

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Удосконалення електропривода кар'єрного одноківшевого екскаватора ЕКГ -5»

Виконав: студент 2 курсу, групи 601-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Гайдук В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Шефер О. В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерську роботу присвячено аналізу, проектуванню та дослідженню модернізованої системи керування електроприводом кар'єрного екскаватора ЕКГ-5. В аналітичній частині досліджено конструктивні та функціональні особливості існуючого електропривода, зокрема системи приводу головних механізмів, специфіку навантажень і технологічні режими роботи.

У конструкторській частині обґрунтовано вибір структури електропривода, розроблено нову систему керування, визначено параметри конструктивних елементів, розраховано навантажувальні та швидкісні характеристики механізмів, а також здійснено вибір і перевірку електродвигуна, генератора, тиристорного перетворювача, трансформатора та датчиків. Наведено технічний опис обраних силових і керувальних компонентів.

У розрахунковій частині виконано дослідження розімкненої та замкненої систем електропривода, визначено параметри схеми заміщення, коефіцієнти передачі та сталі часу, побудовано механічні й енергетичні характеристики (ККД, коефіцієнт потужності), розраховано параметри регуляторів напруги, струму та ЕРС, проаналізовано статичні характеристики замкненої системи.

У дослідницькій частині проведено моделювання динамічних режимів, оцінено показники якості регулювання, розроблено мікропроцесорну систему регулювання частоти обертання та визначено передавальні функції регуляторів для підтвердження працездатності та необхідної точності керування.

Ключові слова: електропривод, екскаватор ЕКГ-5, тиристорний перетворювач, система керування, регулятори напруги та струму, енергетичні та механічні характеристики, мікропроцесорне регулювання, моделювання динамічних режимів.

ABSTRACT

This master's thesis is devoted to the analysis, design and research of a modernized electric drive control system for the open-pit mining excavator EKG-5. The analytical section investigates the structural and functional features of the existing excavator electric drive, including drive architecture of the main mechanisms, load characteristics, and operational technological modes.

The design section substantiates the selection of the electric drive system structure and presents the development of a new control system. The key parameters of excavator structural elements are determined, load-speed characteristics are calculated, and the appropriate selections of the electric motor, generator, thyristor converter, transformer and sensors are carried out with verification. Technical specifications and operation descriptions of the selected power and control components are provided.

The calculation section includes the study of open-loop and closed-loop electric drive systems. The parameters of equivalent circuit components, transfer coefficients, and time constants are defined. Mechanical and energy performance characteristics such as efficiency and power factor are developed. Parameters of voltage, current, and EMF controllers are calculated, and static characteristics of the closed control system are analyzed.

The research section presents dynamic mode simulations and evaluation of control quality indicators. A microprocessor system for motor speed (frequency) regulation is developed. The controller transfer functions are obtained and analyzed to confirm system performance, stability, and required control accuracy.

Keywords: electric drive, EKG-5 excavator, thyristor converter, control system, voltage and current controllers, mechanical and energy characteristics, microprocessor regulation, dynamic mode simulation.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототех-
ніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Рівень вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,
електроніки та телекомунікацій

_____ О.В. Шефер
 “ ____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

ГАЙДУКУ Володимиру Анатолійовичу

1. Тема проекту (роботи) «Удосконалення електропривода кар'єрного
одноківшевого екскаватора ЕКГ -5»

керівник проекту (роботи) Шефер Олександр Віталійович, д.т.н., професор
затверджена наказом вищого навчального закладу від “03” 09 2025 року №1025 ф,а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на екскаватор ЕКГ-5.
Статична похибка системи – до 3%, тривалість перехідного процесу до 45 с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно роз-
робити) Аналіз особливостей ЕП екскаватора ЕКГ-5. Розрахунок параметрів і
вибір електродвигуна. Розрахунок навантажувальних і швидкісних характе-
ристик. Розрахунок потужності та вибір електродвигуна. Вибір електрообладнання.
Розрахунок розімкненої системи керування електроприводом. Розрахунок енер-
гетичних характеристик електропривода. Розрахунок замкненої системи керу-
вання електроприводом. Обґрунтування і вибір системи керування електропри-
водом. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом.
Аналіз статичних характеристик замкненої системи керування. Моделювання
динамічних режимів системи керування електроприводом і визначення парамет-
рів якості регулювання. Висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
Мета, об'єкт та предмет дослідження. Зовнішній вигляд та габаритні розміри
екскаватора ЕКГ-5А. Структура електромеханічного комплексу екскаватора.
Структурна схема електроприводу за системою Г-Д. Оптимізована функціональ-
на схема тиристорного перетворювача з мікропроцесорним керуванням. Схема
модульного транзисторного екскаваторного перетворювача ПТЕМ-2Р. Діаграма

навантаження екскаватора. Механічні та швидкісні характеристики системи екскаваторного електропривода. Характеристики коефіцієнта потужності та ККД електропривода при різних видах навантаження. Структурна схема електропривода. Модель системи ЕП за системою Г-Д у середовищі Matlab. Графіки розгону електродвигуна до номінальної швидкості при змінах навантаження. Діаграма роботи перетворювача. Алгоритм програми регулювання електроприводом кар'єрного екскаватора ЕКГ-5. Висновки по роботі.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Аналіз режимів роботи механізму, обґрунтування і визначення системи електропривода. Визначення мас і лінійних розмірів конструктивних елементів екскаватора.	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Розроблення системи керування електроприводом.	21.10.25	I	25%	Пл. 2, 3
3	Визначення параметрів елементів схеми заміщення, коефіцієнтів передачі і сталих часу. Розрахунок механічних характеристик розімкненої системи електропривода	04.11.25		40%	Пл. 4
4	Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом.	11.11.25		50 %	Пл. 5
5	Аналіз статичних характеристик системи керування ЕП.	18.11.25	II	60%	Пл. 6, 7
6	Моделювання динамічних режимів системи керування електроприводом і визначення параметрів якості регулювання.	25.11.25		70%	Пл. 8, 9
7	Розроблення мікропроцесорної системи керування.	09.12.25		90%	Пл. 10,11
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	Пл. 12

Магістрант _____ Гайдук В.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Шефер О. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ.....	6
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	9
1.1 Аналіз конструктивних і функціональних особливостей існуючого електропривода екскаватора ЕКГ-5.....	9
1.2 Висновки за розділом.....	14
2. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	16
2.1 Розроблення системи керування електроприводом.....	16
2.1.1 Аналіз режимів роботи механізму, обґрунтування і визначення системи електропривода.....	16
2.2 Розрахунок параметрів і вибір електродвигуна.....	25
2.2.1. Визначення мас і лінійних розмірів конструктивних елементів екскаватора.....	25
2.2.2 Розрахунок навантажувальних і швидкісних характеристик.....	29
2.2.3 Розрахункова потужність для вибору двигуна.....	30
2.3. Вибір електродвигуна та генератора.....	37
2.4. Вибір тиристорного перетворювача.....	39
2.5 Технічні характеристики та опис роботи тиристорного перетворювача.....	40
2.5.1 Вибір трансформатора.....	45
2.5.2. Вибір датчиків.....	49
2.6 Висновки за розділом.....	50
3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	52
3.1 Розрахунок розімкненої системи керування електроприводом.....	52
3.1.1 Визначення параметрів елементів схеми заміщення, коефіцієнтів передачі і сталих часу.....	52
3.1.2 Розрахунок механічних характеристик розімкненої системи електропривода.....	54

	7
3.2 Розрахунок енергетичних характеристик електропривода.....	57
3.2.1. Розрахунок коефіцієнта корисної дії.....	57
3.2.2. Розрахунок коефіцієнта потужності.....	58
3.3 Розрахунок замкненої системи керування електроприводом.....	60
3.3.1 Обґрунтування і вибір системи керування електроприводом.....	60
3.3.2. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом.....	62
3.3.2.1 Розрахунок регулятора напруги.....	62
3.3.2.2 Розрахунок регулятора струму.....	63
3.3.2.3 Розрахунок регулятора ЕРС.....	65
3.4 Аналіз статичних характеристик замкненої системи керування.....	66
3.5 Висновки за розділом.....	67
4 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	68
4.1 Моделювання динамічних режимів системи керування електроприводом і визначення параметрів якості регулювання.....	68
4.2 Розроблення мікропроцесорної системи регулювання частоти обертання електродвигуна.....	72
4.3 Визначення передавальної функції регулятора.....	75
4.4 Висновки за розділом.....	84
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87
ДОДАТКИ.....	90

ВСТУП

Сучасний розвиток гірничодобувної промисловості України та світу безпосередньо залежить від ефективності використання високопродуктивного кар'єрного обладнання, здатного забезпечувати значні обсяги виїмки та транспортування гірської маси. Одним із найбільш поширених видів землерийної техніки у відкритих гірничих роботах є одноківшеві кар'єрні екскаватори, зокрема моделі типу ЕКГ-5. Такі машини протягом десятиліть зарекомендували себе як надійні засоби механізації процесів розкривних та видобувних робіт, однак їхні електроприводи морально і фізично застаріли та потребують модернізації для відповідності сучасним вимогам до енергоефективності, надійності та автоматизації.

Актуальність теми магістерської роботи визначається кількома чинниками. По-перше, значна частка кар'єрних екскаваторів, що експлуатуються на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України, належить до застарілих моделей, у яких застосовані традиційні системи електроприводу з низьким коефіцієнтом корисної дії та недостатньою гнучкістю керування. По-друге, підвищення цін на енергоресурси висуває жорсткі вимоги до зниження питомих енерговитрат при роботі екскаваторів, що безпосередньо впливає на собівартість видобутку корисних копалин. По-третє, сучасні стандарти безпеки та умови інтенсифікації виробничих процесів потребують удосконалення систем керування електроприводами, інтеграції засобів моніторингу та діагностики, що дозволяють своєчасно виявляти відхилення у роботі та запобігати аварійним ситуаціям.

Електропривод є ключовим елементом кар'єрного екскаватора, оскільки він визначає можливості реалізації основних робочих рухів машини: підйому та опускання ковша, повороту платформи, подачі й відтягування рукояті, пересування ходової частини. Від технічного рівня електропривода залежать динаміка процесів копання, точність керування, продуктивність та економічність екскаватора в цілому. Традиційно у таких машинах використовуються системи

на базі асинхронних двигунів з контактними чи тиристорними пускачами, які характеризуються обмеженими можливостями регулювання швидкості та значними втратами енергії. У той же час застосування сучасних напівпровідникових перетворювачів, мікропроцесорних систем керування та вдосконалених схем електропривода дозволяє істотно підвищити ефективність роботи екскаватора.

Наукова проблема, якій присвячено дану магістерську роботу, полягає в розробленні та обґрунтуванні технічних рішень щодо модернізації електропривода екскаватора ЕКГ-5 з метою зменшення енерговитрат, покращення експлуатаційних характеристик та підвищення рівня автоматизації керування. Зокрема, актуальним є дослідження доцільності впровадження частотно-регульованих електроприводів, оптимізація алгоритмів керування робочими циклами, а також аналіз економічної ефективності таких заходів.

Об'єкт дослідження - процеси функціонування електропривода кар'єрного одноківшевого екскаватора ЕКГ-5.

Предмет дослідження - засоби та технічні рішення удосконалення електропривода екскаватора ЕКГ-5, спрямовані на підвищення енергоефективності, надійності та динамічних характеристик його роботи з урахуванням сучасних технологій автоматизованого керування та енергозбереження.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні та розробленні інженерних рішень щодо удосконалення електропривода екскаватора ЕКГ-5, спрямованих на підвищення його енергоефективності, надійності та продуктивності. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструктивних і функціональних особливостей існуючого електропривода екскаватора ЕКГ-5;
- дослідити недоліки традиційних систем електропривода та визначити напрями їх модернізації;
- розробити модель удосконаленого електропривода з використанням сучасних напівпровідникових перетворювачів;

- обґрунтувати методи регулювання швидкісних і динамічних характеристик робочих механізмів;
- виконати техніко-економічне порівняння запропонованих рішень із традиційними системами;
- оцінити вплив модернізації електропривода на продуктивність і надійність екскаватора.

Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження запропонованих технічних рішень на гірничодобувних підприємствах з метою модернізації парку екскаваторної техніки. Це сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, скороченню витрат електроенергії та підвищенню конкурентоспроможності продукції підприємств. Крім того, модернізований електропривод дозволяє інтегрувати екскаватор у сучасні автоматизовані системи управління виробництвом, що відповідає тенденціям розвитку «розумних» кар'єрів.

Таким чином, дослідження, виконане у магістерській роботі, має наукову новизну, оскільки спрямоване на вдосконалення електропривода кар'єрного екскаватора шляхом комплексного застосування енергоощадних технологій і сучасних методів автоматизації. Отримані результати можуть бути використані як для практичної модернізації машин ЕКГ-5, так і для інших типів однокішневих екскаваторів, що експлуатуються на відкритих гірничих роботах.

3. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

Аналіз конструктивних і функціональних особливостей існуючого електропривода екскаватора ЕКГ-5

На відкритих гірничих роботах працює велика кількість кар'єрних механічних лопат. Найпоширенішим і масовим екскаватором серед них є ЕКГ-5А (ЕКГ-4.6Б), частка машин цієї моделі становить більше половини всього парку кар'єрних одноковшевих екскаваторів. Вони й сьогодні залишаються основним устаткуванням при розробці кар'єрів нерудних матеріалів, широко використовуються в якості добувних машин на рудниках і вугільних розрізах, будівництві великих об'єктів і т.д. Випуск ЕКГ-5А почався ще наприкінці 1970-х років, фактично це модернізований ЕКГ-4,6Б. З мінімальними конструктивними змінами його продовжує випускати й сьогодні [12].

З огляду на загальний стан гірничодобувної галузі і консерватизм гірського виробництва, можна із упевненістю стверджувати, що в найближчому майбутньому істотної зміни структури екскаваторного парку не буде. Незважаючи на масове просування на ринку гідравлічних екскаваторів робочою масою до 120 т від відомих світових брендів Hitachi, Terex, Komatsu, Caterpillar, Liebherr, ветеран ЕКГ-5А залишається затребуваним [26].

У процесі роботи ЕКГ-5А значно менш витратний, ніж сучасний гідравлічний екскаватор, і відчутно більш надійний. Інтенсифікація гірського виробництва у країні торкнулася лише малої частини галузі. Організація робіт на більшості кар'єрів не дозволяє повною мірою використати можливості високопродуктивних гідравлічних екскаваторів, тому ефект від їхнього впровадження не настільки високе, щоб масово переозброювати підприємства.

ЕКГ-5А с основним ковшем місткістю $5,2 \text{ м}^3$ розрахований на екскавацію розпушеного матеріалу об'ємною масою до $1,8 \text{ т/м}^3$. Породи 1 й 2 категорій (із твердістю f по шкалі Протодяконова до 3) можуть розроблятися без попереднього розпушування, породи категорії 3 й вище - після розпушування. З

особливостей екскаватора можна відзначити рейковий напір із двохбалочною рукояттю, гусеничний хід з малим опором.

Схема з використанням рейкового напору із двохбалочною рукояттю виявилася настільки вдалою, що й сьогодні використовується при виробництві потужних кар'єрних механічних лопат. Тверде з'єднання напрямних балок рукояті зі стрілою через сідлові підшипники дозволяє більш ефективно розробляти "важкі" вибої, особливо при наявності негабаритних шматків гірської маси. Однобалкова рукоять із канатним напором, розвантажена від крутіння, ускладнює процес виїмки погано розпушених гірських порід, під впливом нерівномірного навантаження на ріжучу крайку ківш небагато повертається разом з рукояттю навколо поздовжньої осі рукояті. Пристрій рейкового напірного механізму трохи складніше, у тому числі ускладнюється конструкція стріли, на якій він цілком розташовується. Необхідно забезпечити передачу значних зусиль через зубчасте зачеплення кремальєрних шестірень і рейок рукояті, захистити стрілу від бічних навантажень й ін. Вивчити особливості класичної конструкції робочого встаткування з річковим напором і двохбалочною рукояттю можна на прикладі виконання того ж ЕКГ-5. Корпус стріли ЕКГ-5 цільної конструкції, зварений, коробчастого перетину. У розточенні головної частини стріли установлені на осі вільно обертові головні блоки, що обгинають піднімальним канатом. Блоки підвіски стріли встановлені на тягах. До поворотної платформи стріла кріпиться п'ятами (виконання на зразок вилки) і бічними тягами, що сприймають бічні навантаження від стріли в процесі повороту й черпання. На стрілі змонтовані механізми напірний і відкривання днища ковша.

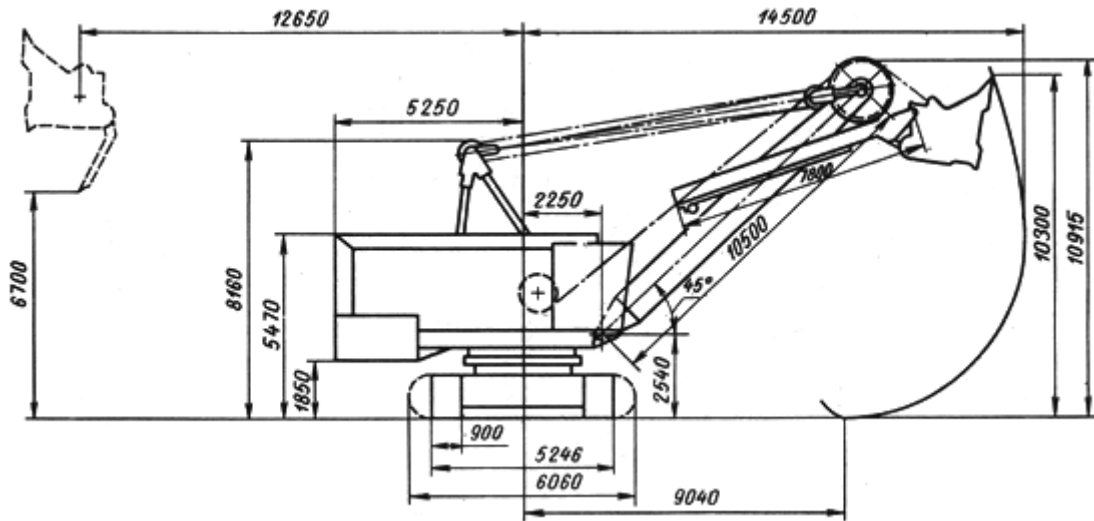


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд та габаритні розміри
екскаватора ЕКГ-5

Напірний механізм складається з електродвигуна, двоступінчастого циліндричного редуктора (вбудований у плиту корпусу стріли), двох сідлових підшипників. Передача крутного моменту від двигуна на редуктор здійснюється за допомогою спеціального запобіжного пристрою, що включає фрикційні колодки й шків. Цей пристрій відіграє роль муфти граничного моменту [8].

При розробці "важких" вибоїв фрикційні колодки небагато ослаблені, що дозволяє прослизати провідному валу редуктора щодо приводного зубчастого колеса, що входить у зачеплення з моторною шестірнею. За рахунок цього приводу охороняють від перевантажень. Сідлові підшипники вільно обертаються на латунних втулках і мають змінні бічні й верхні чавунні ковзуни, що служать опорою для балок рукояті.

Рукоять являє собою суцільнозварну конструкцію. До балок корпусу рукояті приварені зубчасті рейки. Рейки виготовляють способом прокатки (сталь 30ХМА). До кінців балок рукояті болтами кріплять штамповані кінцеві упори, щоб балки рукояті не виходили із сідлового підшипника. В отвори вушок корпусу (приєднання ковша) запресовані змінні сталеві втулки. Зубчасті рейки ставляться до швидкозношуючих деталей, їх періодично замінюють. Рукоять ЕКГ-5А взаємозамінна з рукояттю ЕКГ-4,6Б. Для установки рукояті на

старі моделі (ЕКГ-4, ЕКГ-4,6) буде потрібно заміна сідлових підшипників. Взагалі ЕКГ-4 й ЕКГ-4,6 (А) дотепер працюють на багатьох кар'єрах, що зайвий раз підкреслює виняткову живучість механічної лопати. У цілому машина дуже надійна й при правильному й своєчасному проведенні ремонтів і ТЕ задовільно працює в найтяжких умовах. Фактичний ресурс машини становить десятки років [8].

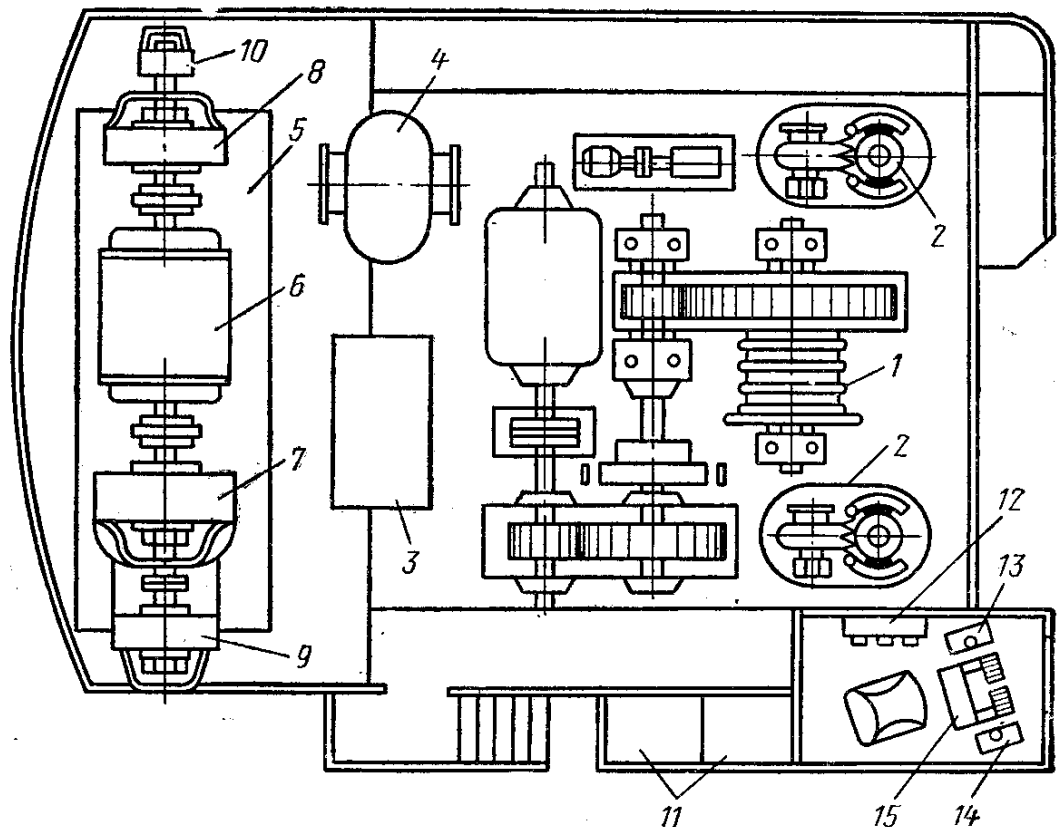


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд основних електроприводів екскаватора ЕКГ-5А на поворотній платформі

Досліджувана система електроприводу підйому екскаватора має найпоширеніший вигляд генератор-двигун зі збудженням генератора за допомогою магнітного підсилювача. В даній роботі проводиться розробка системи генератор-двигун з тиристорним збудженням генератора, як більш ефективною та економічною в наш час. Використання тиристорних збуджувачів в електроприводах екскаваторів допомагає підвищити стійкість, форсування по напрузі ге-

нератора й крутизну струмової відсічки й, таким чином, значно покращити статичні і динамічні характеристики електроприводів.

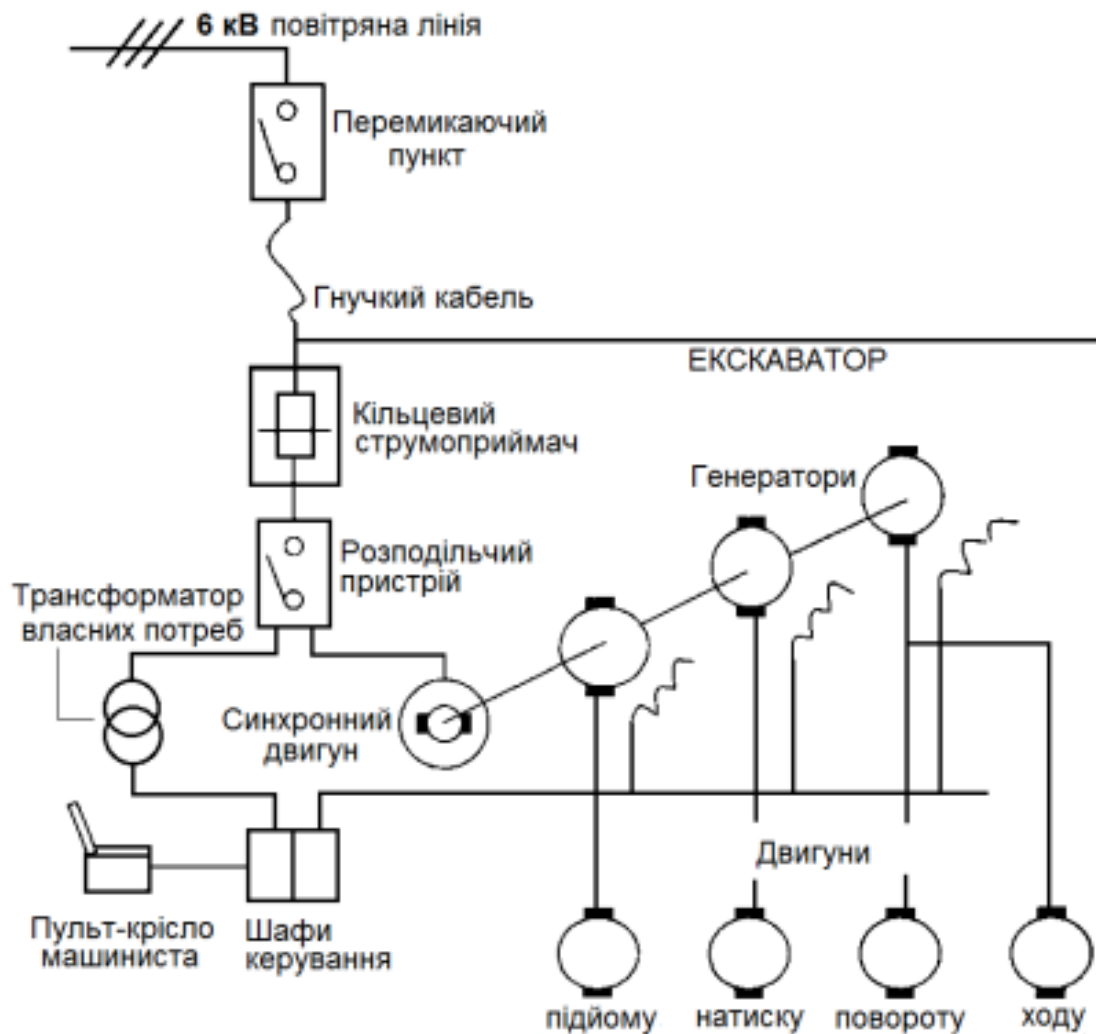


Рисунок 1.3 – Структура електромеханічного комплексу екскаватора ЕКГ-5А

Технічні характеристики екскаватора ЕКГ-5А

Параметр	ЕКГ-5А
Місткість ковша, м ³	5
Радіус черпання, м	14,5
Висота черпання, м	10,3
Висота вигризки, м	6,7
Просвіт під поворотною платформою, м	1,85
Довжина гусеничного ходу, м	5,83
Ширина гусеничної стрічки, м	1100
Середній тиск на ґрунт у русі, кПа	162
Найбільше навантаження на підвісці ковша, кН	500
Розрахункова тривалість циклу (при куті повороту 90°), с	23
Найбільший кут, що долається при підйомі, град	12
Швидкість руху по горизонтальній поверхні, км/ч	0,55
Напруга мережі живлення, кВ	6
Потужність мережевого двигуна, кВт	250
Експлуатаційна маса, т	196

Висновки за розділом

У результаті проведеного аналізу конструктивних та функціональних особливостей електропривода екскаватора ЕКГ-5 встановлено, що його існуюча система має низку характерних переваг і недоліків. До основних позитивних аспектів належить висока надійність та відпрацьованість конструкції, що забезпечує тривалий термін експлуатації у важких умовах кар'єрних робіт. Використання електроприводів постійного струму дозволяє отримати задовільні пускові характеристики та реалізувати регулювання швидкості у певному діапазоні. Разом з тим, аналіз показав суттєві обмеження у точності та гнучкості

керування, значні енерговитрати, високий рівень зносу механічних та електричних елементів, а також недостатню відповідність сучасним вимогам до енергоефективності й автоматизації.

Отже, існуючий електропривод екскаватора ЕКГ-5 можна охарактеризувати як застарілий з точки зору сучасних технологій. Він потребує удосконалення у напрямку впровадження більш енергоефективних та частотно-керованих електроприводів, що дозволить підвищити продуктивність роботи екскаватора, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити кращу адаптацію до умов інтенсивної експлуатації в гірничій промисловості.

4. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.7 Розроблення системи керування електроприводом

2.7.1 Аналіз режимів роботи механізму, обґрунтування і визначення системи електропривода

Робочий цикл екскаватора складається із наступних основних процесів: копання, підйому ковша та його одночасного повороту на розвантаження, розвантаження ковша, повороту до місця копання й одночасного опускання ковша у забій [8].

Режим роботи електроприводів основних механізмів одноковшового екскаватора характеризується частими пусками та реверсами, швидкими розгонами й остановами, різкими поштовхами та піками навантаження. Кількість включень підйомної лебідки доходить до 200...300 у годину. Піки навантаження часто у 2...3 рази перевищують середні навантаження й повторюються декілька разів протягом робочого циклу.

Характерною особливістю копаючих механізмів є можливість стопоріння робочого органа при зустрічі його з перешкодою у процесі копання, зважаючи це необхідне автоматичне обмеження моменту, що розвивається електроприводом.

З іншого боку, для збереження нормальної продуктивності екскаватора механічна характеристика двигуна в межах його нормальної роботи повинна бути досить жорсткою. Лише при моменті, близькому до максимально допустимому, частота обертання повинна різко спадати, навіть до повної зупинки двигуна. Цей момент має назву стопорний [10]. При незначному зниженні навантаження на ківш двигун повинен автоматично розганятися. Така характеристика має назву екскаваторної.

Якість екскаваторної характеристики визначається коефіцієнтом заповнення. Чим ближче коефіцієнт до одиниці, тим більша продуктивність екскаватора. Але при цьому при проектуванні та налазці електроприводів коефіцієнт заповнення обирають відносно невеликим (в межах 0,7...0,8). Чим більш важкими є умови обмеження моменту при стопорінні, тим менше необхідне заповнення екскаваторної характеристики [18].

Екскаватор має певну особливість роботи при копанні: машиніст повинен бачити по зниженню швидкості привода збільшення навантаження механізму й своєчасно попередити його можливе стопоріння. При високому заповненні характеристики перехід до швидкого зниження швидкості навіть при перенавантаженнях у нормальних режимах роботи є для машиніста неочікуваним, та імовірність стопоріння збільшується. Дуже часті стопоріння збільшують тривалість копання, знижують продуктивність й збільшують нагрівання електричних машин.

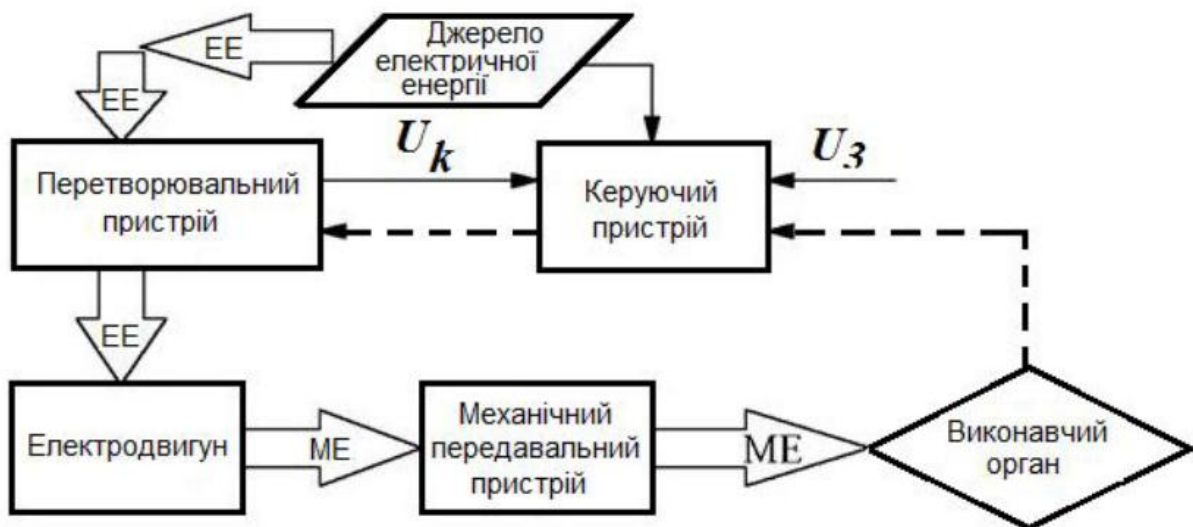


Рисунок 2.1 – Структурна схема електроприводу за системою Г-Д

Необхідні механічні екскаваторні характеристики приводів головних робочих механізмів одноковшових екскаваторів найбільш легко здійснити, коли електроприводи виконуються в такий спосіб. Кожний головний робочий механізм РМ : підйом, поворот, напір або тяга обладнаються двигуном постійного

струму Д незалежного збудження, що живиться від окремого джерела живлення генератора Г, напруга котрого може плавно регулюватися від нуля до повної величини $+U_{\Gamma}$ реостатом R_p або регулятором (командоконтроллером КК, електромашинним підсилювачем поперечного поля ЕМП або магнітним підсилювачем СМП і т.д.), що вмикається у ланцюг збудження генератора.

Генератор приводиться в обертання приводним (або, як прийнято його називати, мережним) двигуном ПД, частота обертання котрого не змінюється. У якості приводного двигуна на потужних розкривних й крокуючих екскаваторах використовуються синхронні двигуни, на кар'єрних екскаваторах асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, а також синхронні двигуни.

В даній роботі досліджується система електроприводу підйому екскаватора ЕКГ-5А. Даний електропривід досліджується за системою Г-Д з тиристорним збуджувачем [6].

Тиристорні й транзисторні збудники в екскаваторному електроприводі прийшли на зміну магнітним підсилювачам, маючи перед останніми масу переваг і по швидкодії, і за ваго-габаритними показниками, і по матеріалоємності. Але вони свідомо програвали по надійності. Тому виникло завдання: як виключити простої екскаватора з вини електропривода, зробивши заміну надійного збудника на свідомо менш надійний вузол? Рішення, у принципі, перебуває на поверхні й широко експлуатується в усім світі, але в іншій галузі - автомобільної. Це ідея запасного колеса. Маючи самі чудові технічні характеристики колеса і його компонентів, жодна автомобільна компанія у світі, проте, не випускає автомобілів без запасних коліс. Тому, що завжди має місце "його величність випадок", що перебуває за межами взагалі ж обґрунтованої математичної статистики.

У нашому випадку ідея колеса замінена ідеєю моноблока, що у всіх габаритах серії має одну схемотехніку, ідентичні характеристики, у ньому відсутні підлагоджувальні елементи. Моноблок регулює напругу, забезпечує рекуперацію енергії в гальмових режимах, дозволяє робити нарощування

потужності паралельним або послідовним з'єднанням з аналогічними блоками. У кожному моноблоці присутній убудований двоступінчастий залежний датчик інтенсивності перехідних процесів, убудований захист від коротких замикань, перевантажень, обриву фази, АПВ, є діагностика несправного стану. Головна перевага полягає в тому, що заміна моноблока по сигналу несправного стану на резервний - виробляється некваліфікованим персоналом. При цьому працездатність екскаватора відновлюється за 10 - 15 хвилин. Один запасний моноблок забезпечує необхідне й достатнє резервування для всіх головних електроприводів екскаватора й навіть не на одній машині.

Далі ремонт й обслуговування несправних моноблоків здійснюється вже кваліфікованим персоналом у стаціонарних умовах ремонтного підприємства або навіть випускаючого заводу, аналогічно тому, як це робиться в тих же центрах сервісного обслуговування автомобілів або телевізійних ательє.

В наш час проводяться дослідження по впровадженню систем екскаваторного електроприводу змінного струму за системами ШІМ-АД та НПЧ-АД, але широкого застосування вони поки що не отримали, хоча мають великі перспективи.

Розробка модуля по типу перетворювача ПТЕМ-2Р на транзисторах IGBT представляє дуже великий інтерес для приводу змінного струму, тому що дозволяє створити систему ТПЧ-АД від декількох одиниць до декількох сотень кіловатів з діапазоном регулювання частоти від 0 до 100 гц, з одноступінчастим перетворенням енергії й енергоспоживанням, аналогічним енергоспоживанню системи НВ-АІН (ШІМ) -АД.

Які і в базовій розробці, модульний перетворювач ПТЕМ-2РІ містить дві реверсивні групи силових приладів - анодний і катодну (мал. 6), причому один транзистор кожного напівмоста ставиться до анодної групи, а суміжний з ним - до катодного. Керування групами роздільне. ПТЕМ-2РІ являє собою регульоване джерело струму, для цього в модулі використовується убудований датчик струму ДС і передбачений релейний регулятор струму РС. У побудові силової

частини є істотні відмінності від інвертора із ШІМ. Тому що перетворювач повинен віддавати енергію в мережу, то в ньому відсутні антипаралельні діоди, а захист транзисторів від зворотних напруг здійснюється діодами, включеними послідовно із транзисторами в прямому напрямку.

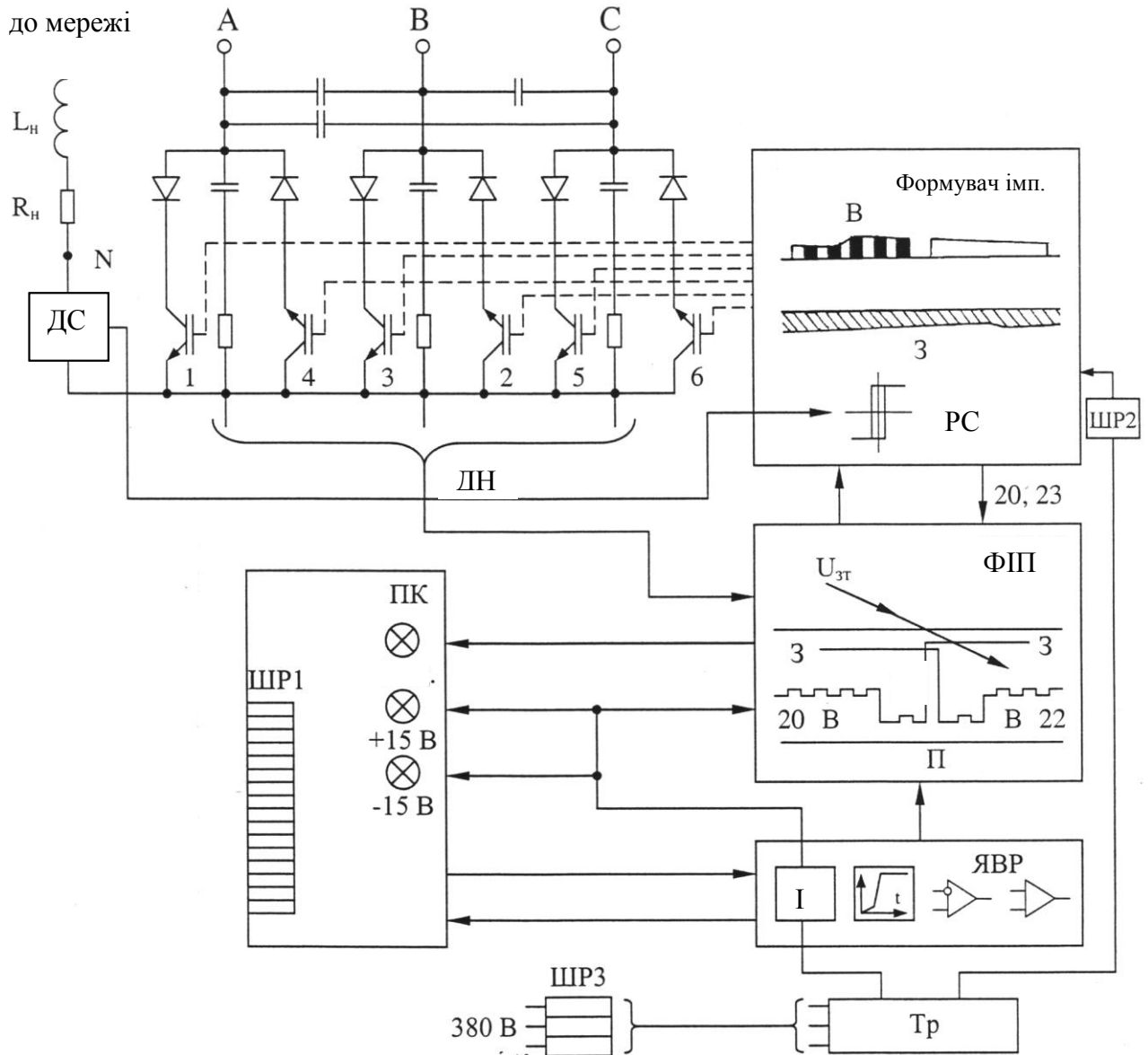


Рисунок 2.2 - Перетворювач транзисторний екскаваторний модульний ПТЕМ-2Р(І)

Система керування виконана на тій же елементній базі й на тих же платах, що й у базовому модульному перетворювачі: ЯВР, ФПІ, ФІ, І.

Передбачається мати серію модулів із чотирьох габаритів потужністю 8, 16(кВт) при природному охолодженні й 80, 150 (кВт) - із примусовою вентиляцією.

Смуга пропускання частот транзисторним модульним перетворювачем при формуванні струмів на активно-індуктивне навантаження від 0,01 до 100 Гц (діапазон 10000:1) без амплітудної й фазової погрешностей з незначним перекручуванням форми в області переходу через нуль (мал. 7). Коефіцієнт перекручування струму в навантаженні 0,99.

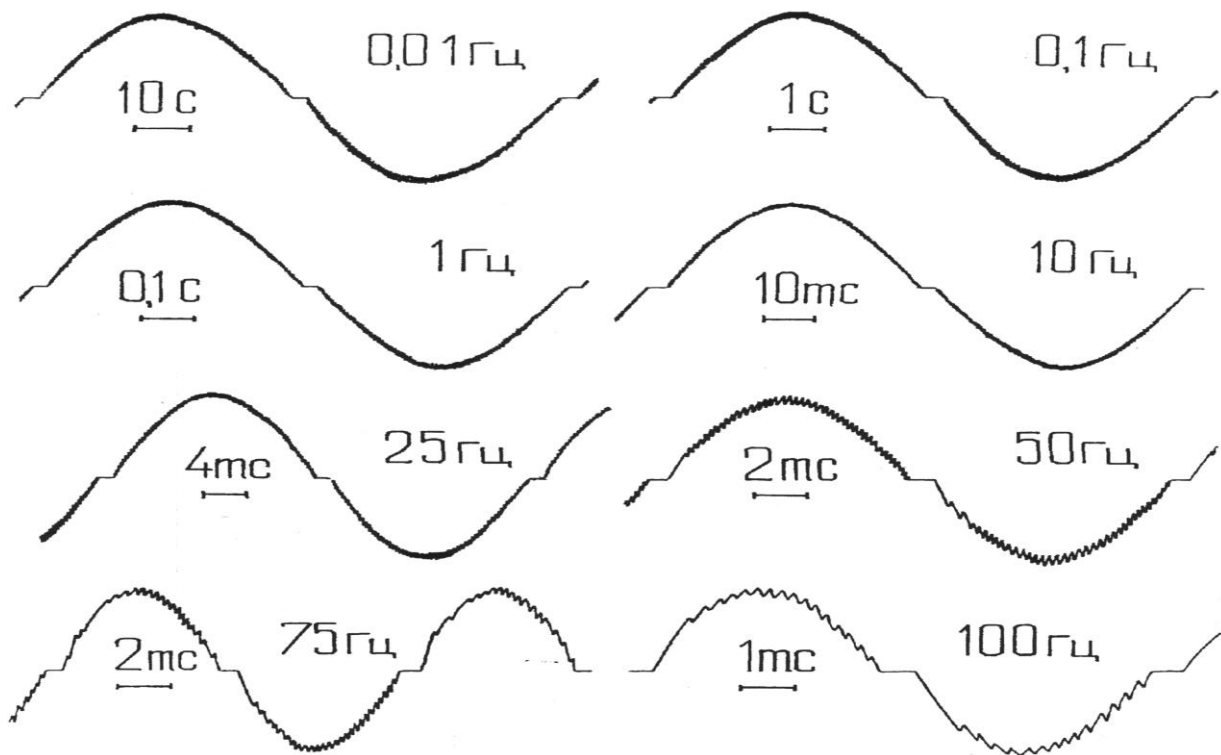


Рисунок 2.3 – Формування струмів транзисторним ПЧ

Незалежно від напруги на навантаженні, завдяки стійкій синхронізації керуючих імпульсів симетрично анодним напругам, ПТЕМ-2РІ забезпечує з боку мережі високий коефіцієнт потужності ($\cos\phi=1$) - такий же, як у перетворювачах частоти з некерованим випрямлячем й інвертором напруги із ШІМ.

У цей час ведуться розробки мікропроцесорних систем керування для екскаваторних тиристорних електроприводів, які розвивають лінію аналогових пристроїв ПТЕМ-1Р и ПТЕМ-2Р на більше високому рівні.

Закладена в раніше розглянуті перетворювачі концепція безналагоджувального моноблока при використанні мікропроцесорних пристроїв перетерплює значні зміни у зв'язку із цифровою формою зберігання параметрів, що набувають. При заміні несправного перетворювача його необхідно перепрограмувати для уведення необхідних параметрів.

Використання декількох мікроконтролерних пристроїв при побудові більше складних систем керування, що складаються з декількох моноблоків (наприклад, багатопульсні перетворювачі постійного струму або безпосередні перетворювачі частоти) недоцільно. Для узгодженої роботи при цьому необхідні швидкодіючі перешкодозахищені цифрові канали зв'язку. Більше зручної є блокова конструкція з розділеними силовою частиною й однією загальною системою керування на одному мікропроцесорі. Перехід від однієї до іншої системи електропривода здійснюється заміною відповідного інтелектуального блоку.

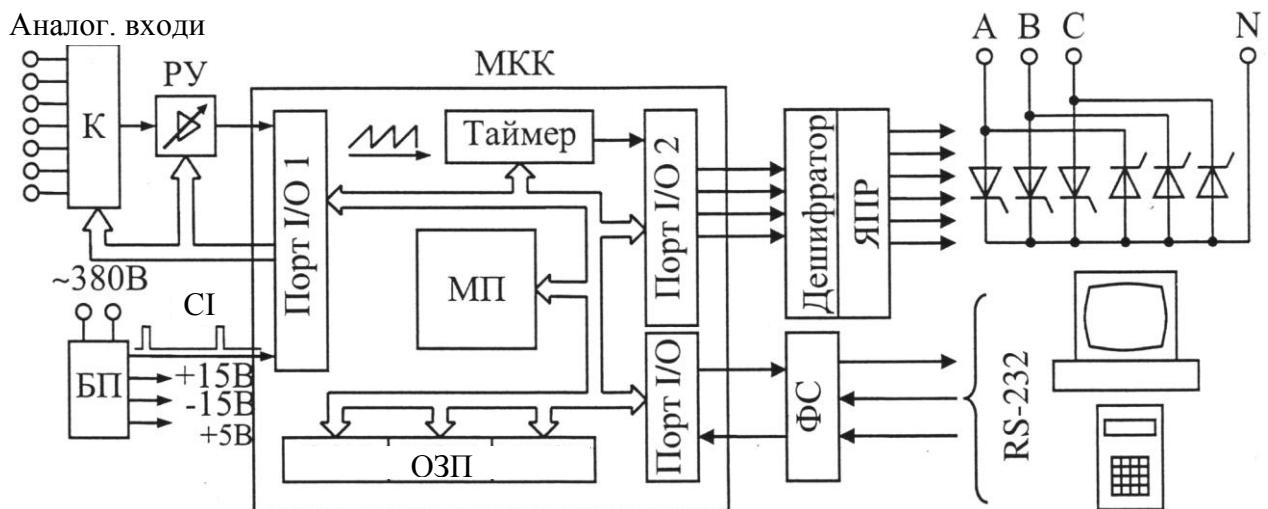


Рисунок 2.4 – Функціональна схема тиристорного перетворювача з мікропроцесорним керуванням

На рис. 2.4 показана функціональна схема системи керування тиристорним перетворювачем, що відбиває загальну концепцію розробки. Центральним елементом є мікроконтролер МКК, що здійснює функції СІФК, логіки й регу-

ляторів. Вісім вхідних аналогових сигналів через комутатор К и підсилювач із керованим коефіцієнтом керування РУ надходить на вхід убудованого АЦП (порт 1). Блок харчування формує необхідні напруги, а також синхроімпульси СІ для роботи підпрограми СІФК. Тиристори управляються імпульсами керування, формованими ПР по цифровому коді, що визначає номер вентиля, що включає. Для зв'язку з пультом керування, а також контролером більше високого рівня (персональним комп'ютером) призначений послідовний порт вводу-висновку RS-232 з гальванічно розв'язаним формувачем сигналів ФС. Спеціально розроблений протокол зв'язку забезпечує надійний перешкодозахищений обмін інформацією з мережею, у яку можна включити до 15 перетворювачів. Підпрограми асинхронного СІФК працюють по спеціально розробленому швидкодіючому алгоритмі, що використовує таймер для розрахунку моментів часу подачі імпульсів керування тиристорами. Алгоритм виконується незалежно від основної програми за допомогою переривання від таймера, що забезпечує більшу точність виставлення кута відмикання.

Параметри настроювання зберігаються в електрично перезаписуваному ППЗУ, доступ до них можливий по протоколі обміну. Спеціально розроблена цифрова структура керування дозволяє використати перетворювач у різних системах електропривода. Особливість структури полягає в можливості будь-якого універсального з'єднання блоків (регуляторів, СІФК, логіки) - як в "конструкторі" Частота розрахунку всіх елементів структури в розробленому перетворювачі становить 1,2 кГц.

На рис. 2.5 представлені осцилограми циклу роботи макета приводу підйому з параметрами екскаватора ЕКГ-10 з використанням цифрового (а) і аналогового (б). Характер процесів зовні ідентичний.

Однак цифрові пристрої представляють зовсім нові можливості в порівнянні з аналоговою технікою. Для силових перетворювачів використання мікропроцесорів дозволяє домогтися чіткої роботи логіки при роздільному керуванні комплектами, виключити дрейф нулів у системі керування, коли потріб-

ний нуль, мати незалежне настроювання від навколишньої температури, мати розгалужену систему самодіагностики, угадувати аварійні ситуації (наприклад, перекидання інвертора, за допомогою контролю за роном комутації). При збої хоча б в одному із внутрішніх вузлів припиняється функціонування всієї системи керування. Мікропроцесорна техніка - це безпомилкове відпрацювання алгоритмів, коли параметри структури не залежать від зовнішніх умов, а також зручність настроювання, коли параметри й алгоритми міняються, а схемотехніка залишається незмінної.

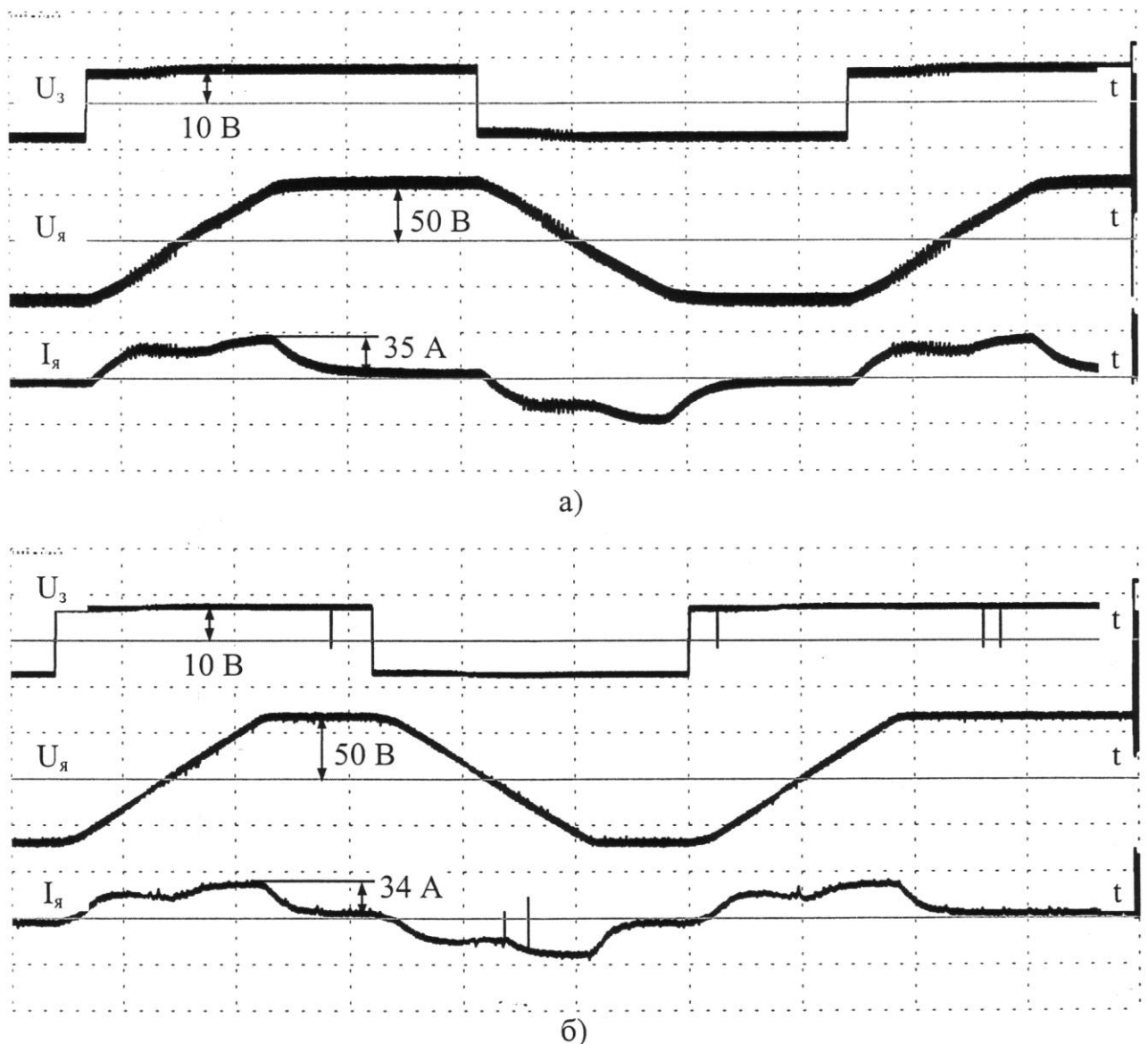


Рисунок 2.5 - Осцилограми струму, напруги якоря й напруги завдання в системі ТП-Д з настроюванням на привід підйому з перетворювачем із мікропроцесорним керуванням (а) і аналоговим (б)

Промисловий зразок успішно пройшов кліматичні (від -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$) і дослідно-промислові випробування на екскаваторі в системі ТП-Д.

Найважливішою перевагою мікропроцесорних систем керування є можливість організувати цифрові мережі для обміну інформацією, дистанційного контролю й керування перетворювачами. У цей час у нас закінчуються роботи зі створення інформаційної екскаваторної мережі екскаватора ЕКГ-8. Проблему взаємозаміни цифрових моноблоків буде вирішувати головний мікропроцесор, перепрограмуючи їх перед початком роботи з місця установки.

2.2 Розрахунок параметрів і вибір електродвигуна

2.2.1. Визначення мас і лінійних розмірів конструктивних елементів екскаватора

Маса всього екскаватора

$$m = K_{ек} * E$$

$K_{ек}$ – коеф. питомої маси екскаватора.

E – місткість ковшу, м^3

$$m = 40 * 5 = 200(m)$$

Розміри ковша

Ширина	$b_{к.п.} = 1,3 * \sqrt[3]{E}$	$b_{к.п.} = 1,3 * \sqrt[3]{5} = 2,23 (м)$
--------	--------------------------------	---

Довжина	$l_{к.п.} = 0,77 * b_{к.п.}$	$l_{к.п.} = 0,77 * 2,23 = 1,712 (м)$
---------	------------------------------	--------------------------------------

Висота	$h_{к.п.} = 0,75 * b_{к.п.}$	$h_{к.п.} = 0,75 * 2,23 = 1,667 (м)$
--------	------------------------------	--------------------------------------

Маса и вага ковша

$$m_{к.п.} = 1,15 * C_{к.п.} * E$$

Ск.п. –коэф для визначення маси ковша (обираємо із умови середньої важкості роботи, Ск.п.=1.5)

$$m_{к.п.} = 1,15 * 1,5 * 5 = 8,625 \text{ (м)}$$

$$G_{к.п.} = m_{к.п.} * g = 10^3 * 9.81 * 8.625 = 8.461 * 10^4 \text{ (Н)}$$

Розміри стріли и рукояті

$$L_c = k_{lc} * \sqrt[3]{m_{екс}}$$

K_{lc} - лінійний коэф. , що залежить від розмірів екскаватора($K_{lc}=1,82$)

$$L_c = 1.82 * \sqrt[3]{200} = 10.64 \text{ (м)}$$

$$L_p = K_{lp} * \sqrt[3]{m_{екс}}$$

K_{lp} - лінійний коэф. , що залежить від розмірів екскаватора ($K_{lp}=1,2$)

$$L_p = 1.2 * \sqrt[3]{200} = 7,018 \text{ (м)}$$

Маса и вага двухбалочної рукояті

$$m_p = c_p * m_{к.п.}$$

$$G_p = m_p * g$$

C_p -коэф для визначення розмірів рукояті екскаваторів ($C_p=0,9$)

$$m_p = 0.9 * 8.625 = 7.763 \text{ (м)}$$

$$G_p = 7.763 * 9.81 * 10^3 = 7.615 * 10^4 \text{ (Н)}$$

Висота пяти стріли

$$L_n = K_n * \sqrt[3]{m_{\text{екс}}}$$

K_n – коеф. , що залежить від розмірів екскаватора ($K_n=0,45$)

$$L_p = 0.45 * \sqrt[3]{200} = 2.635 \text{ (м)}$$

Максимальна висота копання

$$L_{\text{коп.}} = K_{\text{коп.}} * \sqrt[3]{m_{\text{екс}}}$$

$K_{\text{коп.}}$ - лінійний коеф. , що залежить від розмірів екскаватора ($K_{\text{коп.}}=1.75$)

$$L_{\text{кко.}} = 1.75 * \sqrt[3]{200} = 10,234 \text{ (м)}$$

Опір породи копанню

$$N_{1n} = \frac{K_{\text{к.п.}} * E_l * 10^5}{L_3 * K_p},$$

$K_{\text{к.п.}}$ – питомий опір породи копанню, що залежить від характеру породи. ($K_{\text{к.п.}}=1.5$ - 3-я категорія породи – глина середня або важка, розрихлена, суглинок щільний)

$$L_3 \text{ – висота забоя } L_3 = K_{\text{к.п.}} * \sqrt[3]{m_{\text{екс}}} = 1,1\sqrt[3]{200} = 6,43 \text{ (м)}$$

K_p – коеф. розрихлення породи

$$N_p = \frac{1,2 * 5 * 10^5}{6,43 * 1,3} = 8,97 * 10^4 \text{ (Н)}$$

Вага ковша з породою

$$G_k + \text{пор} = G_k + G_{\text{ппо}} = 9,81 * \left(\frac{E * \varphi_{\text{пор}}}{K_p} + m_k \right)$$

$\varphi_{\text{пор}} = 2.7 \text{ т/м}^3$ - щільність розрихлення породи в ціліні

$$G_{к + пор} = 9.81 * \left(\frac{5 * 2.7}{1.3} + 8.625 \right) * 10^3 = 18.65 * 10^4 \quad (H)$$

Сила тяжіння рукояті

$$G_{p'} = \frac{G_p * L_{c'}}{L_p} = \frac{7.615 * 10^4 * 3.8}{7} = 4.134 * 10^4 \quad (H)$$

Навантаження при копанні

$$N_{nn} = \frac{N_{1n} * l_1 + G_{к.л.} * l_k + G_{p'} * l_p}{l_p} = \frac{(8.97 * 5.3 + 18.65 * 4.4 + 4.134 * 1.9) * 10^4}{3.8} = 36.17 * 10^4 \quad (H)$$

Потужність при копанні

$$P_{nn} = \frac{N_{nn} * V_{nn}}{\eta_{nl}} * 10^3$$

$V_{пл} = 0.8$ м/с – швидкість переміщення підйомного механізму

$\eta_{пл} = 0.85$ – ккд підйомного механізму

$$P_{nn} = \frac{36.17 * 10^4 * 0.8}{0.85} * 10^{-3} = 340 \quad (кВт)$$

Навантаження при повороті завантаженого ковша на розгрузку

$$N_{nn'} = \frac{G_{к.} + n. * l_{к'} * \cos \alpha + G_p * l_p * \cos \alpha}{l_n * \sin \beta} = \frac{18.65 * 10^4 * 7.1 * \cos 20 + 7.615 * 3.5 * \cos 20}{7 * \sin 51} = 27.38 * 10^4 \quad (H)$$

Потужність при повороті на розгрузку

$$P_{n.l.}' = 0,2 * \frac{N_{n.l.}' * V_{n.l.}}{\eta_{n.l.}} * 10^3 = 0,2 * \frac{27,38 * 10^4 * 0,8}{0,85} * 10^{-3} = 51,54 \text{ (кВт)}$$

Навантаження при повороті порожнього ковша в забій

$$N_{n.l.}'' = \frac{Gk * lk * \cos \alpha + Gp * lp * \cos \alpha}{ln * \sin \beta} = \frac{8,461 * 7,1 * \cos 20 + 7,615 * 3,5 * \cos 20}{7 * \sin 51} = 14,9 * 10^4 \text{ (Н)}$$

Потужність з порожнім ковшом

$$P_{n.l.}'' = 1,2 * \frac{N_{n.l.}'' * V_{n.l.}}{\eta_{n.l.}} * 10^{-3} = 1,2 * \frac{14,9 * 10^{4*0,8}}{0,85} * 10^{-3} = 168,6 \text{ (кВт)}$$

Середньозважена потужність двигуна механізму підйому

$$P_{n.l.} = \frac{P_{n.l.} * t_{к.п.} + P_{n.l.}' * t_{рл} + P_{n.l.}'' * t_{з.л.}}{t_{ц}} = \frac{\frac{23}{3} * (340,4 + 51,54 + 168,6)}{23} = 176,8 \text{ (кВт)}$$

$$t_{к.п.} = t_{рл.} = t_{з.л.} = 1/3 t_{ц.п}$$

2.2.2 Розрахунок навантажувальних і швидкісних характеристик

Частота повертання підъемного барабану

$$n_{\bar{o}} = \frac{60 * V_n * i_{пол}}{\pi * D_{\bar{o}}} = \frac{60 * 0,8 * 2}{3,14 * 1,17} = 39,18 \text{ (об/хв)}$$

$$D_{\sigma} = 30 * d_{кан} * 10^{-3} = 30 * 39 * 10^{-3} = 1,17(м)$$

$$N_{кка.п} = \frac{5 * N_{н.л.}}{a_{\delta\sigma} * i_{пол} * 0,75} = \frac{5 * 36,17 * 10^4}{2 * 2 * 0,075} = 60,2 * 10^4(Н)$$

Вибираємо канат

39-Г-В-О-Н-180, 7669-80 - що розрахований на розривне навантаження
 $N_{кан}=95,75*10^4(Н)$ й діаметром $d_{кан}=39мм$

2.2.3 Розрахункова потужність для вибору двигуна

$$P_{дв}=P_{пл}=176,8(кВт)$$

Вибираємо найближчий по розрахунковій потужності двигун ДПЕ-82 з параметрами:

$$P_{п}=175кВт$$

$$I_{п}=350 А$$

$$J_{д}=17кг*м^2$$

$$n_{п}=740об/хв$$

$$\eta=0,935$$

$$m=3100кг$$

$$U_{п}=440В$$

Передаточне число редуктора

$$i_{ред} = \frac{n_n}{n_{\sigma}} = \frac{740}{39,18} = 19$$

Вибираємо 2-х ступінчатий циліндричний редуктор з найближчим передаточним числом:

$$i_{ред}=20$$

Загальне передаточне число кінематичної схеми

$$i_{под} = i_{пол} * i_{ред} = 2 * 20 = 40$$

Момент інерції рукояті, ковша и пороуди

$$J_p = 91 * \frac{m_p * V_{пл}^2}{n_n^2} = 91 * \frac{7,763 * 0,8^2}{740^2} * 10^3 = 1,86 \text{ (кг*м}^2\text{)}$$

$$J_k = 91 * \frac{m_k * V_{пл}^2}{n_k^2} = 91 * \frac{8,625 * 0,8^2}{740^2} * 10^3 = 2,064 \text{ (кг*м}^2\text{)}$$

$$J_n = 91 * \frac{m_n * V_{пл}^2}{n_n^2} = 91 * \frac{10,4 * 0,8^2}{740^2} * 10^3 = 2,485 \text{ (кг*м}^2\text{)}$$

Момент інерції редуктора й барабана

$$J_{ред.б.} = 0,2 * Jя = 0,2 * 17 = 3,4 \text{ (кг*м}^2\text{)}$$

Момент опору в цьому випадку буде складатися із преодолання сил ваги рукояті й ковша:

$$M_{1.1} = \frac{\left(\frac{G_p}{2} + \frac{G_k}{2}\right) * Дб}{i_{пол} * i_{ред} * \eta_{пл} * 2} = \frac{\left(\frac{7,615}{2} + \frac{8,461}{2}\right) * 1,17 * 10^4}{0,85 * 2 * 2 * 20} = 0,1383 * 10^4 \text{ (Н * м)}$$

Моменти номінальні, стопорні й відсічки

$$M_{\text{ном1}} = 9550 * \frac{P_H}{n_H} = 9550 * \frac{175}{740} = 0,226 * 10^4 (H * м)$$

$$M_{\text{см2}} = 2,5M_{\text{ном1}} = 2,5 * 0,226 * 10^4 = 0,565 * 10^4 (H * м)$$

$$M_{\text{осм3}} = 0,8M_{\text{см2}} = 0,8 * 0,565 * 10^4 = 0,45 * 10^4 (H * м)$$

Динамічний момент в момент пуску двигуна

$$M_{1.2} = \frac{M_3 + M_2}{2} * 10^4 - M_{1.1} * 10^4$$

$$M_{1.2} = \frac{0,45 + 0,565}{2} * 10^4 - 0,1383 * 10^4 = 0,3631 * 10^4 (H * м)$$

Час розгону двигуна до номінальної кутової швидкості

$$t_{1.1} = (J_p + J_k + J_{\text{ред.б}} + J_{\text{дв}}) * \frac{w_{\text{ном}}}{M_{\text{дин}}} = (1,86 + 2,064 + 3,4 + 17) * \frac{78}{3631} = 0,523(c)$$

$$w_{\text{ном}} = 0,105 * n_{\text{ном}} = 0,105 * 740 = 780(\text{рад/с})$$

Середній момент двигуна при розгоні

$$M_{1.3} = M_{1.1} + M_{1.2} = (0,1383 + 0,3631) * 10^4 = 0,5014 * 10^4 (H * м)$$

Момент опору за час копання

$$M_{1.4} = \frac{M_{1.1}}{2} + \frac{0,5N_{nl} * 0,5Дб}{2 * i_{пол} * i_{ред} * \eta_{nl}} =$$

$$= \left(\frac{0,1383}{2} + \frac{0,5 * 43,22 * 0,5 * 1,17}{2 * 2 * 20 * 0,85} \right) * 10^4 = 0,2551 * 10^4 (H * м)$$

Час копання зі сталюю швидкістю

$$t_{1.2} = \frac{L_H}{V_{nl}} = \frac{6,4}{1,2} = 5,3(c)$$

L_H – висота забою

Момент опору при утримання завантаженого ковша й повороту на його розвантаження

$$M_{1.5} = \frac{\left(\frac{G}{2} + \frac{G}{2} + \frac{G}{2} \right) * 10^4 * Дб * \eta_{nl}}{2 * i_{пол} * i_p} =$$

$$= \frac{\left(\frac{8,461}{2} + \frac{7,615}{2} + \frac{10,385}{2} \right) * 10^4 * 1,17 * 0,85}{2 * 2 * 20} = 0,1645 * 10^4 (H * м)$$

Час утримання ковша в загальмованому вигляді

$$t_{1.3} = t_9 + t_{10} = 3 + 2.5 = 5.5(c)$$

Гальмівний момент при маневруванні з завантаженим ковшем й зниженні кутової швидкості повороту двигуна до $0.1\omega_n$

$$M_{1.6} = \frac{M_{cm1} + M_{ocm1}}{2} = \frac{(0,565 + 0,45) * 10^4}{2} = 0,5014 * 10^4 (H * M)$$

Час до зупинення ковша з породою до $0.1\omega_n$

$$\begin{aligned} t_{1.4} &= (J_p + J_k + J_{ред.б} + J_{дв} + J_n) * \frac{0,9 * \omega_n}{M_{1.6}} = \\ &= (1.86 + 2.064 + 3.4 + 17 + 2.485) * \frac{0.9 * 78}{0.5014 * 10^4} = 0.375(c) \end{aligned}$$

Середній момент двигуна, що виникає при зупиненні

$$\begin{aligned} M_{1.7} &= M_{1.6} - M_{1.5} = \\ &= (0.5014 - 0.1645) * 10^4 = 0.337 * 10^4 (H * M) \end{aligned}$$

Середній момент при розвантаженні ковша

$$M_{1.8} = \frac{M_{1.1}}{2} + \frac{M_{1.5}}{2} = \left(\frac{0.1383}{2} + \frac{0.1645}{2} \right) * 10^4 = 0.1514 * 10^4 (H * M)$$

Час розвантаження ковша

$$t_{1.5} = 2.5(c)$$

Динамічний момент при реверсуванні и розгоні двигуна на спуск порожнього ковша

$$\begin{aligned}
 M_{1.9} &= \frac{M_{cm1} + M_{omc1}}{2} + M_{1.1} = \\
 &= \frac{(0,565 + 0,45)10^4}{2} + 0,1383 * 10^4 = 0,6397 * 10^4 (H * m)
 \end{aligned}$$

*Час розгону двигуна до кутової швидкості $w_H * 1,1$*

$$\begin{aligned}
 t_{1.6} &= (J_p + J_k + J_{редюб} + J_{дв}) * \frac{1,1w_H}{M_{1.9}} = \\
 &= (1,86 + 2,064 + 3,4 + 17) * \frac{1,1 * 78}{0,6397 * 10^4} = 0,326(c)
 \end{aligned}$$

Середній момент, що розвивається при опусканні порожнього ковша

$$\begin{aligned}
 M_{1.10} &= \frac{M_{cm1} + M_{omc1}}{2} - M_{1.1} = \\
 &= \frac{(0,565 + 0,45) * 10^4}{2} - 0,1383 * 10^4 = 0,3631 * 10^4 (H * m)
 \end{aligned}$$

Момент опору при опусканні порожнього ковша зі стабільною швидкістю

$$\begin{aligned}
 M_{1.11} &= \frac{\left(\frac{G_k}{2} + \frac{G_p}{2} \right) * Дб * \eta_{пл}}{2 * i_{пол} * i_{ред}} = \\
 &= \frac{\left(\frac{8,461}{2} + \frac{7,615}{2} \right) * 1,17 * 0,85 * 10^4}{2 * 2 * 20} = 0,1 * 10^4 (H * m)
 \end{aligned}$$

Час опускання ковша зі стабільною швидкістю при тривалості циклу $t_{ц} = 23c$

$$t_{1.7} = t_{\Sigma} - (t_{1.1} + t_{1.2} + t_{1.3} + t_{1.4} + t_{1.5} + t_{1.6} + 0.5) = \\ = 23 - (0.523 + 5.3 + 5.5 + 0.375 + 2.5 + 0.326 + 0.5) = 7.976(\text{с})$$

Момент при зупиненні порожнього ковша й опусканні його в забій

$$M_{1.12} = \frac{M_{cm1} + M_{omc1}}{2} - M_{1.11} = \left(\frac{0,565 + 0,45}{2} \right) * 10^4 - 0,1 * 10^4 = 0,4015(H * m)$$

Час зупинення при опусканні порожнього ковша

$$t_{1.9} = (J_p + J_k + J_{редюб} + J_{дв}) * \frac{1.1w_H}{M_{1.2}} = \\ = (1.86 + 2.064 + 3.4 + 17) * \frac{1.1 * 78}{0.4015 * 10^4} = 0.52(\text{с})$$

Середній момент, що розвивається при зупинці з порожнім ковшом

$$M_{1.13} = M_{1.12} + M_{1.11} = (0.4015 + 0.1) * 10^4 = 0.5014 * 10^4 (H * m)$$

Еквівалентний момент двигуна

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 * t_i}{t_0 + \sum t_i}} = 10^4 * \sqrt{\frac{0.5014^2 * 0.523 + 0.2551^2 * 5.3}{23}} = 0.2062 * 10^4 (H * m)$$

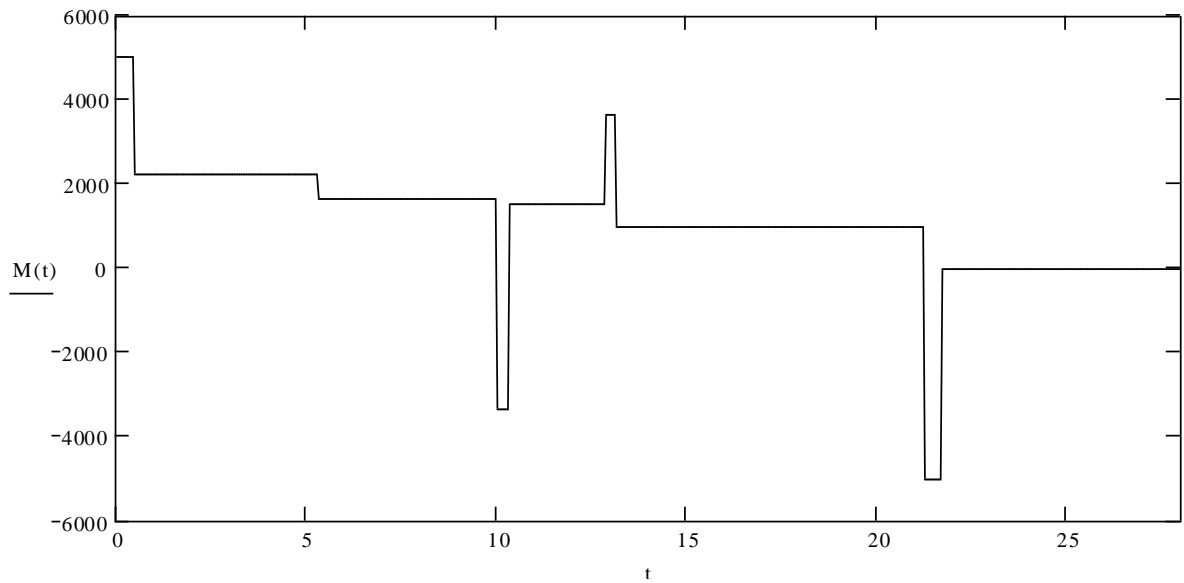


Рисунок 2.6 - Діаграма навантаження екскаватора

2.3. Вибір електродвигуна, генератора та приводного двигуна

Потужність електродвигуна визначається за методом еквівалентного моменту [1-6]:

$$P_{\partial\partial} \geq K_z \omega_y \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_o}} = 1.2 \cdot 78 \cdot 0.2062 \cdot 10^4 = 178(\kappa Bm)$$

Двигун обираємо серії ДЕ-816У2(Т2) з параметрами:

$$P_{\partial} = 200(\kappa Bm)$$

$$U_{\delta} = 440(B)$$

$$I_{\delta} = 490(A)$$

$$n_{\delta} = 750(об / хв)$$

$$I_{ос} = 21(A)$$

$$R_{ос} = 3,14(Ом)$$

$$R_{дон.п.} = 0,0057(Ом)$$

$$\eta_{\delta} = 91\%$$

Визначаємо необхідну потужність генератора:

$$P_{ген} \geq \frac{P_{\delta\delta}}{\eta_{ос}} \geq \frac{178}{0,91} \geq 194(кВт)$$

Генератор для даної системи обираємо серії ПЕМ 2000М-1У2(Т2) з параметрами:

$$P_{\mathcal{L}} = 200(кВт)$$

$$U_{\mathcal{L}} = 460(B)$$

$$I_{\mathcal{L}} = 435(A)$$

$$n_{\mathcal{L}} = 1480(об / хв)$$

$$U_{ос} = 31(B)$$

$$I_{св} = 4,35(A)$$

$$I_{нв} = 12,8(A)$$

$$R_{дон.п.} = 0,00481(Ом)$$

$$\eta_{\mathcal{L}} = 90\%$$

Визначаємо необхідну потужність приводного двигуна:

$$P_{нд} \geq \frac{P_{ген}}{\eta_{ген}} \geq \frac{194}{0,9} \geq 216(кВт)$$

Приводний асинхронний двигун обираємо серії АЕ-113-4М з параметрами:

$$P_{\delta} = 250(\text{кВт})$$

$$U_{\delta} = 6000(\text{В})$$

$$I_{\delta} = 28,8(\text{А})$$

$$n_{\delta} = 1480(\text{об} / \text{хв})$$

$$\eta_{\delta} = 92\%$$

2.4. Вибір тиристорного перетворювача

Вибір тиристорного перетворювача для живлення обмотки збудження генератору здійснюється за умовами [18-20]:

$$U_{\text{тз}} \geq 2U_{\text{зген}}$$

$$I_{\text{тз}} \geq 2I_{\text{зген}}$$

$$I_{\text{тз}} \geq 2 \cdot 12,8 = 25,6$$

$$U_{\text{тз}} \geq 2 \cdot 31 = 62$$

Для даних умов обираємо тиристорний перетворювач серії ПТЕМ-2Р1 з параметрами

$$P_n = 8(\text{кВт})$$

$$U_{\text{сн}} = 220(\text{В})$$

$$U_{\text{дн}} = 110(\text{В})$$

$$I_{\text{дн}} = 30(\text{А})$$

2.5 Технічні характеристики та опис роботи тиристорного перетворювача

Модульний тиристорний перетворювач ПТЕМ-2Р1 виконаний на основі ПТЕМ-1Р. Була розроблена серія уніфікованих модульних екскаваторних перетворювачів ПТЕМ-1Р, пристосована до тяжких умов експлуатації екскаваторного устаткування [21].

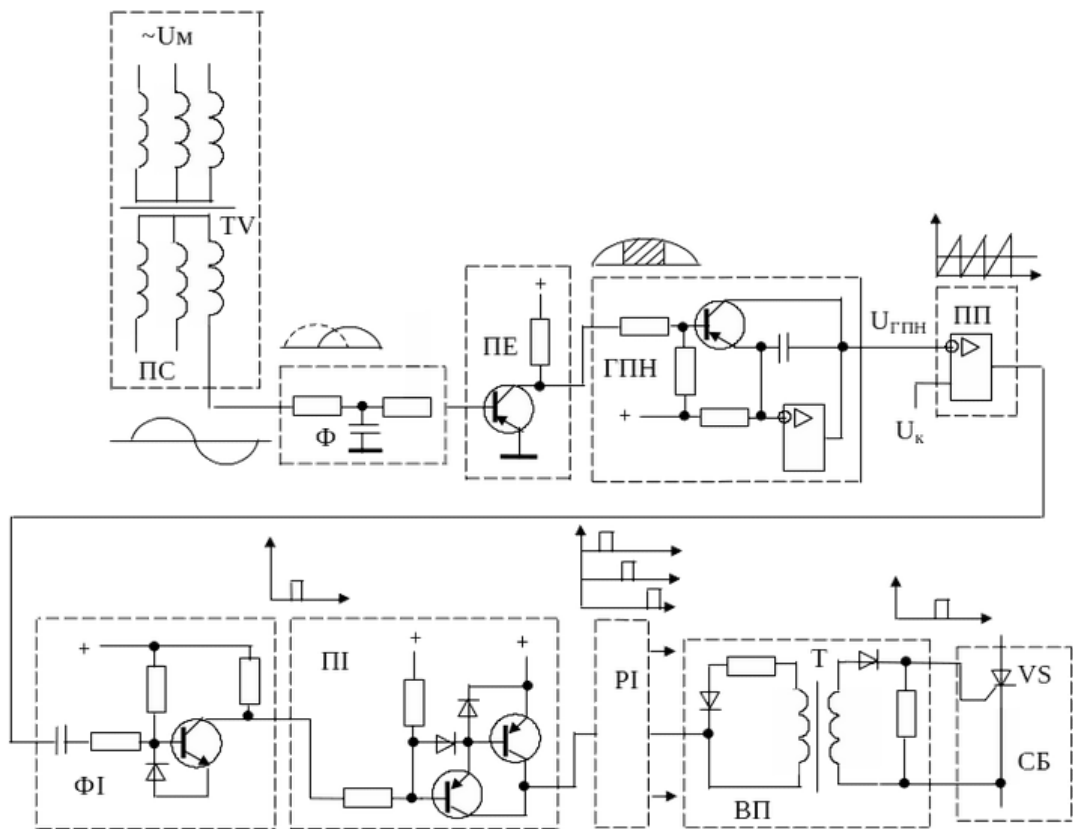


Рисунок 2.7 – Перетворювач тиристорний екскаваторний модульний ПТЕМ-1Р

Тиристорні модульні перетворювачі ПТЕМ-1Р виконані по трифазній нульовій схемі й призначені для використання в низьковольтних пристроях керування головними електроприводами екскаваторів, бурових установок, підйомно-транспортних й інших машин по системах ТВ-Г-Д, ТП-Д, НПЧ-АД у діапазоні потужностей від 10 до 1500 кВт. Перетворювачі виконані у вигляді

моноблоків у відкритому виконанні, призначеному для вбудовування в шафи комплектних пристроїв керування. Серія містила три габарити 12, 35 й 80 кВт. Живлення силових ланцюгів здійснювалося від розділового трансформатора трифазною лінійною напругою 220, 380 й 660 В. Напруга живлення трансформаторів синхронізації 380 В.

Внутрішні ланцюги керування були потенційно розв'язані з вихідними ланцюгами перетворювачів. Всі внутрішні з'єднання виконувалися пайкою, компонування блоків забезпечувалося короткими монтажними ланцюгами. З лицьової сторони всі модулі об'єднані комутуючою платою з контрольними крапками. Обмеження навантажень перетворювача забезпечувалося внутрішнім контуром струму. "Обв'язка" параметрів регулятора виконувалася на розніманні. Одноканальна СІФК дозволяла працювати як у випрямному так й в інверторному режимах (від $\alpha^{\min} = 0^{\circ}$ до $\alpha^{\max} = 140^{\circ}$). Необхідні характеристики електропривода формувалися операційними підсилювачами осередку убудованих регуляторів.

Перетворювач мав логіку, що повинна була забороняти одночасне включення реверсивних комплектів у будь-яких режимах. Захист забороняв включення при несправних тиристорах і відключав при перевантаженнях по струму, зникненні напруги. При випадкових відключеннях спрацьовувала система АПВ, що відновлювала роботу через 15 мс.

Після створення, модулі ПТЕМ-1Р найбільше широко використалися як збудники генераторів і синхронних двигунів. На основі перетворювачів ПТЕМ-1Р-2 для головних приводів екскаваторів була розроблена оптимальна система ТВ-Г-Д. Незважаючи на нечисленні спроби впровадити на екскаватори інші системи електроприводів, наприклад, системи постійного струму - ТП-Д, або змінного струму - з перетворювачами частоти, донині, основною системою залишається Г-Д з магнітними або тиристорними збудниками.

Найперші перетворювачі мали зменшені щодо стандарту відстані між ніжками рознімань і доріжками на платах, що забезпечувало недостатні шляхи

витоків і приводило іноді до перекриттів високою напругою й загорянням. Сигнал струмового зворотного зв'язку знімався в систему керування модуля із шунта, тому силова частина й система керування мали потенційний зв'язок, а розв'язка від загальних ланцюгів керування електроприводом здійснювалася по вхідних ланцюгах модуля за допомогою оптронів. Розв'язка виходила нелінійною і неоднозначною, і також не забезпечувала достатнього опору ізоляції.

Внутрішніх джерел живлення було три, не вважаючи джерела живлення задатчика. Вихід з ладу кожного із джерел міг створити в системі ТВ-Г-Д умови самоходу. Нечітка робота логіки дозволяла в системі ТП-Д робити керування логікою тільки з виходу регулятора струму. Для системи НПЧ-АД імпульси керування були недостатньо широкими, і це не сприяло якісному регулюванню струмів.

Число електронних компонентів модуля перевищувало 600, що також знижувало розрахункову надійність електропривода, особливо в системі НПЧ-АД, де кількість елементів на один перетворювач відразу потроювалося. Через велику кількість елементів робота схеми, особливо одноканальних осередків фазового керування ЯФУ-К й ЯФУ-А, виявилася "не зрозумілою" для обслуговуючого персоналу.

Було уведено типовиконання на IGBT транзисторах, а число габаритів було збільшено до чотирьох. У зв'язку з необхідністю роботи модулів у складі безпосередніх перетворювачів частоти для якісного формування струмів виявилось необхідним мати безперервні імпульси керування, а для збільшення надійності,- кількість електронних елементів модуля знизили з 600 до 200. Поява силових модулів дозволило спростити конструкцію силової частини, а поява нових типів датчиків струму й напруги на основі ефекту Холу забезпечило надійну потенційну розв'язку силових ланцюгів і ланцюгів керування.

Істотно змінений датчик наявності струму в тиристорах, у якому уведена високовольтна потенційна розв'язка за допомогою транзисторних оптронів. СІФК прийнята багатоканальною. Діапазон кутів керування симетричний від

$\alpha_{\min} = 30^{\circ}$ до $\alpha_{\max} = 150^{\circ}$. У той же час були збережені кращою, перевіреною практикою, рішення й вузли перетворювача ПТЕМ-1Р, наприклад, збережена функціональна схема самодіагностики й захисту перетворювача.

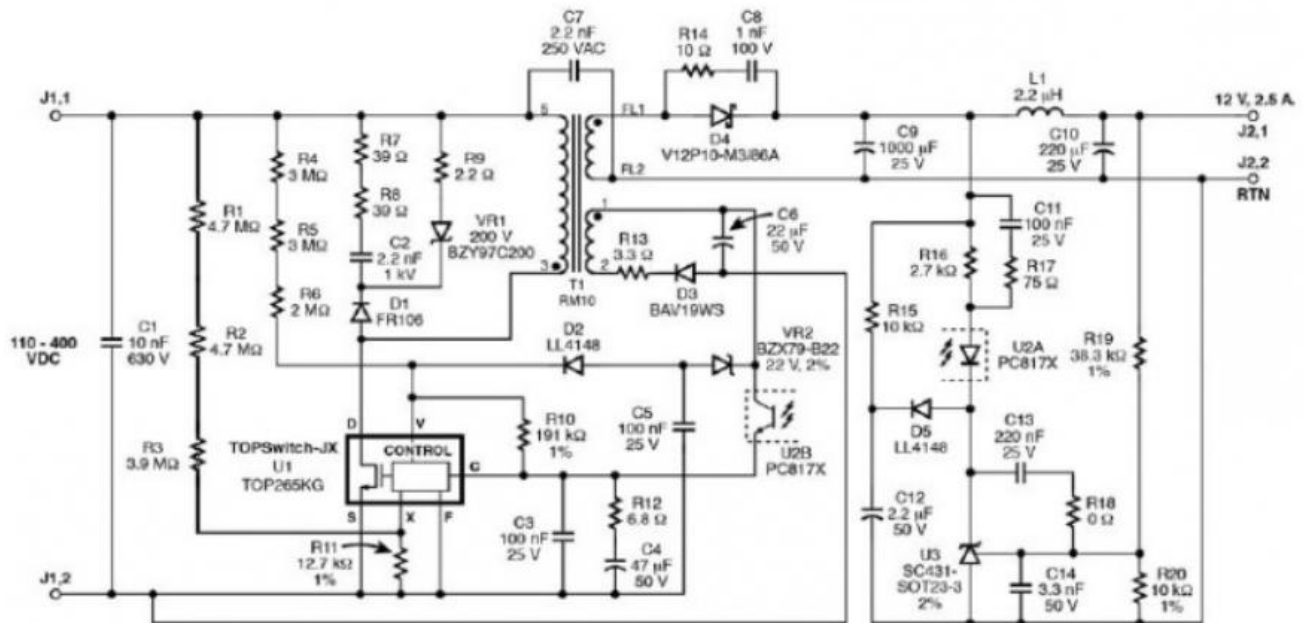


Рисунок 2.8 – Перетворювач тиристорний екскаваторний модульний ПТЕМ-2Р

Функціональна схема перетворювача ПТЕМ-2Р представлена на рис. 2.8. Силова частина дозволяє використати блок або по трьохпульсний реверсивній схемі з роздільним керуванням, або у варіанті регулятора напруги в системі ТРН-Д.

Живлення всіх внутрішніх ланцюгів перетворювача здійснюється від трифазного багатообмоткового трансформатора Тр. Його первинна обмотка підключається до напруги 380 В при будь-якій нарузі харчування силових ланцюгів від 40 до 660 в. Перетворювач першого габариту містить цей трансформатор винесеним, перетворювачі старших габаритів містять його убудованим.

Після впровадження ПТЕМ-2Р проявляли себе перешкоди в каналах керування тиристорами, вихідні транзистори формувачів імпульсів мали зайве нагрівання, що проявлявся приблизно через рік експлуатації, іноді відмовляли оптроні розв'язки датчиків наявності струму, при відключеннях мережі також

іноді виходили з ладу силові тиристори. Після усунення недоліків і введення вхідного контролю на електронний комплектуючі, перетворювач ПТЕМ-2Р перетворився в дійсно надійний елемент екскаваторного електропривода. Однак робота перетворювачів другого й третього габаритів у системах ТП-Д і НПЧ-АД, створених для внутрішніх потреб підприємства, продовжувала викликати дорікання, у зв'язку з непередбаченими кидками струмів і відключеннями по мережі.

Розроблена трипозиційна логіка, що виявилася дуже вдалою для збудників. Введенням резисторів у базові ланцюги вихідних каскадів СІФК значно була збільшена завадостійкість, а установка там же простенького генератора дозволила формувати імпульси із заповненням, що різко розвантажило вихідні транзистори каналів керування по теплу. RC-ланцюга в каналах керування були впритул присунуті до керуючих електродів тиристорів, що додатково знизило вплив перешкод. Perez'єднанням схем включення оптронів у датчиках наявності струмів була значно підвищена надійність останніх. Був уведений захист від неправильного чергування фаз. Як уже згадувалося, - виправлена логіка роздільного керування. Удалося піти від проблеми виходу з ладу тиристорів при відключеннях мережі. На НПЧ була випробувана й гарно себе зарекомендувала система анодного керування тиристорами. Перенос цього рішення на моноблок дозволяє істотно спростити ЯПР, зменшити кількість обмоток трансформатора, спростити сам трансформатор і збільшити надійність.

Особливо варто сказати про конструкції керуючої частини моноблока другого габариту. Вийшло дуже вдале рішення - "трансформер". У результаті всі плати інтелектуальної частини розвертаються в різні сторони, забезпечуючи легкий доступ абсолютно до всіх елементів і дивну ремонтпридатність (мал. 5 Фото блоку БУТ-1 з розворотом плат). Дана інтелектуальна частина була виділена в окремий блок, що одержав назву БУТ-1. Цей блок може пристроюватися практично до будь-якої силовій частини як винесений модуль. Таке рішення, наприклад, використане в НКУ для порушення синхронного

двигуна. Силова частина виконана на тиристорах Т-630 і забезпечує струм 270А в навантаженні при природному охолодженні.

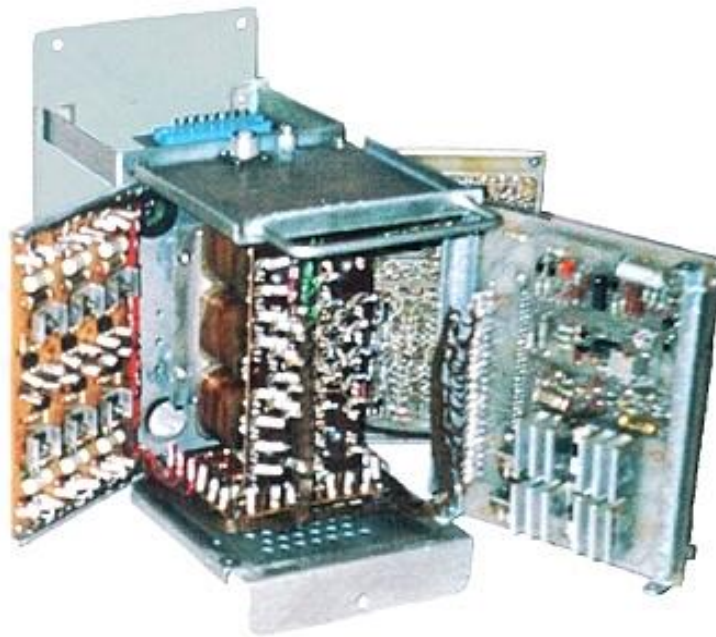


Рисунок 2.9 – Блок керування тиристорами БУТ-1

2.5.1 Вибір трансформатора

Вибір трансформатора для перетворювачів здійснюється згідно рівня випрямленого струму і напруги схеми перетворювача.

Потужність трансформатора:

$$S_{mp} = K_s K_c K_I K_R U_d I_d \cdot 10^{-3} = 1,05 \cdot 1,3 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 110 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 10,9 (\text{кВА})$$

де

$$k_s = \frac{S_{mp}}{P_d} \text{ - коефіцієнт схеми}$$

k_c - коефіцієнт запасу по напрузі

k_i - коефіцієнт, що враховує відхилення струму від прямої

k_r -коефіцієнт, що враховує падіння напруги при комутації у вентиллях та дроселях

$$U_d = 2U_n = 2 \cdot 110 = 220 \text{ В} - \text{напруга навантаження}$$

$$I_d = I_n = 30 \text{ А} - \text{струм навантаження}$$

Необхідна фазна напруга вторинної обмотки трансформатора

$$U_{2\phi} = K_C \frac{K_R}{K_U} U_d = 1,3 \cdot \frac{1,1}{2,34} \cdot 220 = 134,5 \text{ (В)}$$

де

$$k_s = \frac{U_{d0}}{U_{2\phi}} = 2,34$$

- коефіцієнт, що характеризує відношення напруг в ідеальному випрямлячі і який залежить від схеми випрямлення (для трьох-фазної мостової схеми дорівнює 2,34)

Лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора

$$U_{2л} = \sqrt{3} U_{2\phi} = 1,73 \cdot 134,5 = 233 \text{ (В)}$$

Діюче значення струму у вторинній обмотці трансформатора

$$I_2 = K_2 \cdot K_i \cdot I_d = 0,817 \cdot 1,1 \cdot 30 = 27 \text{ (А)}$$

де $k_2 = \frac{I_2}{I_d}$ - коефіцієнт, що характеризує відношення струмів I_2/I_d в ідеальному випрямлячі і який залежить від схеми випрямлення (для трифазної мостової схеми дорівнює 2,34)

По отриманим даним вибираємо трансформатор при виконанні умови $S_n > S_{mp}$ $I_{2н} > I_n$ й знаходимо параметри силового кола з урахуванням технічних даних трансформатора

По отриманим значенням S_{mp} и $U_{2л}$ вибираємо трансформатор серії ТСП-12/0,7 з параметрами:

$$S_{mp} = 11,3(\kappa B \cdot A)$$

$$U_c = 380(B)$$

$$U_{\text{во}} = 205(B)$$

$$I_{\text{во}} = 29,5(A)$$

$$U_{\text{кз}} = 4,7\%$$

$$P_{\text{кз}} = 320(Bm)$$

$$I_{\text{хх}} = 1,5\%$$

Номінальне значення напруги у вторинній обмотці:

$$U_{2\phi n} = \frac{U_{2л}}{\sqrt{3}} = \frac{233}{\sqrt{3}} = 135(B)$$

Номінальний струм вторинної обмотки трансформатора

$$I_{2н} = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{2л}} = \frac{11,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 233} = 27,03(A)$$

Номінальний струм первинної обмотки трансформатора

$$I_{1н} = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1л}} = \frac{11,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 16,56(A)$$

Активний та індуктивний опір трансформатора, приведеного до вторинної обмотки

$$r_{mp} = \frac{P_{\text{кз}}}{3I_{1н}^2 K_{mp}^2} = \frac{320}{3 \cdot 16,56^2 \cdot 1,63^2} = 0,146(Ом)$$

$$\text{де } K_{\text{тр}} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} = \frac{380}{233} = 1.63 \quad - \text{ коефіцієнт трансформації}$$

Індуктивний опір трансформатора

$$x_{\text{мп}} = \frac{U_{\text{кз}} U_{1л}}{100 I_{1н} K_{\text{мп}}^2} = \frac{4.7 \cdot 380}{100 \cdot 16.56 \cdot 1.63^2} = 0,4053(\text{Ом})$$

Еквівалентний активний опір перетворювача:

$$R_n = r_{\text{мп}} + r_{\text{дп}} + \frac{x_{\text{мп}} P}{2\pi} = 0,146 + 0,00235 + \frac{0,4053 \cdot 6}{2 \cdot 3,14} = 0,536(\text{Ом})$$

де $\frac{x_{\text{мп}} \cdot m}{2\pi}$ - еквівалентний активний опір, що враховує зниження випрямленої напруги через комутаційного процесу у перетворювачі

Максимальне значення випрямленої напруги ($\alpha = 0$):

$$U_{d0} = K_u U_{2\Phi_n} = 2,34 \cdot 134.5 = 314.6(\text{В})$$

Напруга перетворювача при мінімальному значенні кута регулювання ($\alpha_{\text{min}} = 20^\circ$):

$$U_{d0} \cos \alpha_{\text{min}} = 314.6 \cdot 0,94 = 295.8(\text{В})$$

Напруга перетворювача при номінальному опорі:

$$U_d' = U_{dн} + I_{dн} R_n = 220 + 30 \cdot 0,536 = 236.1(\text{В})$$

Напруга перетворювача при падінні напруги мережі на 5%:

$$U_d'' = 0,95U_{d0} \cos \alpha_{\min} = 0,95 \cdot 295,8 = 281(B)$$

$U_d'' > U_d'$ трансформатор задовольняє вимогам

2.5.2 Вибір датчиків

Вибір датчика ЕРС здійснюється на основі модулів трансформаторної розв'язки з рівнем розв'язки 1000 – 1500 В виходячи з номінальної напруги двигуна і вимірювального шунта струму по каталогам на електрообладнання [19].

Для даної системи обираємо датчик напруги на основі трансформаторної розв'язки ВТ-1 з параметрами:

$$U_n = 110(B)$$

$$K_{mp} = 0,565$$

$$n_n = 2000(об / хв)$$

$$f_n = 500(Гц)$$

$$R_{ex} = 700(Ом)$$

$$\delta = \pm 0,11\%$$

Вибір датчиків струму здійснюється на основі модулів оптронної розв'язки з рівнем розв'язки 1000 – 1500 В виходячи з номінальної напруги двигуна і вимірювального шунта струму по каталогам на електрообладнання.

Для даної системи обираємо датчик струму серії ДХК-14 з параметрами:

Чутливість – 9 мкВ/мА

$$I_{nut} = 7(мА)$$

$$K_{тем} = 0,15(\% / c^{\circ})$$

$$R_{вх} / R_{вих} = 1.1 / 2.5(kOm)$$

Вибір датчиків напруги здійснюється на основі модулів трансформаторної розв'язки з рівнем розв'язки 1000 – 1500 В виходячи з номінальної напруги двигуна і вимірювального шунта струму по каталогам на електрообладнання.

Для даної системи обираємо датчик напруги на основі трансформаторної розв'язки ВТ-1 з параметрами:

$$U_n = 110(\text{В})$$

$$K_{mp} = 0,565$$

$$n_n = 2000(\text{об} / \text{мин})$$

$$f_n = 500(\text{Гц})$$

$$R_{ex} = 700(\text{Ом})$$

$$\delta = \pm 0,11\%$$

2.6 Висновки за розділом

У конструкторській частині магістерської роботи було проведено комплекс розрахунково-аналітичних заходів, спрямованих на розроблення, обґрунтування та оптимізацію системи електропривода екскаватора.

По-перше, здійснено аналіз режимів роботи механізму. Було визначено динаміку навантажень у робочому циклі, обґрунтовано вимоги до системи керування та електропривода, а також доведено доцільність застосування частотно-керованого привода для забезпечення стабільності, плавності ходу та енергоефективності.

По-друге, проведено розрахунок параметрів і вибір електродвигуна, зокрема визначено маси та геометричні розміри конструктивних елементів, що дозволило перевірити їх міцність і довговічність. Додатково виконано розрахунок навантажувальних і швидкісних характеристик, які забезпечують правильний вибір режимів роботи привода, а також обчислено розрахункову потужність для вибору двигуна, що дозволило підібрати оптимальний електродвигун із потрібними енергетичними параметрами.

По-третє, проведено вибір електродвигуна, генератора та приводного двигуна відповідно до технологічних вимог, що гарантує узгодженість у роботі електромеханічної системи та стабільність подачі енергії.

По-четверте, було здійснено вибір тиристорного перетворювача, технічні характеристики якого відповідають вимогам до плавного регулювання швидкості та моменту електропривода. У роботі наведено опис роботи перетворювача, що підтверджує його функціональну ефективність у складі системи керування.

Крім того, виконано вибір трансформатора, здатного забезпечити надійне живлення схеми керування та силової частини, а також вибір датчиків, необхідних для реалізації системи автоматизованого контролю параметрів електропривода. Це дозволяє підвищити точність регулювання, захист від аварійних режимів і рівень автоматизації.

Результати конструкторської частини підтверджують, що розроблена система електропривода екскаватора на базі частотно-керованого електродвигуна, узгодженого з генератором, трансформатором, тиристорним перетворювачем і сучасними датчиками, забезпечує підвищення енергетичної ефективності, надійності та довговічності роботи екскаватора в умовах інтенсивної експлуатації.

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок розімкненої системи керування електроприводом

3.1.1 Визначення параметрів елементів схеми заміщення, коефіцієнтів передачі і сталих часу

Коефіцієнт підсилення перетворювача визначається:

$$k_n = \frac{U_{mn}}{U_k} = \frac{110}{12} = 9.167$$

де U_{mn} - номінальна вихідна напруга перетворювача. Номінальна напруга керування приймається $U_k = 12$ В.

Стала часу перетворювача $T_n = 0,01$ с.

Коефіцієнт підсилення генератора визначається:

$$k_z = \frac{U_{zном}}{U_{zном}} = \frac{460}{110} = 4.182$$

де $U_{zном}$, $U_{zном}$ – номінальні напруги якоря та збудження генератора.

Стала часу генератору визначається:

$$T_z = \sqrt{\frac{1000P_{zном}}{n_{юм}(2p)^2}} = \sqrt{\frac{1000 \cdot 200}{1480 \cdot (2 \cdot 2)^2}} = 2.9(c)$$

де $n_{юм}$ – номінальна швидкість двигуна, об/хв.;

p – число пар полюсів.

Опір якірного ланцюга системи генератор - двигун визначається:

$$R_e = R_{\text{дв}} + R_z = 0.0057 + 0.00481 = 0.011(\text{Ом})$$

Індуктивність якірного ланцюга системи генератор - двигун визначається:

$$L_e = L_{\text{дв}} + L_z = 1,43 + 0,43 = 1,86(\text{мГн})$$

Електромагнітна стала часу електропривода визначається:

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,00186}{0,011} = 0,177(\text{с})$$

Коефіцієнт е.р.с. двигуна визначається:

$$k\Phi = \frac{U_{\text{двном}} - I_{\text{двном}} R_{\text{дв}}}{\omega_{\text{двном}}} = \frac{440 - 490 \cdot 0,0057}{750 \cdot \pi / 30} = 5,567(\text{Вб})$$

Електромеханічна стала часу електропривода визначається:

$$T_m = \frac{J_{\Sigma} R_e}{(k\Phi)^2} = \frac{24 \cdot 0.011}{(5.567)^2} = 0.00814(\text{с})$$

де J_{Σ} - сумарний момент інерції двигуна і механізму.

Коефіцієнт датчика напруги генератора визначається:

$$k_z = \frac{12}{U_{\text{гном}}} = \frac{12}{460} = 0.026$$

Коефіцієнт датчика струму визначається:

$$k_{\text{oc}} = \frac{U_{\kappa}}{I_{\text{макс}}} = \frac{12}{1.5 \cdot 490} = 0.016$$

де $I_{\text{макс}}$ – максимальний струм якоря двигуна; $I_{\text{макс}} = k_{\text{макс}} I_{\text{двном}}$;

$k_{\text{макс}}$ – коефіцієнт допустимого перевантаження за струмом.

Коефіцієнт датчика швидкості визначається:

$$k_{\text{ош}} = \frac{U_{\kappa}}{\omega_{\text{макс}}} = \frac{12}{1.3 \cdot 750 \cdot \pi / 30} = 0.118$$

де $\omega_{\text{макс}}$ – максимальна швидкість двигуна; $\omega_{\text{макс}} = \omega_{\text{ном}}$.

3.1.2 Розрахунок механічних характеристик розімкненої системи електропривода

Швидкісна характеристика електропривода за системою Г-Д визначається:

$$\omega = \frac{U_{\kappa} - I_{\text{дв}} R_e}{k\Phi}$$

Побудова швидкісних характеристик виконується для 3-4 значень напруги генератора, наприклад, 1,0; 0,8; 0,6; 0,4 від номінального значення.

$$\omega_1(I) := \frac{U_g - I \cdot R_e}{KF_n}$$

$$\omega_2(I) := \frac{0.8 \cdot U_g - I \cdot R_e}{KF_n}$$

$$\omega_3(I) := \frac{0.6 \cdot U_g - I \cdot R_e}{KF_n}$$

$$\omega_4(I) := \frac{0.4 \cdot U_g - I \cdot R_e}{KF_n}$$

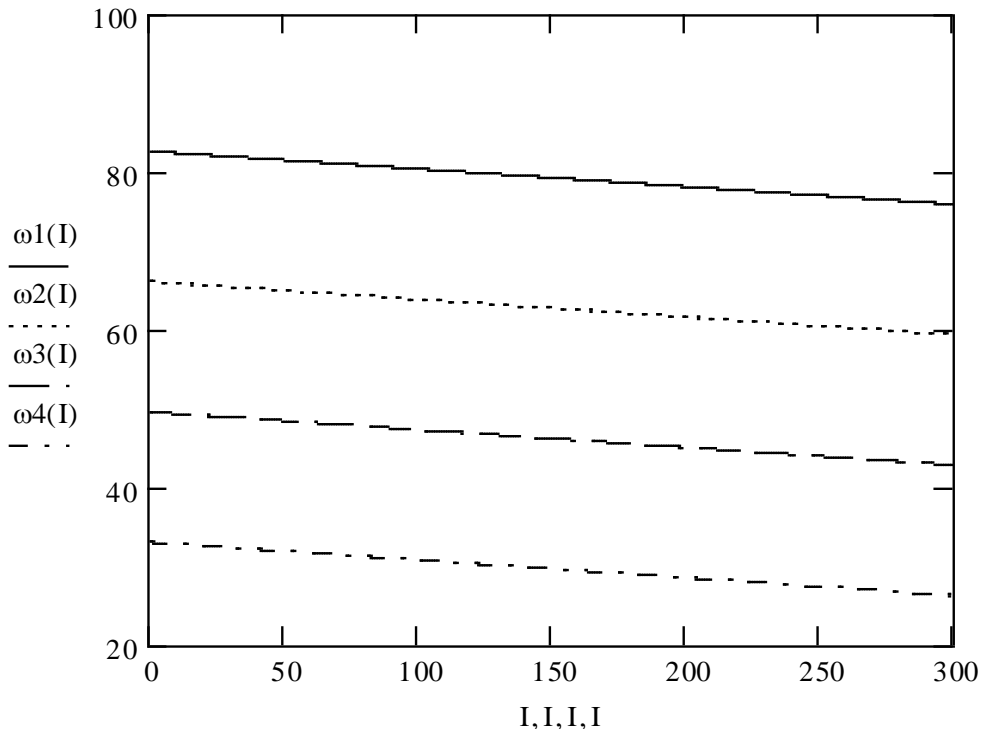


Рисунок 3.1 - Механічна характеристика системи

З отриманих швидкісних характеристик визначається статизм за швидкістю:

$$\delta_{ш} = \frac{I_{двном} R_e}{U_e} 100, \% = \frac{490 \cdot 0.042 \cdot 100}{460} = 4.47\%$$

Очевидно, що за умовами статичної помилки $\Delta\omega^{**}_{раз} = 44,7\%$ у заданому діапазоні регулювання система ЕП не задовольняє поставленим вимогам $\omega^{**}_{потреб} = 3\%$. Систему потрібно оптимізувати. Варіант оптимізації - синтез системи підлеглого регулювання координат.

Побудова механічних характеристик всіх розглянутих систем електроприводу виконується шляхом розрахунку з підстановкою залежності струму від моменту:

$$I_{дв} = \frac{M_{дв}}{k\Phi}$$

$$\omega = \frac{U_e - \frac{M_{\partial 6}}{k\Phi} R_e}{k\Phi}$$

$$\omega_1(M) := \frac{U_g - \frac{M}{KF_n} \cdot Re}{KF_n}$$

$$\omega_2(M) := \frac{0.8 \cdot U_g - \frac{M}{KF_n} \cdot Re}{KF_n}$$

$$\omega_3(M) := \frac{0.6 \cdot U_g - \frac{M}{KF_n} \cdot Re}{KF_n}$$

$$\omega_4(M) := \frac{0.4 \cdot U_g - \frac{M}{KF_n} \cdot Re}{KF_n}$$

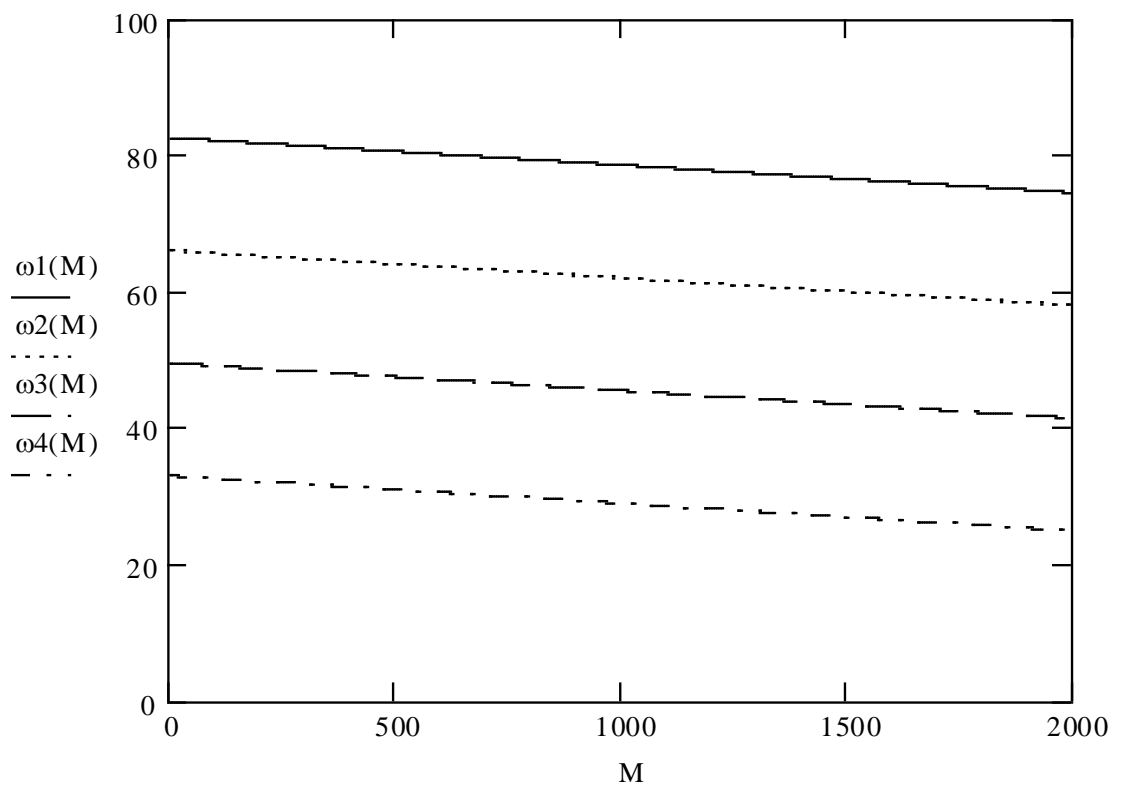


Рисунок 3.2 - Швидкісна характеристика системи

3.2 Розрахунок енергетичних характеристик електропривода

3.2.1. Розрахунок коефіцієнта корисної дії

Коефіцієнт корисної дії електропривода розраховується за виразом:

$$\eta = \frac{M\omega}{M\omega + \Delta P_{\Sigma}} 100, \% = \frac{2730 \cdot 79 \cdot 100}{2730 \cdot 79 + 32790} = 86,8\%$$

де ΔP_{Σ} - загальні втрати потужності у системі електропривода, які визначаються:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{змін}} = 2776 + 30010 = 32790(\text{Вт})$$

Постійні втрати потужності визначаються:

$$\Delta P_{\text{пост}} = k_{\text{мех}} P_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 = 0,015 \cdot 200000 \cdot \left(\frac{70}{79} \right)^2 = 2776(\text{Вт})$$

де $k_{\text{мех}}$ – коефіцієнт механічних втрат; $k_{\text{мех}} = 0,015$.

Змінні втрати потужності визначаються:

$$\Delta P_{\text{змін}} = I_{\text{об}}^2 R = 490^2 \cdot 0,127 = 30010(\text{Вт})$$

Побудова характеристики $\eta = f(\omega)$ для декількох значень моменту двигуна, наприклад, $M = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 M_n$.

$$\eta_1(\omega) := \frac{Md \cdot \omega}{Md \cdot \omega + dP}$$

$$\eta_2(\omega) := \frac{0.8 \cdot Md \cdot \omega}{0.8 \cdot Md \cdot \omega + dP}$$

$$\eta_3(\omega) := \frac{0.6 \cdot Md \cdot \omega}{0.6 \cdot Md \cdot \omega + dP}$$

$$\eta_3(\omega) := \frac{0.4 \cdot Md \cdot \omega}{0.4 \cdot Md \cdot \omega + dP}$$

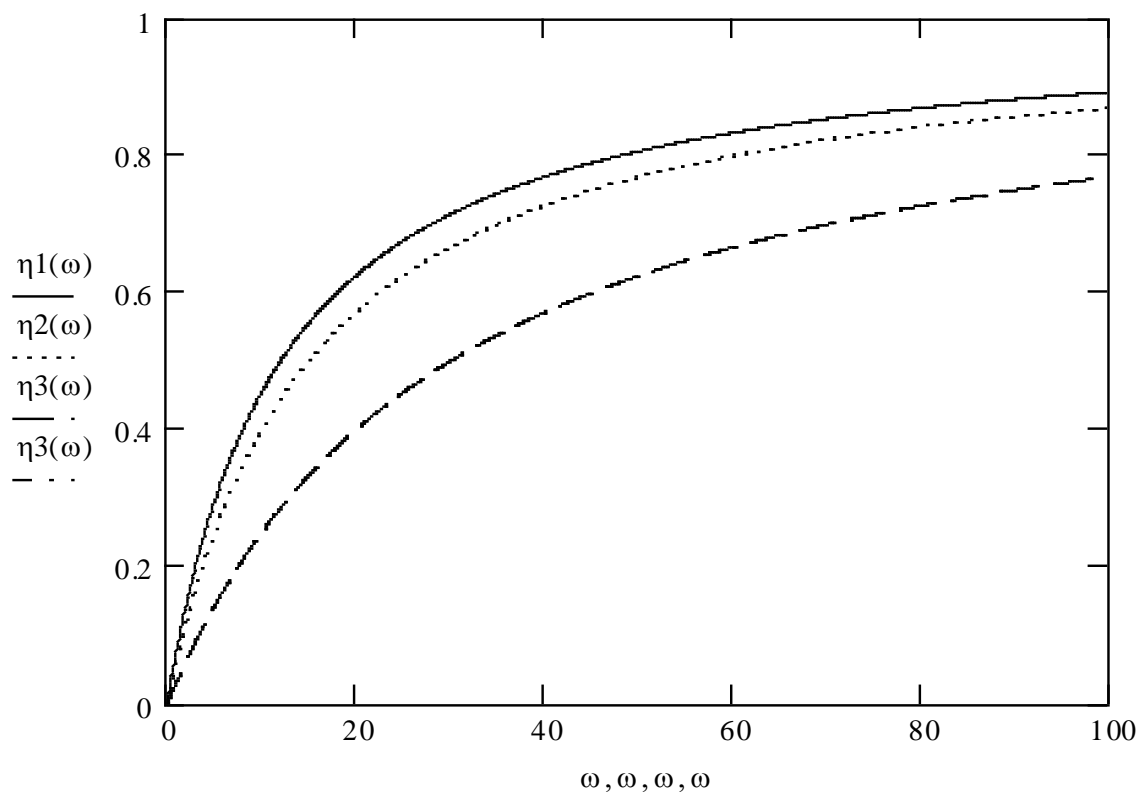


Рисунок 3.2 - Характеристика $\eta = f(\omega)$ системи

3.2.2. Розрахунок коефіцієнта потужності

Розрахунок коефіцієнту потужності виконується:

$$\cos \varphi \approx \cos \alpha = \frac{k\Phi\omega + I_{\text{до}} R_e}{U_{\text{до}}} = \frac{k\Phi\omega + \frac{MR_e}{k\Phi}}{U_{\text{до}}} = \frac{5.567 \cdot 79 + 490 \cdot 0.011}{460} = 0.967$$

Побудува залежності $\cos\varphi = f(\omega)$ для декількох значень моменту двигуна, наприклад, $M = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 M_n$.

$$\cos\phi_1(\omega) := \frac{KF_n \cdot \omega + Id \cdot Re}{U_g}$$

$$\cos\phi_2(\omega) := \frac{KF_n \cdot \omega + 0.8 \cdot Id \cdot Re}{U_g}$$

$$\cos\phi_3(\omega) := \frac{KF_n \cdot \omega + 0.6 \cdot Id \cdot Re}{U_g}$$

$$\cos\phi_4(\omega) := \frac{KF_n \cdot \omega + 0.4 \cdot Id \cdot Re}{U_g}$$

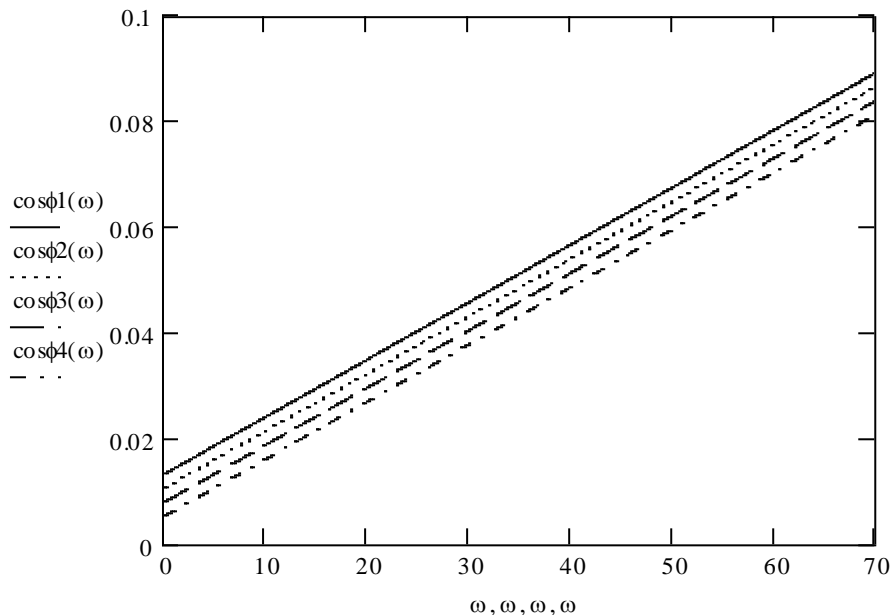


Рисунок 3.3 - Характеристика $\cos\varphi = f(\omega)$ системи

3.3 Розрахунок замкненої системи керування електроприводом

3.3.1 Обґрунтування і вибір системи керування електроприводом

Для даної системи електроприводу обираємо систему підлеглого регулювання, яка має ряд переваг перед системою з загальним суматором. Так го-

ловною перевагою таких систем є те, що кожна регульована координата (а саме: струм, напруга та швидкість) має окремий контур регулювання, що значно покращує можливість наладки системи електроприводу.

Системи підлеглого регулювання поєднують в собі переваги методів послідовної корекції з можливістю обмеження координат руху, що виконується з допомогою каскадного підключення регуляторів так, що вихідна напруга попереднього регулятора є завданням для послідуєчого регулятора. Обмеження або формування по деякому закону вихідної напруги попереднього регулятора викликає обмеження або зміну по деякому закону координати, що регулюється наступним регулятором. Таким чином, необхідне обмеження декількох координат руху досягається за допомогою багатоконтурної системи регулювання. На вхід кожного регулятора подаються сигнали заданого й дійсного значень регулюємого параметра, при чому попередній регулятор виробляє сигнал завдання для послідуєчого регулятора. Спосіб підлеглого регулювання дозволяє легко вводити обмеження параметрів, а також відносно просто виконувати розрахунок та реалізацію систем [3].

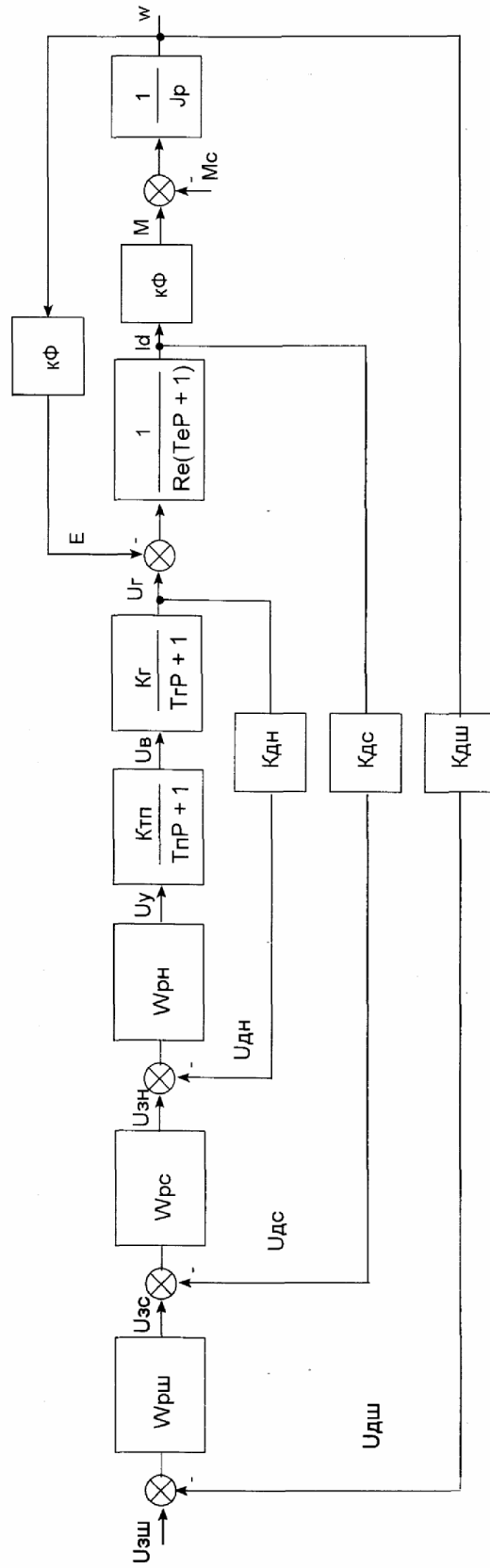


Рисунок 3.4 - Структурна схема електропривода за системою Г-Д

3.3.2. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом

3.3.2.1 Розрахунок регулятора напруги

Регулятор напруги використовується для регулювання напруги генератора у системах Г-Д.

Контур напруги генератора налагоджується на модульний оптимум (МО), через що передавальна функція регулятора напруги визначається:

$$G_{pn}(p) = \frac{T_2 p + 1}{2T_n p k_n k_z k_{дн}}$$

де k_n – коефіцієнт підсилення тиристорного збуджувача генератору;

k_z – коефіцієнт підсилення генератору;

$k_{дн}$ – коефіцієнт датчика напруги генератору;

T_2 – стала часу обмотки збудження генератору;

T_n – постійна часу тиристорного збуджувача, $T_n = 0,01$ с.

Якщо П-регулятор має елементи: R_{zn} – вхідний опір регулятора по завданню напруги каналу, R_n – вхідний опір регулятора по зворотному зв'язку напруги; $C_{ззн}$ – ємність регулятора по зворотному зв'язку напруги.

Приймаючи $C_{ззн} = 2$ мкФ, знайдемо:

$$R_{ззн} = \frac{T_2}{C_{ззн}} = \frac{2.9}{0.000002} = 1.45(\text{МОм})$$

Вхідні опори регулятора напруги по завданню і зворотному зв'язку визначаються:

$$R_{3H} = R_H = \frac{2T_n k_n k_{\text{дн}} k_z R_{33H}}{T_z} = \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 9,167 \cdot 0,127 \cdot 4,182 \cdot 1450000}{2,9} = 99,8 (\text{кОм})$$

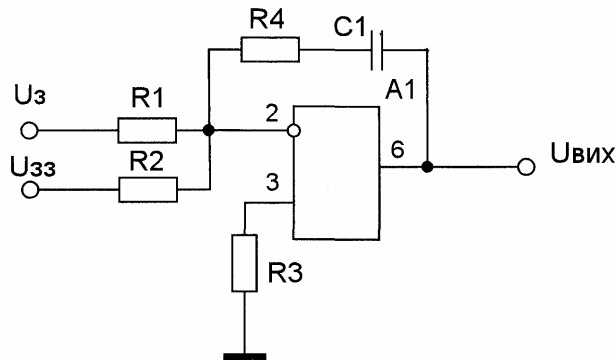


Рисунок 3.5 - Схема регулятора напруги

Для подальших розрахунків передавальна функція замкненого контуру напруги приймається у вигляді:

$$G_{\text{кн}}(p) = \frac{1}{(2T_n p + 1)k_{\text{дн}}} = \frac{1}{(T_n p + 1)k_{\text{дн}}}$$

де $T_n = 2 T_n$ – стала часу контуру напруги.

3.3.2.2 Розрахунок регулятора струму

Контур струму двигуна налагоджується на модульний оптимум (МО), через що передавальна функція регулятора струму визначається:

$$G_{\text{pm}}(p) = \frac{R_e (T_e p + 1)}{2T_k p k_k k_{\text{дс}}}$$

де R_e, T_e – опір і стала часу якійного ланцюга двигуна;

T_k – некомпенсована стала часу, яка для системи Г-Д з внутрішнім контуром напруги - $T_k = T_n$

k_k – коефіцієнт передачі об'єкту регулювання, який для системи Г-Д з внут-

$$k_k = \frac{1}{k_{\text{дн}}} = 38.3$$

рішнім контуром напруги -

Якщо ПІ-регулятор має елементи: R_{zc} – вхідний опір регулятора по завданню струму каналу, R_c – вхідний опір регулятора по зворотному зв'язку струму; C_{zsc} – ємність регулятора по зворотному зв'язку струму.

Приймаючи $C_{zsc} = 3$ мкФ, знайдемо:

$$R_{zsc} = \frac{T_e}{C_{zsc}} = \frac{0.177}{0.000003} = 58.8(\text{кОм})$$

Вхідні опори регулятора струму по завданню і зворотному зв'язку визначаються:

$$R_{zc} = R_c = \frac{2T_k k_k k_{dc} R_{zsc}}{R_e T_e} = \frac{2 \cdot 0.02 \cdot 38.3 \cdot 0.016 \cdot 58800}{0.011 \cdot 0.177} = 794(\text{кОм})$$

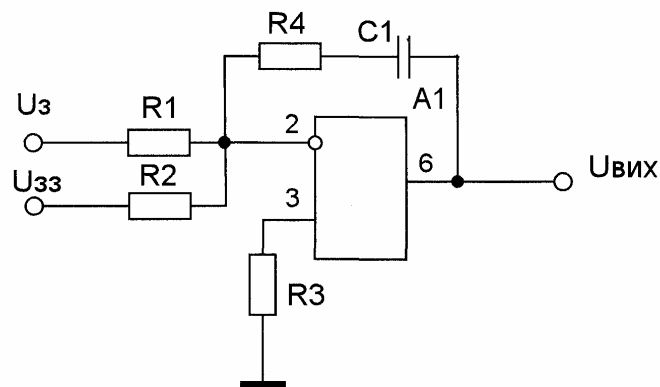


Рисунок 3.6 - Схема регулятора струму

Для подальших розрахунків передавальна функція замкненого контуру струму приймається у вигляді:

$$G_{kc}(p) = \frac{1}{(2T_k p + 1)k_{dc}} = \frac{1}{(T_c p + 1)k_{dc}}$$

де $T_c = 2 T_k$ – стала часу контуру струму.

3.3.2.3 Розрахунок регулятора ЕРС

Передавальна функція регулятора швидкості для модульного оптимуму визначається:

$$G_{pш}(p) = \frac{T_m k_{dc} k_{\Phi}}{2T_c R_e k_{\omegaи}} = \frac{R_{зш}}{R_{ш}} = \frac{R_{зш}}{R_{ш}}$$

де T_m – електромеханічна стала часу електропривода;

$k_{\omegaи}$, k_{dc} – коефіцієнти датчиків швидкості і струму.

Приймаючи $R_{зш} = R_{ш} = 8$ кОм, визначають опір зворотного зв'язку регулятора швидкості:

$$R_{зш} = R_{ш} \frac{T_m k_{dc} k_{\Phi}}{2T_c R_e k_{\omegaи}} = \frac{8000 \cdot 0,00814 \cdot 0,016 \cdot 5,567}{2 \cdot 0,04 \cdot 0,011 \cdot 0,118} = 59,9 (\text{кОм})$$

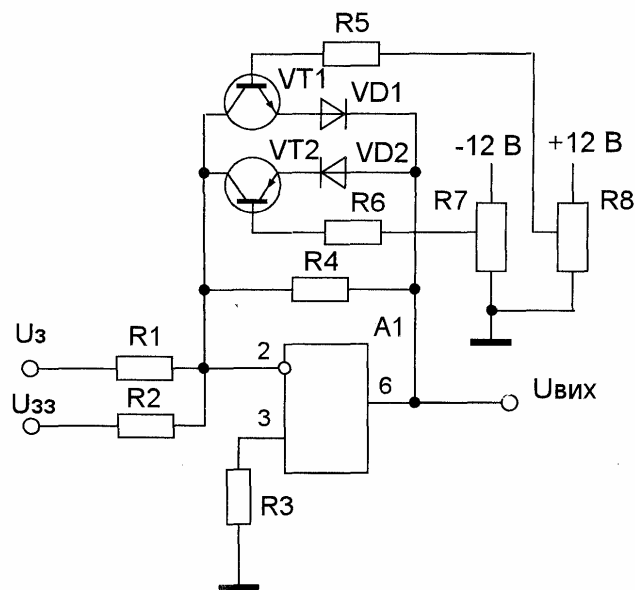


Рисунок 3.7 - Схема П-регулятора швидкості

3.4 Аналіз статичних характеристик замкненої системи керування

Рівняння системи з урахуванням дії сигналу управління $U_{зи}$ і сигналу навантаження $I_c R_e$ має вид:

$$[(U_{зи} - \omega k_{\partialи}) G_{пу} G_{кc} - I_c] \frac{R_e}{p T_M k\Phi} = \omega$$

Рішення рівняння відносно ω у статичному режимі ($p = 0$) має вид для статичних систем (з П-регулятором):

$$\omega = \frac{U_{зи}}{k_{\partialи}} - \frac{R_e 2T_c}{T_M k\Phi} I_c = \omega_o - \Delta\omega_o$$

$$\omega_o = \frac{U_{зи}}{k_{\partialи}} = \frac{12}{0.153} = 78.5 \text{ рад/с}$$

$$\Delta\omega_o = \frac{R_e 2T_c}{T_M k\Phi} I_c = \frac{0.244 * 2 * 0.02}{0.0124 * 342.6} * 217.444 = 0.226 \text{ рад/с}$$

Статична похибка регулювання швидкості визначається при мінімальній швидкості $\omega_{мін}$:

$$\delta = \frac{\Delta\omega_{сн}}{\omega_{мін}} 100\% = \frac{\Delta\omega_{сн} D}{\omega_n} 100\% = \frac{0.226 * 11}{78.5} 100\% = 2.12\%$$

де D – діапазон регулювання швидкості.

3.5 Висновки за розділом

У розрахунковій частині магістерської роботи було виконано комплекс математичних та інженерних розрахунків, спрямованих на дослідження та оптимізацію системи керування електроприводом екскаватора.

По-перше, проведено розрахунок розімкненої системи керування електроприводом. Визначено параметри елементів схеми заміщення, коефіцієнти передачі та сталі часу, що дозволило отримати точну математичну модель системи. На цій основі побудовано та проаналізовано механічні характеристики, які відображають динаміку роботи привода в умовах змінного навантаження.

По-друге, виконано розрахунок енергетичних характеристик електропривода, включаючи коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності. Отримані результати підтвердили високий рівень енергетичної ефективності системи, що дає змогу мінімізувати втрати електроенергії та підвищити економічність експлуатації.

По-третє, здійснено розрахунок замкненої системи керування електроприводом. Обґрунтовано вибір системи автоматичного регулювання, яка забезпечує стабільність швидкісних і динамічних характеристик. Проведено розрахунок параметрів елементів системи керування, зокрема регуляторів напруги, струму та ЕРС, що дозволило узгодити роботу електропривода з вимогами до точності, надійності та швидкодії.

По-четверте, проведено аналіз статичних характеристик замкненої системи, що дало змогу оцінити ефективність реалізованого керування. Результати підтвердили зменшення динамічних відхилень, стабілізацію швидкості та моменту, а також підвищення стійкості системи при зміні навантаження.

У цілому, розрахункова частина роботи показала, що впроваджена система керування електроприводом забезпечує оптимальне поєднання енергетичної ефективності, стабільності та надійності, що є важливим для роботи екскаватора в умовах високих динамічних навантажень.

4 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

4.1 Моделювання динамічних режимів системи керування електроприводом і визначення параметрів якості регулювання

Моделювання динамічних режимів системи керування електроприводом виконується у середовищі MATLAB на основі структурної схеми. Створення моделі відбувається шляхом з'єднання окремих блоків системи електропривода із бібліотек Simulink. Параметри цих блоків задаються згідно розрахунків параметрів регуляторів, датчиків та елементів схеми заміщення.

В процесі створення моделі досліджуваної системи було проведеного розрахунок за датчика інтенсивності, за допомогою якого відбувається контрольований розгін двигуна до заданої швидкості за встановлений час.

В процесі розгону двигуна на холостому ходу пере регулювання за струмом не спостерігається. Враховуючи встановлені параметри за датчика інтенсивності двигун досягає номінальної швидкості за 2 с. На другій секунді відбувається накид номінального моменту на вал двигуна, при чому пере регулювання за струмом становить 4.6 %, час перехідного процесу становить 0.3 с. Параметри перехідних процесів даного режиму моделювання задовольняють поставленим вимогам.

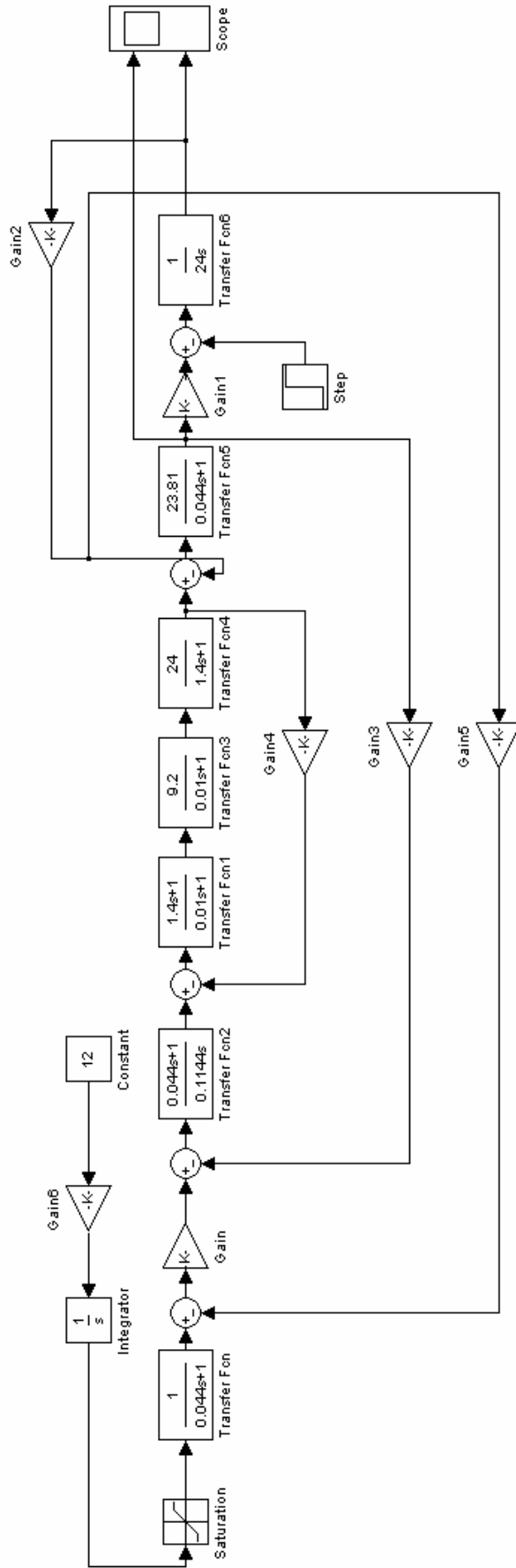


Рисунок 4.1 - Схема моделі системи електропривода за системою Г-Д у середовищі Matlab-Simulink

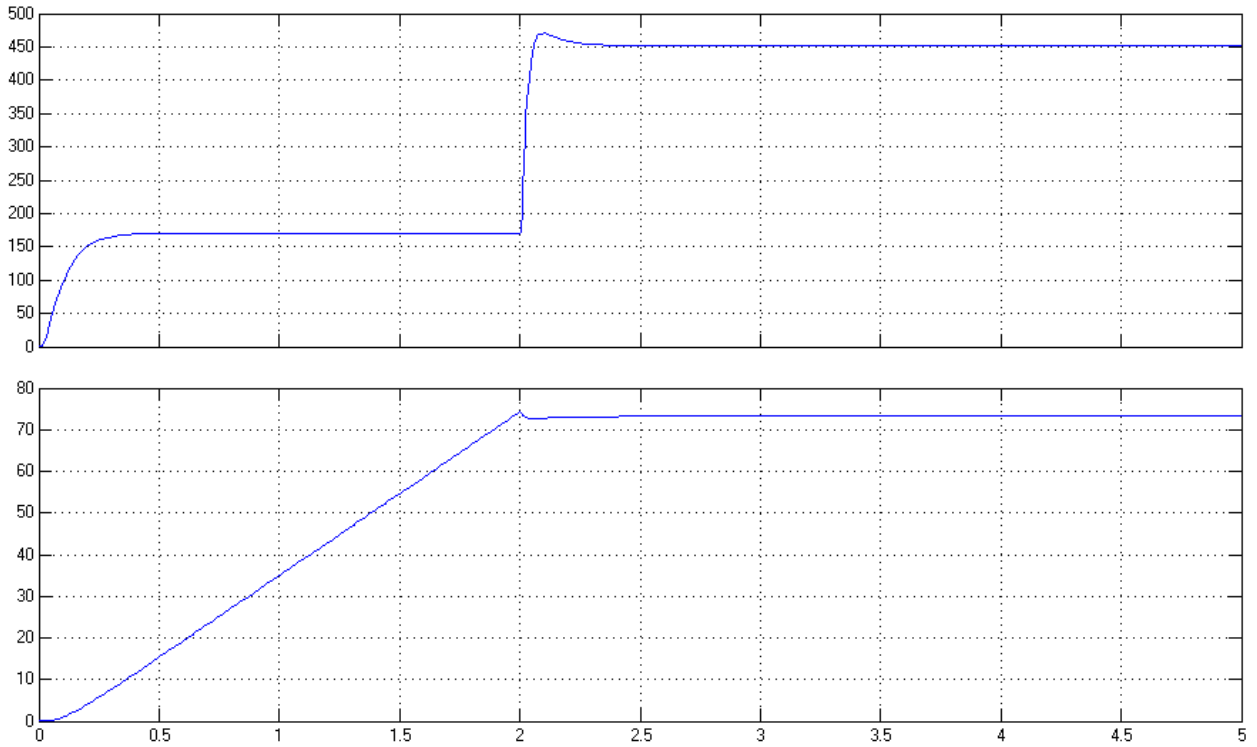


Рисунок 4.2 - Розгін двигуна до номінальної швидкості на холостому ході та накид номінального навантаження на 2с

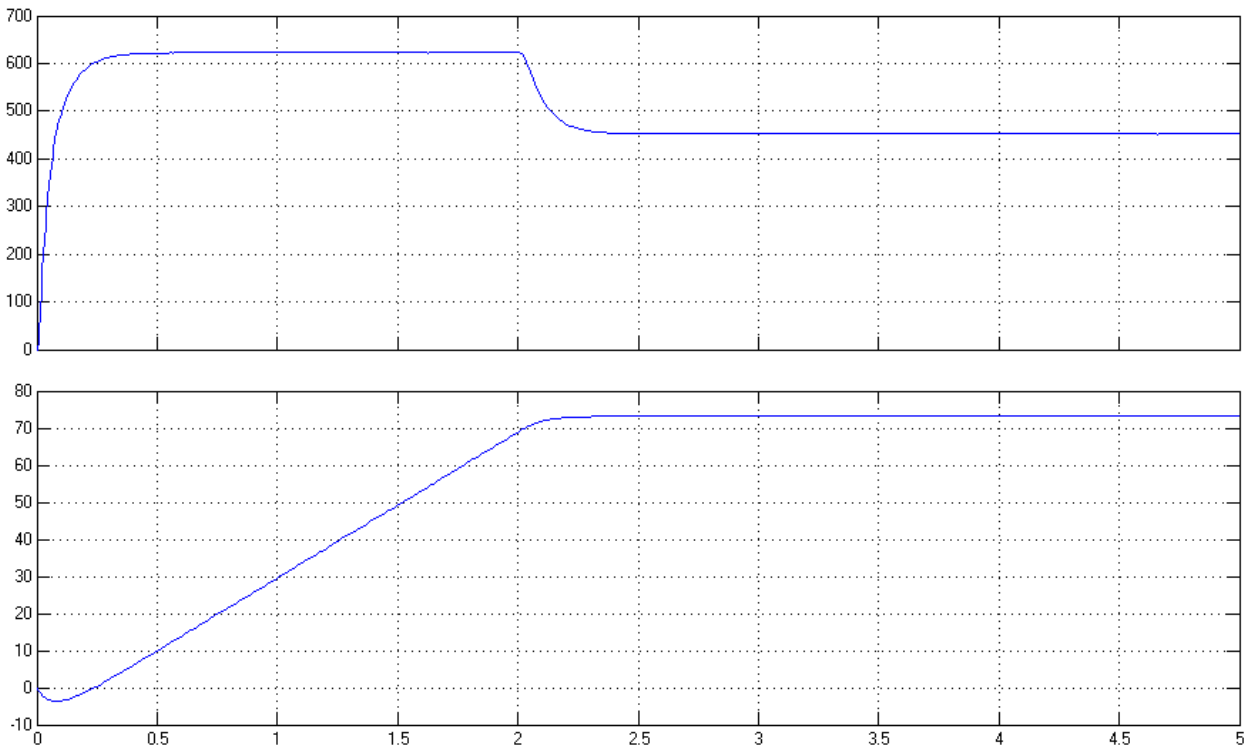


Рисунок 4.3 - Розгін двигуна до номінальної швидкості при номінальному навантаженні

В процесі розгону двигуна при номінальному навантаженні спостерігається короткочасне допустиме збільшення струму якоря двигуна. Враховуючи встановлені параметри за датчика інтенсивності двигун досягає номінальної швидкості за 2 с. На другій секунді відбувається, після досягнення двигуном номінальної швидкості, зниження струму якоря до номінального значення, при чому пере регулювання за струмом становить 0 %, час перехідного процесу становить 0.3 с. Параметри перехідних процесів даного режиму моделювання задовольняють поставленим вимогам.

4.2 Розроблення мікропроцесорної системи регулювання частоти обертання електродвигуна

Цифрові системи останнім часом знаходять все більше застосування в порівнянні з аналоговими. Підвищення параметрів інтегральних мікросхем, у тому числі поява нових мікропроцесорних комплектів, зниження відносної вартості мікроелектронних виробів, реалізація алгоритмів, недоступних аналоговим системам привело до повсюдного застосування цифрових систем, у тому числі й в електроприводі.

Структурна схема МП-системи регулювання частоти обертання наведена на рис. 4.4.

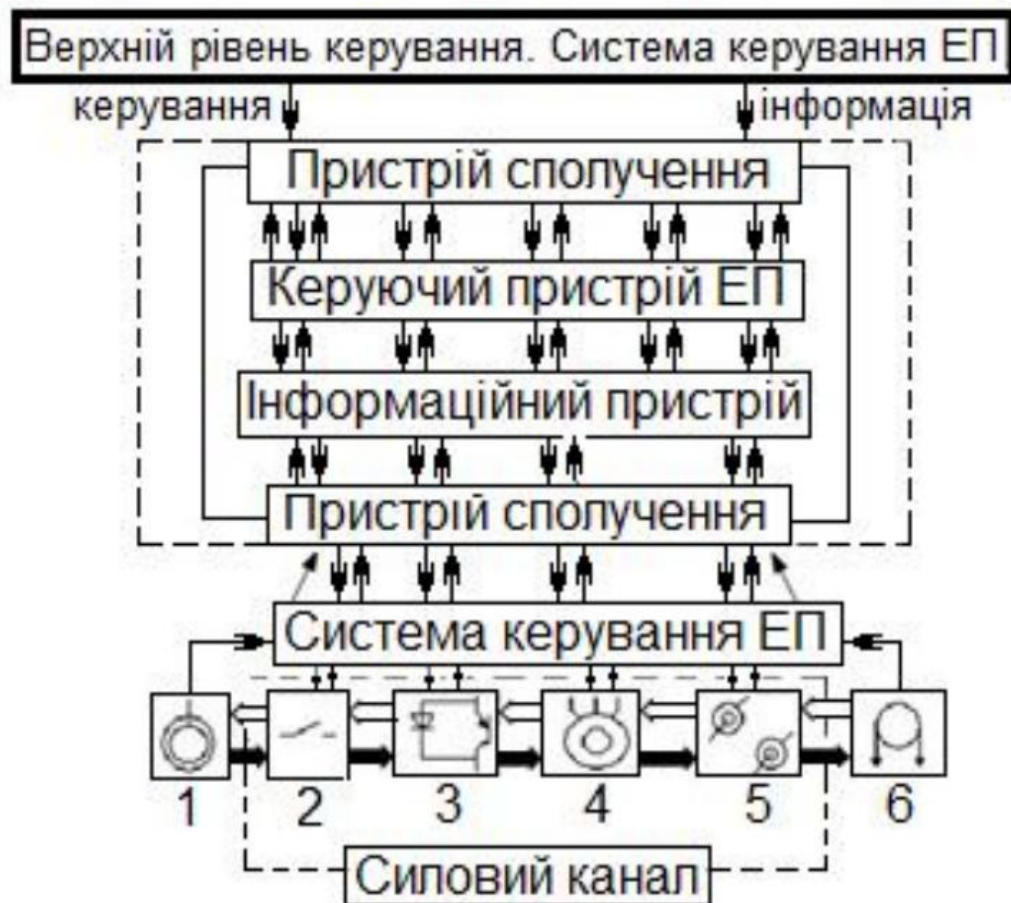


Рисунок 4.4 - Структурна схема ЕП: 1 – джерело електроенергії; 2 – комутаційна апаратура; 3 – перетворювач електричної енергії; 4 – електродвигун; 5 – механічна передача; 6 – робочий орган

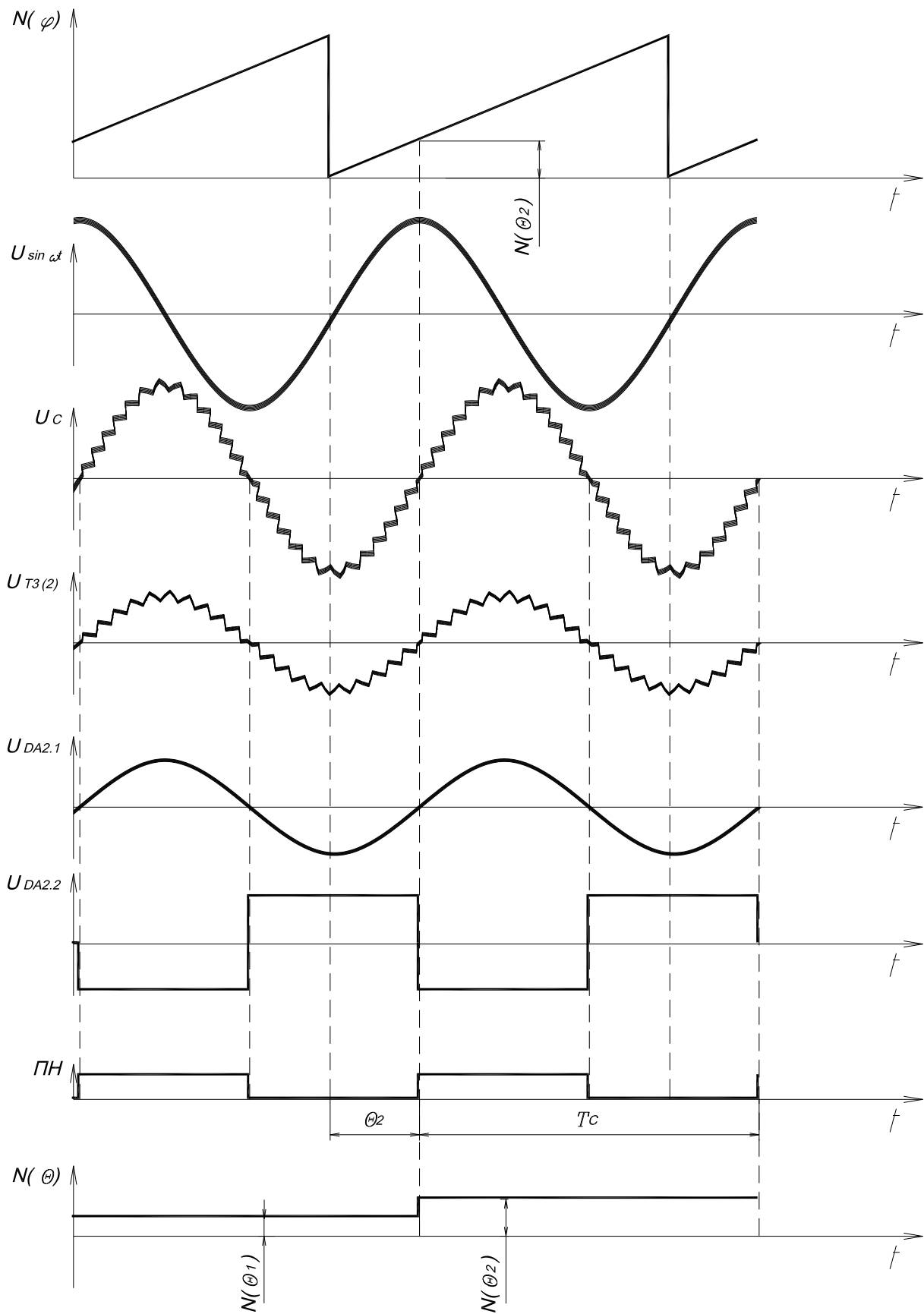


Рисунок 4.5 - Діаграма роботи перетворювача фаза-код

4.5 Визначення передавальної функції регулятора

Передатна функція регулятора швидкості:

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \frac{JR_{\gamma}p(T_{\mu}p + 1)(T_{\gamma}p + 1)}{K_{\mu}K_{C}c\Phi} = \frac{JR_{\gamma}(T_{\gamma}p + 1)}{2T_{\mu}K_{\mu}K_{C}c\Phi} = \beta(T_{\gamma}p + 1)$$

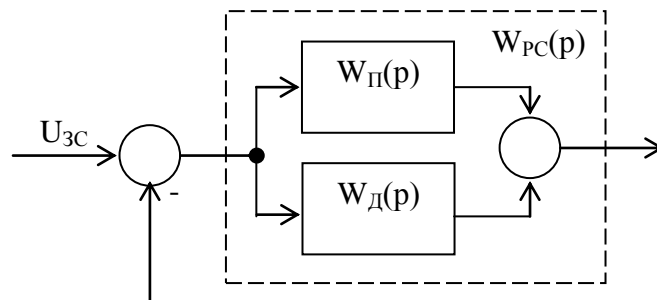


Рисунок 4.6 - Структура регулятора швидкості

$W_{\Pi}(p) = \beta$ – пропорційна складова

$W_{D}(p) = T_{\gamma}p$ - диференціальна складова

Для додання системі астатических властивостей необхідно введення інтегратора $W_{I}(p) = 1/(T_i p)$

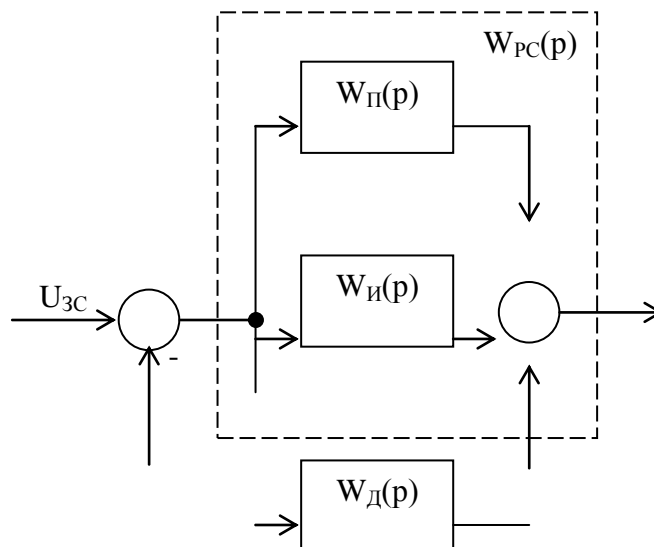


Рисунок 4.7 - Структура регулятора швидкості

Передавальна функція отриманого регулятора:

$$W_{PC}(p) = \beta + \frac{1}{T_i p} + T_J p = \frac{\beta T_i p + 1 + T_J T_i p^2}{T_i p} = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_3 p}$$

$$\begin{cases} T_1 \cdot T_2 = T_J \cdot T_i \\ T_1 + T_2 = \beta T_i \\ T_3 = T_i \end{cases}$$

Одержали ПІД-регулятор швидкості. Використовуючи метод прямої аналогії, перехід до дискретного регулятора здійснюється заміною відповідного аналогового регулятора цифровим. Ця апроксимація здійснюється шляхом уведення екстраполятора нульового порядку й двох ключів, що характеризують прийом і видачу інформації в дискретні моменти часу n .

Дискретний аналог заданої безперервної функції, де передатна функція екстраполятора нульового порядку: $W_e(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p}$, а задана передатна функція регулятора: $W_p(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_3 p}$.

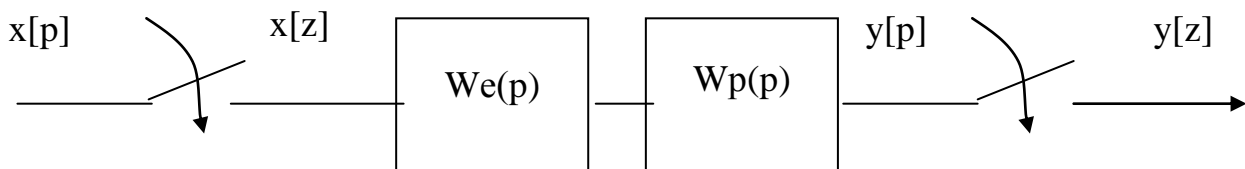


Рисунок 4.8 - Дискретний аналог безперервної функції

Знайдемо відповідну їй дискретну передатну функцію $W_p(z)$

$$\begin{aligned} W_p(z) &= Z\{W_e(p)W_p(p)\} = Z\left\{\frac{1 - e^{-pT}}{p} \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_3 p}\right\} = \\ &= Z\left\{\frac{1 - e^{-pT}}{1} \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_3 p^2}\right\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left| \begin{array}{l} \text{По функції. } e^{pT} = z, \text{ віносимо дискретну} \\ \text{функцію } \frac{z-1}{z} \text{ за знак } Z \text{ - перетворення} \end{array} \right| = \\
&= \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_3 p^2} \right\} = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1}{T_3 p^2} \right\} = \\
&= \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{T_1 T_2 p^2}{T_3 p^2} + \frac{(T_1 + T_2)p}{T_3 p^2} + \frac{1}{T_3 p^2} \right\} = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{T_1 T_2}{T_3} + \frac{T_1 + T_2}{T_3 p} + \frac{1}{T_3 p^2} \right\} = \\
&= \frac{z-1}{z} \left(Z \left\{ \frac{T_1 T_2}{T_3} \right\} + Z \left\{ \frac{T_1 + T_2}{T_3 p} \right\} + Z \left\{ \frac{1}{T_3 p^2} \right\} \right) = \\
&= \frac{z-1}{z} \left(\frac{T_1 T_2}{T_3} + \frac{T_1 + T_2}{T_3} Z \left\{ \frac{1}{p} \right\} + \frac{1}{T_3} Z \left\{ \frac{1}{p^2} \right\} \right)
\end{aligned}$$

Для функції вигляду: $F(p) = \frac{A(p_n)}{B(p_n)}$ маємо формулу:

$$F^*(p) = \sum_{n=1}^N \frac{A(p_n)}{B'(p_n)} \frac{1}{1 - e^{-T(p-p_n)}}$$

Для функції $F(p) = \frac{1}{p}$ маємо:

$$A(p) = 1; B(p) = p; B'(p) = 1; p_1 = 0; A(p_1) = 1; B'(p_1) = 1$$

$$F^*(p) = \frac{1}{1} \frac{1}{1 - e^{-T(p-0)}} = \frac{1}{1 - e^{-pT}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{e^{pT}}} = \frac{1}{\frac{e^{pT} - 1}{e^{pT}}} = \frac{e^{pT}}{e^{pT} - 1}$$

$$\text{Отримуємо: } Z \left\{ \frac{1}{p} \right\} = \frac{z}{z-1}$$

Для функції виду: $F(p) = \frac{1}{(p+a)^k}$ маємо формулу:

$$F(z) = (-1)^{k-1} \frac{1}{(k-1)!} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\partial^{(k-1)}}{\partial a^{(k-1)}} \frac{z}{(z - e^{-aT})}$$

Для функції $F(p) = \frac{1}{p^2}$ маємо: $a = 0$; $k = 1$ – кратність.

$$F(z) = (-1)^1 \frac{1}{(1)!} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial a} \frac{z}{(z - e^{-aT})} = - \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial a} \frac{z}{(z - e^{-aT})} = - \lim_{a \rightarrow 0} \frac{-zTe^{-aT}}{(z - e^{-aT})^2} = \frac{zT}{z-1}$$

$$\begin{aligned} Wp(z) &= \frac{z-1}{z} \left(\frac{T_1 T_2}{T_3} + \frac{T_1 + T_2}{T_3} \frac{z}{z-1} + \frac{1}{T_3} \frac{zT}{(z-1)^2} \right) = \\ &= \frac{z-1}{z} \frac{T_1 T_2 (z-1)^2 + (T_1 + T_2)(z-1)z + zT}{T_3 (z-1)^2} = \\ &= \frac{T_1 T_2 (z-1)^2 + (T_1 + T_2)(z-1)z + zT}{T_3 (z-1)z} = \\ &= \frac{T_1 T_2 z^2 - 2T_1 T_2 z + T_1 T_2 + (T_1 + T_2)z^2 - (T_1 + T_2)z + zT}{T_3 (z^2 - z)} = \\ &= \frac{(T_1 T_2 + T_1 + T_2)z^2 - (T_1 + T_2 + T - 2T_1 T_2)z + T_1 T_2}{T_3 (z^2 - z)} = \\ &= \frac{\frac{(T_1 T_2 + T_1 + T_2)}{T_3} z^2 - \frac{(T_1 + T_2 + T - 2T_1 T_2)}{T_3} z + \frac{T_1 T_2}{T_3}}{z^2 - z} = \\ &= \left| \begin{array}{l} \text{Обозначим: } \frac{(T_1 T_2 + T_1 + T_2)}{T_3} = b_0; \\ -\frac{(T_1 + T_2 + T - 2T_1 T_2)}{T_3} = b_1; \frac{T_1 T_2}{T_3} = b_2; a_1 = -1 \end{array} \right| = \\ &= \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z} = \left| \text{Разделим на } z^2 \right| = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1}} = Wp(z) = \frac{y(z)}{x(z)} \end{aligned}$$

$$y(z)(1 + a_1 z^{-1}) = x(z)(b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2})$$

$$y(z) + a_1 y(z)z^{-1} = b_0 x(z) + b_1 x(z)z^{-1} + b_2 x(z)z^{-2}$$

Перейдемо до гратчастої функції:

$$y[n] + a_1 y[n-1] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + b_2 x[n-2]$$

Одержуємо рекурентне вираження:

$$y[n] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + b_2 x[n-2] - a_1 y[n-1]$$

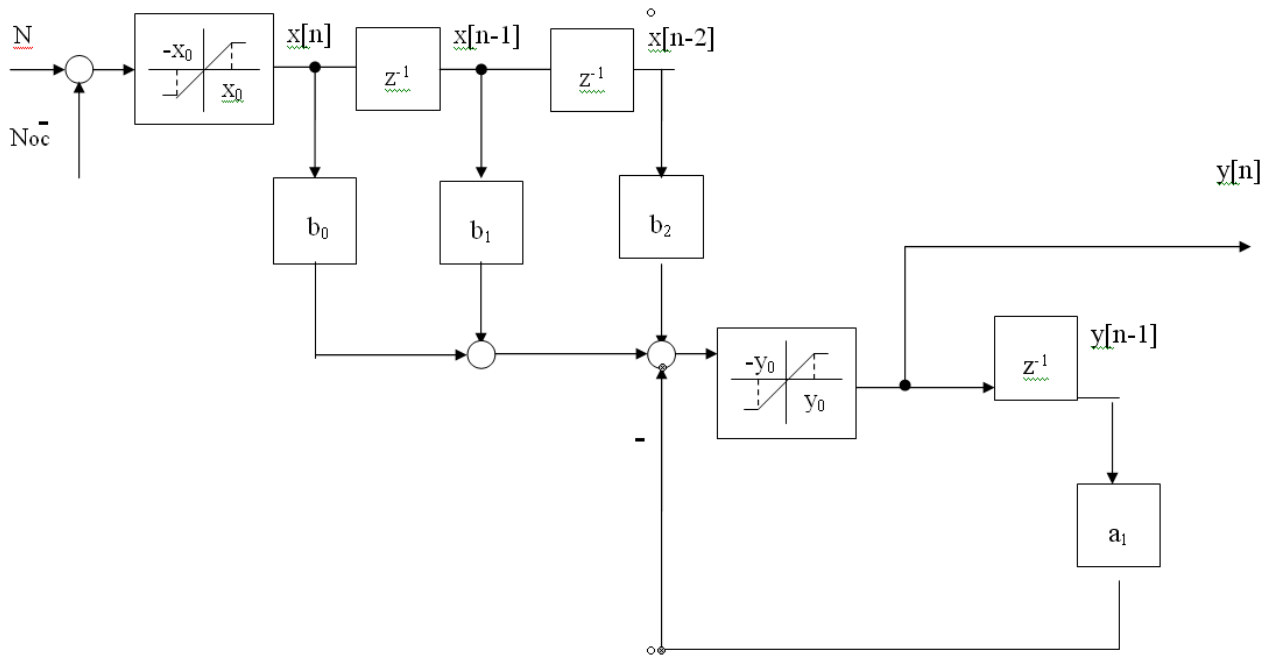


Рисунок 4.9 - Структура прямого програмування регулятора

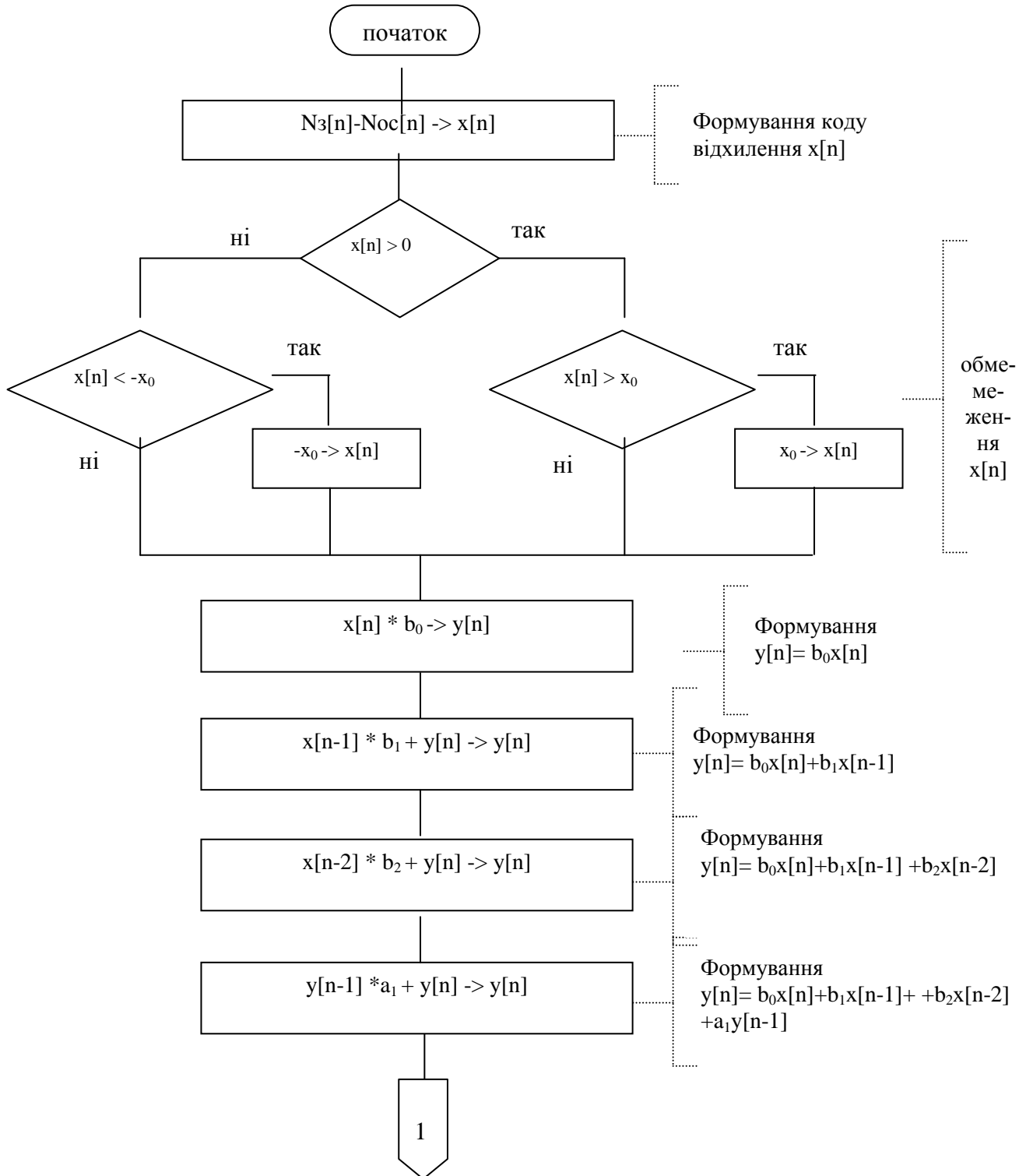
Відповідна структура прямого програмування, що враховує формування вхідного сигналу регулятора як різниці заданого значення N_z і значення зворотного зв'язку N_{oc} , наведена на рис. 4.9. Структура також урахує обмеження вхідного й вихідного сигналів.

Алгоритм підпрограми регулятора повинен виконувати наступні функції:

1. Знаходження поточного значення сигналу неузгодженості $x[n]$ з різниці заданого значення N_z і поточного значення зворотного зв'язку N_{oc} .
2. Обмеження вхідних - $x[n]$ і вихідних - $y[n]$ змінних.
3. Обчислення рекурентного виразу.
4. Формування значень "затриманих" сигналів $x[n-...]$ й $y[n-...]$ для наступних кроків.
5. Формування прямого коду з додаткового з установкою знакового розряду в "1" (для негативних значень $y[n]$).
6. Виведення $y[n]$ на перетворювач.

Найбільше повно використати ресурси мікроЕОМ дозволяє програмування мовою асемблера, багато функцій якого недоступні мовам високого рів-

ня, а деякі виконуються значно повільніше. Програми на асемблері займають менший обсяг пам'яті й мають максимальна швидкодія, доступне для конкретної мікроЕОМ, хоча їхнє створення більш трудомістко в порівнянні з мовами високого рівня.



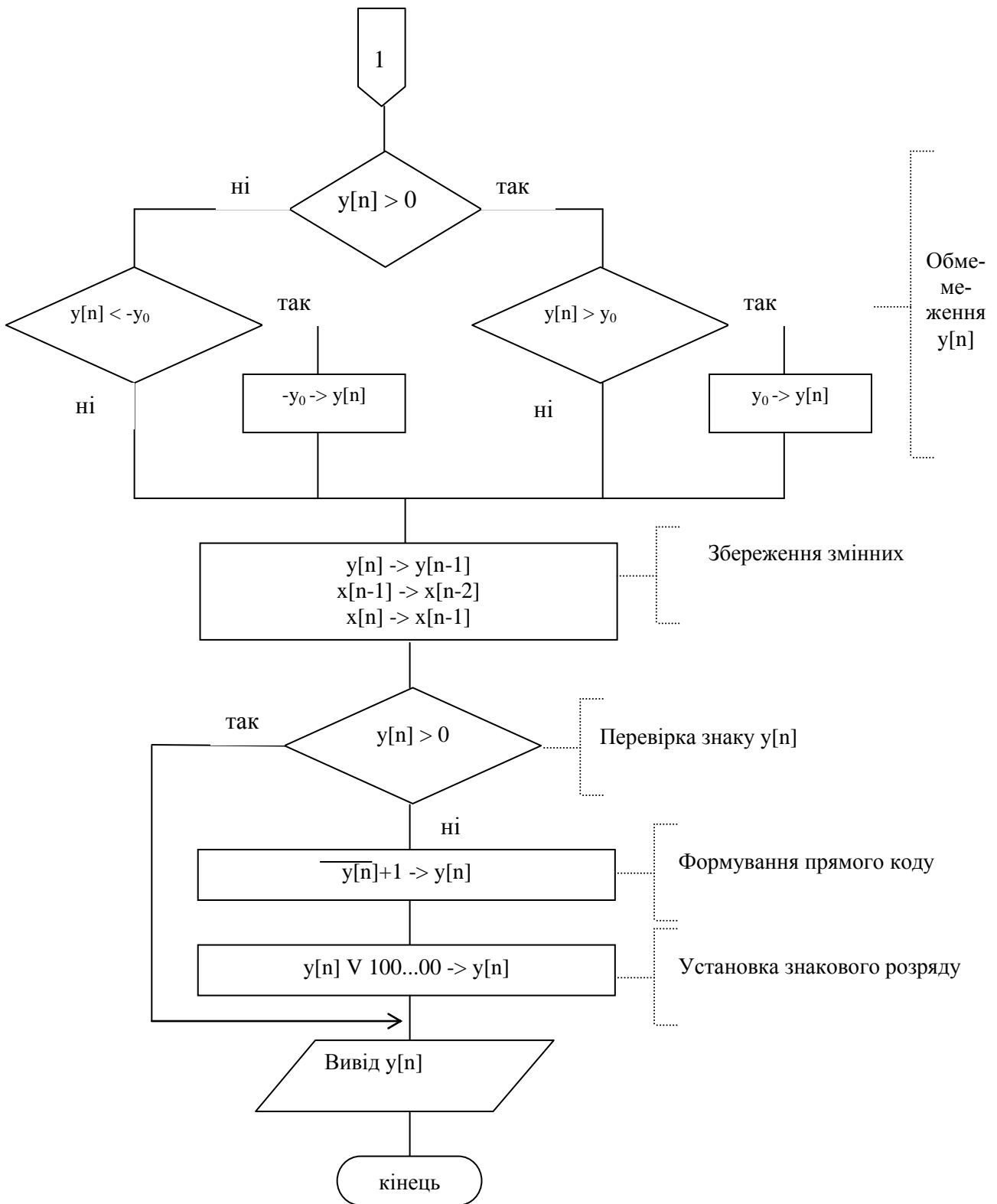


Рисунок 4.10 - Алгоритм програми регулювання електроприводом кар'єрного одноківшевого екскаватора ЕКГ -5

Підпрограма регулятора:

ORG 1000;

RDOUT=160060; /Адреса регістру даних вихідного перетворювача

RDIN=175110; / Адреса регістру даних ПФК

XN = 1400; /Зберігає $x[n]$

XN1 = 1402; /Зберігає $x[n-1]$

XN2 = 1404; /Зберігає $x[n-2]$

YN=1354; /Зберігає $y[n]$

YN1 = 1356; /Зберігає $y[n-1]$

B0 = 1360; /Зберігає b_0

B1 = 1362; /Зберігає b_1

B2 = 1364; /Зберігає b_2

NZ = 1366; /Зберігає код заданої швидкості

X0 = 1370; /Зберігає X_0

NX0 = 1372; /Зберігає $-X_0$

Y0 = 1374; /Зберігає Y_0

NY0 = 1376; /Зберігає $-Y_0$

MOV @ NZ, @ XN; /Nз $x[n]$

SUB @ # RDIN, @ # XN; /Nз-Nос $x[n]$

BMI M1; /Перехід на обмеження «-» якщо $x[n]<0$

CMR @ X0, @ XN; /Порівняння X_0 та $x[n]$

BPL M2; /Вихід з обмеження, якщо $x[n] < X_0$

MOV @ # X0, @ # XN; / X_0 $x[n]$

BR M2; /Вихід з обмеження

M1: CMR @ # NX0, @ # XN; /Порівняння $-X_0$ та $x[n]$

BMI M2; /Вихід з обмеження, якщо $x[n] > -X_0$

MOV @ NX0, @ XN; / $-X_0$ $x[n]$

M2: MOV @ # XN, R1; / $x[n]$ R1

MUL R1 @ B0; / $b_0 * x[n]$ R1

MOV R1, @ # YN; /R1 y[n]
 MOV @ # XN1, R1; /x[n-1] R1
 MUL R1 @ B1; /b1 * x[n-1] R1
 MOV @ # XN2, R1; /x[n-2] R1
 MUL R1 @ B2; /b2 * x[n-2] R1
 ADD R1, @ # YN; /R1 + y[n] y[n]
 MOV @ # YN1, R1; /y[n-1] R1
 ADD @ # YN1, @ # YN; /y[n-1] + y[n] y[n]
 BMI M8; /Перехід на обмеження «-» якщо $y[n] < 0$
 CMP @ Y0, @ YN; /Порівняння Y_0 та $y[n]$
 BPL M6; /Вихід з обмеження, якщо $y[n] < Y_0$
 MOV @ Y0, @ YN; / Y_0 $y[n]$
 BR M6; /Вихід з обмеження
 M8: CMP @ # NY0, @ # YN; /Порівняння $-Y_0$ та $y[n]$
 BMI M6; /Вихід з обмеження, якщо $y[n] > -Y_0$
 MOV @ # NY0, @ # YN; / $-Y_0$ $y[n]$
 M6: MOV @ XN1, @ XN2; /x[n-1] x[n-2]
 MOV @ XN, @ XN1; /x[n] x[n-1]
 MOV @ # YN, @ # YN1; /y[n] y[n-1]
 TST @ # YN; /Перевірка знака $y[n]$
 BPL M7; /Якщо «+», то перейти на M7
 NEG @ # YN; /Формування додаткового коду
 BIS # 100000, @ # YN; /Установка знакового розряду в «1»
 M7: MOV @ # YN, @ # RDOUT; /Виведення $y[n]$
 RTS R5; /Повернення

4.4 Висновки за розділом

У дослідницькій частині магістерської роботи було проведено моделювання та розробку технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування системи керування електроприводом екскаватора.

По-перше, виконано моделювання динамічних режимів системи керування електроприводом. Отримані результати дозволили визначити основні параметри якості регулювання – перерегулювання, час перехідних процесів, стійкість і точність відпрацювання завдання. Аналіз підтвердив, що запропонована система забезпечує зменшення динамічних похибок і підвищує надійність роботи електропривода.

По-друге, розроблено мікропроцесорну систему регулювання частоти обертання двигуна. Її впровадження дає змогу забезпечити гнучке програмне налаштування параметрів, підвищити точність і швидкодію системи, а також реалізувати захисні функції при аварійних режимах роботи. Використання мікропроцесорних технологій сприяє автоматизації процесів керування та зменшенню впливу людського фактора.

По-третє, визначено передавальну функцію регулятора, що дозволило описати математичну модель системи керування та здійснити її подальший синтез і аналіз. Це стало основою для перевірки стійкості та оптимізації параметрів регулятора з метою досягнення необхідної якості регулювання.

У цілому, дослідницька частина роботи підтвердила ефективність запропонованих технічних і програмних рішень, які забезпечують стабільність, енергоефективність та підвищену точність роботи електропривода. Це створює підґрунтя для практичного впровадження розробленої системи керування в реальних умовах експлуатації екскаватора.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеної магістерської роботи було виконано повний цикл досліджень, спрямованих на аналіз, удосконалення та розроблення системи електропривода кар'єрного екскаватора ЕКГ-5.

На основі проведеного аналізу конструктивних та функціональних особливостей існуючого електропривода встановлено, що його застосування забезпечує високу надійність та тривалу експлуатацію у складних кар'єрних умовах. Використання двигунів постійного струму дає можливість отримати задовільні пускові характеристики та реалізувати регулювання швидкості у визначеному діапазоні. Разом з тим, виявлені істотні недоліки – значні енерговитрати, низька точність і гнучкість керування, підвищений рівень зносу обладнання та невідповідність сучасним вимогам енергоефективності й автоматизації. Це дозволяє охарактеризувати існуючий електропривод як застарілий і такий, що потребує модернізації.

У конструкторській частині було розроблено структуру сучасної системи керування з частотно-керованим електроприводом, виконано розрахунок параметрів двигуна, генератора, трансформатора та тиристорного перетворювача, а також підбрано відповідні датчики. Отримані результати свідчать про можливість підвищення енергетичної ефективності, забезпечення плавного регулювання та зниження експлуатаційних витрат.

У розрахунковій частині побудовано математичні моделі розімкненої та замкненої систем керування електроприводом. Визначено параметри схеми заміщення, коефіцієнти передачі та сталі часу, розраховано механічні й енергетичні характеристики, у тому числі коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності. Проведений аналіз підтвердив, що замкнена система з правильно налаштованими регуляторами напруги, струму та ЕРС забезпечує високу стабільність і надійність у роботі.

У дослідницькій частині за допомогою моделювання було досліджено динамічні режими роботи електропривода. Визначено параметри якості регу-

лювання, зокрема час перехідних процесів, перерегулювання та стійкість. Розроблено мікропроцесорну систему регулювання частоти обертання двигуна та отримано передавальну функцію регулятора. Це дозволило підтвердити ефективність реалізованої системи керування й оптимізувати її параметри.

Таким чином, у роботі доведено доцільність заміни застарілої системи електропривода екскаватора ЕКГ-5 на сучасний частотно-керований привід із використанням мікропроцесорних засобів керування. Це рішення забезпечує:

- зниження енергоспоживання та експлуатаційних витрат;
- підвищення точності й гнучкості керування;
- стабільність динамічних і статичних характеристик;
- зростання надійності та довговічності роботи машини;
- кращу відповідність сучасним вимогам автоматизації та енергоефективності.

Результати дослідження мають практичну цінність і можуть бути впроваджені для модернізації існуючих екскаваторів ЕКГ-5, а також використані при проектуванні нових систем електроприводів гірничого обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- 1) Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.
- 2) Яцун, М.А. Електричні машини: навч. посібник / М.А. Яцун. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 400 с.
- 3) Загірняк, М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доп. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
- 4) Електричні машини та апарати: підручник / за ред. В. І. Кравця. – Київ : Либідь, 2019. – 624 с.
- 5) Літерні позначення величин та параметрів електричних машин: методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри «Електричні машини» для викладачів і студентів усіх спеціальностей / уклад. В. І. Мілих. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – 32 с.
- 6) Андрійчук, В. М. Електропривод: теорія і практика : навч. посіб. – Львів : Новий Світ – 2000, 2020. – 548 с.
- 7) Бойко, О. С. Системи керування електроприводами змінного струму. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 312 с.
- 8) Дяченко, С. І., Кузьменко, Ю. В. Енергетична ефективність електроприводів у гірничій промисловості // Вісник НТУ «ХП». – 2020. – № 4(1360). – С. 85–92.
- 9) Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Харків : Фактор, 2018. – 768 с.
- 10) Моделювання та дослідження електропривода поворотної платформи одноківшевих екскаваторів. Yermilova, N. V., Gavrillo, E. V., Kyslytsia, S. G. Журнал «Системи управління, навігації та зв'язку», 2018.

- 11) Математична модель для дослідження механізму привода ротора роторного екскаватора EP-315. Liutenko, V. Ye., Yakovenko, A. M. Журнал «Системи управління, навігації та зв'язку», 2018.
- 12) Bose, B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2017. – 704 p.
- 13) Krishnan, R. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. – Upper Saddle River : Pearson, 2018. – 632 p.
- 14) Boldea, I., Nasar, S. A. *Electric Drives*. – 2nd ed. – CRC Press, 2020. – 680 p.
- 15) Rashid, M. H. *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications*. – 4th ed. – Pearson, 2019. – 1032 p.
- 16) Попов, С. І., Гончаренко, О. Л. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. – Дніпро : НМетАУ, 2022. – 276 с.
- 17) Салтовський, Б. М. Моделювання динамічних режимів електроприводів: монографія. – Одеса: ОНАХТ, 2021. – 210 с.
- 18) Далека В. Х. Електропостачання електричного транспорту / В. Х. Далека, В. І. Скуріхін. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 168 с.
- 19) Буряк В. М. Експлуатація електрообладнання систем електропостачання: навч. посібник / В. М. Буряк. – Харків, ХДАМГ, 2001. – 386 с.
- 20) Мілих В. І. Електропостачання промислових підприємств : підручник / В. І. Мілих, Т. П. Павленко. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – 272 с.
- 21) Афанасьєв В. Н., Ключєв В. В. Електропривод: підручник для ВНЗ. – К.: Вища школа, 2014. – 480 с.
- 22) Боднар В. В., Савчук О. В. Електропривод і автоматизація промислових установок. – Львів: Новий Світ, 2016. – 512 с.
- 23) Горбачов О. І., Колосюк В. М. Автоматизований електропривод: навчальний посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2017. – 356 с.
- 24) Костенко М. П., Писаренко Г. С. Теоретичні основи електротехніки. – К.: Вища школа, 2015. – 620 с.

- 25) Погорєлов С. О., Левченко О. В. Силова електроніка та перетворювальна техніка. — К.: НАУ, 2019. — 398 с.
- 26) Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. — Prentice Hall, 2002. — 711 p.
- 27) Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. — IEEE Press, 2013. — 704 p.
- 28) Novotny D. W., Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. — Oxford Univ. Press, 1996. — 456 p.
- 29) Pillay P., Krishnan R. Modeling, Simulation and Control of Electric Drives. — Prentice Hall, 2000. — 540 p.
- 30) Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. — McGraw-Hill, 2016. — 736 p.

ДОДАТКИ

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

**Удосконалення електропривода кар'єрного
одноківшевого екскаватора ЕКГ -5**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

В. А. ГАЙДУК

Керівник:
д.т.н., проф.

О. В. ШЕФЕР

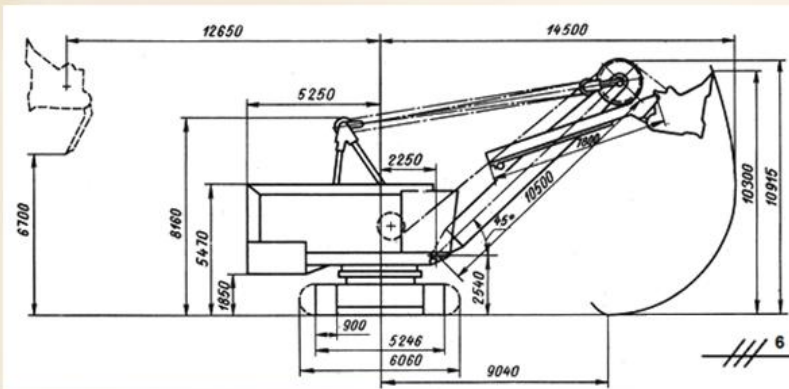
Полтава 2025

Об'єкт дослідження - процеси функціонування електропривода кар'єрного одноківшевого екскаватора ЕКГ-5.

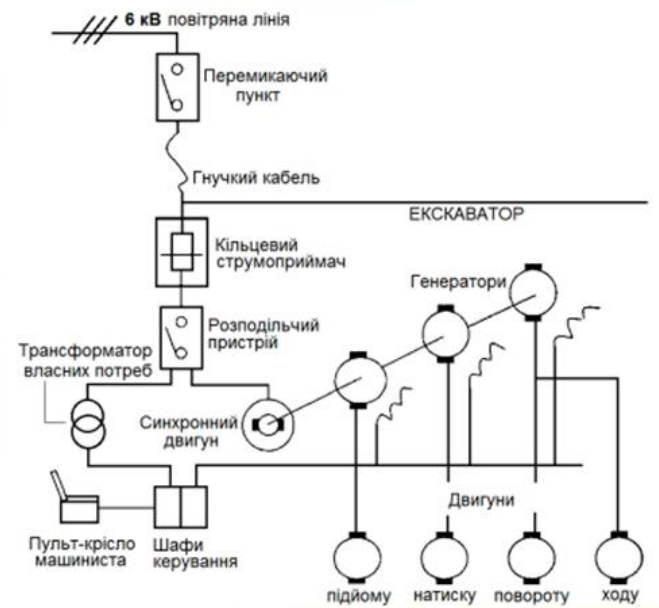
Предмет дослідження - засоби та технічні рішення удосконалення електропривода екскаватора ЕКГ-5, спрямовані на підвищення енергоефективності, надійності та динамічних характеристик його роботи з урахуванням сучасних технологій автоматизованого керування та енергозбереження.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні та розробленні інженерних рішень щодо удосконалення електропривода екскаватора ЕКГ-5, спрямованих на підвищення його енергоефективності, надійності та продуктивності.

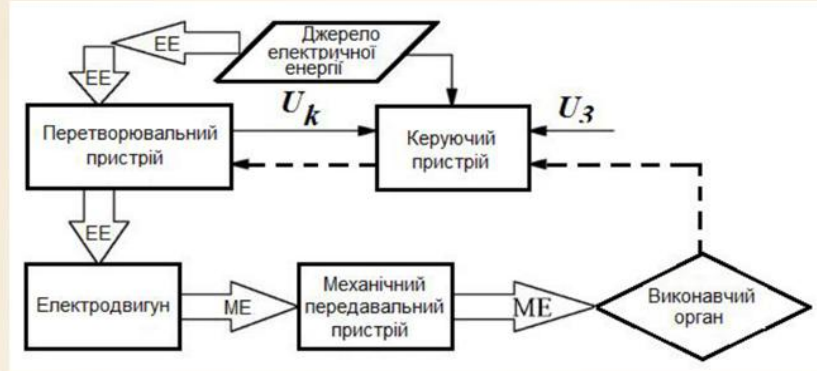
Зовнішній вигляд та габаритні розміри екскаватора ЕКГ-5



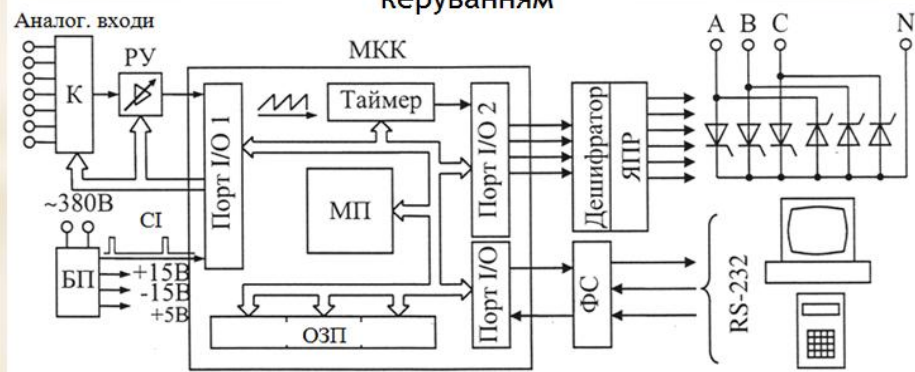
Структура електромеханічного комплексу екскаватора ЕКГ-5



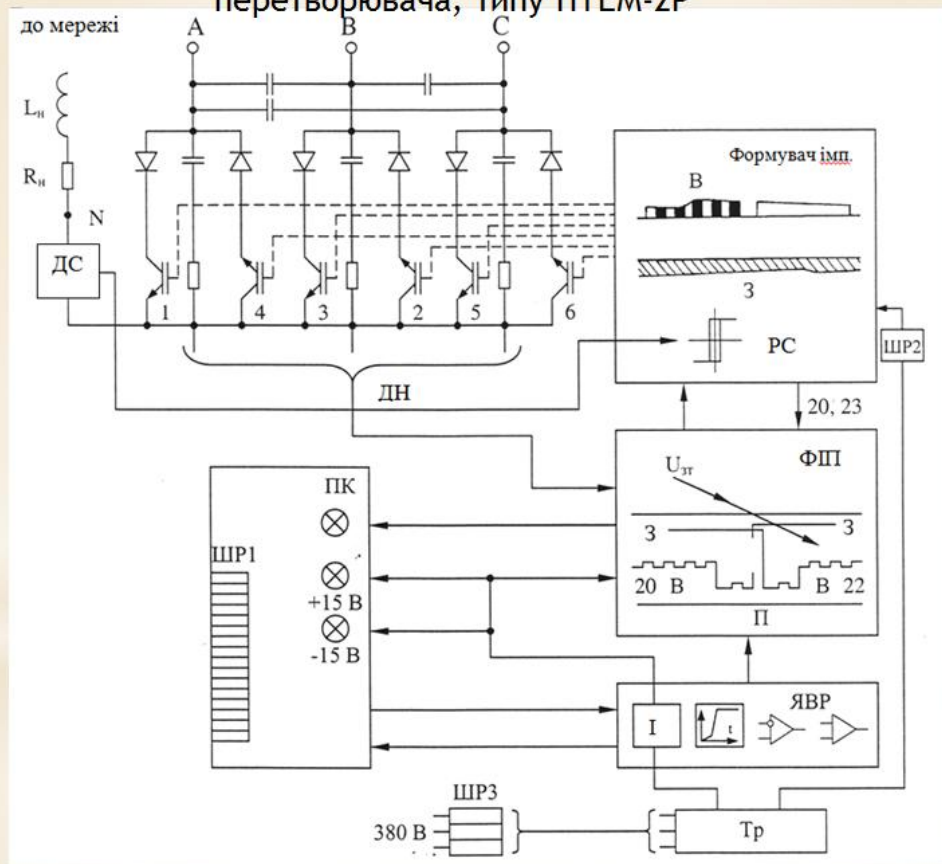
Структурна схема електроприводу за системою Г-Д



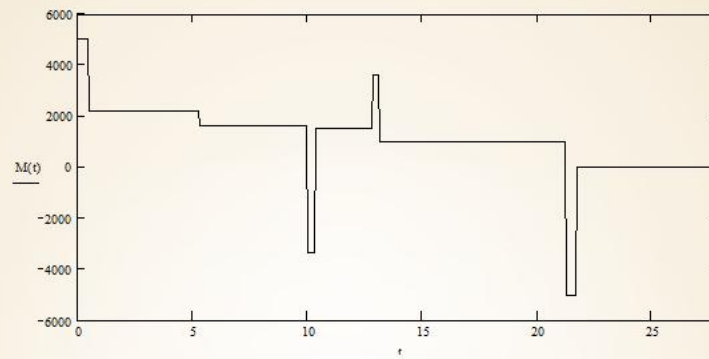
Функціональна схема тиристорного перетворювача з мікропроцесорним керуванням



Функціональна схема транзисторного екскаваторного модульного перетворювача, типу ПТЕМ-2Р

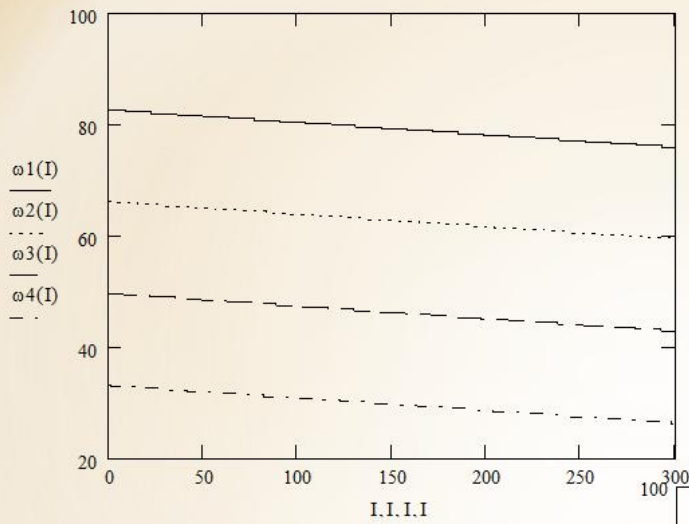


Діаграма навантаження екскаватора



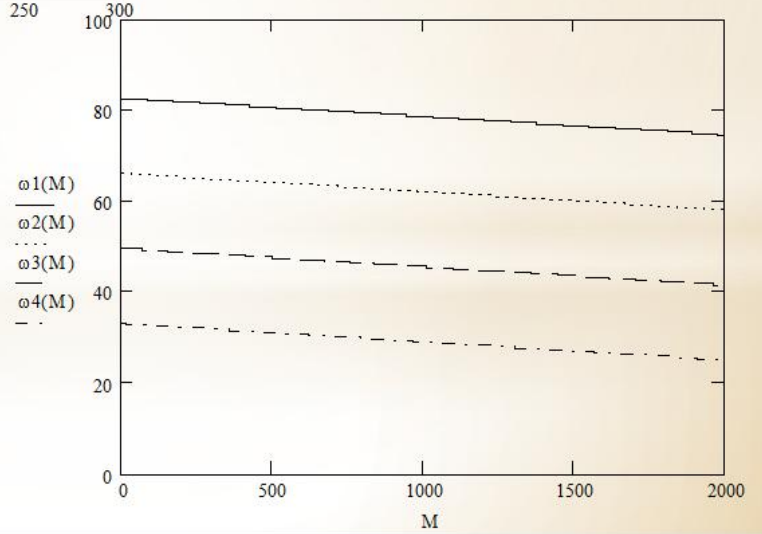
Оптимізована електрична принципова схема кіл керування тиристорного екскаваторного перетворювача ПТЕМ-2Р

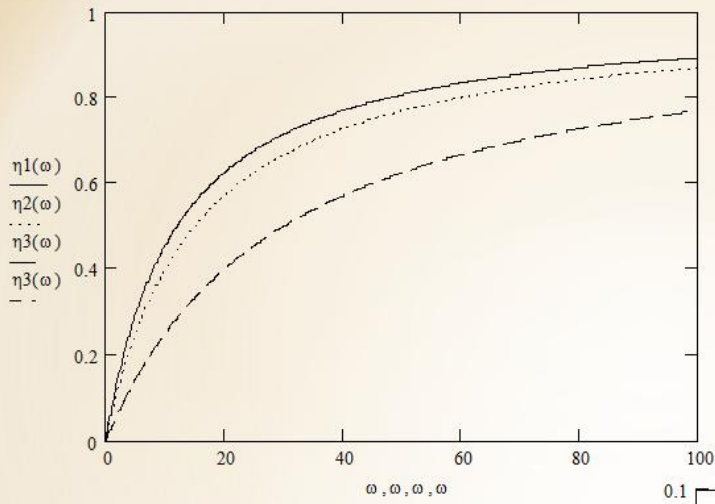




Швидкісні характеристики системи екскаваторного електропривода

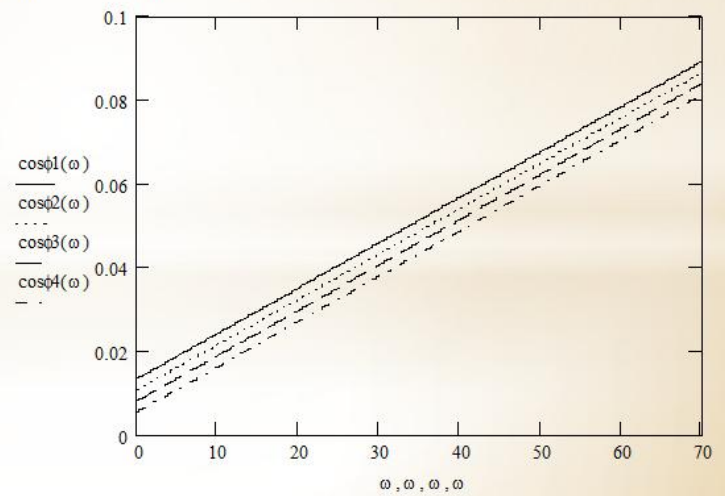
Механічні характеристики системи екскаваторного електропривода



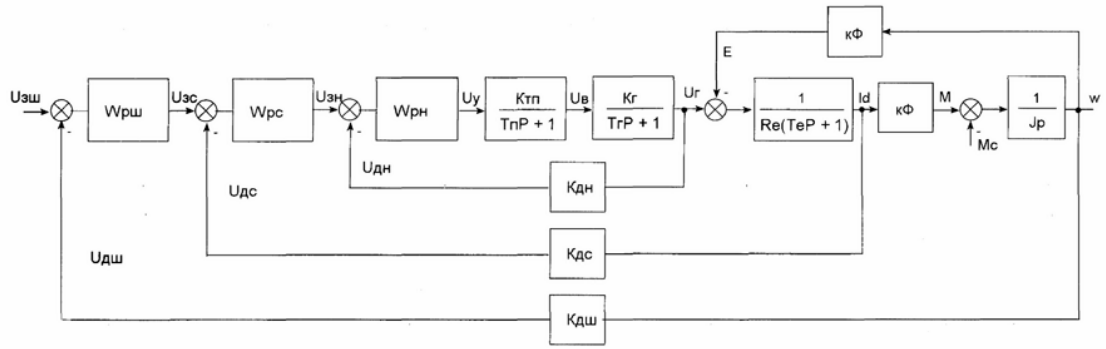


ККД екскаваторного
електропривода при
різних видах
навантаження

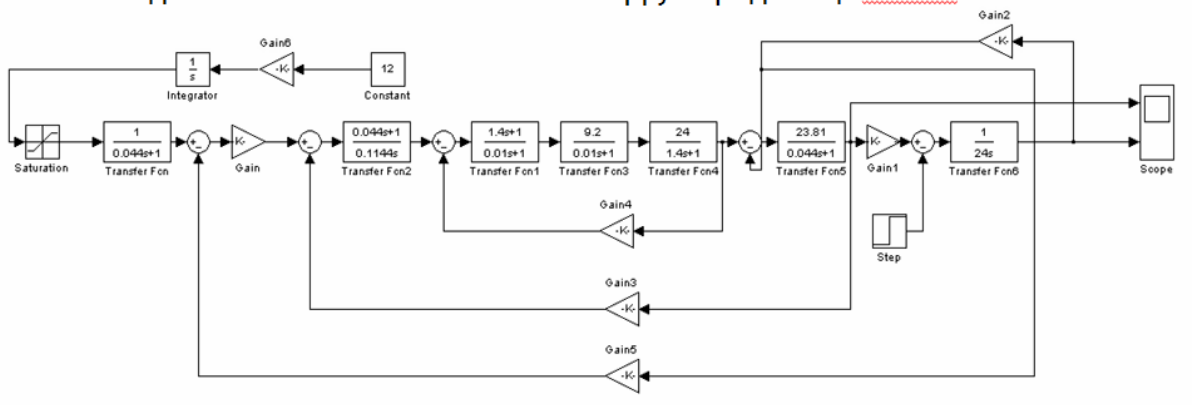
Характеристики
коефіцієнта потужності
електропривода при
різних видах
навантаження

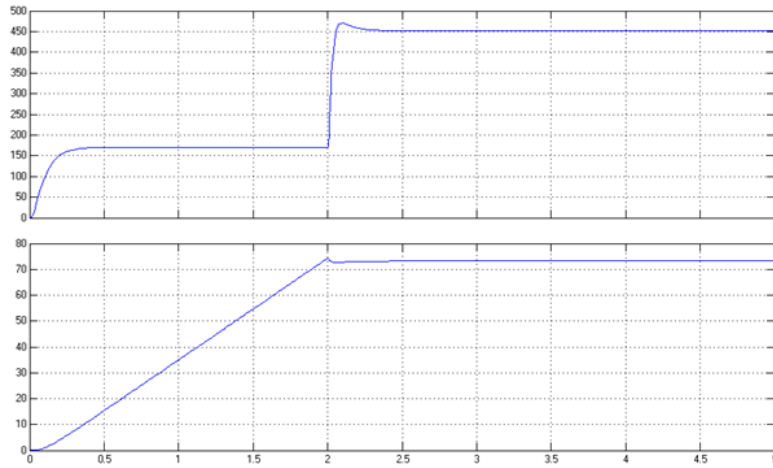


Трикуртна структурна схема електропривода



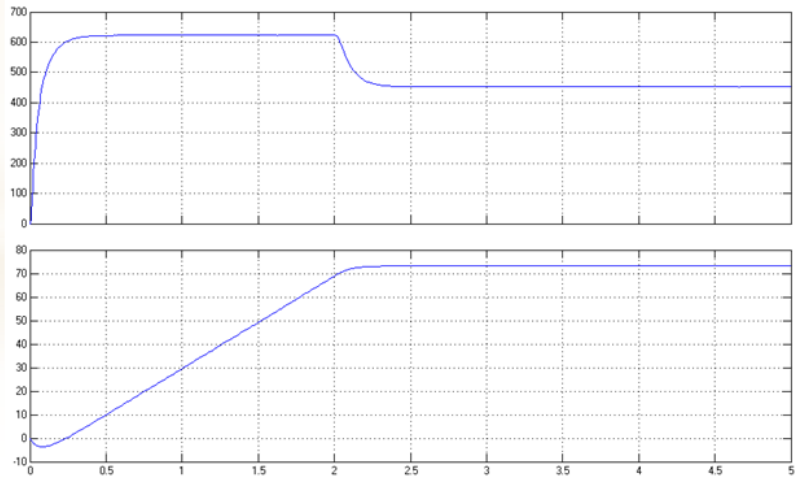
Модель системи ЕП за системою Г-Д у середовищі Matlab-Simulink



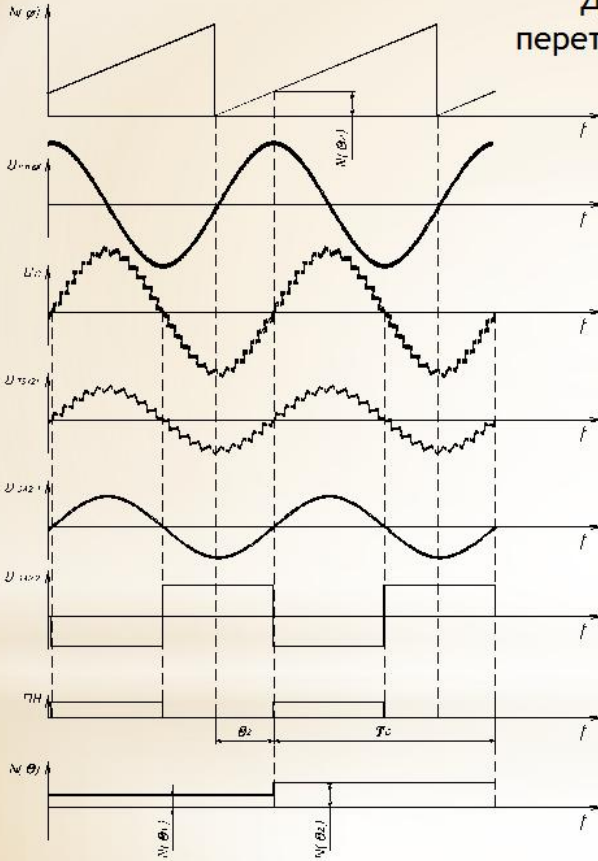


Розгін електродвигуна до
номінальної швидкості на
холостому ході та накид
номінального навантаження на 2с

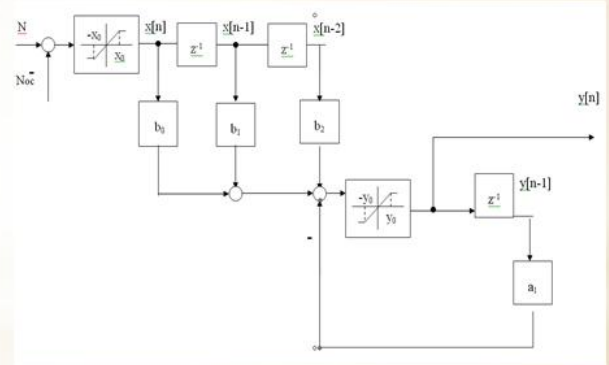
Розгін електродвигуна до
номінальної швидкості при
номінальному навантаженні



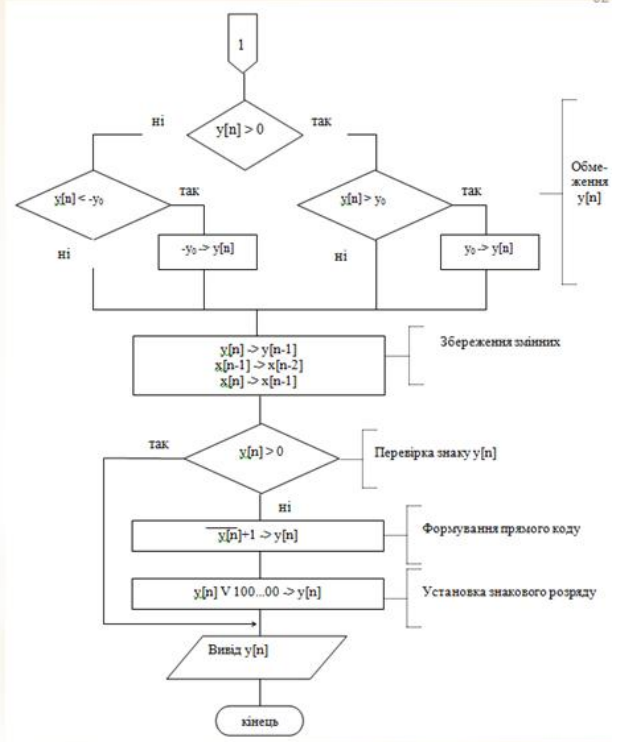
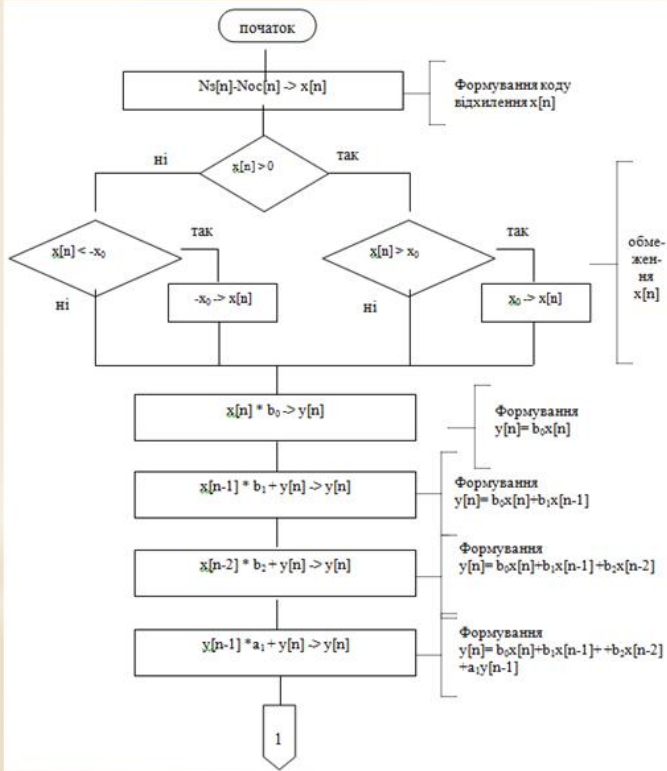
Діаграма роботи перетворювача фаза-код



Структура прямого програмування регулятора



Алгоритм програми регулювання електроприводів кар'єрного одноківшевого екскаватора ЕКГ-5



Висновки

13

Проведений аналіз показав, що існуючий електропривод екскаватора ЕКГ-5 забезпечує необхідну надійність, однак має значні недоліки: високі енерговитрати, недостатню точність і гнучкість керування, підвищений знос обладнання та невідповідність сучасним вимогам автоматизації. Це свідчить про його застарілість і потребу модернізації.

У конструкторській частині розроблено структуру частотно-керованого електропривода, виконано розрахунок основних параметрів та підібрано необхідні датчики. Запропонована система забезпечує підвищення енергоефективності, плавність регулювання та зменшення експлуатаційних витрат.

У розрахунковій частині створено математичні моделі розімкненої та замкненої систем керування, визначено передавальні коефіцієнти, сталі часу та основні характеристики. Аналіз підтвердив, що замкнена система з налаштованими регуляторами гарантує стабільну та надійну роботу.

У дослідницькій частині змодельовано динамічні режими, визначено показники якості регулювання та розроблено мікропроцесорну систему керування частотою обертання, що підтвердило ефективність запропонованих рішень.

Заміна застарілого електропривода на сучасний електропривод забезпечує зменшення енергоспоживання, підвищення точності та надійності, покращення динамічних характеристик і відповідність сучасним вимогам автоматизації. Отримані результати можуть бути впроваджені у модернізацію екскаваторів ЕКГ-5 та проєктування нових систем електроприводів гірничого обладнання.