

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка  
до випускної роботи магістра  
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

### ТЕМА ВИПУСКНОЇ РОБОТИ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОВОРОТУ ЕКСКАВАТОРА ЕКГ-8І  
З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ДІЙ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА

Виконав: студент групи ЕМО-23м

Керівник випускної роботи

Нормоконтролер

Декан ЕТФ

Гарант освітньої програми

Данило ЄРЬОМІН

д.т.н., проф. Валерій ТИТЮК

д.т.н., проф. Валерій ТИТЮК

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

д.т.н., проф. Станіслав ТОЛМАЧОВ

Кривий Ріг 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА  
ВИПУСКНУ РОБОТУ  
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Єр'оміну Данилу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження експлуатаційних характеристик електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8І з урахуванням впливу дій людини-оператора»

2. Строк подання здобувачем роботи : 5 грудня 2024 р.

3. Мета та завдання випускної роботи

Мета та завдання випускної роботи – обґрунтування можливості діагностування несправностей роторного кола асинхронного короткозамкненого двигуна при вимірюванні статорних величин; удосконалення математичної моделі асинхронного двигуна для вивчення параметричної асиметрії роторного кола на показники роботи АД, визначення діагностичних ознак аварійного стану білячої клітки асинхронного двигуна.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

---

---

---

---

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди презентації у кількості \_\_\_\_\_ штук \_\_\_\_\_

---

---

---

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Титюк В.К.	05.09.2024	10.10.2024
II	Титюк В.К.	05.09.2024	3.11.2024
III	Титюк В.К.	05.09.2024	25.11.2024

7. Календарний план виконання роботи та консультацій

№	Назва етапів роботи	Дата виконання
1	Огляд науково-технічної літератури з питань впливу людини-оператора на роботу ергатичних виробничих систем	28.09.2024
2	Формулювання об'єкта, предмета та мети дослідження	3.10.2024
3	Ваго-габаритні розміри екскаватора ЕКГ-8І та параметри його електро механічного обладнання	14.10.2024
4	Вирішення прямої та зворотної кінематичної задачі механічної частини екскаватора ЕКГ-8І	24.10.2024
5	Математичне моделювання екскаватора ЕКГ-8І з електроприводом по системі «генератор-двигун»	28.10.2024
6	Математичне моделювання екскаватора ЕКГ-8І з електроприводом по системі «тиристорний перетворювач-двигун»	3.11.2024
7	Математична модель людини-оператора	10.11.2024
8	Визначення впливу людини-оператора на техніко-економічні показники роботи екскаватора ЕКГ-8І	17.11.2024
9	Оформлення пояснювальної записки та презентації випускної роботи	05.12.2024

Дата видачі завдання 05.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Єршомін Д.О.  
(ПІБ)

Титюк В.К.  
(ПІБ)

Реферат	
Вступ	
Розділ 1 Системне уявлення про гірничовидобувні машини як ергатичні електромехатронні об'єкти	
1.1 Загальна характеристика проблеми подальшого удосконалення гірничо-видобувної техніки	
1.2 Узагальнення мехатронної концепції стосовно до кар'єрних екскаваторів	
1.3 Роль людини-оператора у ергатичних системах	
1.4 Динамічна ідентифікація людини-оператора	
1.4.1 Експериментальне дослідження динамічної моделі людини-оператора	
1.4.2 Динамічна ідентифікація людини-оператора передавальною функцією	
Висновки по розділу 1	
Розділ 2. Математичне моделювання електромеханічної системи екскаватора ЕКГ-8И	
2.1 Кінематичний аналіз механічної частини екскаватора конфігурації «пряма лопата»	
2.1.1 Постановка та вирішення прямої задачі кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата»	
2.1.2 Постановка та вирішення зворотної задачі кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата»	
2.2 Варіанти схемних рішень електромеханічної системи екскаватора	
2.2.1 Електропривод екскаватора ЕКГ-8И по системі «генератор-двигун»	
Розділ 2. Математичне моделювання електромеханічної системи екскаватора ЕКГ-8И	

2.1 Кінематичний аналіз механічної частини екскаватора конфігурації «пряма лопата»	
2.1.1 Постановка та вирішення прямої задачі кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата»	
2.1.2 Постановка та вирішення зворотної задачі кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата»	
2.2 Варіанти схемних рішень електромеханічної системи екскаватора	
2.2.1 Електропривод екскаватора ЕКГ-8И по системі «генератор-двигун»	
2.2.2 Електропривод екскаватора ЕКГ-8И по системі «тиристорний перетворювач двигун»	
Розділ 3 Визначення впливу людини-оператора на техніко-економічні показники роботи екскаватора	
3.1 Математичне моделювання замкненої системи позиціонування ковша екскаватора з різними системами електроприводу	
3.2 Регресійні моделі техніко-економічних показників виробничого циклу екскаватора	
Висновки по розділу 3	
Висновки по роботі	
Література	

## Реферат

\_\_ сторінок, \_\_ таблиць, \_\_ рисунків, \_\_ джерел літератури.

**Тема випускної роботи:** «Дослідження експлуатаційних характеристик електроприводу повороту екскаватора ЕКГ-8І з урахуванням впливу дій людини-оператора»

**Метою роботи** є розробка математичних моделей замкнутих систем керування ергатичними мехатронними системами гірничих машин, які враховують вплив людини-оператора в прямому контурі керування.

**Об'єктом дослідження** магістерської роботи є процеси електромеханічного перетворення у електромеханічній системі екскаватора за схемою «пряма лопата».

**Предметом дослідження** є вплив людини-оператора на техніко-економічні показники екскаватора при виконанні технологічних операцій.

Випускна робота присвячена вивченню питання впливу людини-оператора на техніко-економічні показники роботи екскаватора ЕКГ-8І.

Після обробки експериментальних даних за допомогою Matlab/System Identification Toolbox встановлено, що з достатньою точністю людина-оператор може бути змодельований аперіодичною ланкою першого порядку з запізненням.

Отримано рішення прямої і зворотної задачі кінематики для механічної частини екскаватора за схемою «пряма лопата». З використанням Matlab/Simulink створено повну математичну модель електромеханічної системи екскаватора з різними типами електроприводів та урахуванням впливу людини оператора. Показано, що циклове енергоспоживання екскаватора практично не залежить від типу електропривода. Тривалість технологічного циклу екскаватора з тиристорним електроприводом на 17 % менше порівняно

до екскаватора, обладнаного електроприводом по системі «генератор - двигун».

Отримано залежності циклового енергоспоживання та тривалості технологічного циклу від показників передавальної функції людини оператора.

У значному обсязі використані різноманітні методи дослідження, такі як математичні розрахунки, графічні побудови, математичні залежності та теоретичні положення з курсів «Теорія електропривода», «Електричні машини», «Теоретичні основи електротехніки», «Сучасні методи ідентифікації, моніторингу та діагностики електромеханічного обладнання».

**Ключові слова:** ЕРГАТИЧНА СИСТЕМА, ЛЮДИНА-ОПЕРАТОР, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, ЕКСКАВАТОР, КІНЕМАТИКА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.

## ВСТУП

Екксаватор – широко розповсюджена землерийна машина, призначена для видобутку та переміщення корисних копалин на транспортні засоби або у відвал. Екксаватори відіграють важливу роль у відкритій розробці рудних родовищ, застосовують під час меліоративного та дорожнього будівництва, днопоглиблювальних і портових роботах, спорудженні оборонних рубежів.

Найпотужніші екксаватори використовують в умовах відкритих гірничих робіт як для виконання розкривних робіт, так і для перевантаження гірничої маси і формування відвалів.

Передовий світовий досвід у галузі гірничого машинобудування показує, що домогтися якісно нових характеристик екксаваторів дає змогу мехатронна концепція системного об'єднання електромеханічних систем із комп'ютерними пристроями керування, вбудованими датчиками та інтерфейсами

Технічний прогрес сприяв зміні функціональної ролі людини з безпосереднього виконавця на оператора, основна функція якого полягає в контролі та управлінні ергатичними системами.

Типовим прикладом ергатичних систем у гірничодобувній промисловості є екксаватори різноманітних типів та інше гірничо-видобувне обладнання, роботою якого керує людина-оператор.

Наявність "людського фактора" в ергатичних системах часто трактують як їхній недолік. В ергатичних системах гірничодобувної промисловості негативний вплив людини-оператора проявляється у формі впливу кваліфікації людини-оператора на техніко-економічні показники виробничих процесів.

У зв'язку з цим, завдання розроблення математичних моделей замкнених систем керування ергатичними мехатронними системами гірничих машин, які враховують вплив людини-оператора в прямому контурі керування, підвищить точність та достовірність дослідження енергетичних процесів таких систем.



**Метою роботи** є розробка математичних моделей замкнутих систем керування ергатичними мехатронними системами гірничих машин, які враховують вплив людини-оператора в прямому контурі керування.

**Об'єктом дослідження** є процеси електромеханічного перетворення у електромеханічній системі екскаватора.

**Предметом дослідження** є вплив людини-оператора на техніко-економічні показники екскаватора при виконанні технологічних операцій.

# **Розділ 1 Системне уявлення про гірничовидобувні машини як ергатичні електромехатронні об'єкти**

## **1.1 Загальна характеристика проблеми подальшого удосконалення гірничо-видобувної техніки**

Найважливішою народногосподарською проблемою України є зменшення питомого енергоспоживання промислового виробництва, розвиток енергопостачання на базі власних джерел енергії. Гірничо-видобувна промисловість залишається одним з найзначніших споживачів електроенергії та потребує безперервних зусиль в області енергозбереження. Успішне розв'язання проблеми розвитку енергопостачання на базі власних джерел енергії може бути забезпечено на основі підвищення ефективності розроблення вугільних запасів шляхом зниження собівартості видобутку.

Зазначена мета може бути досягнута шляхом впровадженням якісно нової гірничої техніки, що вирізняється значним підвищенням продуктивності, надійності та безпеки використання, а також зниженням експлуатаційних витрат і енергоспоживання. Однак, традиційні підходи до створення гірничо-видобувної техніки, в тому числі і кар'єрних екскаваторів, обмежуються рамками електромеханічних систем і не забезпечують можливості реалізувати підвищення експлуатаційних характеристик на рівні різко зростаючих вимог ринку.

Передовий світовий досвід у галузі гірничого машинобудування показує, що домогтися якісно нових характеристик устаткування дає змогу мехатронна концепція системного об'єднання електромеханічних систем із комп'ютерними пристроями керування, вбудованими датчиками та інтерфейсами [1, 2].

Тому розроблення наукових засад робочих процесів гірничих машин як електромехатронних систем є актуальною науковою проблемою, яка має важливе народногосподарське значення.

Екскаватори відіграють важливу роль у відкритому розробленні рудних родовищ. Найпотужніші екскаватори використовують в умовах відкритих гірничих робіт як для виконання розкривних робіт, так і для перевантаження гірничої маси та формування відвалів [1].

У гірничій промисловості перехід до виробничої техніки нового покоління характеризується функціональним і конструктивним об'єднанням електромеханічних перетворювачів з енергетичними та інформаційними компонентами з високим рівнем організації процесів управління. Під час безперервного розвитку й ускладнення взаємопов'язаних електричних, механічних, електромеханічних і систем керування сучасна екскаваторна техніка трансформується в мехатронний комплекс [2]. Для мехатронних комплексів гірничих машин у зв'язку з їх значною встановленою потужністю особливе значення має енергетична ефективність їх функціонування.

Підвищення ефективності використання електричної енергії в промисловості і, отже, мехатронних системах гірничих машин - визначальний тренд розвитку технічних систем на найближчу перспективу [3].

## **1.2 Узагальнення мехатронної концепції стосовно до кар'єрних екскаваторів**

У загальному випадку гірнича машина складається з чотирьох підсистем, які реалізують відповідно наступні фундаментальні функції, властиві мехатронним системам:

- технологічна - перетворення вихідного матеріалу (сировини) на кінцевий продукт;
- енергетична - перетворення речовини або отриманої ззовні енергії на кінцевий вид енергії;

- управління - керуючий вплив на перші дві підсистеми за заданою програмою і на основі отриманої інформації про кількість і якість кінцевих продукту та енергії;

- планування - збирання інформації про вироблений продукт, визначення його необхідних кількісних і якісних показників і корекція керуючої програми.

Кожен елемент конструкції кар'єрного екскаватора має певне функціональне призначення, взаємозв'язок елементів конструкції, забезпечуючи функціонування машини в цілому. Усі елементи конструкції кар'єрного екскаватора можна класифікувати на:

- виконавчі механізми - здійснюють просторові рухи за заданими траєкторіями з метою забезпечення заданих силових впливів на навколишнє середовище. На таких елементах формується зовнішнє навантаження (зовнішнє збурення), що являє собою реакцію середовища на ці рухи. Для кар'єрного екскаватора можна виділити виконавчі механізми: механізми маніпулювання положенням ковша, гусенична ходова частина;

- силові перетворювачі енергії - здійснюють перетворення енергії під час її подачі до виконавчих механізмів. Як правило, вихідною є електрична енергія, її перетворення на механічну відбувається в електродвигунах, а потім за потреби - в гідравлічну і назад у насосах і різних гідродвигунах;

- передавальні елементи - здійснюють передачу енергії до допоміжних механізмів без зміни її виду, сюди можна віднести різні механізми, комутаційні пристрої гідроприводу та електроприводу;

- елементи управління - виконують функції контролю та управління роботою силових, перетворювачів і комутаційних пристроїв комбайна. Найширше застосування у світовій практиці знайшли електричні та електронні системи керування.

На рис. 1.1 наведено класифікацію елементів конструкції комбайна із зазначенням конкретних типів елементів у різних групах. Слід зазначити, що

на даному етапі проектування виїмкової техніки ведеться спочатку для силових систем (елементи конструкції I, II і IV груп), а потім виконується розробка елементів управління.

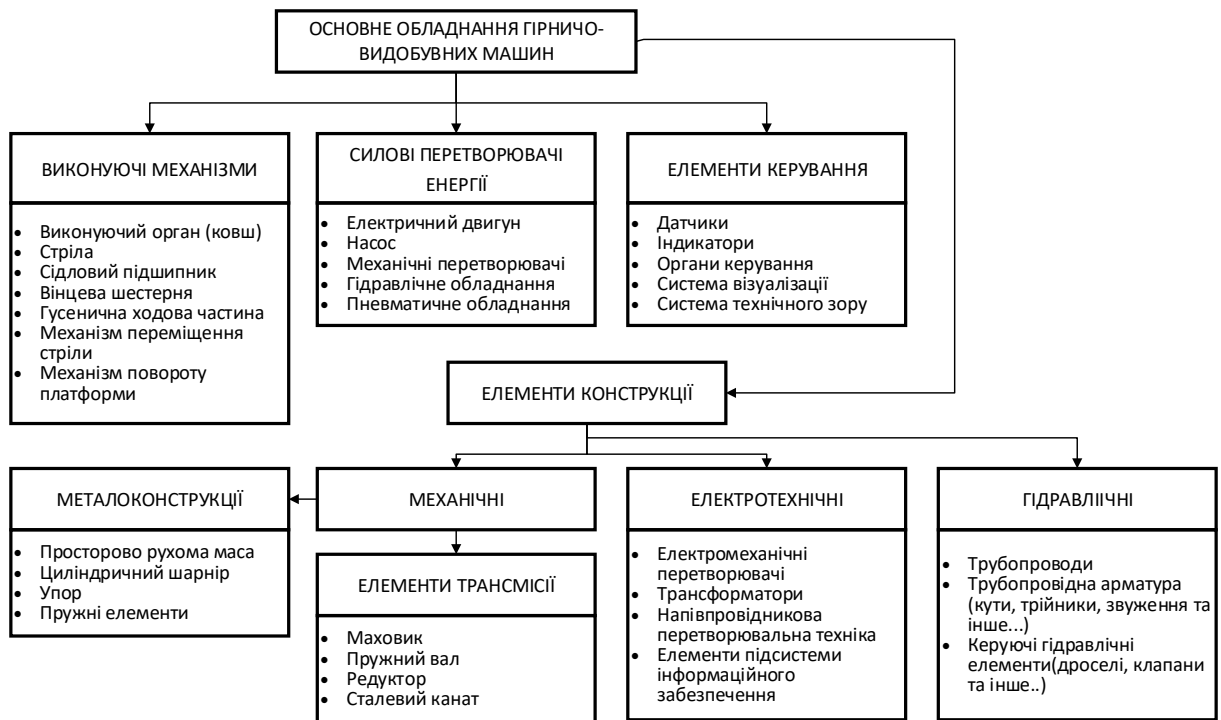


Рисунок 1.1 - Класифікація елементів основного обладнання гірничо-видобувних машин

### 1.3 Роль людини-оператора у ергатичних системах

Технічний прогрес сприяв зміні функціональної ролі людини з безпосереднього виконавця на оператора, основна функція якого полягає в контролі та управлінні ергатичними виробничими процесами в промисловості, транспорті, енергетиці [24].

Ергатичні системи широко поширені в сучасному промисловому виробництві. Типовим прикладом таких систем у гірничодобувній промисловості є екскаватори різноманітних типів, бурові станки та інше гірничо-видобувне обладнання, роботою якого керує людина-оператор [25].

Наявність "людського фактору" в ергатичних системах часто трактують як їхній недолік, чому є певні підтвердження. Від 40% до 80% нещасних випадків та надзвичайних ситуацій у різних сферах діяльності трапляються

через людський фактор, внаслідок невідповідності, несприятливих психологічних факторів та втоми [26, 27].

В ергатичних системах гірничодобувної промисловості негативний вплив людини-оператора проявляється у формі впливу кваліфікації людини-оператора на техніко-економічні показники виробничих процесів.

В роботі [28] наведено дані аналізу Міністерства енергетики США (DOE) щодо енергоспоживання гірничодобувної промисловості США. Існує потенціал для скорочення річного споживання енергії з 365 млрд кВт-год на рік до 169 млрд кВт-год на рік, що становить близько 46% поточного річного споживання енергії. З різноманітних факторів, що впливають на енергоспоживання гірничо-видобувного обладнання, практика та ефективність роботи оператора, ймовірно, є найдешевшим фактором, який можна змінити. Навчання операторів для покращення їхньої роботи є відносно дешевим і дієвим підходом у багатьох випадках [28].

Робота [29] присвячена статистичним дослідженням показників енергетичної ефективності роботи операторів гірничо-видобувного обладнання. Показано, що низький рівень кваліфікації оператора екскаватора може призводити до підвищення питомого енергоспоживання на 30-40 % [29].

Людина-оператор екскаватора виконує не тільки функцію вироблення оптимальної траєкторії руху робочих органів екскаватора, а й виробляє послідовність дій, спрямованих на реалізацію обраної траєкторії. Він є важливою частиною керівної системи і функціонує як складний механізм, що обробляє інформацію з різних джерел. Оператор екскаватора отримує й оцінює зовнішні дані, аналізує їх, перетворює на керуючі команди з урахуванням навичок і знань. Людина-оператор виконує двоєдине завдання вироблення оптимальної траєкторії руху робочих органів екскаватора і реалізації цієї траєкторії шляхом впливу на органи управління електроприводами окремих механізмів.

Абстрагуючись від проблеми вироблення оптимальної траєкторії руху екскаватора, у замкненій системі керування роботою екскаватора людину-

оператора слід розглядати як нелінійну нестационарну динамічну ланку системи керування, рис. 1.2.

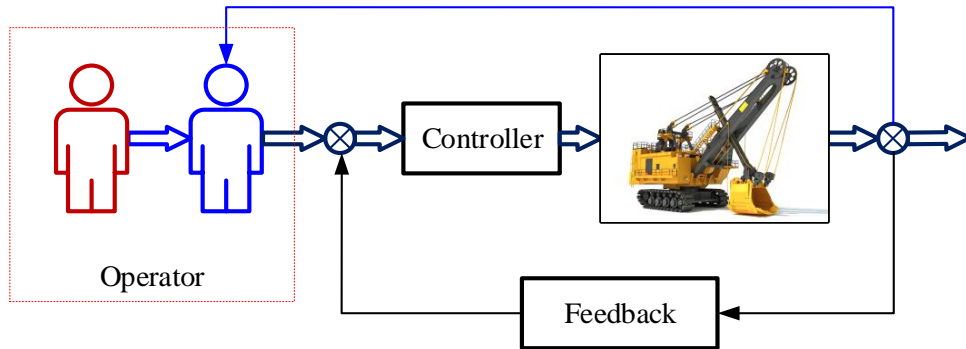


Рисунок 1.2 Укрупнена структурна схема ергатичної системи керування екскаватором

## 1.4 Динамічна ідентифікація людини-оператора

### 1.4.1 Експериментальне дослідження динамічної моделі людини-оператора

Зміст експериментального дослідження полягав у реєстрації реакції оператора на зовнішній сигнал і визначенні динамічних характеристик цієї реакції.

Зовнішній сигнал генерувався в моделі MATLAB/Simulink, рис. 1.3.

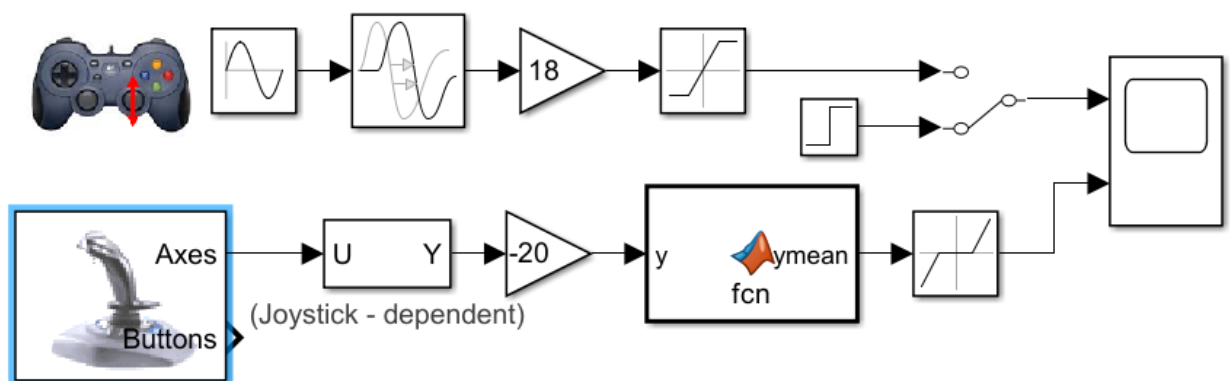


Рисунок 1.3 – Модель MATLAB/Simulink для проведення експериментального дослідження

Завданням оператора було відстеження зовнішнього сигналу за допомогою джойстика. Під час досліджень використовували ігрові джойстики геймпадів типу Logitech F310 і MSI Force GC30, рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд геймпадів, використаних в експериментальному дослідженні; а - Logitech F310; б - MSI Force GC30

Реєстрація дій оператора записувалася в спеціальну змінну в MATLAB Workspace.

На рис. 1.5 наведено приклад того, який вигляд має процес завдання зовнішнього впливу і реакції оператора в пропонованій моделі.

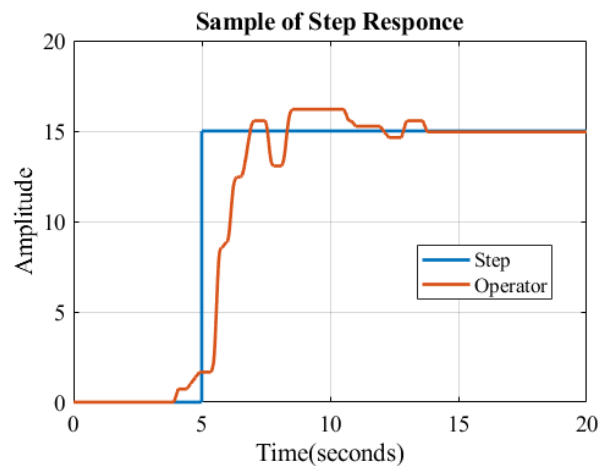


Рисунок 1.5 – Приклад реалізації експерименту реєстрації дій оператора

Запропонований підхід дає змогу досліджувати роботу оператора за різних входніх впливів, динамічно розширювати базу результатів експериментального дослідження.



Під час експериментального дослідження оператора пропонували дві форми зовнішнього сигналу:

1. Ступінчастий сигнал, увімкнення якого відбувалося в строго заданий момент часу  $T_S = 5$  сек (сигнал типу **ТС**).

2. Ступінчастий сигнал, увімкнення якого відбувалося у випадковий момент часу (сигнал типу **ТВ**).

Динамічну модель оператора можемо отримано шляхом динамічної ідентифікації за результатами експериментального дослідження,

### 1.4.2 Динамічна ідентифікація людини-оператора передавальною функцією

Для встановлення структури передавальної функції людини-оператора доцільно скористатися вихідними даними із зовнішнім сигналом типу **ТС**.

Для виконання структурно-параметричної ідентифікації динамічної моделі оператора була використана вбудована функція **procest** бібліотеки SIT (System Identification Toolbox®) програми MATLAB.

Таблиця 1.1 – Математичні моделі оператора, які досліджувалися за результатами обробки експериментальних даних з зовнішнім сигналом типа **ТС**.

пп	Назва моделі	Передавальна функція моделі
1	P1D	$G(s) = \frac{K_P}{1 + T_{P1} \cdot s} \cdot e^{-T_d \cdot s}$
2	P2DU	$G(s) = \frac{K_P}{1 + 2 \cdot \xi \cdot T_W \cdot s + (T_W \cdot s)^2} \cdot e^{-T_d \cdot s}$
3	P3DU	$G(s) = \frac{K_P}{(1 + 2 \cdot \xi \cdot T_W \cdot s + (T_W \cdot s)^2) \cdot (1 + T_{P3} \cdot s)} \cdot e^{-T_d \cdot s}$
4	P1DZ	$G(s) = \frac{K_P \cdot (1 + T_Z \cdot s)}{1 + T_{P1} \cdot s} \cdot e^{-T_d \cdot s}$

Встановлення доцільної структури передавальної функції людини-оператора виконується таким чином. Усі відомі реалізації експериментів із зовнішнім сигналом типу **ТС** було піддано усередненню в часі.

Отриману усереднену криву реакції оператора представлено на рис.

1.6.

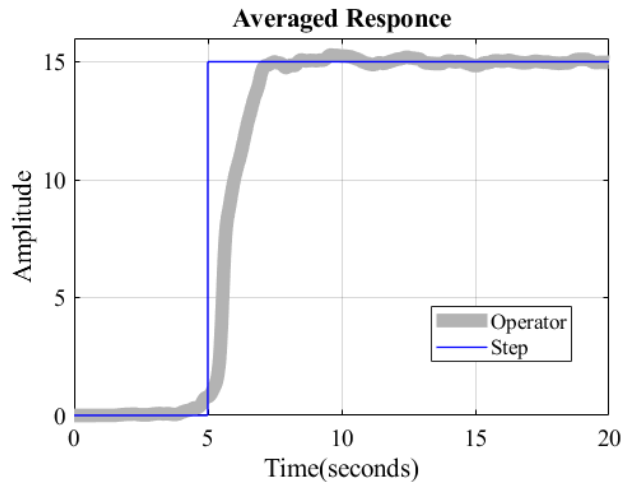


Рисунок 1.6 – Усереднена за часом реакція оператора на зовнішній сигнал типу **ТС**

Для кожного типу динамічної моделі табл. 1 було виконано процедуру ідентифікації. Визначено числові значення параметрів моделі, а також коефіцієнт регресії моделі  $R$ . Отримані значення коефіцієнта регресії для різних моделей наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 Значення коефіцієнта регресії для динамічних моделей людини оператора

пп	Назва моделі	Коефіцієнт регресії
1	P1D	96,60 %
2	P2DU	97,30 %

3	P3DU	97,30 %
4	P1DZ	96,50 %

Як випливає з отриманих даних, усі розглянуті моделі мають вельми високий коефіцієнт регресії (понад 95 %). Тому для подальших досліджень цілком достатньо використовувати найпростішу з розглянутих моделей - динамічну модель типу P1D з передавальною функцією

$$G(s) = \frac{K_P}{1 + T_{P1} \cdot s} \cdot e^{-T_d \cdot s}$$

Для уточнення значення параметрів динамічної моделі оператора було виконано ідентифікацію даних кожного експерименту із зовнішнім впливом типу TV моделлю P1D з подальшим статистичним опрацюванням значень окремих параметрів за множиною результатів.

Отримані результати параметричної ідентифікації моделі оператора типу P1D наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 Результати параметричної ідентифікації моделі оператора типу P1D

Параметр	TV	
	Усереднення за множиною	
	Середнє значення, $\mu$	Середньоквадратичне відхилення, $\sigma$
$K_P$	1,004	0,0098
$T_{P1}$	0,25349	0,14967
$T_D$	0,57644	0,15444
R, %	92,62	6,0382

Деяка відмінність в отриманих числових значеннях окремих параметрів пояснюється відмінністю умов проведення експериментів із зовнішнім сигналом різних типів.

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень встановлено, що передавальна функція людини-оператора матиме наступну форму:

$$G_s(s) = \frac{1}{0,25349 \cdot s + 1} \cdot e^{-0,57644 \cdot s}$$

Слід враховувати, що параметри цієї передавальної функції можуть суттєво змінюватися на протязі робочого дня, що пов'язане з втомою оператора, впливом оточуючого середовища та інших факторів, що впливають на психо-фізіологічний стан людини.

### **Висновки по розділу 1**

У першому розділі розвинуто уявлення про сучасну гірничо-видобувну техніку, зокрема екскаватори, як про ергатичні електромехатронні комплекси, що вирізняються значним підвищенням продуктивності, надійності та безпеки використання, а також зниженням експлуатаційних витрат і енергоспоживання.

Тому розроблення наукових засад робочих процесів гірничих машин як електромехатронних систем є актуальною науковою проблемою, яка має важливе народногосподарське значення.

Ергатичні системи широко поширені в сучасному промисловому виробництві. Типовим прикладом таких систем у гірничодобувній промисловості є екскаватори, роботою якого керує людина-оператор. Вплив "людського фактору" на роботу ергатичних систем часто має негативні наслідки, що підтверджується дослідженнями, виконаними у науковій літературі. Людина-оператор виконує двоєдине завдання вироблення оптимальної траєкторії руху робочих органів екскаватора і реалізації цієї траєкторії шляхом впливу на органи управління електроприводами окремих механізмів. У замкненій системі керування роботою екскаватора людину-оператора слід розглядати як нелінійну нестационарну динамічну ланку системи керування. На основі експериментальних досліджень людини оператора обґрунтовано можливість

представлення передавальної функції людини-оператора у вигляді аперіодичної ланки з транспортним запізненням. З використанням методів динамічної ідентифікації експериментальних даних отримано оцінки числових характеристик сталої часу та сталої запізнення передавальної функції людини-оператора.

# **Розділ 2. Математичне моделювання електромеханічної системи екскаватора ЕКГ-8И**

## **2.1 Кінематичний аналіз механічної частини екскаватора конфігурації «пряма лопата»**

Під час виконання робочого циклу екскаватор здійснює три основні рухи: по-перше, вертикальне переміщення ковша при його наповненні та звільненні (реалізується механізмом підйому); по-друге, горизонтальне лінійне переміщення робочого органу для копання та розвантаження (забезпечується механізмом напору); по-третє, обертальний рух платформи для позиціонування у місці розвантаження або копання (виконується механізмом повороту). Важливо зазначити, що механізм пересування не включається до безпосереднього робочого циклу, оскільки переміщення екскаватора відбувається окремо від основних робочих операцій.

Управління рухом робочих органів екскаватора передбачає розв'язання класичних кінематичних задач, характерних для електромехатронних систем. Це включає два ключові аспекти: визначення просторового положення ковша залежно від заданих параметрів механізмів напору, підйому та повороту (пряме кінематичне завдання) та встановлення положень цих механізмів відповідно до просторової позиції ковша (зворотне кінематичне завдання). Специфічна складність такого позиціонування полягає в тому, що різні механізми реалізують неоднорідні типи рухів, а їхні осі обертання не мають просторового суміщення.

На рисунку 2.1 зображено спрощену кінематичну схему механізмів екскаватора конфігурації "пряма лопата". Просторове положення ковша екскаватора може бути повністю охарактеризоване тривимірними координатами

центральної точки ковша К.

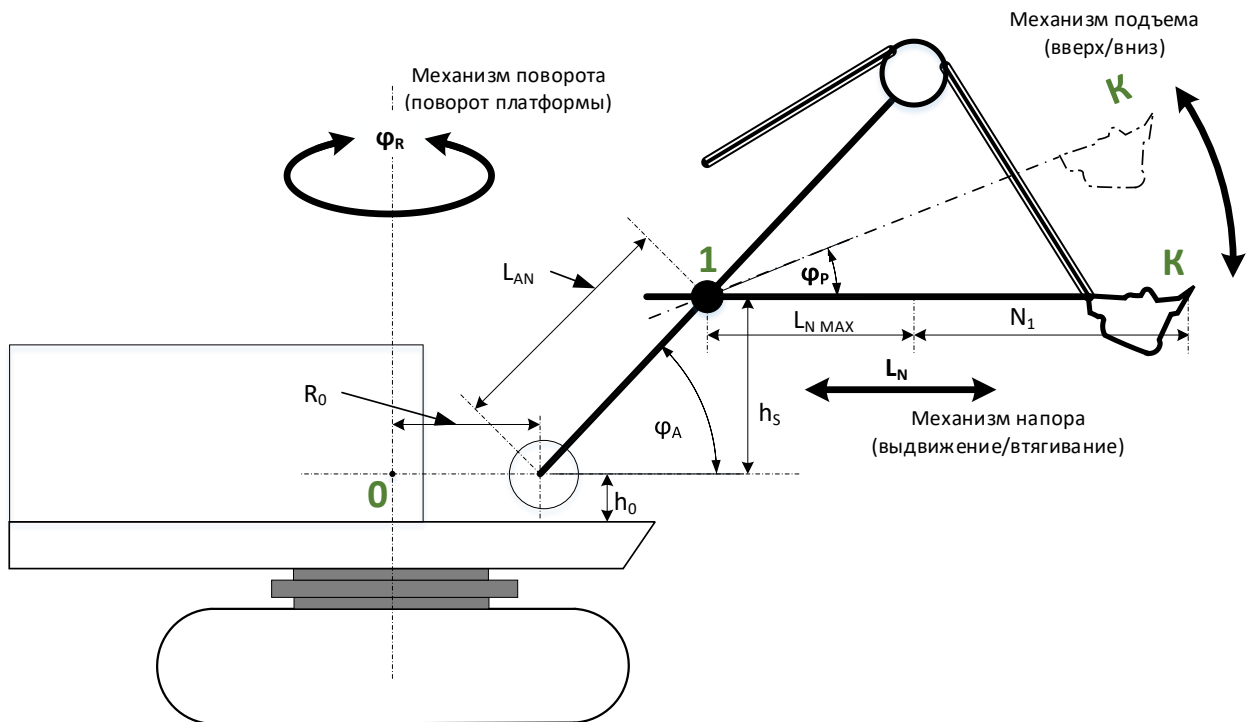


Рисунок 2.1 – Спрощена кінематична схема механічної частини екскаватора конфігурації «пряма лопата»

Підняття лопати екскаватора реалізується через зміну кута обертання  $\varphi_P$  навколо осі, яка проходить через точку 1 перпендикулярно площині зображення. Висунення та втягування лопати екскаватора відбувається через лінійне переміщення в сідловому підшипнику, розташованому в точці 1, що супроводжується лінійним переміщенням лопати  $L_N$ . Обертання платформи екскаватора здійснюється навколо вертикальної осі, що проходить через її центр мас, шляхом зміни кута повороту  $\varphi_T$ .

Рисунок 2.2 показує варіанти розташування стріли і лопати екскаватора для різних граничних значень кута підйому лопати екскаватора  $\varphi_P$  та лінійного переміщення лопати екскаватора  $L_N$ .

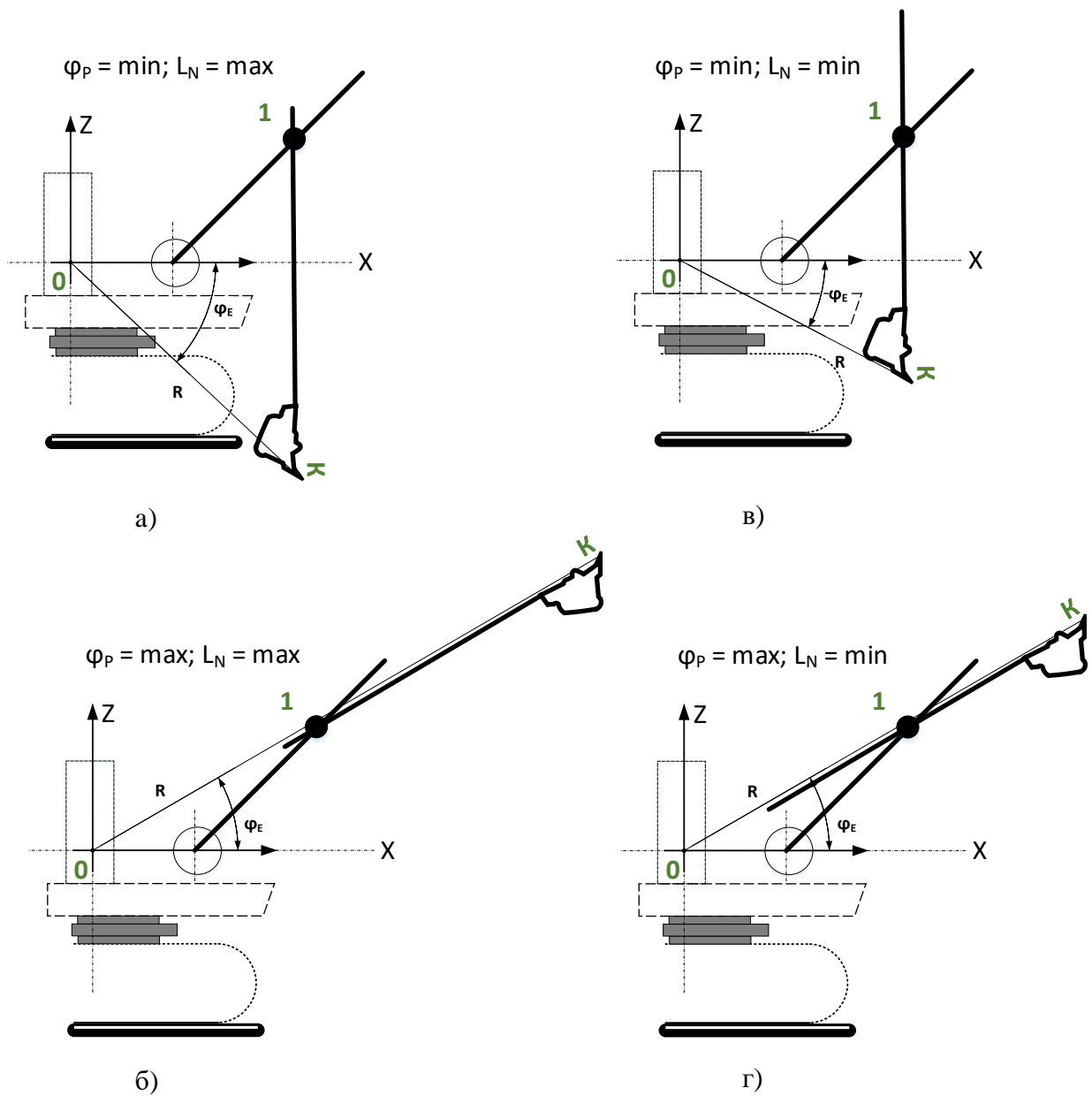


Рисунок 2.2 – Схема взаємного розташування стріли та лопати екскаватора при різних граничних значеннях кута підйому лопати та лінійного переміщення лопати  $L_N$ : а)  $\varphi_P = \min; L_N = \max$ ; б)  $\varphi_P = \max; L_N = \max$ ; в)  $\varphi_P = \max; L_N = \max$ ; г)  $\varphi_P = \max; L_N = \min$ .

Параметри кінематичної схеми для екскаватора ЕКГ-8И наведено в табл.2.1.



Таблиця 2.1 – Параметри кінематичної схеми для екскаватора ЕКГ-8И.

Параметр	Значення
Довжина стріли, м	13.35
Кут нахилу стріли, град	47
Довжина рукояті, м	11.425
Хід рукояті, м	4.3
R0 Відстань від осі обертання екскаватора до точки кріплення п'яти стріли, м	
N1 Довжина ділянки рукояті, що не бере участі в ході рукояті, м	
LAN – Відстань від точки кріплення п'яти стріли до сідлового підшипника, м	
Мінімальне значення ходу рукояті, м	0
Максимальне значення ходу рукояті, м	4,3
Мінімальне значення кута підйому, град	-90
Максимальне значення кута підйому, град	45
Мінімальне значення кута повороту, град	0
Максимальне значення кута повороту, град (визначається параметрами забою екскаватора)	120

Оскільки основні механізми екскаватора здійснюють два непов'язаних обертальних рухи, то доцільно для аналізу руху цих робочих органів екскаватора використати сферичну систему координат. Центр цієї сферичної системи координат екскаватора розмістимо у точці «О», що знаходиться на осі обертання платформи та на висоті кріплення п'яти стріли, рис.2.3.

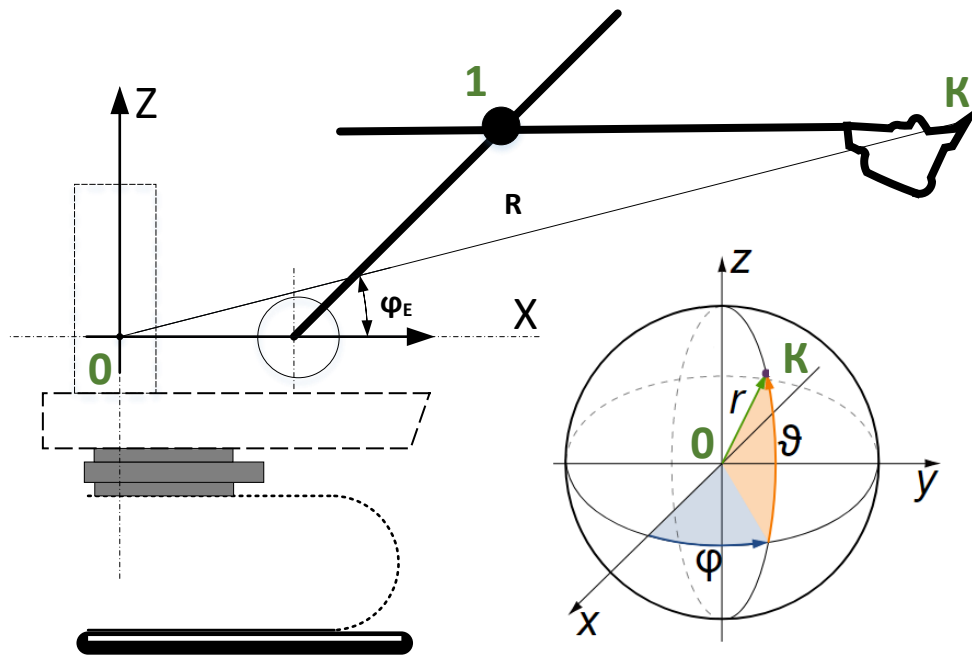


Рисунок 2.3 – Сферична система координат, пов'язана з екскаватором

При обраному виборі розташування центру координатної системи, координата  $\varphi$  співпадатиме з кутом повороту платформи екскаватора  $\varphi_T$ , координата  $r$  буде дорівнювати довжині відтинка  $OK$ , координата  $\vartheta$  - це кут  $KOX$  (кут  $\varphi_E$ ).

При обраному розташуванні центру сферичної системи координат та напрямках декартової ортогональної системи координат, рівень стояння екскаватора матиме від'ємне значення вертикальної координати  $Z$ .

### 2.1.1 Постановка та вирішення прямої задачі кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата»

Пряма задача кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата» формулюється наступним чином. За відомими значеннями положення окремих механізмів екскаватора, а саме лінійного переміщення лопати екскаватора  $L_N$ , куту підйому стріли екскаватора  $\varphi_P$ , куту повороту платформи екскаватора  $\varphi_T$ , визначити просторові координати точки положення ковша  $K(X, Y, Z)$  у декартовій системі координат.

З рисунку 2.3 за геометричними міркуваннями визначаємо координати точки К у декартовій системі координат  $ZOY$ .

$$\begin{cases} K_X = R_0 + L_{AN} \cdot \cos(\varphi_A) + (L_N + N_1) \cdot \cos(\varphi_P) \\ K_Z = L_{AN} \cdot \sin(\varphi_A) + (L_N + N_1) \cdot \sin(\varphi_P) \end{cases} \quad (2.1)$$

З урахуванням (2.1) координати точки К у сферичній системі координат можуть бути розраховані за такими виразами:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{K_X^2 + K_Z^2} \\ \vartheta &= \arctan(K_Z / K_X) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Перевід сферичних координат точки К до тривимірних декартових координат реалізується з використанням загальновідомих математичних перетворень:

$$\begin{cases} X = r \cdot \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi_T) \\ Y = r \cdot \cos(\vartheta) \cdot \sin(\varphi_T) \\ Z = r \cdot \sin(\vartheta) \end{cases} \quad (2.3)$$

Наведені вирази (2.1 – 2.3) визначають повне рішення прямої задачі кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата» та дозволяють визначати декартові координати точки розташування ковша К ( $X, Y, Z$ ) за відомими значеннями положення окремих механізмів екскаватора ( $L_N, \varphi_P, \varphi_T$ ).

### **2.1.2 Постановка та вирішення зворотної задачі кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата»**

Зворотна задача кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата» формулюється наступним чином. За відомими значеннями просторових декартових координат точки розташування ковша К ( $X, Y, Z$ ) необхідно визначити положення окремих механізмів екскаватора ( $L_N, \varphi_P, \varphi_T$ ).

Перетворення просторових декартових координат точки розташування ковша К ( $X, Y, Z$ ) до сферичних координат здійснюється за допомогою відомих з математики виразів:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_T = a \tan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ \vartheta = a \tan\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) \\ r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Враховуючи вираз (2.2), отримаємо такі рівняння:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_X = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\vartheta)}} \\ K_Z = \frac{\operatorname{tg}(\vartheta)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\vartheta)}} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Використовуючи рівняння (2.1) отримуємо наступні вирази:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_P = a \tan\left(\frac{K_Z - L_{AN} \cdot \sin(\varphi_A)}{K_X - R_0 - L_{AN} \cdot \cos(\varphi_A)}\right) \\ L_N = \frac{K_X - R_0 - L_{AN} \cdot \cos(\varphi_A)}{\cos(\varphi_P)} - N_1 \\ \varphi_T = a \tan\left(\frac{Y}{X}\right) \end{array} \right. \quad (2.6)$$

У процесі розв'язання оберненої задачі кінематики екскаватора постає важливе обмеження: не всі точки просторових координат (X, Y, Z) є фізично досяжними внаслідок існуючих конструктивних обмежень кінематичної схеми екскаватора.

Для урахування цих обмежень рівняння (2.4 – 2.6) необхідно доповнити додатковими обмеженнями:

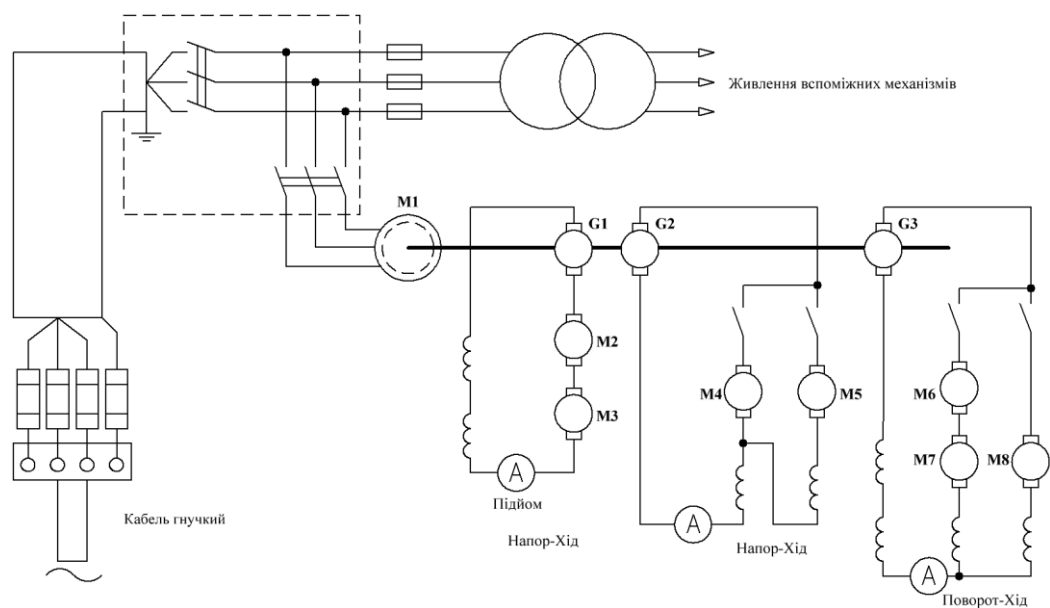
$$\left\{ \begin{array}{l} L_{NMIN} \leq L_N \leq L_{NMAX} \\ \varphi_{PMIN} \leq \varphi_P \leq \varphi_{PMAX} \\ \varphi_{TMIN} \leq \varphi_T \leq \varphi_{TMAX} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Вирази (2.4 – 2.6) з урахуванням додаткових обмежень (2.7) утворюють замкнуте рішення зворотної задачі кінематики екскаватора конфігурації «пряма лопата».

## 2.2 Варіанти схемних рішень електромеханічної системи екскаватора

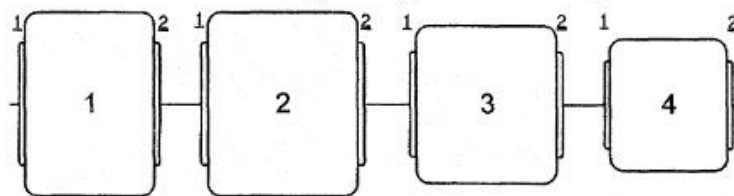
### 2.2.1 Електропривод екскаватора ЕКГ-8И по системі «генератор-двигун»

Принципова електрична схема головних кіл екскаватора ЕКГ-8И при використанні електроприводу по системі Г-Д зображена на рис.2.4, а. Механічна схема з'єднання окремих елементів перетворювального агрегату екскаватора ЕКГ-8И зображена на рисунку 2.4, б.



а)

#### «ЭКГ-8И» Перетворюючий агрегат



- 1 - Генератор підйому «ПЭМ-151-8К»
- 2 - Синхронний двигун «СДЭ2-15-34-6»
- 3 - Генератор повороту «ПЭМ-2000М»
- 4 - Генератор напору «ПЭМ141-4К-2»

б)

Рисунок 2.4 – Схеми екскаватора ЕКГ-8И по системі Г-Д: а - принципова електрична схема головних кіл; б - механічна схема з'єднань перетворювального агрегату екскаватора

Загальний синхронний двигун забезпечує обертання всіх трьох генераторів постійного струму. При цьому електр оприводи механізмів напору та обертання є двомоторними, тоді як механізм напору - одномоторним.

Для комплексного моделювання електромеханічної системи екскаватора необхідно виконати розроблення математичних моделей електр оприводів окремих механізмів за схемою «генератор-двигун», а також змоделювати приводний синхронний двигун.

Для створення повноцінної математичної моделі електромеханічної системи екскаватора буде використано програмне середовище MATLAB/Simulink, яке має перевірені компоненти для моделювання електричних машинно-перетворювальних систем з можливістю функціонування у генераторному та двигунному режимах.

Різниця у моделюванні генератора та двигуна постійного струму при використанні блока DC Machine з бібліотеки SimPowerSystems полягає у зміні типу механічного входу (Mechanical input) бібліотечного блока, рис. 2.5, При моделюванні двигуна постійного струму необхідно встановити налаштування входу (Mechanical input) у значення Torque TL (момент опору), а для генератора постійного струму – необхідно встановити налаштування входу (Mechanical input) у значення Speed  $w$  (кутова швидкість).

### **2.2.2 Електропривод екскаватора ЕКГ-8И по системі «тиристорний перетворювач - двигун»**

На рис.2.5 наведено принципову електричну схему живлення екскаватора ЕКГ-8И з регульованим електроприводом по системі «тиристорний перетворювач - двигун».

Ця принципова схема слугує основою для математичного моделювання електромеханічної системи екскаватора з регульованим електроприводом по системі «тиристорний перетворювач - двигун».

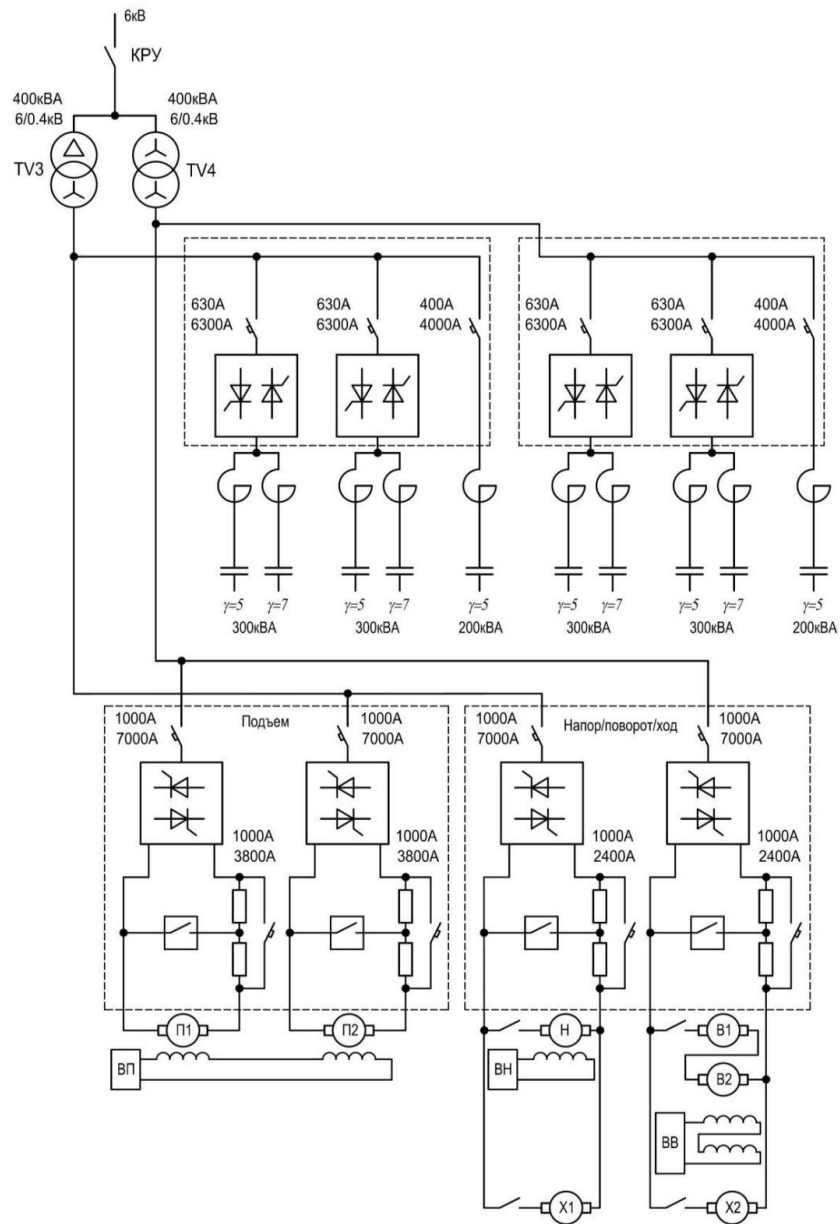


Рисунок 2.5 – Принципова схема живлення екскаватора ЕКГ-8И з регульованим електроприводом по системі «тиристорний перетворювач - двигун»

## 2.3 Технічні характеристики електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-8И

### 2.3.4 Приводний синхронний двигун

Паспортні дані головного синхронного двигуна екскаватора ЕКГ-8И наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані приводного головного синхронного двигуна екскаватора ЕКГ-8И.

Тип	СДЭ2-15-34-6-У2
Номінальна потужність	630 кВт
Кількість фаз	3
Частота струму	50 Гц
Номінальна потужність	630 кВт
Режим роботи	S1
Частота обертання	1000 об./хв.
Струм статора	75 А
Номінальна напруга	6 Кв
Струм збудження	270 А
Напруга збудження	36 В
Коефіцієнт навантаження, випере- джаючий	0.8-0.9
Клас ізоляції	В
Вага	5100 кг
Ступінь захисту	IP21
ККД	94.2%

### 2.3.5 Генератори постійного струму екскаватора ЕКГ-8И

Електроприводи основних механізмів екскаватора отримують живлення від власних генераторів постійного струму, паспортні дані яких наведено у табл.2.3.



Таблиця 2.3. Технічні характеристики генераторів постійного струму екскаватора ЕКГ-8И

№	Механізм	Підйом	Напор	Поворот
1	Тип генератора	ПЭМ-151-8К	ПЭМ-2000М	ПЭМ-141-4К
2	Номінальна потужність генератора, кВт	500	115	250
3	Номінальна швидкість обертання, об/хв	1000	1000	1000
4	Номінальна напруга якоря, В	560	330	630
5	Номінальний струм якоря, А	895	348	397
6	Номінальний ККД, %	0,932	0,92	0,925
7	Число пар полюсів	3	2	2
8	Опір обмоток якоря, $R_{яг}$ , Ом	0,0075	0,0112	0,0355
9	Опір додаткових полюсів $R_{дпг}$ , Ом	0,00153	0,00385	0,0054
10	Опір компенсаційної обмотки $R_{ког}$ , Ом	0,00516		0,0139

### 2.3.6 Двигуни постійного струму екскаватора ЕКГ-8И

Таблиця 2.4 містить паспортні дані двигунів постійного струму основних механізмів екскаватора ЕКГ-8И.

Таблиця 2.4. Технічні характеристики та електромагнітні параметри приводних двигунів постійного струму екскаватора ЕКГ-8И.

Механізм	Підйом	Напор	Поворот
Тип двигуна	2хДЭ-816	ДЭ-816	2хВЭ-812
Номінальна потужність, кВт	2х190	100	2х100
Номінальна швидкість обертання, об/хв	720	750	750
Номінальна напруга, В	2 х 300	305	2х305
Кількість пар полюсів	2	2	2
Опір обмотки якоря, Ом	2 х 0,0055	0,014	2х0,014
Опір додаткових полюсів, Ом	0,0032	0,009	2х0,009

## 2.4 Структурна схема системи автоматичного позиціонування ковша екскаватора

Отримані вище вирази для вирішення прямої та зворотної задачі кінематики екскаватора «пряма лопата» дозволяють перейти до реалізації замкненої системи переміщення ковша екскаватора.

На рис.2.6 наведено запропоновану укрупнену структурну схему замкнутої САУ положенням ковша екскаватора, що містить підсистему формування потрібної траєкторії руху ковша, визначення завдання на положення окремих механізмів екскаватора шляхом розв'язування оберненої задачі кінематики екскаватора, замкнутих систем керування положенням окремих механізмів, підсистеми обчислення споживаної електроенергії від живлячої мережі.

Обчислювані під час математичного моделювання положення окремих механізмів екскаватора за допомогою рівнянь (2.1-2.3) для прямої задачі кінематики дають змогу обчислити поточне положення ковша в тривимірному просторі та використовувати отримані дані для реалізації замкненої системи керування положенням ковша екскаватора.

Задаючи необхідну траєкторію переміщення ковша в тривимірному просторі у вигляді масиву точок, через які має пройти ківш, ми за допомогою рівнянь розв'язання оберненої задачі кінематики (2.4-2.7) обчислюємо необхідні завдання для положення окремих механізмів екскаватора, які й відпрацьовують замкнені системи керування положенням окремих механізмів.

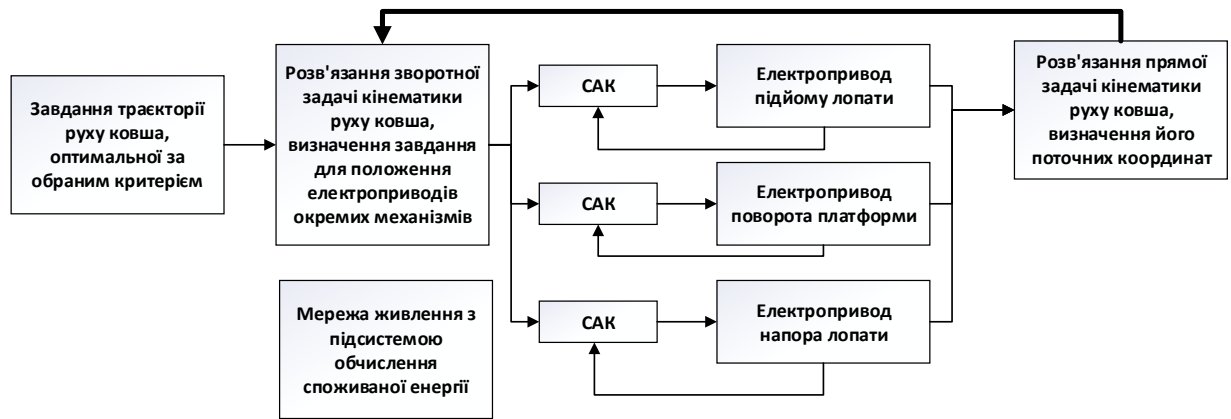


Рисунок 2.6 - Укрупнена структурна схема замкнутої САУ положенням ковша екскаватора

Технологічний цикл переміщення вантажу екскаватором має три обов'язкові просторові позначки траєкторії руху ковша: перша точка - місце започаткування копання, друга точка - завершення процесу копання, третя точка - вивантаження матеріалу в транспортний засіб.

Траєкторія переміщення ковша між другою та третьою точками, а також між третьою та першою точками може бути варіативною. Безпосередньо процес переміщення в цих проміжках здійснюється під контролем машиніста, причому показники енергоспоживання екскаватора безпосередньо корелюють з професійною майстерністю оператора.

## Висновки по розділу 2

У другому розділі розглянуто рух механічної частини екскаватора конфігурації «пряма лопата» у сферичній системі координат, отримано рішення прямої та зворотної задачі кінематики екскаватора, що дає змогу перетворити задачу керування положенням ковша екскаватора у задачу керування положенням окремих механізмів екскаватора.

Розглянуто принципові схеми живлення силової частини екскаватора ЕКГ-8И з електроприводами різних типів: за системою «генератор - двигун постійного струму» та за системою «тиристорний перетворювач – двигун

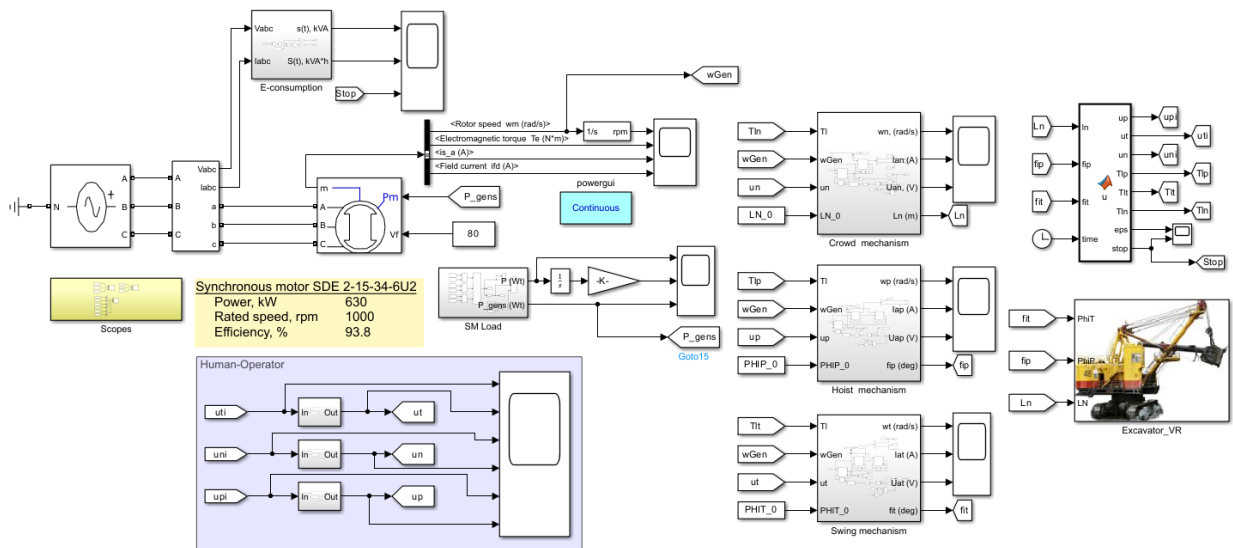
постійного струму». Наведено технічні характеристики силового обладнання, необхідні для визначення параметрів схеми заміщення приводних електродвигунів.

Запропоновано структурну схему замкнутої САУ положенням ковша екскаватора, що містить підсистему формування потрібної траєкторії руху ковша, визначення завдання на положення окремих механізмів екскаватора шляхом розв'язування оберненої задачі кінематики екскаватора, замкнутих систем керування положенням окремих механізмів, підсистеми обчислення споживаної електроенергії від живлячої мережі.

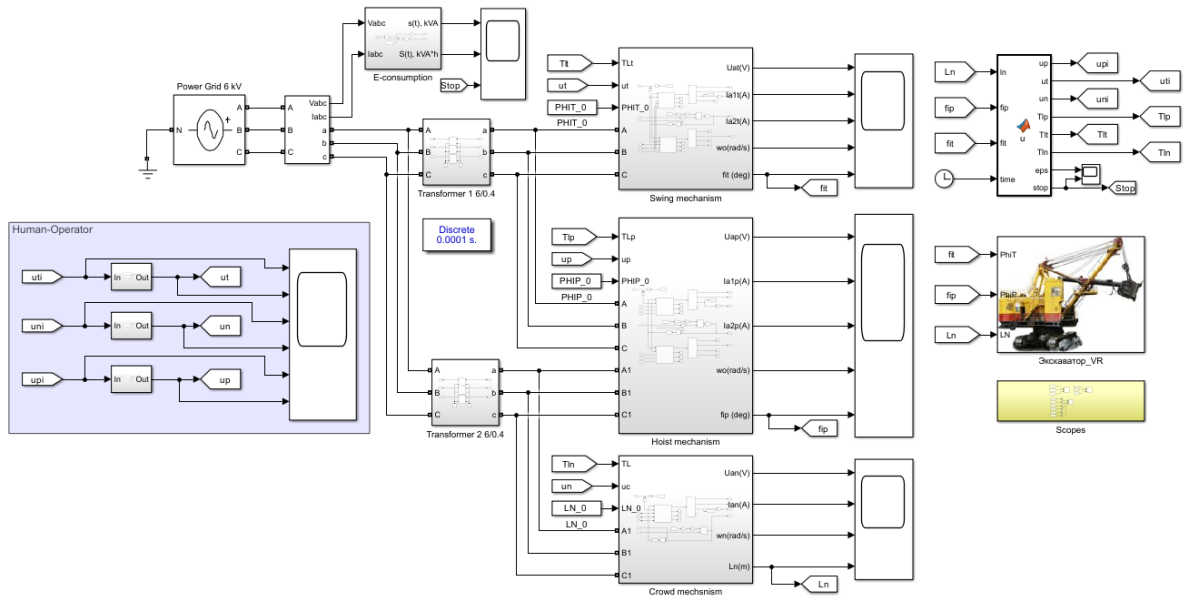
# Розділ 3 Визначення впливу лю- дини-оператора на техніко-економічні показники роботи екскаватора

## 3.1 Математичне моделювання замкненої системи пози- ціонування ковша екскаватора з різними системами електропри- воду

На основі апробованих вище математичних моделях електроприводів основних механізмів екскаватора ЕГК-8І у середовищі MATLAB/Simulink було розроблено математичні моделі замкненої системи керування положенням ковша екскаватора з електроприводом по системі «генератор-двигун» та з електроприводом по системі «тиристорний перетворювач-двигун». Розроблені моделі зображено на рис. 3.1.



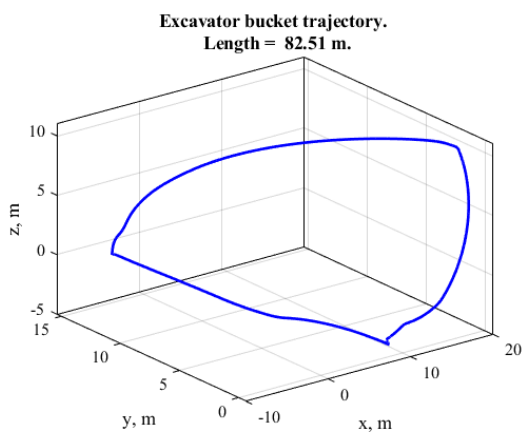
a)



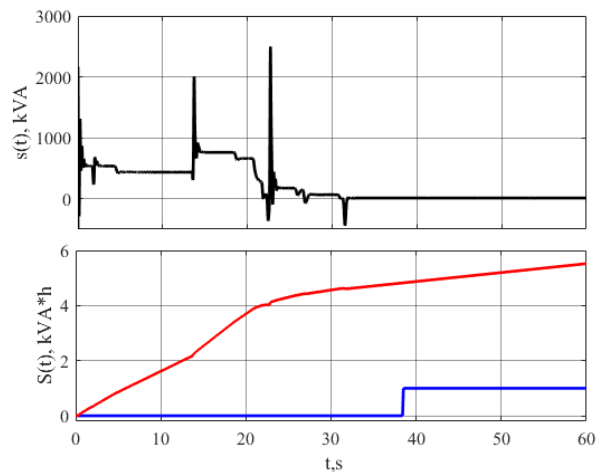
б)

Рисунок 3.1 – Математичні моделі цілісної електромеханічної системи екскаватора: а – за системою «генератор двигун», б – за системою «тиристорний перетворювач двигун»

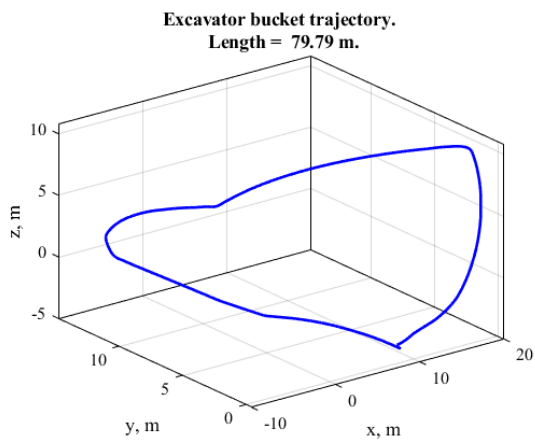
З використанням цих моделей було виконано розрахунки техніко-економічних показників екскаватора при виконанні однакового технологічного циклу в залежності від задіяного типу електроприводу. Отримані результати зображено на рис. 3.2.



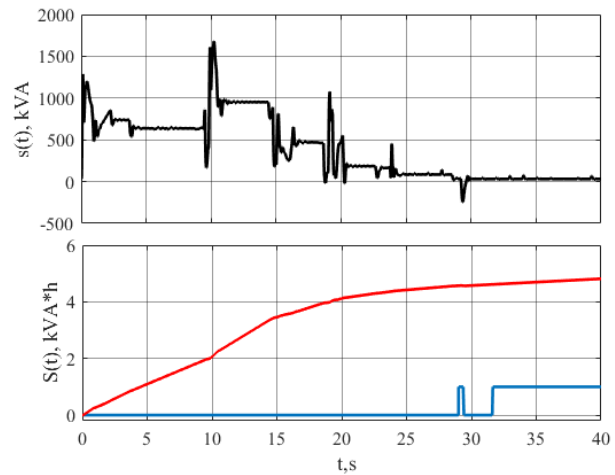
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2 - Порівняльні часові діаграми виконання технологічного циклу для екскаватора з електроприводами різних типів: а) - просторове переміщення ковша, Г-Д; б) повна потужність і спожита електроенергія, Г-Д; в) - просторове переміщення ковша, ТП-Д; г) повна потужність і спожита електроенергія, ТП-Д

Як показує аналіз отриманих результатів, енергоспоживання екскаватора при виконанні однакового технологічного циклу практично не залежить від типу електроприводу. Але використання електроприводу за системою «– двигун постійного струму» дозволяє значно, до 15-20%, скоротити тривалість виконання технологічного циклу, що еквівалентно аналогічному за величиною скороченню питомих витрат електроенергії при видобутку корисних копалин.

### 3.2 Регресійні моделі техніко-економічних показників виробничого циклу екскаватора

Зміна ступеня навченості машиніста екскаватора, а також вплив на роботу машиніста його психофізіологічного стану може бути врахована зміною параметрів детермінованої частини передатної функції людини-оператора: сталої часу оператора  $TP1$  і сталої часу транспортного запізнювання  $TD$ .

Для вивчення впливу людини-оператора на техніко-економічні показники виконання технологічної операції екскаватора був розроблений і виконаний двофакторний експеримент на запропонованих вище математичних моделях екскаваторів. Було застосовано метод планування експерименту. Як чинники, що впливають на результат експерименту, було обрано такі характеристики передавальної функції оператора: постійна часу оператора  $T_{P1}$  і постійна часу транспортного запізнювання  $T_D$ .

Як відгуки експерименту були прийняті тривалість виконання технологічного циклу  $T_C$ , сек, і енергоспоживання, спожите екскаватором на виконання технологічного циклу  $E$ , кВА·год.

Результати виконаного двофакторного експерименту наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 2. Двофакторний експеримент дослідження впливу характеристик оператора на показники виконання технологічного циклу екскаватора.

№ з/п	ПАРАМЕТРИ				Відгуки ГД		Відгуки ТНС	
	X1	X2	$T_{P1}$	$T_D$	E	$T_C$	E	$T_C$
1	2	3	4	5	1	2	1	2
1	0,707	0,707	4,28215	4,28215	5,433	45,05	5,423	41,8
2	-0,707	0,707	0,81785	4,28215	5,372	45,58	5,333	39,75
3	0,707	-0,707	4,28215	0,81785	5,005	37,41	4,957	34,78
4	-0,707	-0,707	0,81785	0,81785	4,887	38,75	4,832	33,2
5	-1	0	0,1	2,55	5,117	41,83	4,989	35,84
6	1	0	5	2,55	5,452	45,68	5,405	43,502
7	0	1	2,55	5	5,518	46,8	5,544	39,164
8	0	-1	2,55	0,1	4,72	36,7	4,702	29,181
9	0	0	2,55	2,55	5,261	41,93	5,192	34,289

Оброблення результатів двофакторного експерименту здійснено в програмі STATGRAPHICS. У результаті опрацювання результатів математичного експерименту було отримано регресійні моделі другого порядку для залежностей циклового енергоспоживання  $E$  і тривалості технологічної операції екскаватора  $T_C$  від постійної часу оператора  $T_{P1}$  і постійної часу транспортного



запізнювання  $T_D$ . Ці регресійні моделі було визначено для екскаватора, обладнаного електроприводом Леонарда та електроприводом "тиристорний перетворювач-двигун". Візуалізацію отриманих регресійних моделей представлено на рис.6.

Нижче наведено рівняння отриманих регресійних моделей.

Залежність циклового енергоспоживання екскаватора з електроприводом по системі Леонарда:

$$E_L = 4.5762 + 0.0509 \cdot T_{P1} + 0.2918 \cdot T_D + 0.0016 \cdot T_{P1}^2 + 0.00475 \cdot T_{P1} \cdot T_D - 0.0260 \cdot T_D^2$$

Коефіцієнт детермінації моделі складає  $R = 92.25 \%$ .

Залежність тривалості технологічної операції екскаватора з електроприводом по системі Леонарда:

$$TC_L = 37.0603 - 1.0172 \cdot T_{P1} + 2.5032 \cdot T_D + 0.2163 \cdot T_{P1}^2 + 0.0675 \cdot T_{P1} \cdot T_D - 0.1177 \cdot T_D^2$$

Коефіцієнт детермінації моделі складає  $R = 79.90 \%$ .

Залежність циклового енергоспоживання екскаватора з електроприводом по системі «тиристорний перетворювач -двигун»:

$$E_T = 4.5331 + 0.0712 \cdot T_{P1} + 0.2319 \cdot T_D + 0.0011 \cdot T_{P1}^2 + 0.0029 \cdot T_{P1} \cdot T_D - 0.0135 \cdot T_D^2$$

Коефіцієнт детермінації моделі складає  $R = 90.49\%$ .

Залежність тривалості технологічної операції екскаватора з електроприводом по системі тиристорний перетворювач -двигун:

$$T_{C_T} = 32.9908 - 3.8246 \cdot T_{P_1} + 1.8012 \cdot T_D + 0.9350 \cdot T_{P_1}^2 + 0.0392 \cdot T_{P_1} \cdot T_D + 0.0190 \cdot T_D^2$$

Коефіцієнт детермінації моделі складає  $R = 88.87\%$ .

Для всіх отриманих регресійних моделей коефіцієнт детермінації більше  $80\%$ , що свідчить про задовільну відповідність регресійних моделей результатам експериментальних досліджень.

За допомогою таблиць ANOVA було перевірено мінливість усіх відгуків для кожного з ефектів. Було виконано перевірку статистичної значущості кожного ефекту шляхом порівняння середнього квадрата з оцінкою експериментальної помилки. Для всіх відгуків усі ефекти мають Р-значення, більші за  $0,05$ , що вказує на їхню значущу відмінність від нуля за довірчого рівня  $95,0\%$ .

На рис.4.9 наведено порівняльні графіки залежності тривалості технологічного циклу від характеристик оператора для двох розглянутих систем електроприводу.

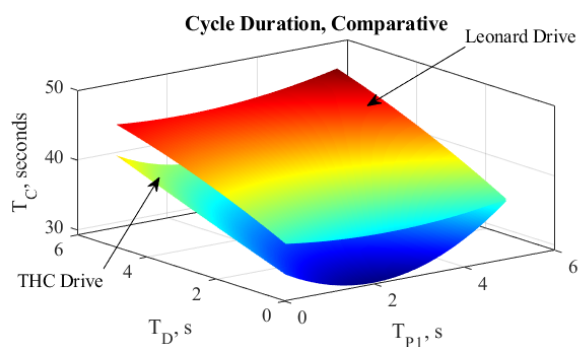


Рисунок 3.3 - Порівняння поверхонь регресійних моделей тривалості технологічного циклу для різних типів електроприводів екскаватора

Виконано порівняльний аналіз результатів математичного моделювання для різних систем електроприводу. Енергоспоживання екскаватора під час виконання технологічного циклу практично не залежить від типу електроприводу. Тривалість виконання технологічного циклу екскаватора, обладнаного

електроприводом ТП-Д, виявляється істотно (до 25 %) меншою, ніж для екскаватора з електроприводом Г-Д, що пов'язано з меншою інерційністю каналу керування електроприводом ТП-Д.

Залежність енергоспоживання і тривалості виконання технологічного циклу екскаватора від параметрів передавальної функції оператора має однаковий вигляд для розглянутих систем електроприводу. Постійна часу запізнювання оператора чинить істотніший вплив на роботу екскаватора порівняно з постійною часу реакції оператора.

### **Висновки по розділу 3**

У третьому розділі розроблено математичні моделі замкненої системи керування положенням ковша екскаватора «пряма лопата» з урахуванням збурень, що може вносити в роботу людина-оператор.

Встановлено, що енергоспоживання екскаватора при виконанні однакового технологічного циклу практично не залежить від типу електроприводу. Але використання електроприводу за системою «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» дозволяє значно, до 15-20%, скоротити тривалість виконання технологічного циклу, що еквівалентно аналогічному за величиною скороченню питомих витрат електроенергії при видобутку корисних копалин.

Для вивчення впливу людини-оператора на техніко-економічні показники виконання технологічної операції екскаватора було застосовано метод планування експерименту з використанням запропонованих вище математичних моделей екскаваторів. Отримано регресійні рівняння залежностей енергоспоживання екскаватора та тривалості виконання технологічного циклу екскаватора від параметрів передавальної функції людини-оператора. Залежність енергоспоживання і тривалості виконання технологічного циклу екскаватора від параметрів передавальної функції оператора має однаковий вигляд для розглянутих систем електроприводу. Постійна часу запізнювання оператора чинить більш

істотний вплив на роботу екскаватора порівняно з постійною часу реакції оператора.

За результатами математичного моделювання встановлено, що вплив людини оператора може призводити до збільшення енергоспоживання електричного приводу «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» до 40% порівняно з роботою автоматичної системи керування положенням ковша екскаватора.

## Висновки

У першому розділі розвинуто уявлення про сучасну гірничо-видобувну техніку, зокрема екскаватори, як про ергатичні електромехатронні комплекси, що вирізняються значним підвищенням продуктивності, надійності та безпеки використання, а також зниженням експлуатаційних витрат і енергоспоживання.

Тому розроблення наукових засад робочих процесів гірничих машин як електромехатронних систем є актуальною науковою проблемою, яка має важливе народногосподарське значення.

Ергатичні системи широко поширені в сучасному промисловому виробництві. Типовим прикладом таких систем у гірничодобувній промисловості є екскаватори, роботою якого керує людина-оператор. Вплив "людського фактору" на роботу ергатичних систем часто має негативні наслідки, що підтверджується дослідженнями, виконаними у науковій літературі. Людина-оператор виконує двоєдине завдання вироблення оптимальної траєкторії руху робочих органів екскаватора і реалізації цієї траєкторії шляхом впливу на органи управління електродвигодами окремих механізмів. У замкненій системі керування роботою екскаватора людину-оператора слід розглядати як нелінійну нестационарну динамічну ланку системи керування. На основі експериментальних досліджень людини оператора обґрунтовано можливість представлення передавальної функції людини-оператора у вигляді аперіодичної ланки з транспортним запізненням. З використанням методів динамічної ідентифікації експериментальних даних отримано оцінки числових характеристик сталої часу та сталої запізнення передавальної функції людини-оператора.

У другому розділі розглянуто рух механічної частини екскаватора конфігурації «пряма лопата» у сферичній системі координат, отримано рішення прямої та зворотної задачі кінематики екскаватора, що дає змогу перетворити задачу керування положенням ковша екскаватора у задачу керування положенням окремих механізмів екскаватора.

Розглянуто принципові схеми живлення силової частини екскаватора ЕКГ-8И з електроприводами різних типів: за системою «генератор - двигун постійного струму» та за системою «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму». Наведено технічні характеристики силового обладнання, необхідні для визначення параметрів схеми заміщення приводних електродвигунів.

Запропоновано структурну схему замкненої САУ положенням ковша екскаватора, що містить підсистему формування потрібної траєкторії руху ковша, визначення завдання на положення окремих механізмів екскаватора шляхом розв'язування оберненої задачі кінематики екскаватора, замкнутих систем керування положенням окремих механізмів, підсистеми обчислення споживаної електроенергії від живлячої мережі.

У третьому розділі розроблено математичні моделі замкненої системи керування положенням ковша екскаватора «пряма лопата» з урахуванням збурень, що може вносити в роботу людина-оператор.

Встановлено, що енергоспоживання екскаватора при виконанні однакового технологічного циклу практично не залежить від типу електроприводу. Але використання електроприводу за системою «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» дозволяє значно, до 15-20%, скоротити тривалість виконання технологічного циклу, що еквівалентно аналогічному за величиною скороченню питомих витрат електроенергії при видобутку корисних копалин.

Для вивчення впливу людини-оператора на техніко-економічні показники виконання технологічної операції екскаватора було застосовано метод планування експерименту з використанням запропонованих вище математичних моделей екскаваторів. Отримано регресійні рівняння залежностей енергоспоживання екскаватора та тривалості виконання технологічного циклу екскаватора від параметрів передавальної функції людини-оператора. Залежність енергоспоживання і тривалості виконання технологічного циклу екскаватора від параметрів передавальної функції оператора має однаковий вигляд для розглянутих систем електроприводу. Постійна часу запізнювання оператора чинить більш

істотний вплив на роботу екскаватора порівняно з постійною часу реакції оператора.

За результатами математичного моделювання встановлено, що вплив людини оператора може призводити до збільшення енергоспоживання електродвигуна «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» до 40% порівняно з роботою автоматичної системи керування положенням ковша екскаватора.

## Перелік використаних джерел

1. Подураєв Ю. В., Кулешов В. С. Принципи побудови та сучасні тенденції розвитку мехатронних систем. *Мехатроніка*. 2000. №1. С. 5-10.
2. Шапобаєв Є. В. До питання про визначення мехатроніки та ієрархії мехатронних об'єктів. *Датчики і системи*. 2001. №7. С. 64-67.
3. Стадник М. І., Сергєєв А. В., Кондрахін В. П. Мехатроніка у вугільному машинобудуванні. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2006. №2. С. 148-163.
4. Горбатов П. А., Косарєв В. В., Стадник М. І. Концептуальна характеристика складних гірничих машин як мехатронних систем. *Наукові праці ДонНТУ*. Донецьк : ДонНТУ, 2005. Вип. 104. С. 53-61.
5. Семенченко А. К., Кравченко В. М., Шабаєв О. Є. Теоретичні засади аналізу та синтезу гірничих машин і процесу їх відновлення як динамічних систем. *Донецьк : РВА ДонНТУ*, 2002. 302 с.
6. Drebenstedt C., Singhal R. (eds.) *Mine Planning and Equipment Selection: Proceedings of the 22nd MPES Conference, Dresden, Germany, 14th-19th October 2013*. Cham : Springer International Publishing, 2014. 1440 p.
7. Kyura N., Oho H. *Mechatronics—an industrial perspective*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 1996. Vol. 1, No. 1. P. 10-15.
8. Козярук А. Є. Удосконалення систем керування електрообладнанням кар'єрних гірничих машин. Проблеми створення перспективних систем електроприводів і НКП у гірничих машинах: доповіді науково-практичного семінару, 11-12 жовтня 2006 р. ВАТ "Рудоавтоматика", 2006. С. 7-11.
9. Kontz M. E., Book W. J. Kinematic analysis of backhoes/excavators for closed-loop coordinated control. *IFAC Proceedings Volumes*. 2006. Vol. 39, Is. 15. P. 316-321. DOI: 10.3182/20060906-3-IT-2910.00054.
10. Tytiuk V., Baranovskaya M., Chorny O. Mathematical modeling of group drives push and lift electric excavator mechanisms. *Electromechanical and energy saving systems*. 2016. Vol. 1/2016(33). P. 42-48.
11. Raza M. A., Frimpong S. *Mechanics of Electric Rope Shovel Performance and Reliability in Formation Excavation*. Lagrangian Mechanics / ed. Hüseyin Canbolat. IntechOpen, 2017. DOI: 10.5772/65333.
12. Babaei Khorzoughi M., Hall R. A Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators. *Minerals*. 2016. Vol. 6, No. 2. P. 48. DOI: 10.3390/min6020048.
13. Vukotic I. M. *Evaluation of Rope Shovel Operators in Surface Coal Mining Using a Multi-Attribute Decision-Making Model : Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports*. 2013. 176 p.
14. Svanberg A., Larsson S., Mäki R. Full-Scale Simulation and Validation of Wear for a Mining Rope Shovel Bucket. *Minerals*. 2021. Vol. 11, No. 6. P. 623. DOI: 10.3390/min11060623.



15. Joseph T. G., Rasimarzabadi R., Curley M. Visual Interpretation of DEM Fill Mechanisms for a Rope Shovel Dipper in Dry Broken Rock. *Civil Eng Res J.* 2018. Vol. 3, Is. 3. P. 555611. DOI: 10.19080/CERJ.2018.03.555611.
16. Dunbabin M., Corke P. Autonomous Excavation Using a Rope Shovel. *Field and Service Robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics* / eds. P. Corke, S. Sukkariah. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. Vol. 25. P. 425-434. DOI: 10.1007/978-3-540-33453-8\_46.
17. *Mechatronics : An Introduction* / ed. R. P. Bishop. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2006. 285 p.
18. Kitzig J., Bumiller G. Evaluation of Power Quality Measurement System Concept using an experimental setup. 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) : proceedings. Auckland, New Zealand, 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/I2MTC.2019.8826814.
19. Wilamowski B. M. *Control and Mechatronics (The Industrial Electronics Handbook)*. New York : CRC Press, 2011. 728 p.
20. Tytiuk V., Lutsenko I., Oksanych I. Development of the method for determining optimal parameters of the process of displacement of technological objects. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. №6/3(90). P. 41-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.116788.
21. Tytiuk V., Chorny O., Zachepa Yu. Control of the start of high-powered electric drives with the optimization in terms of energy efficiency. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* 2020. Vol. 179(5). P. 101-109.
22. Hughes A., Drury B. *Electric motors and drives Fundamentals, Types, and Applications.* 4th ed. Elsevier Ltd, 2013. 441 p.
23. Srivastava K., Berggren B. Simulation of synchronous machines in phase coordinates including magnetic saturation. *Electric Power Systems Research.* 2000. Vol. 56, Is. 3. P. 177-183. DOI: 10.1016/S0378-7796(00)00121-8.
24. Haifeng Zhu. *Fundamental Models for Missions of Engineered Systems.* Systems Conference (SysCon) IEEE International. 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/syscon.2019.8836714.
25. Korobiichuk I., Tokar A., Danik Y. Evaluation methods for the ergonomic system reliability operator. *Automation 2019: progress in automation, robotics and measurement techniques.* 2020. Vol. 920. P. 560-570. DOI: 10.1007/978-3-030-13273-6\_52.
26. Strauch B. *Investigating Human Error: Incidents, Accidents, and Complex Systems.* 1st ed. Routledge, 2018. DOI: 10.4324/9781315251851.
27. Kletz T., Amyotte P. *Accidents said to be due to human error. What Went Wrong?.* 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2019. P. 53-172. DOI: 10.1016/B978-0-12-810539-9.00007-0.
28. Oskouei M. A., Awuah-Offei K. Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines. *Mining*

Technology. 2014. Vol. 123(4). P. 175-182. DOI: 10.1179/1743286314Y.0000000067.

29. Babaei K. M., Hall R. A Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators. *Minerals*. 2016. Vol. 6, No. 2. P. 48. DOI: 10.3390/min6020048.

30. Tytiuk V., Khandakji K., Sivyakova G. Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. DOI: 10.1051/e3sconf/202128005013.

31. Pan X., Wu Z. Performance shaping factors in the human error probability modification of human reliability analysis. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2020. Vol. 26. P. 538-550. DOI: 10.1080/10803548.2018.1498655.

32. Digiesi S., Facchini F., Mossa G., Vitti M. A model to evaluate the Human Error Probability in inspection tasks of a production system. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 217. P. 1775-1783. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.377.

33. Rejeki Y., Achiraeniwati E., Wanda A. Measurement of operator reliability level using the Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 830. P. 032095. DOI: 10.1088/1757-899X/830/3/032095.

34. Manghisi V. M., Wilhelm M., Uva A., Engelmann B., Fiorentino M., Schmitt J. Towards gestured-based technologies for human-centred Smart Factories. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2023. Vol. 36(1). P. 110-127. DOI: 10.1080/0951192X.2022.2121424.

35. Kulakov A. A. Features of a Simple Psychophysiological Reaction. *Human Physiology*. 2018. Vol. 44. P. 412-417. DOI: 10.1134/S0362119718040060.

36. Logan G. D., Van Zandt T., Verbruggen F., Wagenmakers E.-J. On the ability to inhibit thought and action: General and special theories of an act of control. *Psychological Review*. 2014. Vol. 121(1). P. 66-95. DOI: 10.1037/a0035230.

37. Bekele E., Sarkar N. Psychophysiological Feedback for Adaptive Human–Robot Interaction (HRI). *Advances in Physiological Computing. Human–Computer Interaction Series* / eds. S. Fairclough, K. Gilleade. London : Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-1-4471-6392-3\_7.

38. System Identification Toolbox. MathWorks. URL: [https://www.mathworks.com/help/ident/index.html?s\\_tid=srchtitle\\_site\\_search\\_1\\_System%20Identification%20toolbox](https://www.mathworks.com/help/ident/index.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_System%20Identification%20toolbox) (дата звернення: 15.05.2024).

39. Sinclair T. Model theory of operator systems and C\*-algebras. *Model Theory of Operator Algebras*. Berlin, Boston : De Gruyter, 2023. P. 343-386. DOI: 10.1515/9783110768282-009.

40. Zhou L., Li X., Xu H., Zhu P. Gradient-Based Iterative Identification for Wiener Nonlinear Dynamic Systems with Moving Average Noises. *Algorithms*. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 712-722. DOI: 10.3390/a8030712.
41. Li J. Parameter estimation for Hammerstein CARARMA systems based on the Newton iteration. *Applied Mathematics Letters*. 2013. Vol. 26, Is. 1. P. 91-96. DOI: 10.1016/j.aml.2012.03.038.
42. Danaci M., Koylu F., Al-Sumaidae Z. A. Identification of Dynamic Models by Using Metaheuristic Algorithms. *ADI Journal on Recent Innovation*. 2021. Vol. 3(1). P. 36-58. DOI: 10.34306/ajri.v3i1.492.
43. Mzyk G. Nonparametric System Identification Matlab Toolbox. *Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. 2019. Vol. 1. P. 691-698. DOI: 10.5220/0007922306910698.
44. Valoušek L., Jalovecky R. Use of the MATLAB® System Identification Toolbox® for the creation of specialized software for parameters identification. *2021 International Conference on Military Technologies (ICMT) : proceedings*. Brno, Czech Republic, 2021. P. 1-5. DOI: 10.1109/ICMT52455.2021.9502786.
45. Bappah A. S. Hands-on Industrial Process Modelling Using the MATLAB System Identification Toolbox. *Industrial Engineering, Management Science and Applications 2015. Lecture Notes in Electrical Engineering / eds. M. Gen, K. Kim, X. Huang, Y. Hiroshi*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2015. Vol. 349. DOI: 10.1007/978-3-662-47200-2\_10.
46. Victor S., Malti R. CRONE Toolbox for system identification and modeling using fractional differentiation models. *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56, Is. 2. P. 120-125. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1556.
47. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сісюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001.-376 с.