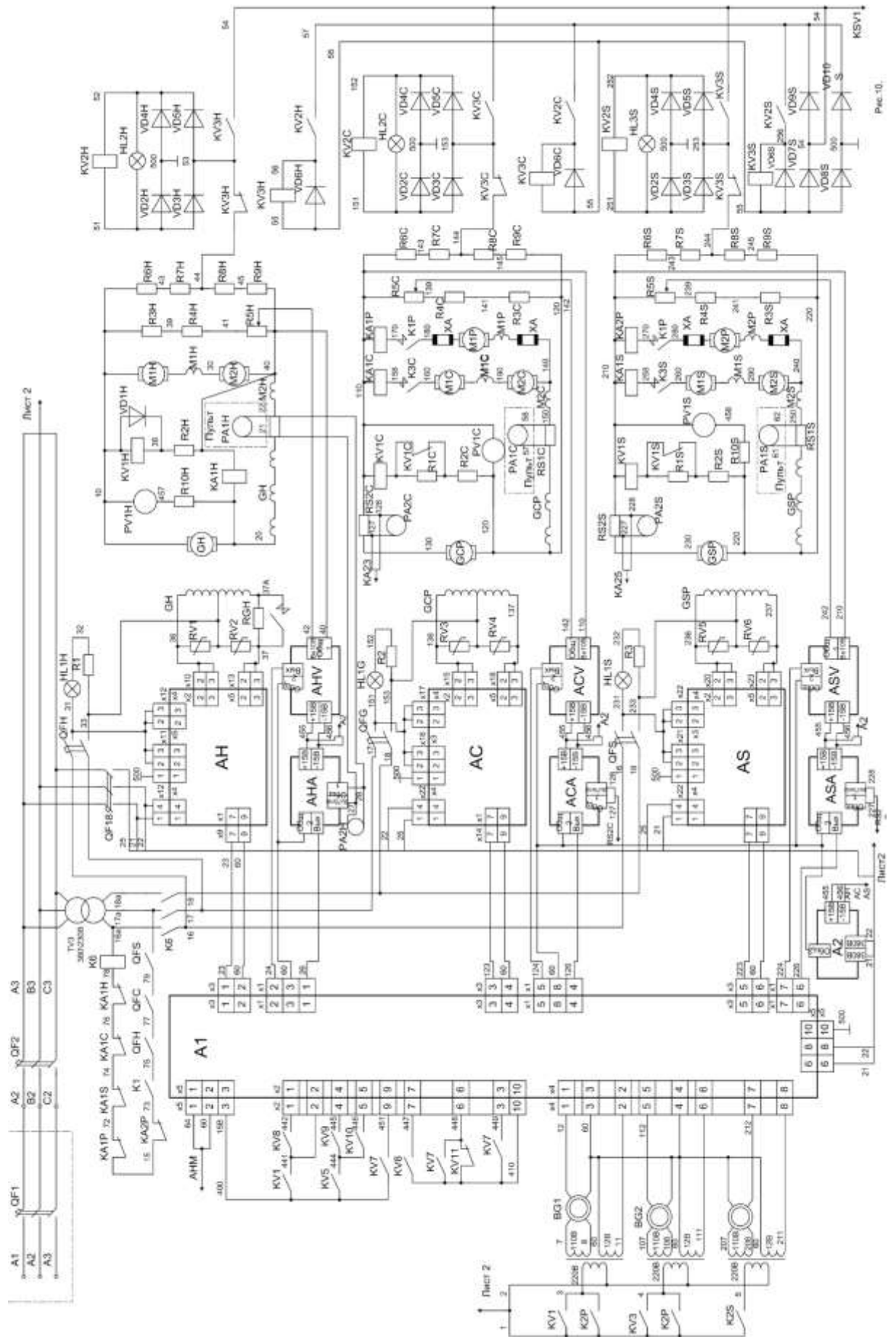


Рисунок 4.2 Принципова схема головних електроприводів

Контактори в системі виконують різні функції. Контактор К1 відповідає за включення живлення релейно-контакторної апаратури, тоді як К2 — за мотор, який відкриває днище ковша. Контактори К4 і К5 контролюють двигун кабельного барабана, а К6 активує головні приводи. Контакти К1R і К4R включають якірні ланцюги для привода ходу, тоді як К3S — для приводів напору. Для привода повороту використовується контактор К3Н, а К2С, К2S, К2Р активують електрогальма головних приводів. Контактор К1Н відповідає за включення розрядного опору в обмотку генератора підйому.

Реле в системі також виконують важливі функції. Наприклад, KV1Н, KV1С і KV1S контролюють напругу в якірних ланцюгах приводів підйому, напору та повороту. Реле КА1Н, КА1С, КА1S, КА1Р і КА2Р контролюють максимальний струм електроприводів. Реле КМ2Н, KV2С та KV2S забезпечують захист якірних ланцюгів від замикань на землю. Реле KV3Н, KV3С та KV3S фіксують замикання на землю, тоді як КА2Н, КА2С, КА2S, КА3Р контролюють обриви поля двигунів головних приводів.

Блоки АН, АС, АS, АНМ, АСМ, АSМ, АRМ та А1 виготовлені на основі конструкції БУК-В, що забезпечує захист чутливих елементів схеми від механічних впливів та забруднень, зручне обслуговування та естетичний зовнішній вигляд. Електровимірювальні прилади та сигнальні елементи зручно розміщені на дверцятах шаф ПКУ.

Системи живлення всіх вузлів управління забезпечуються трифазною мережею змінного струму 380 В. Автомат QF17 відповідає за включення змінної напруги, а автомат QF18 подає напругу на системи імпульсно-фазового управління блоків БУТВ, АН, АС, АS, а також на панелі живлення блоків регулювання головних приводів А1 і живлення датчиків А2.

Для подачі напруги на силову частину блоків БУТВ передбачено включення автоматів QFH, QFC і QFS, що також готують ланцюг для контактора К6. Контактор К6 активується після спрацьовування контактора К1. Для по-

дачі живлення на силову частину блоків БРВД використовується автоматичний вимикач QFM. Сигнальні лампочки HL1H, HL1C, HL1S та HL1M інформують про наявність перемінної напруги на силових частинах блоків БУТВ та БРВД, а також включені резистори R1 до R4 для обмеження струму.

Автомати QFH, QFC і QFS призначені для захисту силової частини блоків БУТВ і повинні бути завжди включеними. Слід відзначити, що на системи імпульсно-фазового управління та силову частину блоків БРВД і БУТВ подаються одні й ті ж фазові живлення.

При активації головного автоматичного вимикача QF17 живлення отримує електромагнітний стабілізатор напруги TS1, який перетворює напругу на 380/220 В. Стабілізоване значення напруги ~ 220 В надходить на первинні обмотки трансформаторів TVH, TVC та TVS, які забезпечують синхронізацію ~ 12 В для фазочутливих випрямних пристроїв в блоці регулятора А1. Стабілізоване ~ 220 В з виходу стабілізатора також подається на первинну обмотку трансформатора TV1, а напруга ~ 110 В з його вторинних обмоток живить однофазний

Вористання тиристорних збудників для живлення обмоток збудження генераторів і двигунів дозволяє відповідати сучасним вимогам щодо статичних і динамічних характеристик головних електроприводів. Ця технологія реалізована через трьохконтурну систему підпорядкованого регулювання, яка включає два контури регулювання напруги і один контур для регулювання струму якоря. Завдяки такій структурі управління вдалося досягти задовільних характеристик для усіх головних приводів завдяки налаштуванню контурів та використанню додаткових вузлів.

Для пояснення принципу формування статичних і динамічних характеристик даної системи управління варто розглянути узагальнену принципову схему, наведена на рисунку 4.3. Нумерація елементів на схемі є довільною і не прив'язана до конкретного приводу.

Усі регулятори, застосовані в цій системі, є пропорційного типу. Операційний підсилювач DD3 виконує функцію регулятора напруги внутрішнього контуру, що застосовується для лінеаризації статичної характеристики каскаду "тиристорний збудник - генератор". Лінеаризація забезпечує необхідну якість процесів у зовнішніх контурах. Налаштування контуру відбувається шляхом вибору опору резистора R11 в ланцюзі зворотного зв'язку для напруги, що забезпечує потрібну лінійність характеристики $E_g(U_{рт})$ напруги генератора E_g в залежності від вихідної напруги $U_{рт}$ регулятора струму. Варто зазначити, що електропривід повороту має найбільш високі вимоги до лінійності цієї характеристики серед усіх приводів.

Наступним етапом налаштування є вибір опору резистора R10 у ланцюзі завдання, який має бути таким, щоб максимальна напруга генератора досягалася при $U_{рт}$, становлячому менш ніж 10 В. Залежність $E_g(U_{рт})$ показана на рисунку 4.3, де пояснюється, як опори зазначених резисторів впливають на результат.

Регулятор струму, реалізований на операційному підсилювачі DA2, має безперервну зворотну зв'язок по струму, заведений через резистор R5. Значення цього резистора впливає на динамічні характеристики контура і коефіцієнт відсічення статичної характеристики. Його опір треба підбирати експериментально, виходячи з необхідних перехідних характеристик. Зменшення опору R5 призводить до підвищення швидкості реакції контуру, але й до збільшення перерегулювання. Підібране опір забезпечує статичну характеристику з коефіцієнтом відсічення $K_{отс}$, який може бути меншим від бажаного. Остаточне налаштування статичної характеристики виконується за рахунок резистора R8 в ланцюзі позитивної зворотного зв'язку по напрузі. Введення цієї зв'язки підвищує коефіцієнт відсічення, і критичне налаштування забезпечує крутопадную форму статичної характеристики з $K_{отс} = 1$, що є необхідним для привода повороту.

Варто зауважити, що така форма характеристики досягається при використанні пропорційно-інтегрального регулятора струму. Хоча застосування такого регулятора може не поліпшити роботу приводу, воно створює необхідність "обнулення" регулятора в неробочому положенні, що ускладнює схему управління і знижує її надійність. Таким чином, введення позитивної зворотної зв'язку по напрузі в системі управління електроприводами екскаваторів виглядає більш доцільним. Ймовірно, що потрібне значення Котс для приводів копаючих механізмів може бути досягнуто й без введення такої зворотної зв'язки, у такому разі резистор R8 не буде встановлюватись.

Сема силової частини блоку управління тиристорним збудником з підключеною обмоткою збудження представлена на рисунку 4.4. Силова схема збудника складається з чотирьох тиристорів позначених як VS1, VS2, VS3 і VS4. В залежності від напрямку струму в обмотці збудження, працюють різні групи тиристорів: при одному напрямку активуються VS1 і VS2, а при протилежному — VS3 та VS4. Першу групу можна умовно назвати "Вперед", а другу — "Назад".

Розглянемо роботу цієї схеми, спираючись на часові діаграми, представлені на рисунку 4.5. У додатний напівперіод живлячої напруги, коли на спільну точку тиристорів подається додатна напруга, а на середню точку обмотки збудження — від'ємна, керуючі імпульси надходять на верхню групу тиристорів (VS1 і VS3). В результаті цього відкривається тиристор VS1, на аноді якого виникає позитивна напруга, що призводить до протікання струму I_{v1} через половину обмотки L1G.

У від'ємний напівперіод живлячої напруги керуючі імпульси подаються на нижню групу тиристорів (VS2 і VS4). У цьому випадку відкривається тиристор VS2, на аноді якого також виникає позитивна напруга, що забезпечує протікання струму I_{v2} через половину обмотки L2G. Таким чином, схема дозволяє реалізувати керування обмоткою збудження в обох напрямках, забезпечуючи гнучкість і контролюваність процесу збудження.

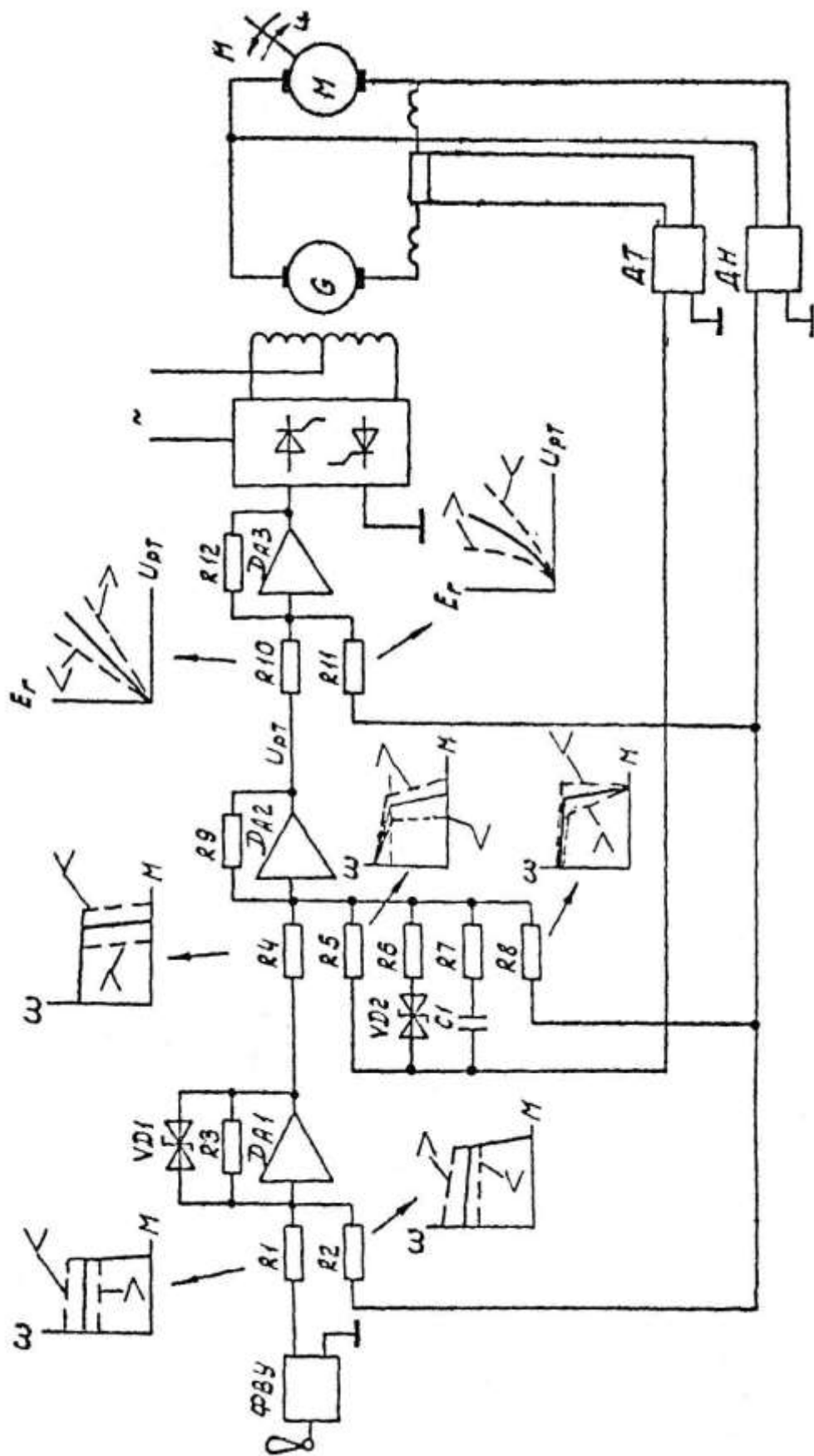


Рисунок 4.3 Вплив вхідних опорів регуляторів на форму статичних характеристик електроприводів (> - опір збільшується; < - опір зменшується)

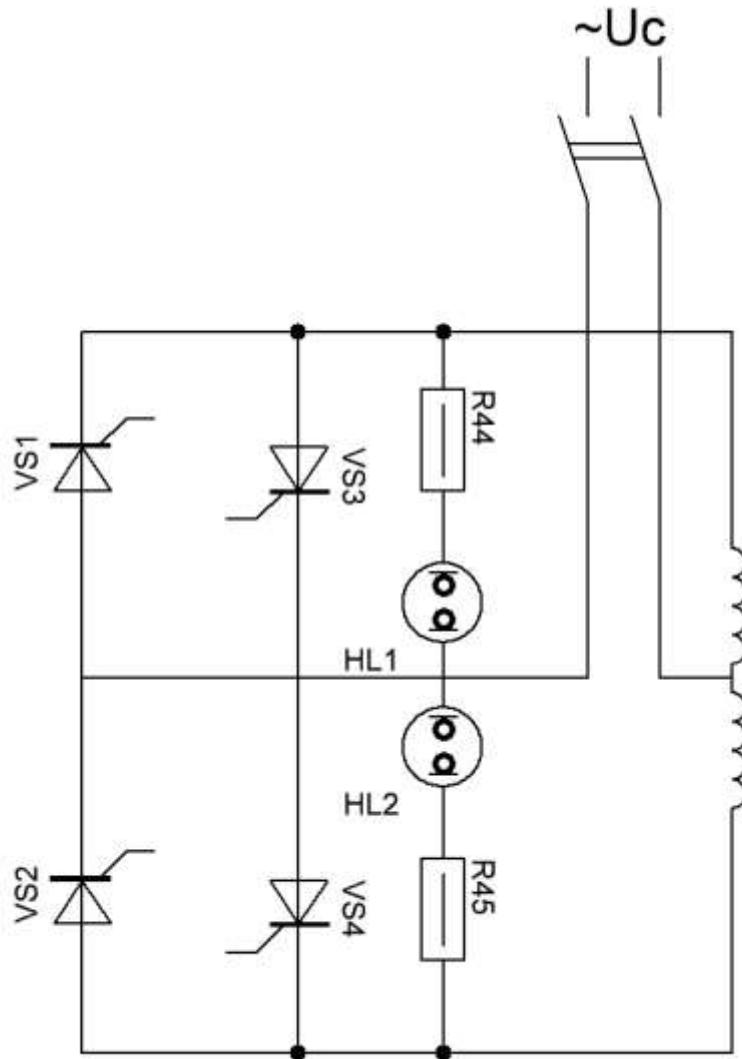


Рисунок 4.4 Принципова схема силової частини тиристорного збудника

От, намагнічена сила генератора утворюється по черзі обмотками L1G та L2G, під час роботи тиристорів групи "Вперед". Якщо виникає необхідність змінити напрямок струму в обмотці збудження, то в позитивний напівперіод керуючі імпульси направляються на тиристори VS2 і VS4. У цьому випадку відкривається тиристор VS4, оскільки на його аноді є додатна напруга. У від'ємний напівперіод керуючі імпульси поступають на тиристори VS1 і VS3, в результаті чого відкривається тиристор VS3.

Таким чином, напрямок струмів I_{B1} і I_{B2} стає протилежним. Цей новий напрямок на часових діаграмах, представлених на рисунку 4.5, показаний пунктирною лінією. Спостерігаємо, що при зміні напрямку струму активуються тиристори групи "Назад", що забезпечує гнучкість і контрольований процес збудження генератора в обох напрямках.

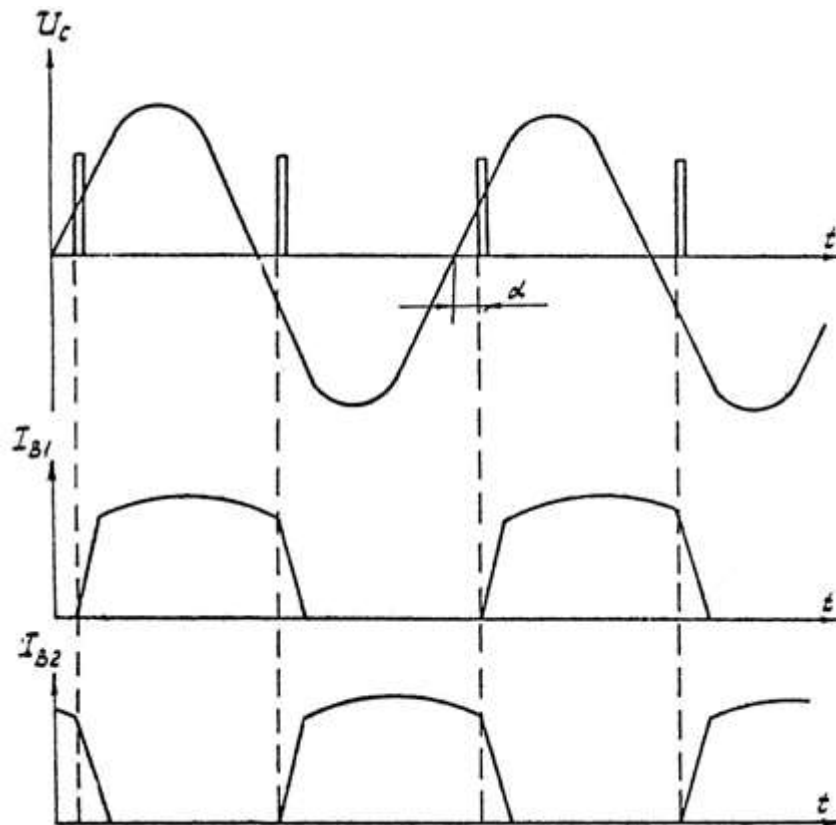


Рисунок 4.5 Часові діаграми роботи силової частини тиристорного збуджувача.

На рис.4.6 наведено принципову схему системи імпульсно-фазового керування тиристорним збудником.

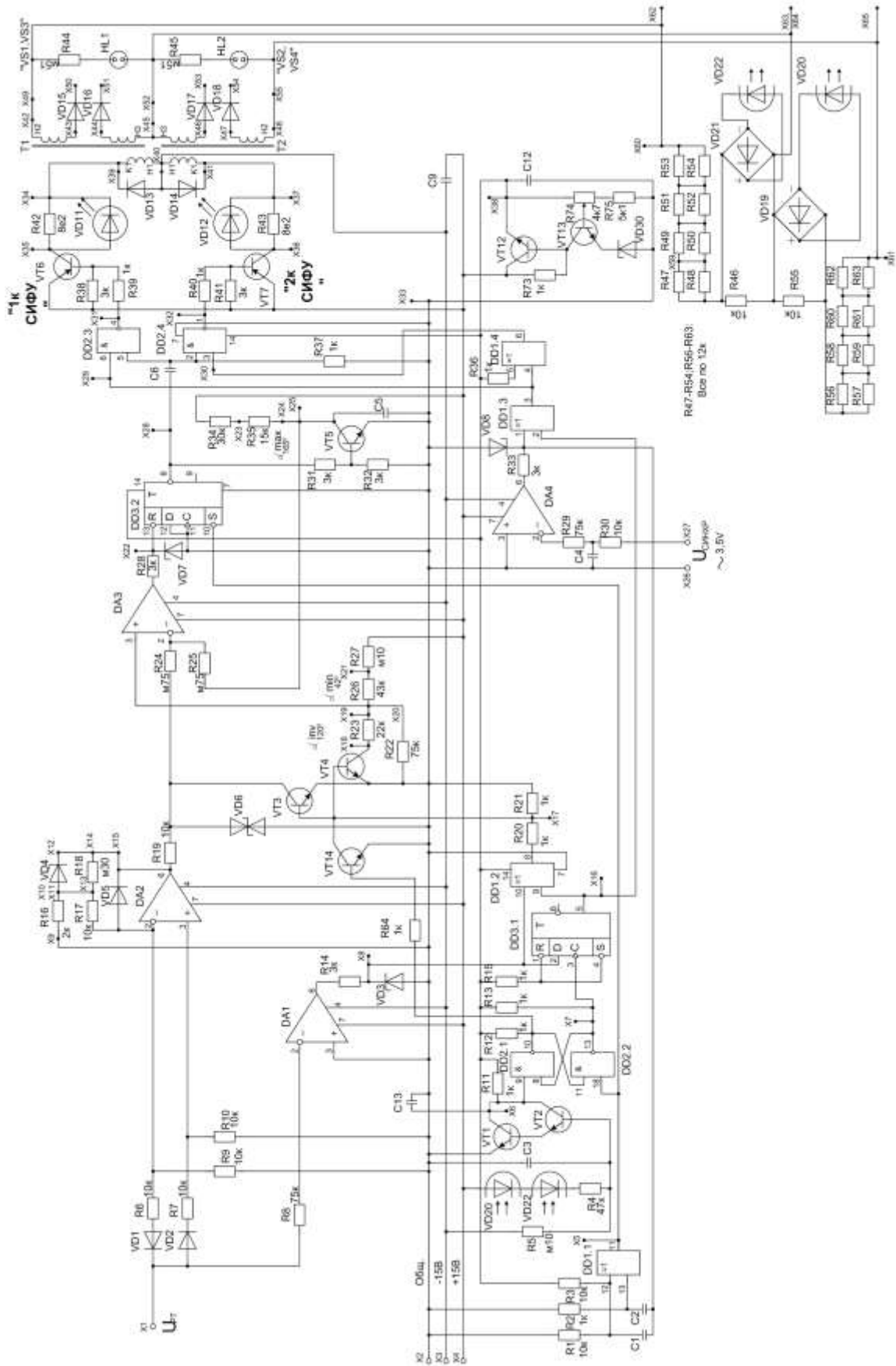


Рисунок 4.6 Принципова схема системи імпульсно-фазового керування тиристорним збудником.

Нижче наведено специфікацію елементів плати управління тиристорним збудником ПУТВ [6].

Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		Конденсатори К73-9 ОЖО.461.087ТУ		
		Конденсатори К73-17 ОЖО.461.104ТУ		
1	C1,C2	К73-9-100В-0,033мкф+-10%	2	
2	C3	К73-9-100В-2200пф+-10%	1	
3	C4	К73-9-100В-0,1мкф+-5%	1	
4	C5	К73-9-100В-0,15мкф+-5%	1	
5	C6	К73-9-100В-0,33мкф+-5%	1	
6	C9,C12	К73-17-160В-2,2мкф+-10%	2	
		Мікросхеми		
7	DA1-DA4	КР544УД1А БКО.348.257ТУ	4	
8	DD1	КМ155ЛП5 БКО.348.244-22ТУ	1	
9	DD2	КМ155ЛА8 БКО.348.244-01ТУ	1	
10	DD3	КМ155ТМ2 БКО.348.244-01ТУ	1	
		Лампа універсальна ИНС-1		
11	HL1 - HL2	ШАЗ.341.030ТУ	2	
		Резистори МЛТ ОЖО.467.180ТУ		
12	R1	МЛТ-0,25-10кОм+-10%	1	
13	R2	МЛТ-0,25-1кОм+-10%	1	
14	R3	МЛТ-0,25-10кОм+-10%	1	
15	R4	МЛТ-0,25-47кОм+-10%	1	
16	R5	МЛТ-0,25-100кОм+-10%	1	
17	R6,R7	МЛТ-0,25-10кОм+-10%	2	
18	R8	МЛТ-0,25-75кОм+-10%	1	
19	R9,R10	МЛТ-0,25-10кОм+-10%	2	
20	R11-R13	МЛТ-0,25-1кОм+-10%	3	
21	R14	МЛТ-0,25-3,0кОм+-10%	1	
22	R15	МЛТ-0,25-1,0кОм+-10%	1	
23	R16	МЛТ-0,25-2,0кОм+-10%	1	
24	R17	МЛТ-0,25-10кОм+-10%	1	
25	R18	МЛТ-0,25-300кОм+-10%	1	
26	R19	МЛТ-0,25-10кОм+-10%	1	
27	R20,R21	МЛТ-0,25-10кОм+-10%	2	
28	R22	МЛТ-0,25-75кОм+-10%	1	
29	R23	МЛТ-0,25-180кОм+-10%	1	
30	R24,R25	МЛТ-0,25-750кОм+-10%	2	
31	R26	МЛТ-0,25-43кОм+-10%	1	
32	R27	МЛТ-0,25-100кОм+-10%	1	
33	R28	МЛТ-0,25-3,0кОм+-10%	1	
34	R29	МЛТ-0,25-75кОм+-10%	1	

35	R30	МЛТ-0,25-10кОм+-10%	1	
36	R31-R33	МЛТ-0,25-3,0кОм+-10%	3	
37	R34	МЛТ-0,25-30кОм+-10%	1	
38	R35	МЛТ-0,25-15кОм+-10%	1	
39	R36,R37	МЛТ-0,25-1,0кОм+-10%	2	
40	R38	МЛТ-0,25-3,0кОм+-10%	1	
41	R39,R40	МЛТ-0,25-1,0кОм+-10%	2	
42	R41	МЛТ-0,25-3,0кОм+-10%	1	
43	R42,R43	МЛТ-0,5-8,2 Ом+-10%	2	
44	R44,R45	МЛТ-0,25-510кОм+-10%	2	
		Резистори МЛТ ОЖО.467.180ТУ		
		СП3-39А ОЖО.468.354ТУ		
45	R46	МЛТ-1,0-10кОм+-10%	1	
46	R47-R54	МЛТ-2,0-22кОм+-10%	8	
47	R55	МЛТ-1,0-10кОм+-10%	1	
48	R56-R63	МЛТ-2,0-22кОм+-10%	8	
49	R64,R73	МЛТ-0,25-1,0кОм+-10%	2	
50	R74	СП3-39А-1-4,7кОм	1	
51	R75	МЛТ-0,25-5,1кОм+-10%	1	
52	T1,T2	Трансформатор ЖИБЦ.671121.001-18	2	
		Діоди КД521А дРЗ.362.035ТУ		
		КД105В ТРЗ.362.060ТУ		
		Стабілітрон КС147А СМЗ.362.818ТУ		
		Двоханодний стабілітрон КС210Б		
		ХЫЗ.369.001ТУ		
53	VD1,VD2	КД521А	2	
54	VD3,VD4	КС147А	2	
55	VD5	КД521А	1	
56	VD6	КС210Б	1	
57	VD7,VD8	КС147А	2	
58	VD11,VD12	Індикатор одиничний АЛ307БМ аАО.336.076ТУ	2	
59	VD13- VD18	КД105В	6	
		Транзистори КТ315В ЖКЗ.365.200ТУ		
		КТ816В аАО.336.186ТУ		
		КТ817В аАО.336.187ТУ		
60	VT1-VT5	КТ315В	5	
61	VT6,VT7	КТ816В	2	
62	VT12	КТ817В	1	
63	VT13,VT14	КТ315В	2	
64	X1-X54, X58-X65	Штирь ЖДИЦ.711.411.001	62	
		Прибор выпрямляющий КЦ405И		
		УФО.336.006ТУ		
		Стабілітрон КС133А СМЗ.362.814ТУ		
		Оптодистор ТО-125 ТУ16-529.933-82		

65	VD19	КЦ405И	1	
66	VD20	ТО-125-12,5-63	1	
67	VD21	КЦ405И	1	
68	VD22	ТО-125-12,5-63	1	
69	VD30	КС133А	1	

Вористання тиристорних збудників для живлення обмоток збудження генераторів та двигунів відповідає сучасним вимогам статичних і динамічних характеристик головних електроприводів. Застосування трикоштовної системи підпорядкованого регулювання, що містить два контури напруги та один контур регулювання струму якоря, дозволяє досягти високої точності характеристик електроприводів. Налагодження таких систем зводиться до перенесення параметрів регуляторів із тестового зразка на нові установки.

При цьому, якщо виявляються значні розбіжності в характеристиках, це свідчить про несправність одного з елементів, і подальше налаштування можливе лише після їх усунення. Робота релейно-контакторної схеми залежить від стану блоків АНМ, АСМ, АСМ і АРМ. Це підготовлювальні заходи перед налаштуванням блоків і приводів, завершальні етапи налаштування описуються в наступних пунктах.

Для запуску системи необхідно здійснити такі дії: включити автоматичний вимикач QF17 і перевірити подачу напруги на силову частину блоків АН, АС та АS. Потім включити автоматичні вимикачі QFH, QFC та QFS, змережити контактор К1, після чого зажадає засвітитися сигнальні лампочки HL1H, HL1C та HL1S. Далі потрібно вимкнути К1 і QFH, QFC та QFS, після чого активувати автомат QFM та перевірити засвітлення лампочки HL1M, щоб підтвердити наявність живлення для блоків АНМ, АСМ, АСМ і АРМ.

Далі, з використанням вольтметра, потрібно перевірити наявність напруги близько 150 В між клемми 304 і 305, і переконатись, що натягнувся трос двигуна М1 для відкривання днища ковша. Опісля спробувати встановити необхідне значення струму збудження для двигуна М1 з амперметром, щоб значення становило $1,2 \pm 0,1$ А.

Наступним кроком є налаштування напруги спрацьовування реле КА1Н максимального струму приводу підйому, підключаючи реостат до клем 304 та 305. Потрібно контролювати напругу, при якій спрацьовує реле. Якщо це значення виходить за межі 30 ± 1 В, необхідно відрегулювати натяг пружин реле і повторити вимірювання.

Далі потрібно включити автомат QF20 та перевірити наявність напруги близько 130–140 В на кіл релейно-контакторної апаратури. Натиснувши кнопку сигналізації SQ3, можна перевірити її роботу. Вимкнути QF20 та підключити до корпусу шафи точку з маркуванням 350, потім знову включити QF20 для підтвердження сигналу лампочкою HL7.

Після цього точка з маркуванням 340 також підключається до корпусу, і варто перевірити світіння лампочки HL8. Після кожного з цих етапів потрібно відключити автомат QF20 і прибрати перемички.

Далі перевіряється комутація приводу підйому шляхом підключення перемички між клемми 366 і 368 і тестування рукоятки командоконтролера BG1 в середньому положенні. Це дозволяє підтвердити, що включається контактор КЗН, електрогальма спрацьовують, і відповідні напруги надходять на сельсин.

Схожим чином здійснюється перевірка ланцюга комутації приводу напору, при цьому повинні включитися контактори К30, спрацювати електрогальма приводу напору, а також підтвердитися надходження напруги на соответствующий сельсин.

Кожен з етапів перевірки виконується в послідовності, описаній вище, з підтвердженням нормальної роботи всіх систем, включаючи командоконтролери.

Висновки

У розділі представлені принципові схеми живлення допоміжного устаткування екскаватора, а також системи живлення головних електроприводів. Окрім того, розглянуті принципові схеми блоку тиристорного збудника та його імпульсно-фазового керування, включаючи детальний опис їх роботи і порядку наладки.

Також обговорюється порядок проведення наладки обладнання екскаватора перед його запуском в експлуатацію, що включає необхідні етапи і процедури для впевненості в коректності функціонування всіх систем та елементів.

ВИСНОВКИ

Удiлi представленi технiчнi характеристики екскаватора ЕКГ-8И, а також типовi навантажувальнi дiаграми для основних механiзмiв цiєї машини. Також наведено технiчнi параметри електрообладнання, генераторiв постiйного струму та приводних двигунiв. Серед iнформацiї, що включається, є навантажувальнi дiаграми для основних механiзмiв, включаючи механiзм повороту.

Дослiджено, що статизм електроприводу в системi Г-Д коливається вiд 8,2% до 33,5%, тодi як у системi ТП-Д цей показник становить вiд 4,7% до 19,8%. Також проаналiзовано коефiцiєнт корисної дiї електроприводу: для системи Г-Д при номiнальному навантаженнi вiн становить 83%, а для ТП-Д — 87%. Впровадження системи ТП-Д вказує на пiдвищення коефiцiєнта корисної дiї на 4%.

Розглянутi типовi математичнi моделi електричних машин постiйного струму та тиристорних перетворювачiв. Окрiм того, пiдкреслюються особливостi моделювання замкнених систем пiдпорядкованого керування. Розроблено математичну модель двохдверного електроприводу повороту екскаватора по системi ТП-Д та виконано аналiз струмових i механiчних навантажень окремих двигунiв. Дослiдження показують, що застосування традицiйної двоконтурної системи пiдпорядкованого керування швидкiстю забезпечує адекватне вирiвнювання навантажень, але супроводжується деяким збiльшенням часу запуску та коливаннями струмiв пiд час перехiдних режимiв.

Наведено принциповi схеми живлення допомiжного обладнання екскаватора i головних електроприводiв. Розглянуто схеми блоку тиристорного збудника та iмпульсно-фазового керування, описано їх роботу та порядок налашки. Крiм того, обговорюється порядок пiдготовки обладнання екскаватора перед введенням в експлуатацiю.