

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП -38.00.00.000 ПЗ

група АКП -23-1К

**Володимир Витвицький**

2025 рік



**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКТ**

А.І. Лагойда.

«   »                      20   року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Витвицькому Володимиру Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження динаміки регулювання процесу буріння  
електробурами в умовах невизначеності

керівник роботи Зварич Галина Григорівна, асистент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломої практики,  
технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічних показників і енергетики електробурів  
2. Дослідження процесу буріння свердловин електробурами. 3. Дослідження  
динаміки регулювання процесу буріння нафтових та газових електробурами.  
за умов впливу факторів невизначеності. Загальні висновки. Перелік  
на джерела.

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

1. БР.АКП-38.00.00.001 – Графіки зміни затуплення зубів 1,2,3-го вінців 3-ої  
шарошки долота в часі . 2. БР.АКП-38.00.00.002 – Зміна в часі механічної  
швидкості проходки  $V_m$ , проходки  $h$ , струму навантаження  $I$ , потужності  $P$ ,  
відносного зносу , питомих енерговитрат  $A$  при бурінні з постійним  
навантаженням на долото. 3. БР.АКП-38.00.00.003 - Розрахунок оптимальних  
параметрів керування процесом буріння. 4.БР.АКП-38.00.00.004 - Структурна  
схема системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна  
електробура. 5.БР.АКП-38.00.00.005 – Крива Михайлова для оцінки стійкост  
системи автоматичного керування. 6. БР.АКП-38.00.00.06 – Структурна  
схема САК у програмному середовищі Matlab.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічних показників і енергетики електробурів	13.05.2025	
2	Дослідження процесу буріння свердловин електробурами	23.05.2025	
3	Дослідження динаміки регулювання процесу буріння нафтових та газових свердловин електробурами за умов впливу факторів невизначеності	28.05.2025	
4	Загальні висновки	07.06.2025	
5	Оформлення бакалаврської роботи	12.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

В. М. Витвицький  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Г. Г. Зварич  
(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить: 54 сторінки, 31 рисуноків, 3 таблиця, 5 джерел.

Тема: «Дослідження динаміки регулювання процесу буріння електробурами в умовах невизначеності».

*Об'єкт дослідження:* є технологічний процес поглиблення нафтових і газових свердловин електробурами.

*Предмет* дослідження: є методи аналізу та автоматичного керування процесом поглиблення свердловин електробурами.

*Мета роботи:* полягає в дослідженні динаміки регулювання процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами за умов дії факторів невизначеності.

У межах дослідження проведено комплексний аналіз технологічних характеристик та енергетичних показників електробурів, зокрема досліджено процес зношення шарошкового долота та його вплив на ефективність буріння. Проаналізовано основні закономірності бурильного процесу. Серед критеріїв оптимальності виділено критерій максимальної потужності на долоті та мінімізації вартості проходки свердловини. Сформульовано цілі управління процесом та визначено комплекс заходів для їх досягнення, включаючи перелік конкретних цільових дій, реалізація яких забезпечує досягнення поставленої мети. Визначено також необхідну ресурсну базу та розроблено систему моніторингу і контролю за виконанням заходів.

Встановлено математичні моделі взаємозв'язку енергетичних показників із осьовим навантаженням на долото. удосконалений підхід до використання потужності зануреного електродвигуна в процесі буріння, зокрема через підвищення точності роботи системи стабілізації потужності на його валу.

**Ключові слова:** продуктивність, двигун, аналіз, регулювання, критерій стійкості, моделювання, об'єкт керування, структурна схема, функція передачі.

## ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 54 pages, 31 figures, 3 tables, 5 sources.

Topic: "Study of the dynamics of the regulation of the drilling process with electric drills under conditions of uncertainty".

Object of research: is the technological process of deepening oil and gas wells with electric drills.

Subject of research: are methods of analysis and automatic control of the process of deepening wells with electric drills.

Purpose of work: is to study the dynamics of the regulation of the drilling process of oil and gas wells with electric drills under conditions of uncertainty factors.

Within the framework of the study, a comprehensive analysis of the technological characteristics and energy indicators of electric drills was carried out, in particular, the process of wear of the cone bit and its effect on drilling efficiency was studied. The main patterns of the drilling process were analyzed. Among the optimality criteria, the criterion of maximum power on the bit and minimization of the cost of drilling the well was highlighted. The goals of process management are formulated and a set of measures for their achievement is determined, including a list of specific targeted actions, the implementation of which ensures the achievement of the set goal. The necessary resource base is also determined and a system for monitoring and controlling the implementation of measures is developed.

Mathematical models of the relationship between energy indicators and the axial load on the bit are established. An improved approach to the use of the power of a submerged electric motor in the drilling process, in particular by increasing the accuracy of the power stabilization system on its shaft.

**Keywords:** performance, engine, analysis, regulation, stability criterion, modeling, control object, structural diagram, transfer function.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>7</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ І ЕНЕРГЕТИКИ</b>	
<b>ЕЛЕКТРОБУРІВ .....</b>	<b>9</b>
1.1 Дослідження зношення робочих елементів шарошкового долота .....	9
1.2 Вплив зношення долота на енергоспоживання та потужність електробура .....	12
1.3 Залежність енергетичних показників електробура від осьового навантаження на долото .....	18
Висновки до розділу.....	25
<b>2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН</b>	
<b>ЕЛЕКТРОБУРАМИ .....</b>	<b>26</b>
2.1 Функції передачі колони бурільних труб і їх апроксимація .....	26
2.2 Розрахунок та визначення оптимальних параметрів керування процесом електробуріння .....	30
Висновки до другого розділу .....	35
<b>3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ</b>	
<b>БУРІННЯ НАФТОВИХ ТА ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН</b>	
<b>ЕЛЕКТРОБУРАМИ ЗА УМОВ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ</b>	
<b>НЕВИЗНАЧЕНОСТІ .....</b>	<b>36</b>
3.1 Дослідження експериментальних даних свердловини електробуром.....	36
3.2. Дослідження стійкості системи автоматичного керування та моделювання перехідних характеристик.....	46
Висновок до третього розділу .....	53

					БР.АКП-38.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Витвицький В. В.			Дослідження динаміки регулювання процесу буріння електробурами в умовах невизначеності	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Зварич Г. Г.					6	52
Реценз.						ІФНТУНГ АКП-23-1К		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А. І.						

**ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....54**  
**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....55**  
**БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА**  
**ДОДАТКИ**

					БР.АКП-38.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ І ЕНЕРГЕТИКИ ЕЛЕКТРОБУРІВ

## 1.1 Дослідження зношення робочих елементів шарошкового долота

Буріння свердловин включає взаємозалежні процеси руйнування породи та зношення долота. Для оцінки ефективності зануреного привода важливо враховувати вплив зношення долота та осьового навантаження на питому електроспоживання і потужність двигуна.

Ефективність роботи долота на вибої свердловини здебільшого визначається інтенсивністю зношення його робочих елементів, що залежить від абразивності порід, параметрів режиму буріння, зносостійкості матеріалів озброєння, а також конструктивних особливостей долота та його зубців [8].

Процес буріння свердловин включає комплекс взаємопов'язаних операцій, зокрема руйнування гірської породи на вибої та зношення долота. Визначення загальних закономірностей перебігу зазначених процесів і встановлення взаємозв'язків між ними є важливим з погляду підвищення ефективності буріння. Зокрема, для оцінки роботи зануреного привода доцільним є дослідження впливу зношення долота та осьового навантаження на питому електроспоживання, потужність двигуна й інші енергетичні параметри процесу буріння із застосуванням електробурів.

Дослідження об'ємного зношення долота дало змогу отримати рівняння, яке описує зміну зношення у часі. Залежно від умов, ця зміна може мати як лінійний характер, так і наближений до експоненціального. Швидкість зношення долота прямо пропорційна осьовому навантаженню  $P$  і обернено пропорційна витраті промивальної рідини  $Q$ . Крім того, зношення зубів долота  $u$  по висоті пропорційне величині кутової швидкості. На основі сказаного вище справедливе рівняння:

					БР.АКП–38.00.00.000 ПЗ	9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





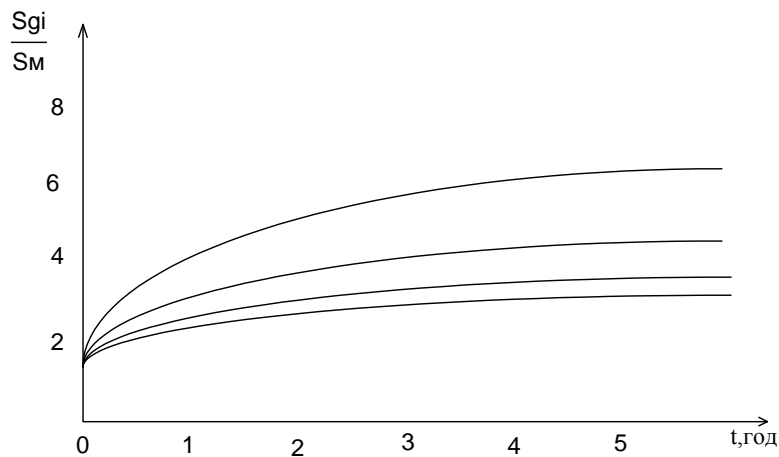


Рисунок 1.1 – Графіки зміни затуПЛення зубів 1,2,3-го вінців 3-ьої шарошки долота типу Т в часі, загальної поверхні долота (4) за експериментальними даними і побудований за формулою (1.5) рівномірно по всьому долоту

Інтенсивність зношення визначається низкою чинників, що пов'язані з механізмом руйнування порід та технічним станом долота. Деякі дослідники зазначають, що

## 1.2. Вплив зношення долота на енергоспоживання та потужність електробура

Зношування породоруйнівного інструменту визначає тривалість його перебування на вибої. Оскільки безпосереднє вимірювання зношення долота в процесі буріння є складним, доцільно вивчити його зв'язок з енергетичними показниками, зокрема з питомими енергозатратами та потужністю, яку споживає електродвигун електробура. Питому витрату електроенергії під час буріння зазвичай розглядають як кількість енергії, необхідної для руйнування одиниці об'єму гірської породи:

$$a(t) = \frac{P_{\text{дол}}(t)}{SV_M(t)} = 1.27 \frac{P_{\text{дол}}(t)}{D_{\text{дол}}^2 V(t)}, \text{кВт} - \text{год} / \text{м}^3, \quad (1.9)$$

де  $P_{\text{дол}}(t)$  - потужність на долоті, кВт;  $D_{\text{дол}}$  - діаметр долота, м;  $V_M(t)$  механічна швидкість проходки, м/год.





З рівняння (1.15) видно, що питома витрата електроенергії з часом зростає за параболічним законом. Максимальна різниця між експериментальною кривою  $A$  (1) та розрахунковою  $A(e)$  не перевищує 2%, що добре узгоджується з теоретичними результатами, отриманими з рівняння (1.11) [10].

Для лінії регресії  $\varepsilon(t)$  відповідає рівняння:

$$\varepsilon(t) = 0.1 + 0.0752t \quad (1.16)$$

Лінія регресії механічної швидкості проходки  $V_M(t)$  адекватна рівнянню:

$$V_M(t) = \frac{1}{0.1 + 0.0752t} \quad (1.17)$$

Із (1.17) бачимо, що зміна механічної швидкості проходки в часі проходить за законом гіперболи.

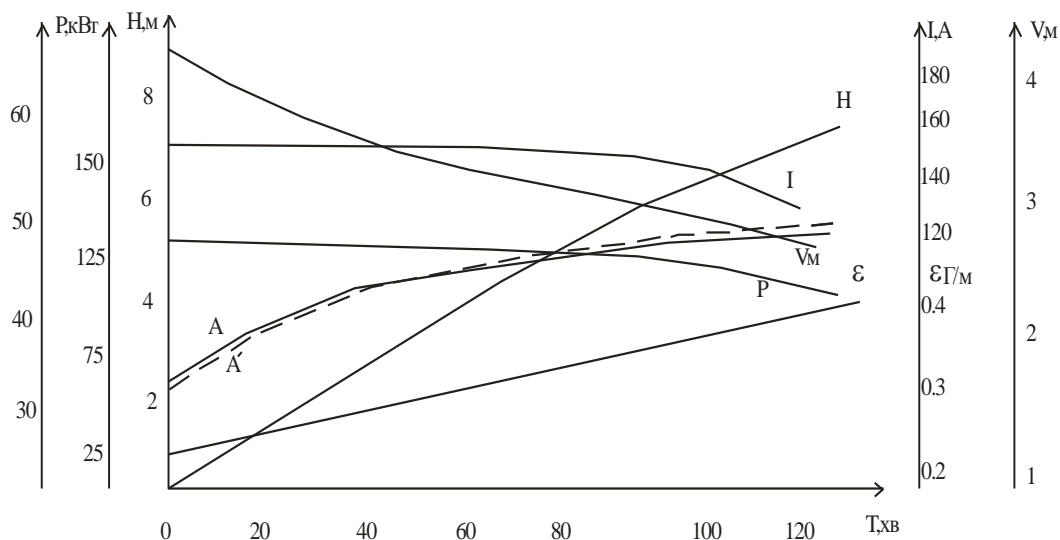


Рисунок 1.2 – Зміна в часі механічної швидкості проходки  $V_M$ , проходки  $h$ , струму навантаження  $I$ , потужності  $P$ , відносного зносу  $\varepsilon$ , питомих енерговитрат  $A$  при бурінні з постійним навантаженням на долото

Високе значення вибіркового коефіцієнта кореляції  $r_{ae} = 0,929$  вказує на наявність лінійної залежності між параметрами. Інтервальні оцінки коефіцієнта



Таким чином, збільшення зношення озброєння долота призводить до зменшення потужності, яку споживає двигун. електробура, при бурінні в однорідних породах з постійними параметрами режиму буріння  $F=\text{const}$ ,  $\omega=\text{const}$ ,  $Q=\text{const}$ , до пониження струму навантаження і механічної швидкості проходки, до недовикористання потужності зануреного електроприводу.

Побудова за експериментальними даними (рис. 2.3) графіка зміни в часі, потужності двигуна електробура E240-8, механічної швидкості проходки і відносного зношення долота підтверджує зроблений вище висновок. Так як потужність, яку споживає двигун електробура, є основною енергетичною характеристикою буріння, то для забезпечення ефективності буріння необхідно стабілізувати її величину на вибої свердловини. Дослідження впливу зношення долота на потужність, яку споживає двигун електробура, струм навантаження і механічну швидкість проходки проведено також за результатами вимірювань, отриманих при бурінні свердловини №346Д електробуром E240-8, долотом У295,3Т в інтервалі 1327,75 м.

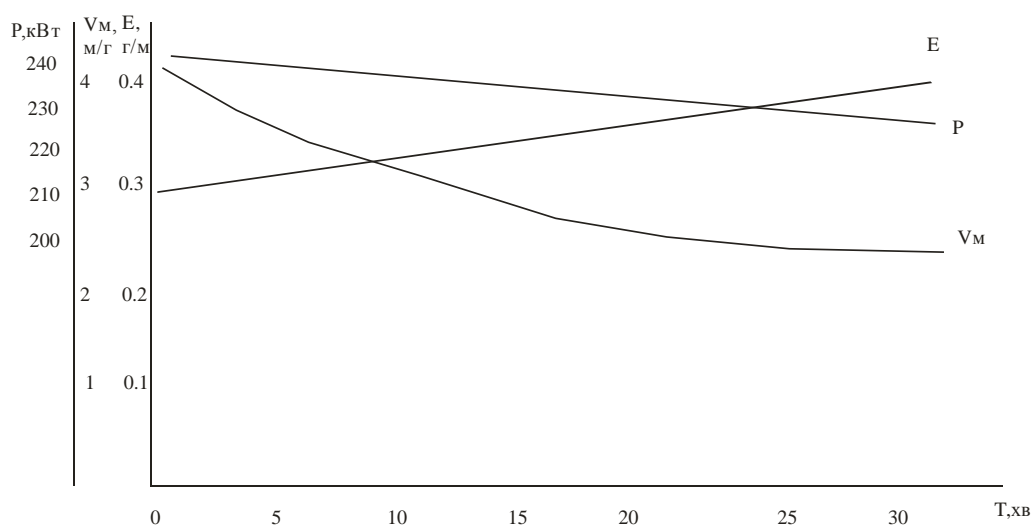


Рисунок 1.3 – Зміна в часі потужності  $P$  двигуна електробура, механічної швидкості проходки  $V_m$  і відносного зношення долота

Результати досліджень, отриманих на ПК з допомогою стандартних програм, приведені в табл. 1.1.





$$S_{zi} - \frac{F_0}{K_S} \ln(F_0 + K_S S_{zi}) = y_2 K_S t, \quad (1.27)$$

або

$$\frac{S_{zi}}{K_S y_2} - \frac{\ln(F_0 + K_S S_{zi})}{K_S^2 y_2} = t. \quad (1.28)$$

Реалізація алгоритму (1.28) на ПК дозволяє визначити характер зміни площі затуплення зуба шарошки долота в часі.

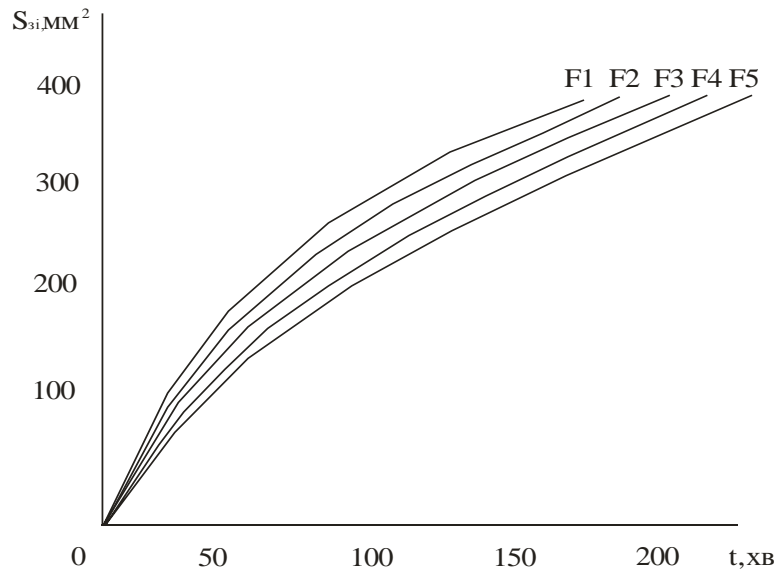


Рисунок 1.4 – Графіки зміни площі затуплення зуба шарошки долота в часі

Значний інтерес представляє встановлення характеру залежності швидкості зміни площі затуплення озброєння  $\frac{dS_{\text{дол}}}{dt}$  долота в режимі  $V_M = \text{const}$ ,  $\omega = \text{const}$ ,  $Q = \text{const}$ ,  $F = \text{var}$  від площини затуплення. З (1.28) маємо:

$$\frac{dS_{\text{дол}}}{dt} = \frac{y_2 F_0}{S_{\text{дол}}} + y_2 K_S. \quad (1.29)$$

Швидкість зміни площі затуплення озброєння шарошок  $\frac{dS_{\text{дол}}}{dt}$  зменшується за гіперболічним законом в міру збільшення площі затуплення і досить швидко стабілізується [8].











## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

### 2.1 Функції передачі колони бурильних труб та їх апроксимація

Створення ефективної системи управління процесом буріння вимагає розуміння динамічних властивостей колони бурильних труб як елемента регулювання. Ці властивості описуються диференціальними рівняннями або передаточними функціями, які повинні якомога точніше відобразити реальну систему, не будучи надмірно складними. Колона бурильних труб є об'єктом з розподіленими параметрами, де вхідною величиною є швидкість подачі на поверхні  $V(0,t)$  і зусилля на гаку  $Q(Q>t)$ , а вихідними - навантаження на долото  $Q(l,t)$  і швидкість руху кінця колони  $V(l,t)$ .

Як модель бурильної колони прийемо довгий важкий стержень, на кінці якого знаходиться важкий низ довжиною  $2\epsilon$  разом із вибійним двигуном, сумарна маса яких рівна  $M$ . Поздовжні коливання такої динамічної системи описуються наступною системою рівнянь в часткових похідних (1,2,3)

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial Q}{\partial x} &= m \frac{\partial V}{\partial t} + RV \\ -\frac{\partial Q}{\partial x} &= \frac{1}{EF} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} \end{aligned} \right\} , \quad (2.1)$$

де  $V$  - швидкість точки  $x$  колони в момент часу  $t$ ;  $m$ - маса одиниці довжини колони ;  $E$  - модуль Юнга;  $F$  - площа поперечного січення;  $R$ - коефіцієнт втрат, пропорційних швидкості. Початкові умови для рівняння (3.1) прийняті нульовими, тобто, до початку буріння колона вільно висить на гаку:  $V(x, 0) - Q(x,0) = 0$  для всіх  $0 \leq x \leq l$ . Граничні умови для будь-якого  $t > 0$  записуються у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} V(0,t) &= V_t(t) \\ V(j,t) &= \frac{1}{EF} \cdot \frac{\partial Q_o(l,t)}{\partial t} \end{aligned} \right\} , \quad (2.2)$$

де  $l$  -глибина свердловини.

Величину  $Q_d$  визначимо з наступних міркувань. Сумарну масу завантаженого низу і вибійного двигуна  $M$  можна вважати одинарною, так як величина є набагато менша довжини колони  $l$ . Із врахуванням прийнятих допущень сила, яка діє на долото буде рівна:

$$Q_d = (l, t) = Q(l, t) - M \frac{\partial V(l, t)}{\partial t} - Q_{mp}, \quad (2.3)$$

де  $Q_{mp}$  - сила тертя низу колони бурильних труб у стіни свердловини.

Не враховуючи силу тертя і врахувавши відношення (2.3), одержуємо граничні умови для прийнятої моделі колони бурильних труб.

$$\left. \begin{aligned} V(0, t) &= V_i(t) \\ V(l, t) &= \frac{1}{EF} \cdot \left[ \frac{\partial Q(l, t)}{\partial t} - M \frac{\partial^2 V(l, t)}{\partial t^2} \right] \end{aligned} \right\} . \quad (2.4)$$

Перед тим, як приступити до аналізу рівнянь (3.1), потрібно привести їх до безрозмірного вигляду. Для цього виберемо базові значення зусиль  $Q^*$  швидкості  $V^*$ , довжини  $l$  і часу  $\tau^*$ .

В результаті система рівнянь (2.1) в безрозмірних величинах має наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial q}{\partial \xi} &= m \frac{\partial v}{\partial \tau} + rv \\ -\frac{\partial v}{\partial \xi} &= \frac{1}{ef} \cdot \frac{\partial q}{\partial \tau} \end{aligned} \right\} , \quad (2.5)$$

де  $q = \frac{Q}{Q^*}$  зусилля;  $m = \frac{m V^* l}{Q^* \tau^*}$  - маса одиниці довжини колони;  $r = \frac{R V^* l}{Q^*}$  -

коефіцієнт тертя;  $ef = \frac{V^* \tau^* EF}{Q^* l}$  - жорсткість колони;  $\xi = \frac{x}{l}$  - довжина;  $\tau = \frac{t}{\tau^*}$  - час.

Аналогічно приводимо до безрозмірного виду рівняння (3.2), яке описує граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} v(0, t) &= v_1(\tau) \\ v(l, t) &= \frac{l}{ef} \left[ \frac{\partial q(l, \tau)}{\partial \tau} - m \frac{\partial^2 v(l, \tau)}{\partial \tau^2} \right] \end{aligned} \right\} , \quad (3.6)$$





де  $a_2 = \frac{m}{ef}$ . Використовуючи відомі структурні перетворення, можна одержати всі чотири передавальні функції колони бурильних труб.

Розглянемо знаходження передавальної функції по передавальному зусиллю. Для простоти прийmemo  $a_2 = 0$ , тобто не беремо до уваги масу завантаженого низу колони. Припустимо  $v_1 = 0$  і  $v_2 = 0$ . УВ результаті одержимо структурну схему (рис. 2.1), на основі якої визначаємо:

$$W(p) = \frac{W_{q1,q2}(p)}{1 + W_H(p)W_{v2,q2}(p)} \quad (2.15)$$

## 2.2 Розрахунок та визначення оптимальних параметрів керування процесом буріння

Створення надійності системи управління процесом буріння вимагає знань динамічних властивостей колони бурильних труб як об'єкту керування [10].

Колона бурильних труб є об'єктом із розподіленими параметрами, вхідними величинами якого є швидкість подачі на поверхні  $V(0,t)$  і зусилля на гаку  $F(0,t)$ , а вихідними - навантаження на долото  $F(1,t)$  і швидкість руху колони бурильних труб  $V(1,t)$ . Узагальнена структурна схема установки приведена на рис. 2.1

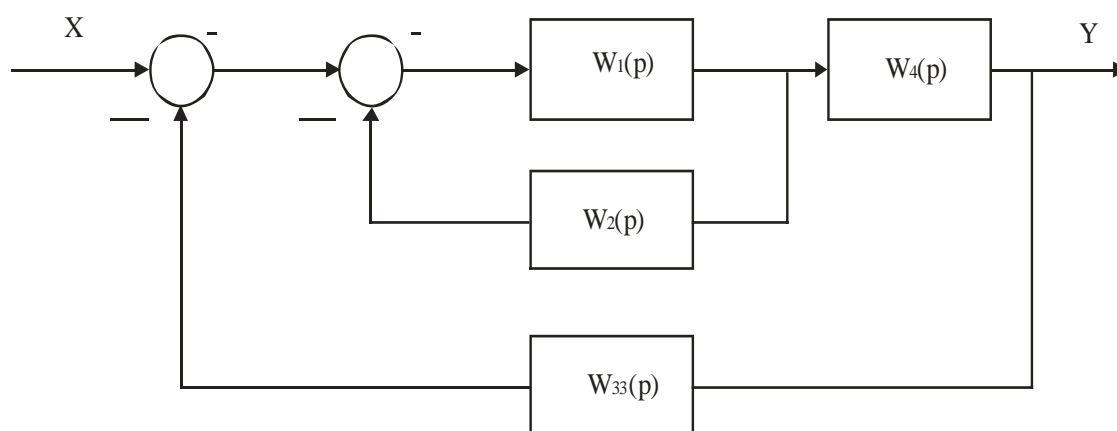


Рисунок 2.1 – Структурна схема бурової установки



$$\begin{aligned}
 W_{\text{замк}}(p) &= \frac{W_{1,2,3,4}(p)}{1 + W_{1,2,4}(p) \cdot W_{33}(p)} = \\
 &= \frac{-13.77p^2 - 16.06p + 3.06}{6.3p^3 + 13.95p^2 + 10.67p + 4.36} = \\
 &= \frac{(-13.77p^2 - 16.06p + 3.06)(0.6 - 0.15p)}{1 + \frac{(-13.77p^2 - 16.06p + 3.06)(0.6 - 0.15p)}{(6.3p^3 + 13.95p^2 + 10.67p + 4.36)(1 + 0.25p)}} = \\
 &= \frac{-13.77p^2 - 16.06p + 3.06}{1.57p^4 + 11.84p^3 + 12.75p^2 + 17.8p + 6.19}.
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Дослідження стійкості АСК за критерієм Гурвіца Михайлова:

Характеристичне рівняння зімкнутої системи :

$$\begin{aligned}
 A(p) &= 1.574p^4 + 11.84p^3 + 12.75p^2 + 17.8p + 6.19 & (2.22) \\
 & \quad a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4
 \end{aligned}$$

Критерій Гурвіца

Для стійкості за критерієм Гурвіца повинні виконуватись дві умови:

- 1) необхідно, щоб всі  $a_i > 0$ ;
- 2) головний визначник  $\Delta$  і всі визначники  $\Delta_i > 0$ .

Перша умова виконується  $a_i > 0$ .

Складаємо визначник Гурвіца:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 11.84 & 17.8 & 0 & 0 \\ 1.574 & 12.75 & 6.19 & 0 \\ 0 & 11.84 & 17.8 & 0 \\ 0 & 1.574 & 12.75 & 6.19 \end{vmatrix} \tag{2.23}$$

$$\Delta_1 = 11.84 > 0;$$

$$\Delta_2 = 11.84 \cdot 12.75 - 1.574 \cdot 17.8 = 150.96 - 28.01 = 122.94 > 0;$$

$$\Delta_3 = 11.84 \cdot 12.75 \cdot 17.8 - 1.574 \cdot 17.8^2 - 11.84^2 \cdot 6.19 = 2687.08 - 498.7 - 875.09 = 1313.29 > 0;$$

$$\Delta_4 = a_4 \cdot \Delta_3 = 6.19 \cdot 1313.29 = 8129.26 > 0.$$

Головний визначник і всі визначники більші нуля. Достатня умова виконується, значить система стійка.

Критерій Михайлова

$$A(p) = 1.574p^4 + 11.84p^3 + 12.75p^2 + 17.8p + 6.19. \tag{2.24}$$

Прирівнюємо це рівняння до нуля.

$$1.574p^4 + 11.84p^3 + 12.75p^2 + 17.8p + 6.19 = 0.$$

Робимо заміну  $p \rightarrow \omega j$ .

$$1.574(\omega j)^4 + 11.83(\omega j)^3 - 12.75(\omega j)^2 + 17.8\omega j + 6.19 = 0.$$

$$1.574\omega^4 + 11.83\omega^3 - 12.75\omega^2 + 17.8\omega + 6.19 = 0.$$

Виділимо дійсну та уявну частини.

$$P(\omega) = 6.19 + 1.574\omega^4 - 12.75\omega^2 \quad \text{- дійсна частина} \quad (2.25)$$

$$Q(\omega) = 17.8\omega - 11.83\omega^3 \quad \text{- уявна частина} \quad (2.26)$$

Змінюємо  $\omega$  від 0 до  $\infty$  і будуємо годограф Михайлова. Знаходимо реперні точки:

$$1.574\omega^4 - 12.75\omega^2 + 6.19 = 0;$$

$$x = \omega^2; \quad 1.574x^2 - 12.75x + 6.19 = 0.$$

$$x_{1,2} = \frac{12.75 \pm \sqrt{12.75^2 - 4 \cdot 1.57 \cdot 6.19}}{2 \cdot 1.57};$$

$$x_1 = \frac{12.75 + 11.12}{3.14} = 7.6,$$

$$x_2 = \frac{12.75 - 11.12}{3.14} = 0.5.$$

$$17.8\omega - 11.83\omega^3 = 0;$$

$$\omega(17.8 - 11.83\omega^2) = 0;$$

$$\omega = \sqrt{\frac{17.8}{11.83}} = 1.22.$$

Підставляючи  $\omega$  у вирази для  $P(\omega)$  і  $Q(\omega)$  будуємо годограф Михайлова. Дана система є стійка, бо годограф Михайлова починається на додатній дійсній осі і проходить проти годинникової стрілки чотири квадранти ( $N=4$ ).

Побудова амплітудно-фазової характеристики АСК:

Знаходимо передавальну функцію розімкнутої АСК. Вона складається з трьох послідовно з'єднаних ланок  $W_1(p)$ ,  $W_2(p)$  і  $W_{33}(p)$ .







$$q = \frac{B_{\sigma}(t_{cn} + t_{\sigma}) + B_{\sigma}}{h},$$

де  $B_{\sigma}$  - вартість однієї години роботи бурової установки;

$t_{cn}$  - час, що витрачається на спуско-підймальні і допоміжні операції;

$t_{\sigma}$  - тривалість процесу поглиблення;

$B_{\sigma}$  - вартість долота;

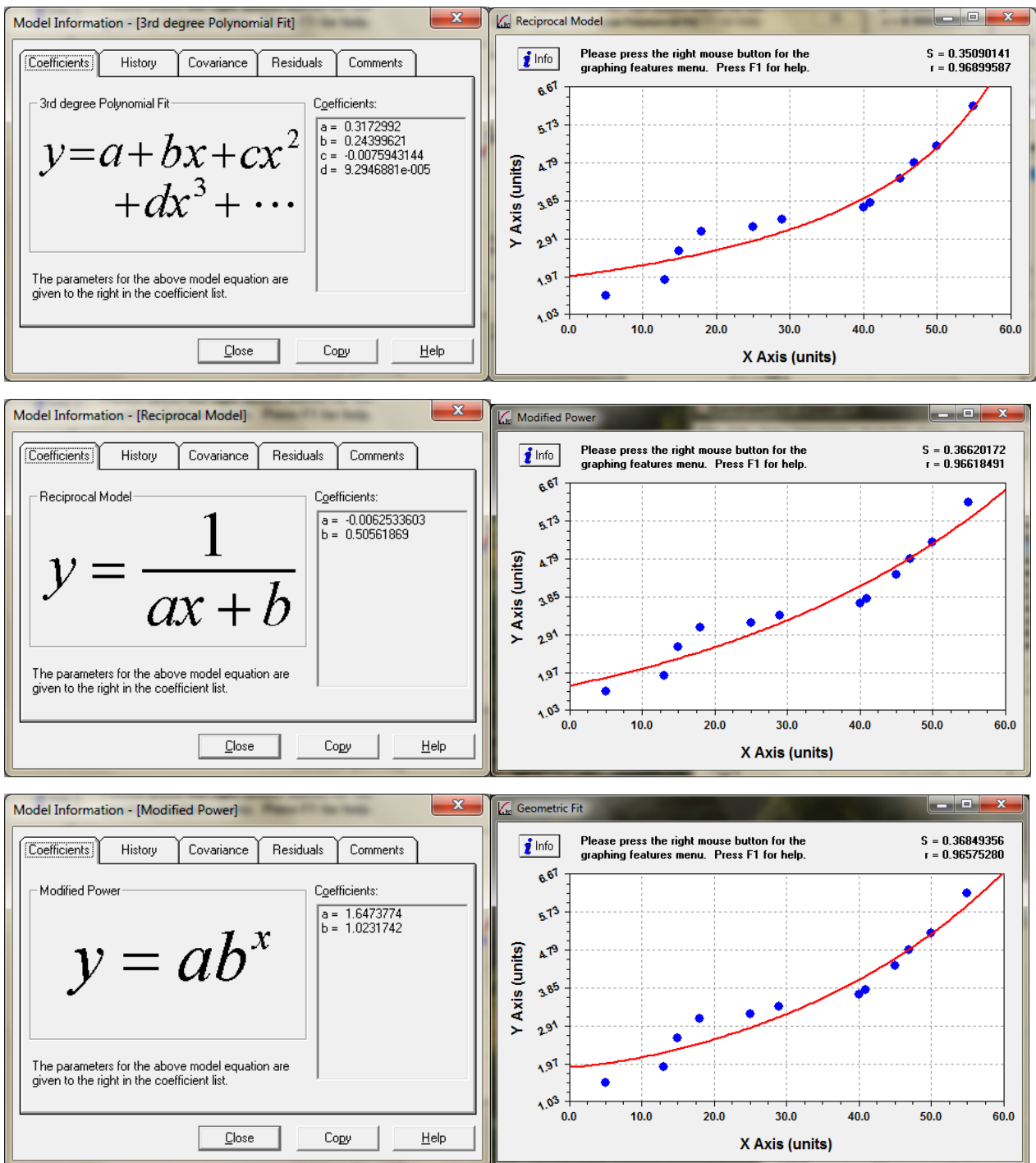
$h$  - проходка на долото.

Проте встановити аналітичну залежність ефективності буріння свердловини електробурами від значення потужності на долоті досить важко. Тому для геолого-технічних умов буріння свердловин на Прикарпатті були отримані експериментальні дані (табл.3.1).

Таблиця 3.1 – Експериментальні дані для буріння свердловини електробуром Е 215-8 в умовах Прикарпаття

$P$ , кВт	$V$ , м/год	$B$ , грн./м
5	1,5	3393,0
13	1,9	3075,15
15	2,6	2888,25
18	3,1	2760,0
25	3,2	2787,54
29	3,4	2757,0
40	3,7	2736,99
41	3,8	2716,92
45	4,4	2649,82
47	4,8	2646,71
50	5,2	2621,73
55	6,2	2568,14

Побудовані за цими даними лінії регресії  $V = f_1(p)$  і  $B = f_2(p)$  апроксимувались декількома рівняннями за допомогою програми Curve Expert.



Model Information - [Geometric Fit]

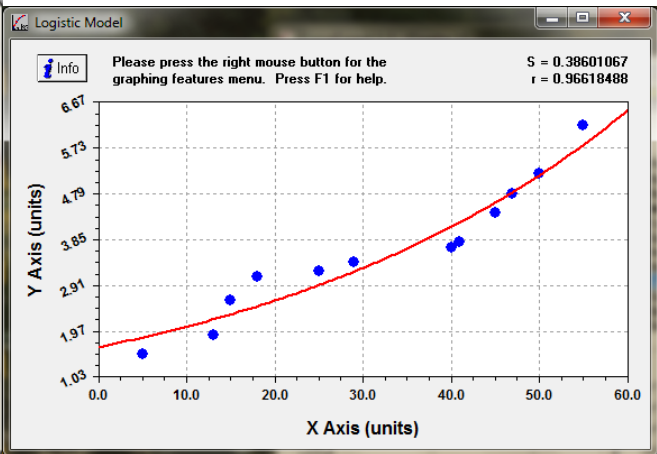
Geometric Fit

$$y = ax^{bx}$$

The parameters for the above model equation are given to the right in the coefficient list.

Coefficients:  
 a = 1.8963386  
 b = 0.005156553

Close Copy Help



Model Information - [Logistic Model]

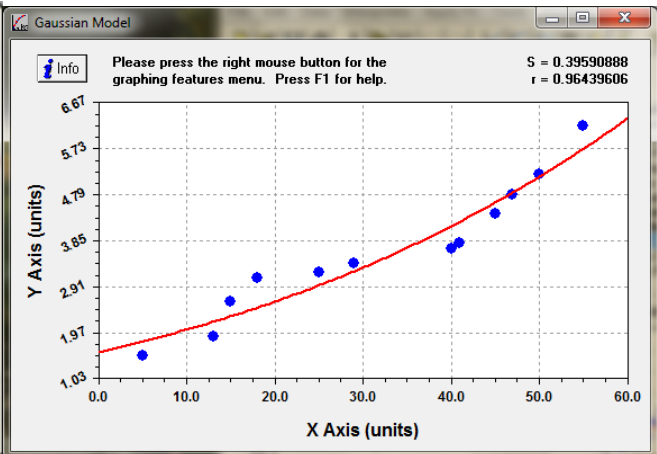
Logistic Model

$$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$$

The parameters for the above model equation are given to the right in the coefficient list.

Coefficients:  
 a = 1.1515953e+009  
 b = 6.9891504e+008  
 c = 0.022904188

Close Copy Help



Model Information - [Gaussian Model]

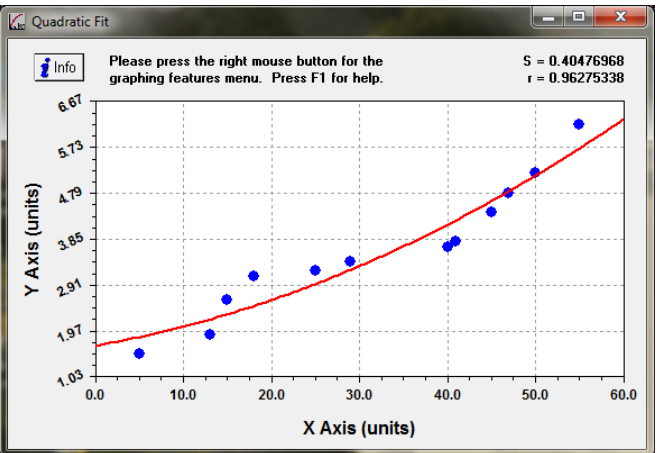
Gaussian Model

$$y = ae^{\frac{-(x-b)^2}{2c^2}}$$

The parameters for the above model equation are given to the right in the coefficient list.

Coefficients:  
 a = 53.340412  
 b = 269.50043  
 c = 101.57565

Close Copy Help



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

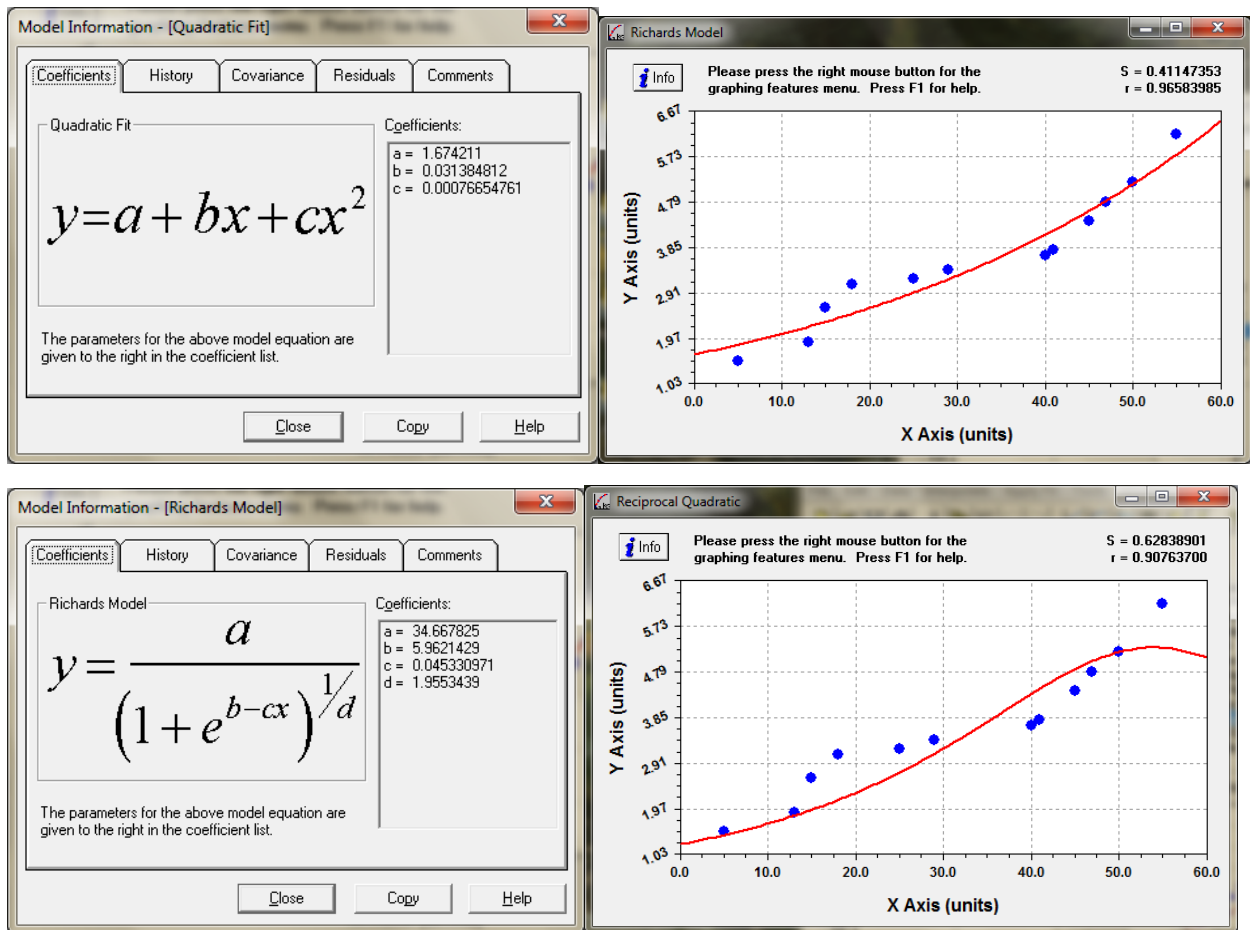


Рисунок 3.1 – Апроксимація регресії  $V = f_1(p)$  і  $B = f_2(p)$  за допомогою програми Curve Expert.

Перевагу для лінії регресії  $V = f_1(p)$  було надано рівнянню

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 \dots, \quad (3.1)$$

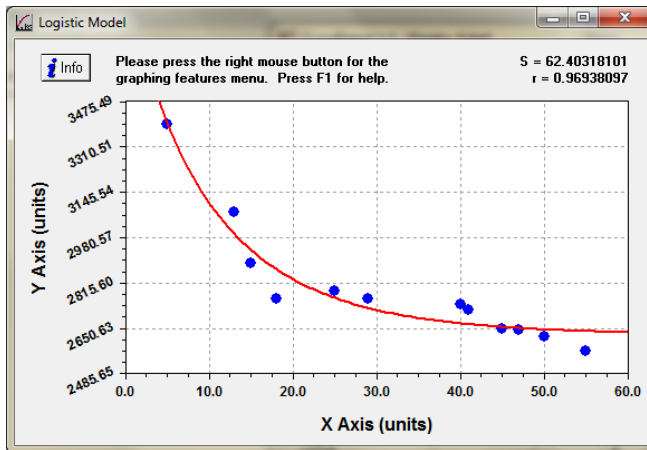
де  $x = P_{\text{дол}}$  - потужність на долоті;

$y = V$  - механічна швидкість буріння;

$a, b, c, d$  - коефіцієнти моделі.

Параметри рівняння (3.1) визначені за допомогою методу найменших квадратів, коефіцієнт кореляції для нього дорівнює 0,988.

Лінію регресії  $B = f_2(p)$  апроксимували рівняннями, які наведені нище.



Model Information - [Logistic Model]

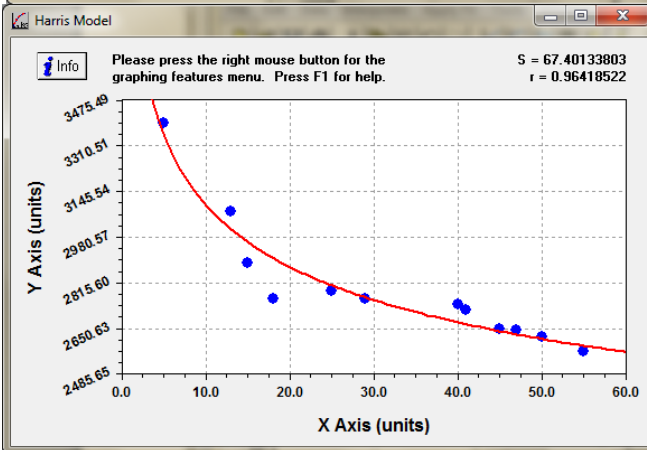
Logistic Model

$$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$$

Coefficients:  
a = 2627.5934  
b = -0.33156504  
c = 0.076862202

The parameters for the above model equation are given to the right in the coefficient list.

Close Copy Help



Model Information - [Harris Model]

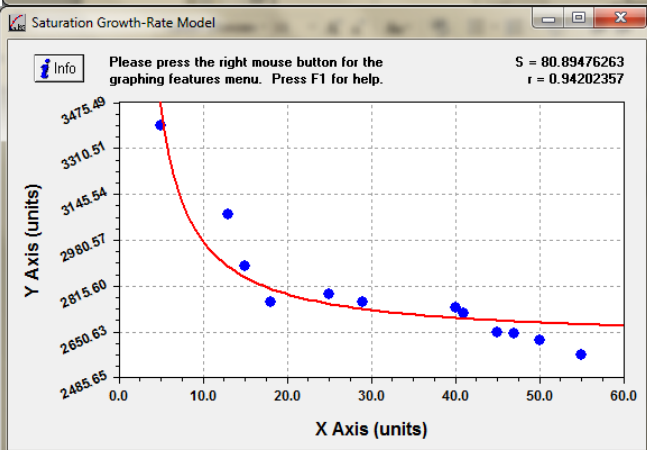
Harris Model

$$y = \frac{1}{(a + bx^c)}$$

Coefficients:  
a = -0.00039333646  
b = 0.00063886859  
c = 0.049716111

The parameters for the above model equation are given to the right in the coefficient list.

Close Copy Help



Model Information - [Saturation Growth-Rate Model]

Saturation Growth-Rate Model

$$y = \frac{ax}{b + x}$$

Coefficients:  
a = 2620.0233  
b = -1.1935085

The parameters for the above model equation are given to the right in the coefficient list.

Close Copy Help

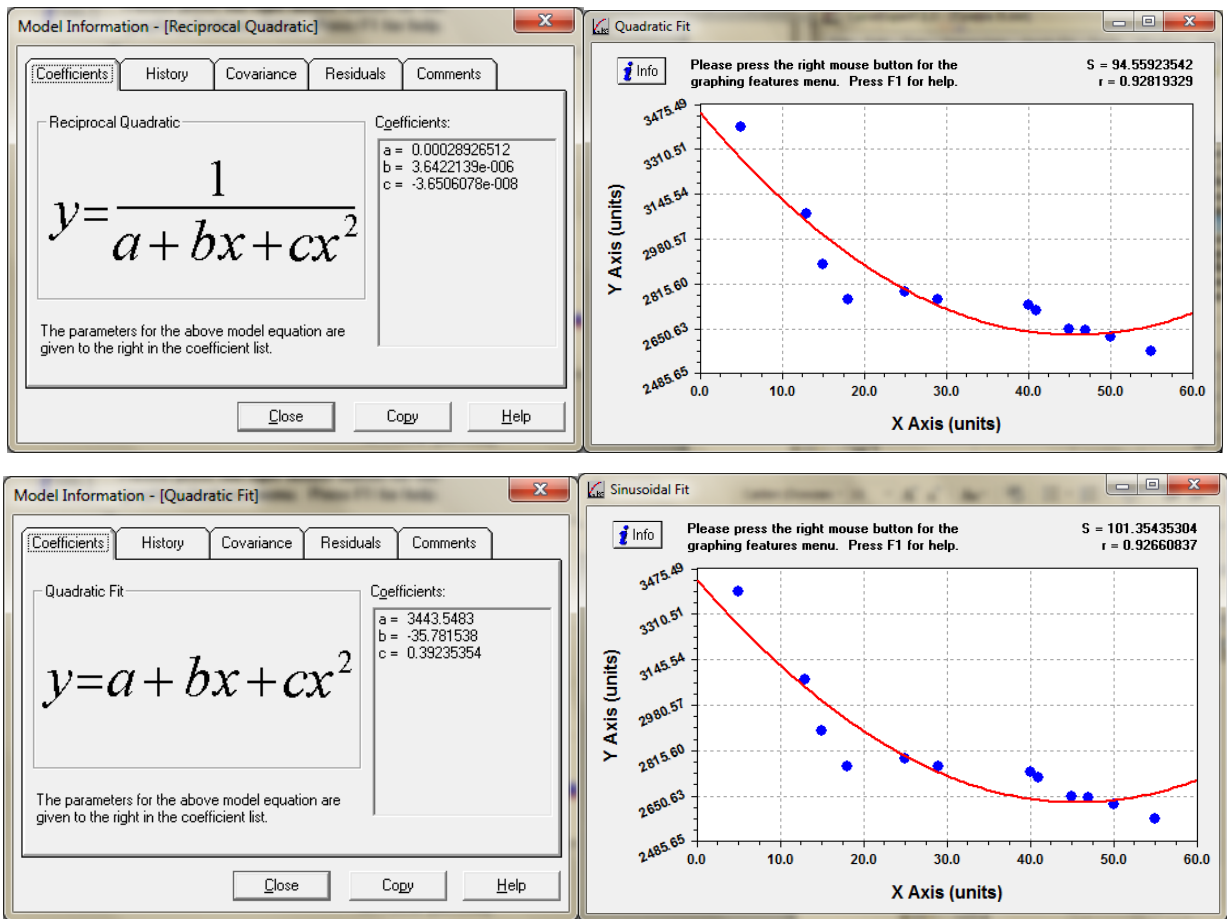


Рисунок 3.2 – Апроксимація регресії  $B = f_2(p)$  за допомогою програми Curve Expert.

Перевагу було надано рівнянню Logistic Model

$$y = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-cx}}, \quad (3.2)$$

де  $y = B$  - собівартість метра проходки;  $x$  - потужність на долоті;  $a$ ,  $b$  - коефіцієнти моделі.

Коефіцієнт кореляції для даної моделі дорівнює 0,969.

Аналіз рівняння (3.2), довів, що зниження собівартості метра проходки можливо за рахунок збільшення потужності, що доводиться до вибою. Оскільки сучасні електробури Е-127, Е-164, Е-190, Е-215, Е-240, Е-290 [6] мають обмежену потужність електродвигунів, то доцільна її стабілізація під час поглиблення свердловини.

Слід відзначити, що регулятори подачі долота типу АВТ-2, які



і визначення функції передачі із виразу (3.5).

Ідентифікація функції передачі двигуна електробура проведена на основі експериментальних даних, одержаних під час буріння вертикальної ділянки свердловини №814Д електробуром Е250-10 в однорідних породах на глибині 215-717 м. В умовах експерименту не врахували втрати потужності в струмовідводі, а також вважали силу тертя колони бурильних труб об стінку свердловини сталюю.

В результаті було встановлено, що:

- автокореляційна функція  $R_{FF}(\tau)$  має тенденцію до затухання, що характеризує поглиблення свердловини, як ергодичний випадковий процес;

- періодична складова автокореляційної функції  $R_{pp}(\tau)$  характеризує буріння як не випадковий процес, обумовлений кінематикою шарошкового долота, м'якою підвіскою колони бурильних труб та ін.;

- проходження максимуму взаємної кореляційної функції  $R_{FP}(\tau)$  через нуль вказує на відсутність запізнення в системі.

В результаті розв'язання рівняння (3.6) отримано вираз для функції передачі по каналу осьова сила на долото  $F$  – активна потужність двигуна електробура  $P$ :

$$W(p) = \frac{P(p)}{F(p)} = \frac{0,63}{0,86p + 1}. \quad (3.6)$$

Вона характеризує динамічні властивості послідовного з'єднання таких ланок: давача сили; колони бурильних труб; двигуна; струмовідводу і давача активної потужності:

$$W(p) = W_F(p) \cdot W_1(p) \cdot W_\partial(p) \cdot W_{cn}(p) \cdot W_p(p).$$

Оскільки осьова сила на долото передається через колону бурильних труб, а вимірювання осьової сили і активної потужності здійснюється на поверхні, то функція передачі двигуна може бути визначена із співвідношення:

$$W_\partial(p) = \frac{W(p)}{W_F(p) \cdot W_1(p) \cdot W_{cn}(p) \cdot W_p(p)}, \quad (3.7)$$



і після підстановки конкретних значень параметрів функції передачі [5] для інтервалу буріння 2073-2177,6 м отримаємо таке характеристичне рівняння:

$$0,0000024p^8 + 0,00018p^7 + 0,00487p^6 + 0,062p^5 + 0,42p^4 + 1,56p^3 + 3,66p^2 + 4,97p + 7,1 = 0. \quad (3.11)$$

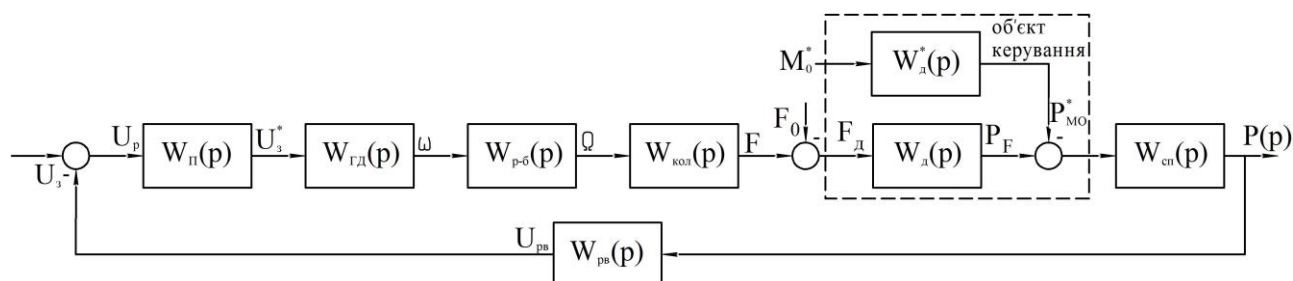


Рисунок 3.13– Структурна схема системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна електробура:  $W_{п}(p)$  - еквівалентна функція передачі підсилювачів;  $W_{гд}(p)$  - функція передачі системи «генератор двигун» приводу подачі долота;  $W_{р-б}(p)$  - функція передачі сукупності механічних елементів – редуктора і барабана лебідки;  $W_{кол}(p)$  - функція передачі колони бурильних труб;  $W_{д}^*(p)$  - функція передачі двигуна за збуренням  $M_o^*$ ;  $M_o^*$  - момент опору;  $W_{рв}(p)$  - функція передачі давача потужності на валі двигуна електробура

### 3.2. Дослідження стійкості системи автоматичного керування

Проаналізуємо стійкість системи автоматичного керування (САК), властивості якої описуються характеристичним рівнянням (3.11).

Оскільки всі коефіцієнти характеристичного рівняння більші нуля ( $a_0 = 7,1 > 0$ ;  $a_1 = 4,97 > 0$ ;  $a_2 = 3,66 > 0$ ;  $a_3 = 1,56 > 0$ ;  $a_4 = 0,42 > 0$ ;  $a_5 = 0,062 > 0$ ;  $a_6 = 0,00487 > 0$ ;  $a_7 = 0,00018 > 0$ ;  $a_8 = 0,0000024 > 0$ ), то це означає, що необхідні умови стійкості системи виконуються.

Для перевірки достатніх умов стійкості скористаємось критеріями Ляпунова, Гурвіца та Михайлова.

*Критерій Ляпунова*



Потім визначник заповнюють по стовпцях: вище діагональних коефіцієнтів записуються коефіцієнти із індексами, що зменшуються, а нижче – із зростаючими. При досягненні нульового або  $n$ -го індексу далі ставляться нулі.

Для визначення стійкості досліджуваної системи скористаємося програмним пакетом Mathcad за допомогою наступного алгоритму (Додаток А).

Як бачимо визначник Гурвіца і його діагональні мінори додатні. Отже, система, що досліджується є стійкою.

### *Критерій Михайлова*

Для оцінки стійкості системи за допомогою критерію Михайлова важливо встановити розміщення кривої Михайлова, відносно початку координат.

Для побудови кривої Михайлова проведемо в заданому рівнянні (3.11) підстановку  $p \rightarrow j\omega$ . В результаті отримаємо:

$$0,0000024\omega^8 + 0,00018j\omega^7 + 0,00487\omega^6 + 0,062j\omega^5 + 0,042\omega^4 - 1,56j\omega^3 - 3,66\omega^2 + 4,97j\omega + 7,1 = 0. \quad (3.16)$$

Виділимо дійсну та уявну частину:

$$P(\omega) = 0,0000024\omega^8 + 0,00487\omega^6 + 0,042\omega^4 - 3,66\omega^2 + 7,1, \quad (3.17)$$

$$Q(\omega) = 0,00018j\omega^7 + 0,062\omega^5 - 1,56\omega^3 + 4,97\omega. \quad (3.18)$$

Для побудови годографа використаємо програму Mathcad. В результаті проведеного моделювання отримали таку криву Михайлова.

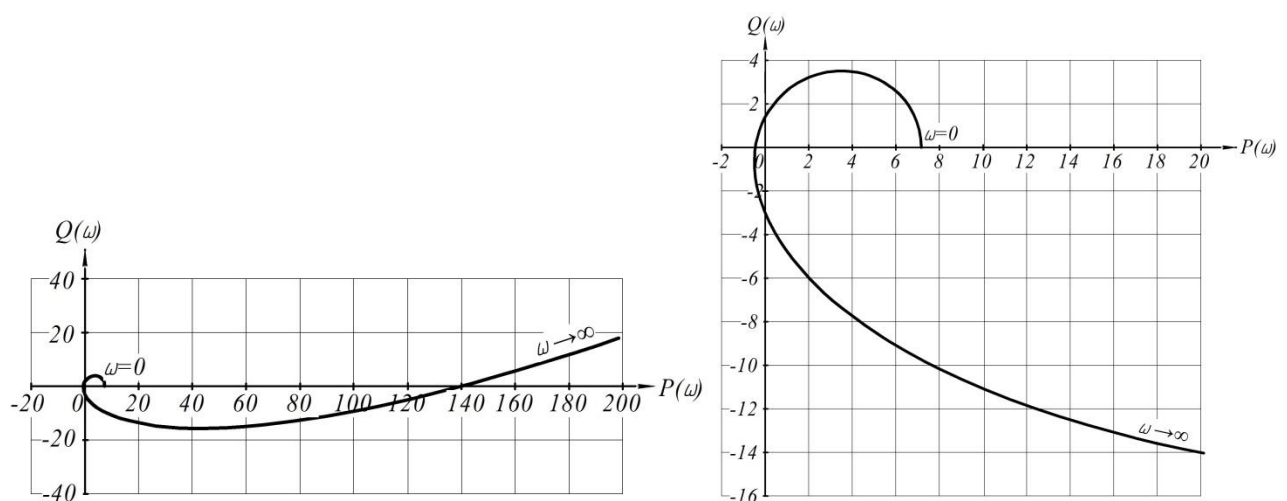


Рисунок 3.4– Крива Михайлова для оцінки стійкості системи автоматичного керування

Після проведення відповідних побудов можемо сказати, що система стійка.

У результаті проведення відповідних досліджень методами Ляпунова, Гурвіца і Михайлова можемо сказати, що система стійка, бо дане характеристичне рівняння задовольняє усі досліджувані достатні умови стійкості. Для виявлення поведінки системи керування при зміні параметрів окремих ланок проведемо аналіз властивостей системи автоматичного керування за допомогою методу кореневих годографів.

В результаті зміни параметра  $a_0$  змінюються і корені характеристичного рівняння, які в результаті описують відповідні траєкторії (рис. 3.5).

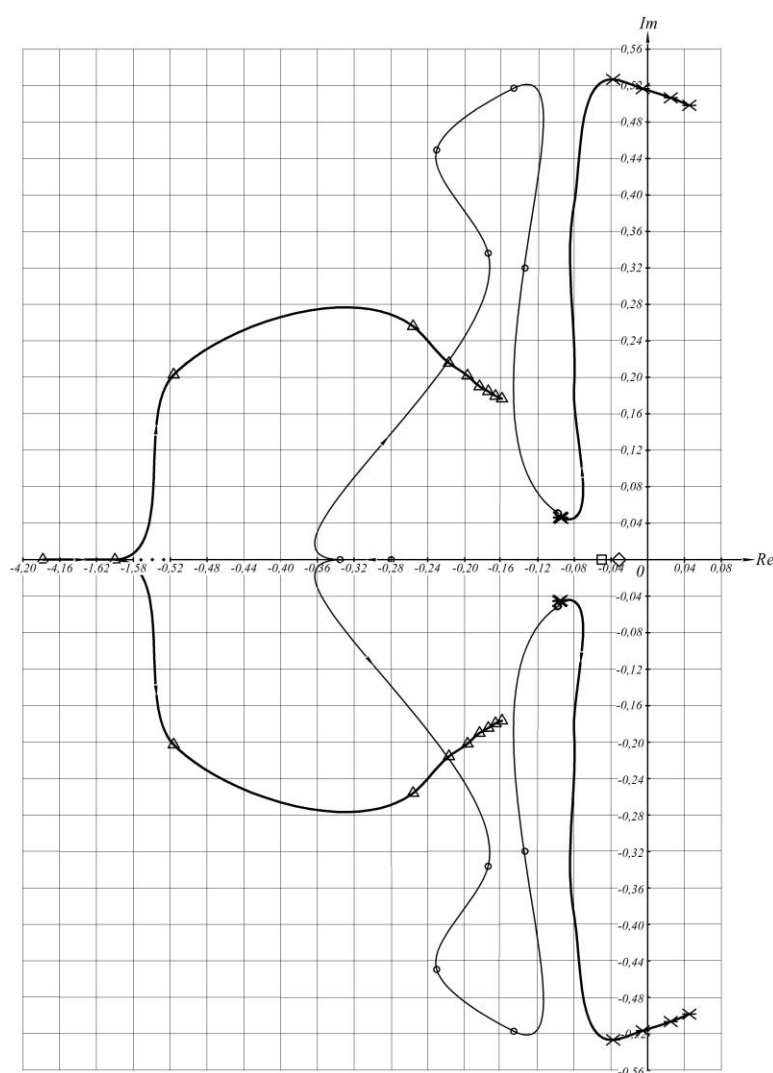


Рисунок 3.5 – Траєкторії коренів характеристичного рівняння (11) при зміні коефіцієнта  $a_0$ :  $\Delta$  - перший корінь;  $\circ$  - другий корінь;  $\otimes$  - третій корінь;  $\square$  - четвертий корінь;  $\diamond$  - п'ятий корінь

Для знаходження коренів рівняння (4.11) при зміні параметра  $a_1$  від 1 до 5 також скористаємося критерієм Ляпунова, який описаний в програмному пакеті Mathcad (Додаток Б). Кореневий годограф, утворений при зміні коефіцієнта  $a_1$ , наведений на рис. 3.6.

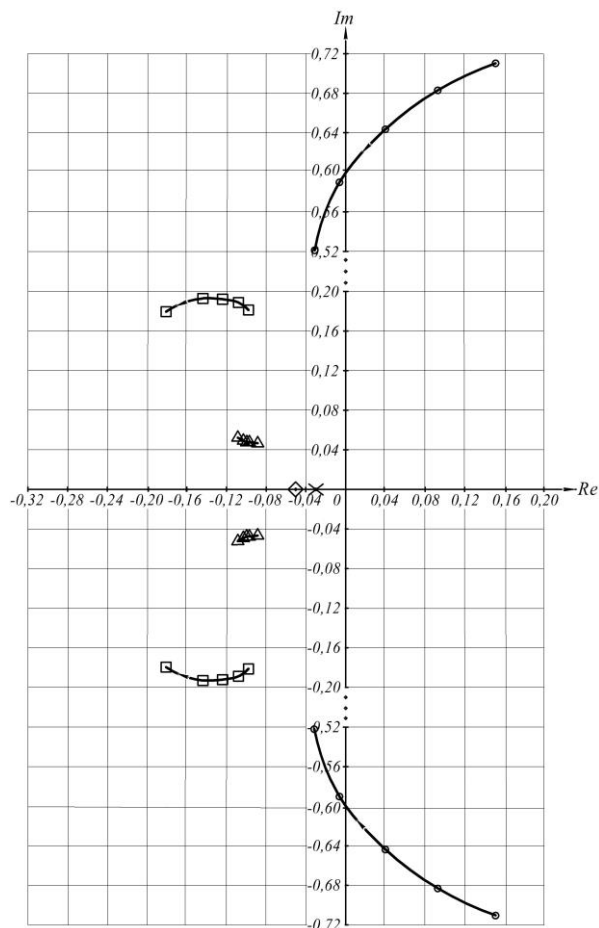


Рисунок 3.6 – Траєкторії коренів характеристичного рівняння (1) при зміні коефіцієнта  $a_1$ :  $\square$  - перший корінь;  $\triangle$  - другий корінь;  $\diamond$  - третій корінь;  $\times$  - четвертий корінь;  $\circ$  - п'ятий корінь

З аналізу траєкторій, наведених на рис.3.4, бачимо, що п'ятий корінь характеристичного рівняння суттєво впливає на стійкість САК і може перевести її в область нестійких режимів роботи.

Для оцінювання якості процесу керування визначимо перехідну функцією  $h(t)$ , тобто зміну вихідної величини в часі після подачі на вхід одиничного ступінчатого впливу при нульових початкових умовах.

Врахуємо, що перехідна функція  $h(t)$  має дві складові: вимушену  $h_e(t)$  і вільну  $h_{вн}(t)$ :

$$h(t) = h_e(t) + h_{вн}(t). \quad (3.19)$$

Вимушена складова  $h_e(t)$  дає частковий розв'язок рівняння при ступінчатому впливі. Вона дорівнює ustalеному значенню вихідної величини при  $t \rightarrow \infty$ :

$$h_e(t) = y(t) = y(\infty). \quad (3.20)$$

Вільна складова  $h_{вн}(t)$  знаходиться із розв'язку однорідного диференційного рівняння:

$$h_{вн}(t) = \sum_{k=1}^n c_k e^{p_k t}, \quad (3.21)$$

де  $p_k$  – корені характеристичного рівняння;  $c_k$  – постійні інтегрування, які залежать від початкових умов.

Корені розглядуваного нами характеристичного рівняння (3.11) знайдені вище за критерієм Ляпунова, алгоритм якого записаний в програмному пакеті Mathcad.

Оскільки характеристичне рівняння має пари комплексних спряжених коренів  $p_k = \alpha + j\omega$  і  $p_k = \alpha - j\omega$ , то в таких випадках для окремої пари значення вільних складових буде наступним:

$$c_i e^{(\alpha + j\omega)t} + c_{i+1} e^{(\alpha - j\omega)t} = e^{\alpha t} (c_i e^{j\omega t} + c_{i+1} e^{-j\omega t}) = e^{\alpha t} ((c_i + c_{i+1}) \cos(\omega \cdot t) + (c_i - c_{i+1}) \sin(\omega \cdot t)) \quad (3.22)$$

Враховуючи дані зауваження можемо отримати значення вільної складової:

$$\begin{aligned} h_{вн}(t) = & e^{-0,182t} ((c_1 + c_2) \cos(0,191 \cdot t) + (c_1 - c_2) \sin(0,191 \cdot t)) + \\ & + e^{-0,097t} ((c_3 + c_4) \cos(0,049 \cdot t) + (c_3 - c_4) \sin(0,049 \cdot t)) + c_5 e^{-0,048t} + \\ & e^{-0,032t} ((c_6 + c_7) \cos(0,526 \cdot t) + (c_6 - c_7) \sin(0,526 \cdot t)) + c_8 e^{-0,031t}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Враховуючи отримані результати, на рис. 3.3 та рис. 3.4 проведено моделювання перехідної та імпульсної перехідної характеристики в програмному пакеті Matlab за допомогою структурної схеми наведеної на рис. 3.7.

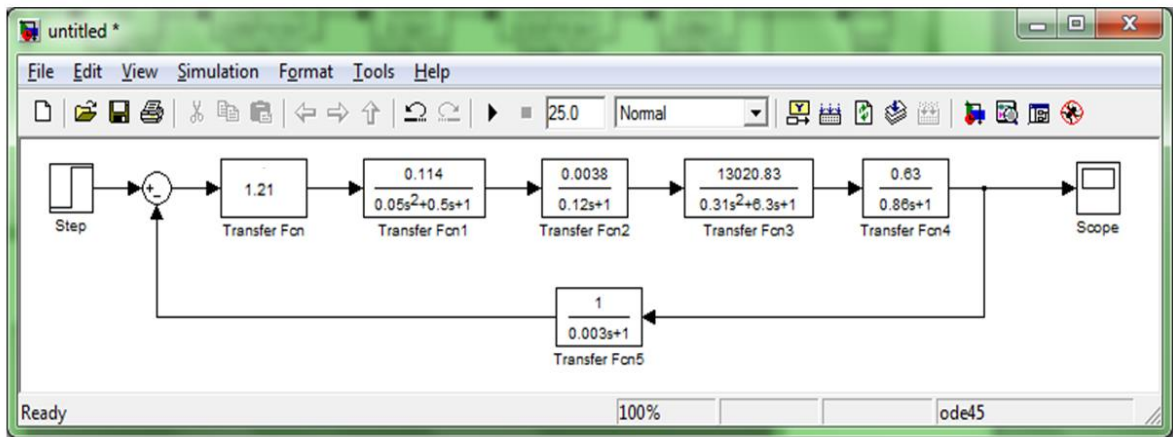


Рисунок 3.7 – Структурна схема в середовищі Matlab

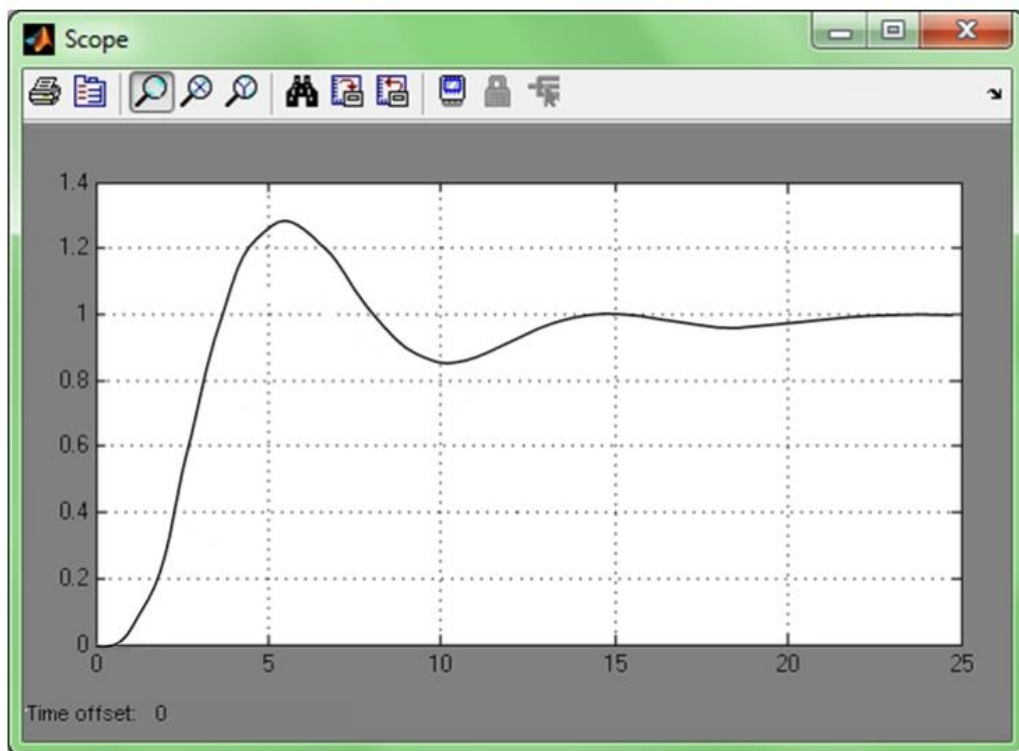


Рисунок 3.8 – Перехідна характеристика: перерегулювання:

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{cm}}{h_{cm}} 100\% = \frac{1.29 - 1}{1} 100\% = 29\%; \text{ час регулювання: } t_p = 12\text{c};$$

час досягнення максимального значення:  $t_{\max} = 5.2\text{c}$ ; час наростання перехідної характеристики:  $t_y = 4\text{c}$ ; максимальне значення перехідної характеристики:

$$h_{\max} = 1.29; \text{ кількість коливань: } 2$$



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технологічних показників і енергетики електробурів, зокрема зношення шарошкового долота та вплив даного процесу на ефективність процесу буріння. Викладено принципів автоматизовані системи управління процесом буріння та спроектовано схему автоматизації процесу буріння нафтогазових свердловин електробурами.

2. Проаналізовано основні закономірності буріння. Серед критеріїв оптимальності виділено критерій максимальної потужності на долоті та мінімум вартості проходки свердловини. Сформульовано цілі управління і заходи для її досягнення, включаючи перелік конкретних цільових заходів, реалізація яких дозволить досягти поставлену ціль, визначити структуру та джерела ресурсів, необхідних для здійснення накреслених заходів, вибрати систему моніторингу та контролю за ходом досягнення поставленої мети.

3. Встановлено залежність в часі площі затуплення шарошкового долота при бурінні в однорідних породах. Збільшення площі затуплення шарошкового долота призводить до зменшення питомого осьового навантаження і потужності на долоті. Встановленні моделі зв'язків енергетичних показників з осьовим навантаженням на долото. Також встановлена залежність між кількісною оцінкою ефективністю буріння і потужністю на долоті, та запропонований спосіб більш нового використання потужності зануреного електродвигуна при бурінні свердловини шляхом підвищення точності системи стабілізації потужності на валу двигуна.

В результаті проведених досліджень системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна електробура E250-10 доведено, що вільний рух системи є стійким, що підтверджується експериментальними даними.

Моделювання в середовищі Matlab траєкторій коренів характеристичного рівняння, а також перехідної та імпульсної перехідної характеристики системи дозволило визначити параметри перехідного процесу.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бунчак З. Електробур. Парадокси і реальність. /З. Бунчак, О. Дудар, О. Кекот, О. Турянський // Електроінформ. – 2003.№4.-С.8-11.
2. Горбійчук М.І., Чигур Л.Я. Теорія автоматичного керування. Нелінійні системи. Лабораторний практикум, ІФНТУНГ, 2024. – 84 с.
3. Мельник, О. І. Системи автоматизації технологічного процесу нафтогазовидобувних підприємств: [монографія] / О.І. Мельник Івано-Франківськ: Видавництво ІФНТУНГ. – 2015. – 322 с.
4. Семенцов Г.Г. Автоматизація технологічних процесів та виробництв в нафтовій та газовій промисловостях: [навч.посібник] /М.І. Горбійчук, Г.Н.Семенцов, М.М. Дранчук, Я. Р. Когуч та ін. – Івано-Франківськ: Факел. – 2003. – 327 с.
5. Програмування у середовищі Matlab. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-mapreduce-hadoop.html>

						БР.АКП–38.00.00.000 ПЗ	55
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			

## БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Бакалаврська робота на тему «Дослідження динаміки регулювання процесу буріння електробурами в умовах невизначеності», містить пояснювальну записку в розмірі 55 аркушів друкованого тексту, графічного матеріалу 6 аркушів формату А4.

Перелік креслень графічної частини:

1. БР.АКП-38.00.00.001 – Графіки зміни затуплення зубів 1,2,3-го вінців 3-ої шарошки долота в часі.
2. БР.АКП-38.00.00.002 – Зміна в часі механічної швидкості проходки  $V_m$ , проходки  $h$ , струму навантаження  $I$ , потужності  $P$ , відносного зносу  $\varepsilon$ , питомих енерговитрат  $A$  при бурінні з постійним навантаженням на долото.
3. БР.АКП-38.00.00.003 - Розрахунок оптимальних параметрів керування процесом буріння.
4. БР.АКП-38.00.00.004 - Структурна схема системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна електробура.
5. БР.АКП-38.00.00.005 – Крива Михайлова для оцінки стійкості системи автоматичного керування.
6. БР.АКП-38.00.00.06 – Структурна схема САК у програмному середовищі Matlab.