

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП -22.00.00.000 ПЗ

група АКП -21-1

Ярослав Тимків

2025 рік

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Тимків Ярослав Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:004.89

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Дослідження впливу похибок на ефективність автоматичного

(назва роботи)

керування динамічними об'єктами

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

к.т.н. О. В. Кучмистенко
(науковий ступінь, підпис) (дата) (ініціали та прізвище)
вчене звання)

Рецензент

к.т.н., доцент
(науковий ступінь, підпис) (дата) (ініціали та прізвище)
вчене звання)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1 Я. М. Тимків
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент Г. Г. Зварич
(науковий ступінь, підпис) (дата) (ініціали та прізвище)
вчене звання)

Допущено до захисту Завідуючий кафедри

к.т.н., доцент А. І. Лагойда
(науковий ступінь, підпис) (дата) (ініціали та прізвище)
вчене звання)

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 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І. Лагойда.

«___» _____ 20__ року

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

Тимківу Ярославу Михайловича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Дослідження автоматизованої системи керування продуктивністю бурового насоса.**

керівник роботи Зварич Галина Григорівна, асистент

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

затвердені 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 продуктивності насосів на ефективність процесу буріння свердловин електробурами. 2. Математичне моделювання й ідентифікація процесу буріння свердловин як об'єкта керування.

3. Структурно-алгоритмічний синтез системи керування продуктивністю бурового обладнання. 4. Дослідження параметрів стійкості та регуляторних властивостей системи автоматичного контролю продуктивності насоса.

Висновки. Список використаної літератури.

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

1. БР.АКТ-22.00.00.001 – Структурна схема об'єкта моделювання.

2. БР.АКП-22.00.00.002 – Модель “вхід-вихід” керування типу SI-SO.

3. БР.АКП-22.00.00.003 – Схема оснащення приладами системи автоматичної стабілізації продуктивності бурового насоса. 4. БР.АКП-22.00.00.004 – Експериментальна і апроксимована крива розгону та функція передачі об'єкта регулювання.

5. БР.АКТ-22.00.00.005-Функціональна та алгоритмічна структури, характеристичне рівняння. 6. БР.АКТ-22.00.00.06– Аналіз стійкості САК за критерієм Найквіста.

7. БР.АКТ-22.00.00.07- Графік перехідного процесу та графіки АЧХ і ФЧХ.

8. БР.АКТ-22.00.00.08- Система керування з врахуванням рішень оператора.

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 продуктивності насосів на ефективність процесу буріння свердловин електробурами	13.05.2025	
2	Математичне моделювання й ідентифікація процесу буріння свердловин як об'єкта керування	20.05.2025	
3	Структурно-алгоритмічний синтез системи керування продуктивністю бурового обладнання	30.05.2025	
4	Дослідження параметрів стійкості та регуляторних властивостей системи автоматичного контролю продуктивності насоса	05.06.2025	
5	Оформлення бакалаврської роботи	12.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Я. М. Тимків _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Г. Г. Зварич _____
(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить: 63 сторінки, 22 рисунків, 9 таблиця, 15 джерел.

Тема: «Дослідження автоматизованої системи керування продуктивністю бурового насоса».

Метою роботи є підвищення ефективності процесу буріння нафтових і газових свердловин за рахунок використання удосконалених моделей для керування продуктивністю насосів в умовах невизначеності.

Об'єкт дослідження: процес буріння нафтових і газових свердловин.

Предмет дослідження: методи автоматичного регулювання продуктивністю бурових насосів.

Виконані дослідження щодо математичного моделювання й ідентифікація об'єкта керування, було розроблено структурну схему об'єкта моделювання. До схеми автоматичної системи стабілізації швидкості двигуна бурового насоса підбрані прилади, які б забезпечували безперебійну роботу даного процесу. Також визначали перехідну функцію за допомогою програми Argox 1.0 і отримали експериментальний і апроксимований графіки перехідного процесу.

Складено також алгоритмічну структуру системи автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса ,згідно якої знайдено характеристичне рівняння системи. Також вибрано тип тахометра, який б забезпечив надійну роботу автоматичної системи стабілізації швидкості двигуна бурового насоса.

Розроблено структуру процесу проектування фазі-контролера, який складається з чотирьох етапів: аналіз системи; встановлення алгоритмічних ступенів свободи; встановлення параметричних ступенів свободи; моделювання спроектованого контуру регулювання.

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

ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 63 pages, 22 figures, 9 tables, 15 sources.

Topic: "Study of an automated system for controlling the performance of a drilling pump".

The purpose of the work is to increase the efficiency of the drilling process of oil and gas wells by using improved models for controlling the performance of pumps under conditions of uncertainty.

Object of research: the process of drilling oil and gas wells.

Subject of research: methods of automatic regulation of the performance of drilling pumps.

Research has been carried out on mathematical modeling and identification of the control object, a structural diagram of the modeling object has been developed. Devices have been selected for the scheme of the automatic system for stabilizing the speed of the drilling pump engine, which would ensure the uninterrupted operation of this process. The transition function was also determined using the Aprox 1.0 program and experimental and approximate graphs of the transition process were obtained.

The algorithmic structure of the system for automatic stabilization of the speed of the drilling pump engine has also been developed, according to which the characteristic equation of the system has been found. The type of tachometer has also been selected, which would ensure reliable operation of the automatic stabilization system for the speed of the drilling pump engine.

The structure of the design process of the fuzzy controller has been developed, which consists of four stages: system analysis; setting algorithmic degrees of freedom; setting parametric degrees of freedom; modeling the designed control loop.

Keywords: automatic stabilization, performance, engine, control, stability criterion, modeling, control object, structural diagram, transfer function.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ НАСОСІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ	
ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ.....	9
1.1 Структура та особливості об’єкта керування	9
1.2 Розгляд методів і інструментів керування продуктивністю бурових насосів у режимі автоматизації	24
1.3 Вибір методу регулювання продуктивності бурового насоса.....	27
Висновки до розділу.....	28
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ Й ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ	
БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	29
2.1 Узагальнена математична модель технологічного процесу буріння свердловин.....	29
2.2 Схема проведення експерименту на об’єкті керування (ОК).....	30
2.3 Результати досліджень статистичних характеристик тиску бурового розчину.....	31
2.4 Ідентифікація параметрів функції передачі об’єкта керування... ..	40
Висновки до . розділу.....	41
3 СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ	
КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ БУРОВОГО ОБЛАДНАННЯ	43
3.1 Синтез функціональної структури системи автоматичного регулювання продуктивності бурового насоса.....	43

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження автоматизованої системи керування продуктивністю бурового насоса	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Тимків Я.М.						
Перевір.		Зварич Г.Г.					7	79
Реценз.						ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.				АКП-21-1		
Затверд.		Лагойда А.І.						

3.2 Синтез алгоритмічної структури автоматичного регулювання продуктивності бурового насоса.....	44
3.3 Вибір додаткових приладів.....	45
Висновки до розділу.....	46

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТІЙКОСТІ ТА РЕГУЛЯТОРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПРОДУКТИВНОСТІ НАСОСА	47
4.1 Вибір критерію стійкості та аналіз стійкості системи регулювання.....	47
4.2 Аналіз показників якості системи регулювання.....	49
4.3 Синтез фазі-системи регулювання.....	53
Висновки до розділу.....	58
ВИСНОВОК	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	61
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....	65

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БУ – бурова установка
АФХ - амплітудно-фазова характеристика
АЧХ - амплітудно-частотна характеристика
ДВЗ - двигун внутрішнього згоряння
ЕМ - еластична муфта
ЗП – задаючий пристрій
ЗІЗ - засоби індивідуального захисту
КП - корегуючий пристрій
М – двигун
Н - насос
ОЗД - обмежуючий збуджуючий двигун
ОК- об'єкт керування
ППР - пристрій перетворення руху
САК - система автоматичного керування
САР – система автоматичного регулювання
ТГ- тахогенератор.
ТП- тиристорний перетворювач
ФЧХ - фазо-частотна характеристика
SI-SO – singl input – singl output

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Актуальність теми бакалаврської роботи. Задача автоматизації процесів керування динамічними об'єктами, які функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта і навколишнього середовища, що виявляє себе у вигляді контрольованих і неконтрольованих збурень і перешкод різної природи, є однією із ключових у сучасній теорії керування. Це пояснюється тим, що багато об'єктів керування нафтогазової промисловості відносяться до класу погано визначених об'єктів, що мають нелінійні статистичні й динамічні характеристики. До таких об'єктів відноситься процес буріння нафтових і газових свердловин, який є невідтворюваним, нестационарним, розвивається у часі і протікає в умовах значної невизначеності, яка обумовлена наявністю високого рівня шумів у каналах передачі інформації «вибій – гирло свердловини» та зміною фізико-механічних і абразивних властивостей гірських порід [1,2,4 та ін.].

Оскільки ефективність систем автоматизації процесів керування бурінням свердловин істотно залежить від особливостей керованого процесу, та від рівню апріорної та поточної невизначеності про зовнішні збурення, то саме дефіцит цієї інформації і поставив проблему адаптивної ідентифікації, контролю і керування бурінням свердловин.

Актуальним є розроблення і дослідження системи автоматичного регулювання продуктивності бурового насосу в однорідних за буримістю пластах порід під час основного періоду роботи долота за умов рівноваги або допустимого мінімального перевищення свердловинного тиску над пластовим тиском.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу буріння нафтових і газових свердловин за рахунок використання удосконалених моделей для керування продуктивністю насосів в умовах невизначеності.

Об'єкт дослідження: процес буріння нафтових і газових свердловин.

Предмет дослідження: методи автоматичного регулювання продуктивністю бурових насосів.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Авк.
						8
Змн.	Авк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ НАСОСІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

1.1. Структура та особливості об'єкта керування

Продуктивність насосного обладнання є одним із ключових чинників, що визначає стабільність і ефективність буріння свердловин, особливо за умов використання електробурів. Подача бурового розчину з необхідними параметрами тиску та витрати забезпечує охолодження робочого інструмента, винос шламу з вибою свердловини та підтримання гідравлічної рівноваги в системі [1÷8].

У системах із електробурами, які працюють у складних геологічних умовах, наявність надійної та гнучкої насосної системи дозволяє оптимізувати режими буріння, зменшити знос інструменту та підвищити загальну продуктивність робіт. Недостатня або нестабільна подача бурового розчину може призвести до перегріву електродвигуна, зниження ефективності буріння або навіть аварійного зупинення процесу.

Таким чином, ефективне регулювання продуктивності насосів є критично важливим для забезпечення безперервності бурового процесу, підвищення енергоефективності системи та досягнення високих технологічних показників у бурінні свердловин з використанням електробурів. Встановлено, що збільшення потужності, яка підводиться до долота, покращує показники його роботи: зростає механічна швидкість проходки; збільшується проходка на долото; скорочується час механічного буріння та об'єм спуско-підіймальних операцій і решта види операцій, що залежать від проходки на долото. Проте характер зміни цих чинників із збільшенням потужності поки ще не встановлений, а окремі результати не узагальнені.

Труднощі виявлення впливу продуктивності бурових насосів на ефективність процесу буріння нафтогазових свердловин електробурами обумовлені різноманіттям підходів до його оцінки, недоліками вимірювання

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Док.
Змн.	Док.	№ доквм.	Підпис	Дата		9

До першої групи змінних $\bar{U}^T(t)$, що діють на вході об'єкта керування відносять [3, 8]: осьове навантаження на долото $F(t)$, швидкість обертання долота $n(t)$, витрату промивальної рідини $Q(t)$ та тиск промивальної рідини $p(t)$. Вважатимемо сукупність параметрів $F(t)$, $n(t)$, $Q(t)$, $p(t)$ компонентами вектора вхідних величин процесу буріння електробурами, тобто керувальними діями:

$$U^T t = (Ft, nt, Qt, pt). \quad (1.1)$$

Відзначимо, що $n(t)$ залежить від $F(t)$ і характер цієї залежності визначається типом механічних характеристик двигуна електробура, колони бурильних труб і долота. $Q(t)$ і $p(t)$ також взаємно зв'язані і їх зв'язок визначається параметрами технічної гідравлічної системи промивки свердловини.

До другої групи змінних входять некеровані зовнішні впливи $\tilde{f}(t)$, діаметр долота, що характеризують умови роботи електробура.

До третьої групи віднесені показники процесу буріння електробуром, що залежать від вхідних параметрів $\bar{U}^T(t)$. Будемо вважати, що показники процесу є компонентами вектора вихідних змінних:

$$x^T t = (ht, vMt, It, Pat, \varepsilon t, gt, Bc, vp) \quad (1.2)$$

Кожна з вихідних величин є функцією керувальних дій $\bar{U}(t)$ та вхідних величин $\bar{z}(t), \tilde{f}(t)$.

$$\bar{x}_j(t) = \varphi_j(\bar{U}(t), \bar{z}(t), \tilde{f}(t)), \quad (1.3)$$

$j=1, 2, \dots, m$, де m – кількість вихідних величин.

Отже,

$$\{(h(t), v_M(t), I(t), P_a(t), \varepsilon(t), g(t), B_c, v_p)\} = \varphi\{F(t), n(t), Q(t), p(t), \tilde{f}(t)\} \quad (1.4)$$

Внаслідок дії на процес буріння великої кількості збурень таких як: фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск та ін., вхідні та вихідні величини процесу вимірюються з певними похибками, які можна трактувати як адитивний шум $e(t)$.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

Тоді

$$\left. \begin{aligned} \tilde{F}(t) &= F(t) + e_F(t); & \tilde{n}(t) &= n(t) + e_n(t); \\ \tilde{p}(t) &= p(t) + e_p(t); & \tilde{Q}(t) &= Q(t) + e_Q(t); \\ \tilde{h}(t) &= h(t) + e_h(t); & \tilde{v}_M(t) &= v_M(t) + e_{v_M}(t); \\ \tilde{I}(t) &= I(t) + e_I(t); & \tilde{P}_a(t) &= P_a(t) + e_{P_a}(t); \\ \tilde{\varepsilon}(t) &= \varepsilon(t) + e_\varepsilon(t); & \tilde{g}(t) &= g(t) + e_g(t). \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Отже процес буріння свердловин електробурами описується сукупністю випадкових процесів $F(t), n(t), Q(t), p(t), h(t), v_M(t)$ та іншими, які стохастично зв'язані між собою.

Оскільки експериментальні дослідження процесу буріння електробурами проводили в стаціонарному режимі, оцінки математичного сподівання досліджуваних параметрів під час експерименту вважатимемо постійними. Це дозволяє розглядати досліджувані параметри, як квазістаціонарні випадкові функції.

У роботах [3, 8 та ін.] доведено, що досліджувані квазістаціонарні функції мають властивість ергодичності, як по відношенню до оцінки математичного сподівання, так і оцінок автокореляційних функцій: $R_{FF}(t), R_{nn}(t), R_{QQ}(t), R_{PP}(t), R_{v_M v_M}(t), R_{II}(t), R_{P_a P_a}(t)$ та ін. Така властивість дозволяє вважати процес на досліджуваних ділянках свердловини стаціонарним.

Проте, про стан озброєння долота “ ε ” та його опор “ g ” можна судити тільки опосередковано за результатами вимірювань механічної швидкості проходки та моменту на долоті.

У зв'язку з цим, ефективність процесу буріння будемо оцінювати за механічною швидкістю проходки

$$v_M(t) = \frac{dh}{dt}, \quad (1.6)$$

часом буріння t_δ , проходкою на долото $h(t_\delta)$, що безумовно пов'язані з продуктивністю бурових насосів, якістю очищення вибою свердловини та іншими факторами.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

Собівартість метра проходки свердловини визначатимемо за формулою [3]:

$$B_C = \frac{B_r(t_6 + t_{\text{сп}}) + d}{h(t_6)}, \quad (1.7)$$

де B_r - вартість години роботи бурової установки; $t_{\text{сп}}$ - час, що витрачається на спуско-підймальні операції; d - вартість долота.

Відомо [4÷9], що бурові насоси для усіх способів буріння є основними споживачами електроенергії. На більшості бурових установок широко застосовують поршневі двоциліндрові насоси подвійної дії, які при постійному числі ходів поршня за хвилину дозволяють в певних межах регулювати витрату промивальної рідини, шляхом заміни втулок циліндрів.

Використання підпірних насосів сприяє також зменшенню коливань в гідравлічному ланцюзі і дуже ефективно під час перекачування бурового розчину з великим вмістом повітря і газу. До теперішнього часу електропривод підпірних насосів, що застосовують на бурових установках на 70% є нерегульований. Слід зазначити, що в практиці буріння свердловин за кордоном, перехід на трипоршневі бурові насоси в основному здійснюється для бурових насосів великої потужності, що розраховані на великий тиск.

Для двопоршневих насосів, які ще застосовують в електробурінні, можна вважати, що для заданої глибини буріння існує залежність між моментом на валу двигуна насоса та швидкістю його обертання за законом параболи [8]. Коефіцієнт параболи залежить від конструкції, діаметра втулок, якості промивальної рідини та ін.

Основними чинниками, що визначають режим роботи бурових насосів, є тиск на його виході P і продуктивність Q , тобто кількість рідини в одиницю часу. Тиск на виході бурового насоса на деяку гідравлічну систему визначається за формулою [16]:

$$p = KQ^2, \quad (1.8)$$

де Q – продуктивність бурового насоса;

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Док.
						13
Змн.	Док.	№ доквм.	Підпис	Дата		

K – коефіцієнт, що характеризує загальний опір гідравлічної системи, тобто коефіцієнт гідравлічного опору.

Продуктивність бурового насосу Q вибирається технологічними службами, з урахуванням конкретних умов буріння і фіксується у геолого-технічному наряді для кожної бурової. Для нормального очищення вибою свердловини і підйому часток розбуреної породи на поверхню величина подачі повинна бути тим більша, чим більша площа вибою.

Гідравлічну потужність P_r і потужність бурового насосу P_n визначають за формулами [7.9]:

$$P_r = pQ; P_n = p \frac{Q}{\eta} , \quad (1.9)$$

де $\eta=0,9 \div 0,92$ –ККД, що враховує гідравлічні та механічні втрати в бурових насосах.

Згідно (1.8) і (1.9) неважко переконатися, що при постійних параметрах гідравлічної системи і змінної подачі бурового розчину $Q=\text{var}$, гідравлічна потужність P_r , пропорційна подачі у третьому ступені, тобто зростає досить інтенсивно.

Оптимальний режим роботи бурового насосу характеризується потужністю на виході, яка рівна номінальній $pQ=\text{const}$ [16]. Наближення до цього режиму для нерегульованого електроприводу насоса досягається шляхом застосування циліндричних втулок різного діаметру. На рис.1.2 подані графіки режимів роботи бурового насосу при різних видах електропривода, що характеризують зв'язки між подачею Q і тиском p на виході при різних значеннях діаметра втулки D .

Якщо прийняти, що в комплект бурового насосу входить 5 типорозмірів змінних втулок поршнів, то основні розрахункові точки 2,4,6,8,10, що відповідають різним діаметрам поршнів, будуть розташовані на розрахунковій кривій постійної потужності - гіперболі. При цьому точка 2 відповідає максимальному, а точка 10 – мінімальному діаметру поршня. Слід відмітити, що при незмінному діаметрі поршня подача бурового насоса

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

пропорційна швидкості двигуна привода, а момент на валу двигуна пропорційний тиску.

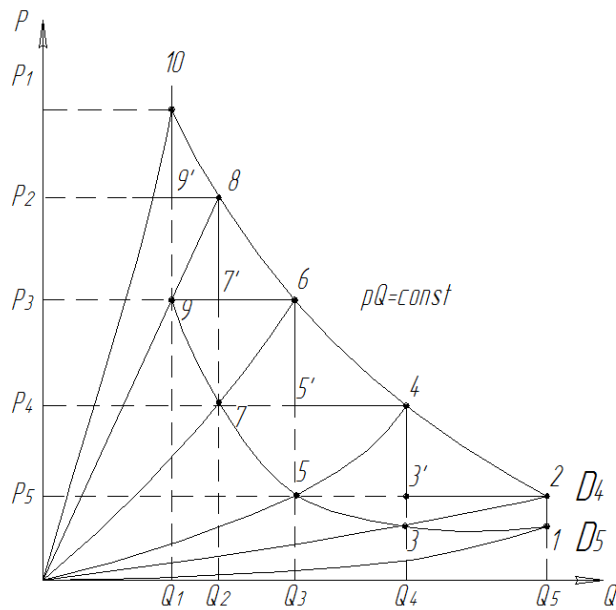


Рисунок 1.2 – Графіки режимів роботи бурового насоса при різних видах електроприводів: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8-9-10 – для нерегульованого електроприводу; 1-2-3'-4-5'-6-7'-8-9'-10 – для регульованого електроприводу (регулювання при постійному моменті); 2-4-6-8,10 – для регульованого електроприводу (регулювання при постійній потужності)

На основі викладеного встановлено, що електропривод бурового насоса повинен відповідати наступним вимогам [6]:

- можливість плавного, затягнутого в часі пуску (до 60с);
- можливість регулювання швидкості двигуна електропривода в режимі буріння до 50%, а в режимі відновлення циркуляції до 80% і більше вниз від номінального значення;
- під час регулювання швидкості вниз від номінального значення, привід повинен забезпечити сталість тиску бурового насоса, що відповідає сталості моменту на його валу;
- привід повинен мати жорстку механічну характеристику, з коефіцієнтом жорсткості близько 5%;
- привід повинен бути нереверсивний, а режим роботи-тривалий.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

В результаті дослідження регульованого електроприводу бурового насоса типу У8-6М встановлено [3], що у порівнянні з нерегульованим, регульований електропривод дозволяє збільшити механічну швидкість і проходку на долото на 20%, кількість рейсів доліт скоротити на 20%, а тривалість допоміжних операцій на 12%.

Переваги регульованого електроприводу бурових насосів особливо суттєві при бурінні свердловин електробурами. Вони полягають у наступному [6÷9]:

- найкраще використання встановленої потужності та робота в оптимальних режимах для кожного інтервалу буріння при різних типах вибійних двигунів, що забезпечує скорочення часу механічного буріння;

- збільшення швидкості буріння та середньої потужності, що підводиться до долота, а за необхідністю – збільшення гідравлічної потужності по мірі зносу вибійного двигуна;

- можливість пуску бурових насосів під навантаженням, що зменшує знос засувки і полегшує працю бурової бригади;

- скорочення часу спуско-підймальних, допоміжних і підготовчо-заклучних операцій, що зменшує кількість рейсів, оскільки збільшується середня проходка на долото;

- можливість швидкої ліквідації аварій, що пов'язані з прихватами й іншими аварійними ситуаціями.

- рівномірність подачі, що дозволяє відмовитись від пневмокомпенсаторів та ін.

За останні два десятиліття у світовій практиці буріння тиск і потужність бурових насосів зросли в 2 рази і досягли відповідно 40МПа і 1600÷1750 кВт [7]. Рівень робочих тисків під час буріння свердловин знаходиться в межах від 12 до 25 МПа. Максимальний тиск застосовують короткочасно, як правило в аварійних ситуаціях [6,7].

Напрямки розвитку електроприводу бурових насосів збігаються із загальною тенденцією розвитку електропривода, тобто розширюється

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

область застосування регульованого електроприводу та комп'ютерних засобів автоматизації як під час створення нового обладнання так і під час модернізації діючого.

Отже для конкретного електроприводу бурових насосів можна визначити такі напрямки його вдосконалення [6]:

- широке застосування силових напівпровідникових перетворювачів нових поколінь для регулювання координат (швидкості, моменту та ін.) електропривода;

- підвищення потужності силових перетворювачів і зниження їх габаритів;

- стандартизація, уніфікація електрообладнання та підвищення рівня його заводської готовності;

- створення комплексних електроприводів, що містять силове обладнання, системи автоматизованого керування, контролю та діагностики, включаючи уніфікацію та мініатюризацію технічних засобів автоматизації;

- застосування засобів комп'ютеризації та модульної побудови систем автоматичного керування;

- удосконалення конструкції електродвигунів і апаратури керування, що спрямована на підвищення їх надійності і рівня вибухозахисту;

- створення нових засобів автоматизованого керування.

В даний час усі провідні електротехнічні фірми випускають регульовані електроприводи комплектно з комп'ютерними засобами автоматизації у вигляді гнучко програмованих систем, що адаптуються до різних галузей застосування.

У зв'язку з засвоєнням промисловістю повністю керованих силових напівпровідникових приладів в модульному виконанні: потужних польових транзисторів (MOSFET), біполярних транзисторів із ізольованим затвором (IGBT), замикаючих тиристорів з інтегрованим керуванням (IGCT) і замикаючих тиристорів (GTO) розроблені напівпровідникові перетворювачі, що забезпечують плавне і економічне регулювання швидкості

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

електродвигунів в широкому діапазоні. Наприклад, для електроприводів потужністю до 1 МВт в перетворювачах частоти використовують модулі IGBT, а більше за 1 МВт – модулі GTO або IGBT.

Створення надійних статичних перетворювачів частоти для керування асинхронними електродвигунами з використанням засобів мікропроцесорної техніки призвело до масового застосування електроприводів за системою ПЧ-АД в різних галузях промисловості.

Розробки частотно-регульованих приводів знайшли застосування в електроприводах виконавчих механізмів ряду закордонних бурових установок наземного і морського буріння [6].

Кожен привід має індивідуальний інвертор, побудований за трифазною схемою, що складається з шести напівпровідникових ключів, а також має власну мікропроцесорну систему керування. Статична точність регулювання швидкості зі зворотнім зв'язком від імпульсного давача складає 0,01%, без зворотного зв'язку – від 0,5% до 3% [16].

Для регулювання швидкості електропривода насоса можна використати різні схеми і типи регульованого електроприводу як змінного, так і постійного струму (рис.1.3).



Рисунок 1.3 – Класифікація систем регулювання електроприводу бурових насосів [6]

Досвід експлуатації і результати аналізу роботи бурових насосів [9,10] показує, що максимально необхідний діапазон безступінчастого регулювання продуктивності бурових насосів по закону $P = p \cdot Q = \text{const}$ становить 24%. За даними фірми Security, що використовує для доліт РДС спеціальну гідравлічну програму, діапазон зміни витрати бурового розчину складає $12,6 \div 53,6 \frac{\text{л}}{\text{сек}}$, при зміні гідравлічної потужності в межах $3,1 \div 5,7 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$.

Оскільки збільшення витрати бурового розчину сприяло зростанню механічної швидкості проходки, була встановлена емпірична залежність мінімальної витрати бурового розчину Q_{\min} від діаметра долота [6]

$$Q_{\min} = 12,72 D_{\text{дол}}^{1.47}, \quad (1.10)$$

де $D_{\text{дол}}$ – діаметр долота.

Графік залежності витрати бурового розчину Q від діаметра шарошkových доліт і доліт РДС наведено на рис. 1.4.

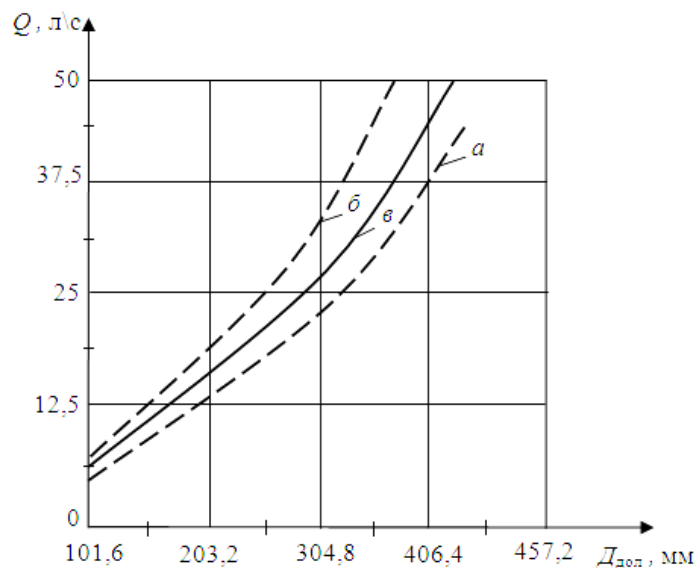


Рисунок 1.4 – Графік залежності витрати бурового розчину від діаметру доліт: *а, б* – відповідно мінімальна і максимальна витрата бурового розчину для шарошkových доліт; *в* – мінімальна рекомендована витрата бурового розчину для доліт РДС

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

внаслідок впливу механічних факторів (осьове навантаження на долото, крутний момент, частота обертання), а також конструктивних параметрів долота і фізико-механічних властивостей гірських порід. Отже, в режимі III гідравлічні параметри є оптимальними, з точки зору механічної швидкості проходки і довговічності долота. Оптимальна гідравлічна потужність визначається по точці 2 згину на рис.1.8.

На основі системного аналізу теоретичних і прикладних аспектів впливу продуктивності бурових насосів на ефективність процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами виявлено обмежену придатність стандартних підходів до керування процесом буріння. Це пов'язано з обмеженими можливостями регулювання продуктивності бурових насосів, а також з тим, що технічна гідравлічна система промивки свердловини є нелінійним динамічним об'єктом, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеностей під впливом збурень як внутрішнього, так і зовнішнього середовищ.

Теоретично обґрунтовано доцільність застосування для буріння свердловин електробурами бурових насосів з регульованим приводом з метою збільшення питомої гідравлічної потужності, що підводиться до долота. Це дає змогу суттєво збільшити проходку на долото і механічну швидкість проходки.

Для забезпечення високих значень механічної швидкості проходки і проходки на долото при бурінні нафтових і газових свердловин електробурами запропоновано, окрім регулювання осьового навантаження на долото та частоти його обертання, також застосовувати оптимальні гідравлічні програми буріння з регулюванням продуктивності бурових насосів для шарошкових доліт і доліт PDC. Впровадження таких програм сприятиме суттєвому зменшенню собівартості 1 метра проходки.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Авк.
						23
Змн.	Авк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

1.2 Розгляд методів і інструментів керування продуктивністю бурових насосів у режимі автоматизації

На рис. 1.9 зображено запропоновану комбіновану систему автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса. Об'єктом керування у даній схемі є процес автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса.

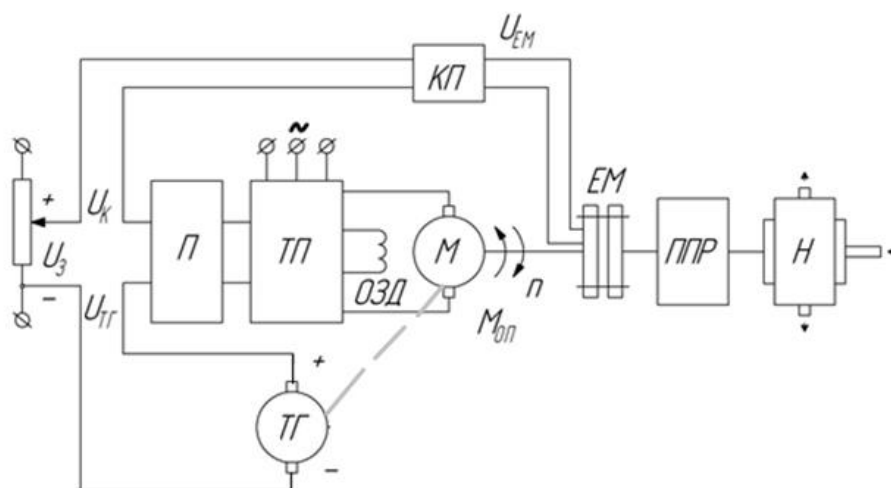


Рисунок 1.9 – Комбінована система автоматичної стабілізації продуктивності бурового насоса [6]

З тахогенератора напруга йде на підсилювач Π -пристрій, в якому здійснюється збільшення потужності вхідного сигналу за рахунок допоміжного джерела живлення. Далше сигнал поступає на тиристорний перетворювач ТП , від якого живиться обмотка збудження двигуна ОЗД , і двигун М .

Збурюючий вплив – момент опору $M_{оп}$ вимірюється за допомогою еластичної муфти ЕМ і вбудованого в муфту індуктивного давача. Електричний сигнал U_{EM} , пропорційний моменту опору, через корегуючий пристрій КП , надходить на вхід підсилювача Π .

Пристрій перетворення руху ППР перетворює обертальний рух в зворотно-поступальний, що призводить до початку руху поршня насоса.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

Для якісного проходження технологічного процесу, а також для ефективної роботи системи автоматизації необхідно визначити вхідні, вихідні і збурювальні величини (рис. 1.10).

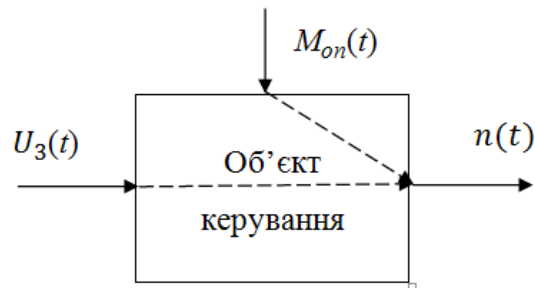


Рисунок 1.10 – Модель « вхід-вихід » об'єкта керування типу SI-SO

Вихідна величина – частота обертання двигуна $n(t)$ (керована величина) залежить від керувальної дії $U_3(t)$ і збурювального впливу $M_{оп}(t)$. Запишемо алгоритм функціонування ОК [3]:

$$N(t) = A_0[U_3(t), M_{оп}(t)], \quad (1.14)$$

де A_0 - деякий оператор, що зв'язує вхідні і вихідні величини.

У даному випадку об'єктом керування є процес автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса. На об'єкт надходить вхідна величина $U_3(t)$, значення якої впливає на регульовану величину об'єкту. На виході об'єкта керування є частота обертання двигуна $n(t)$, яка змінюється у процесі керування. Також на об'єкт керування діє збурення за заданим значенням $M_{оп}(t)$, яке намагається порушити необхідний функціональний зв'язок між керувальними діями і змінною, яка регулюється.

Основна мета автоматичного керування об'єктом полягає в тому, щоб безупинно підтримувати з заданою точністю необхідну функціональну залежність між керованими змінними, що характеризують стан об'єкта і керуючими впливами в умовах взаємодії об'єкта з зовнішнім середовищем, тобто при наявності як внутрішніх, так і зовнішніх збурювальних впливів [8]. Питанням дослідження регульованого електроприводу бурових насосів

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

присвячено праці вітчизняних науковців М.І.Горбійчука, Семенцової А. О., Костишина В. С., Федоріва М. Й. та інших [2,6,7,8].

Для буріння нафтових і газових свердловин переважно застосовуються поршневі насоси із змінними циліндричними втулками, які дозволяють в певних межах змінювати продуктивність насоса при постійній кількості ходів поршнів за хвилину. При незмінних глибині буріння, конструкції свердловини і бурильної колони та якості бурового розчину крутний момент на привідному валі бурового насосу зв'язаний параболічною залежністю з частотою обертання цього валу.

Оскільки тиск на виході насосів зростає по мірі заглиблення свердловин, а також збільшується кількість бурового розчину, який прокачується, тому, щоб не перебільшити допустиме зусилля на шток насосу, слід працювати з постійним тиском, що дорівнює гранично допустимому. Враховуючи, що зусилля на шток визначає необхідне значення крутного моменту для приводу насоса, регулювати продуктивність доцільно при постійному моменті. Регулювання продуктивності насосу потрібне ще й в ускладнених умовах буріння, а також при поновленні циркуляції бурового розчину в гідравлічній системі. Тому для бурових насосів доцільно, виходячи з умов допустимого навантаження, застосовувати електропривід з регулюванням швидкості при постійному моменті, який забезпечує можливість тривалої роботи на малій швидкості обертання.

Отже, актуальна задача керування витратами бурового розчину може бути вирішена за допомогою використання насосів з регульованим приводом, який дає змогу регулювати витрати від 0,025 до 0,015 м /с, тобто з глибиною регулювання приблизно 40 %. Регульований привід потрібен ще й тому, що різні умови буріння можуть вимагати різних витрат бурового розчину, потрібного для виносу породи та оптимізації режиму буріння. Одночасно зникає необхідність заміни насосних втулок. При бурінні верхніх ділянок стовбура свердловини можливе регулювання витрати у бік збільшення при заниженому значенні тиску на виході насосів.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Аналіз показує, що максимально потрібний діапазон безступінчатого регулювання продуктивності бурових насосів за законом $p = \text{const}$ складає 33,5%, а при регулюванні за законом $pQ = \text{const}$ - 24 %.

У перехідних режимах, які виникають під час ускладнень або поновленні циркуляції, діапазоні короткочасного регулювання продуктивності насоса складає 100 %.

1.3. Вибір і обґрунтування методу автоматичного регулювання продуктивності бурового насоса

На основі аналізу існуючих методів регулювання продуктивності бурових насосів було розглянуто кілька основних підходів: зміна частоти обертання приводу насоса, використання регулювальних клапанів для контролю витрати бурового розчину, а також комбінацію зазначених методів у складі комплексних систем автоматизації. У процесі вибору методу автоматичного регулювання було враховано такі основні критерії: точність підтримання заданого режиму подачі; швидкість реакції на зміну зовнішніх та внутрішніх умов; простота інтеграції в існуючі технологічні комплекси; надійність і ремонтпридатність обладнання.

З огляду на зазначені вимоги, найбільш доцільним для даного випадку є використання методу частотного регулювання обертів електродвигуна приводу бурового насоса. Цей підхід дозволяє безпосередньо впливати на продуктивність насоса, забезпечує високу точність регулювання, знижує енергоспоживання та мінімізує механічне навантаження на вузли приводу.

Таким чином, застосування частотного регулювання є оптимальним рішенням для створення сучасної автоматизованої системи керування продуктивністю бурового насоса, що базується на використанні комбінованої системи автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса.

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Висновки до розділу

Було проаналізовано продуктивність насосів на ефективність процесу буріння свердловин електробурами. Також розглянуто методи і інструменти керування продуктивністю бурових насосів у режимі автоматизації.

Вибрано й обґрунтовано метод автоматичного регулювання продуктивності бурового насоса.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Узагальнена математична модель технологічного процесу буріння свердловин

Відзначимо, що метою моделювання будь-якого об'єкта є здобуття, оброблення, представлення і використання інформації про об'єкти, які взаємодіють між собою і зовнішнім середовищем. Модель тут виступає як засіб пізнання властивостей і закономірностей поведінки об'єкту. Основним призначенням моделі в задачах управління бурінням є прогноз реакції об'єкту на керувальні дії – F, n, Q [2].

Структурну схему процесу буріння свердловин як об'єкта керування можна відобразити так, як це зображено на (рис. 2.1).

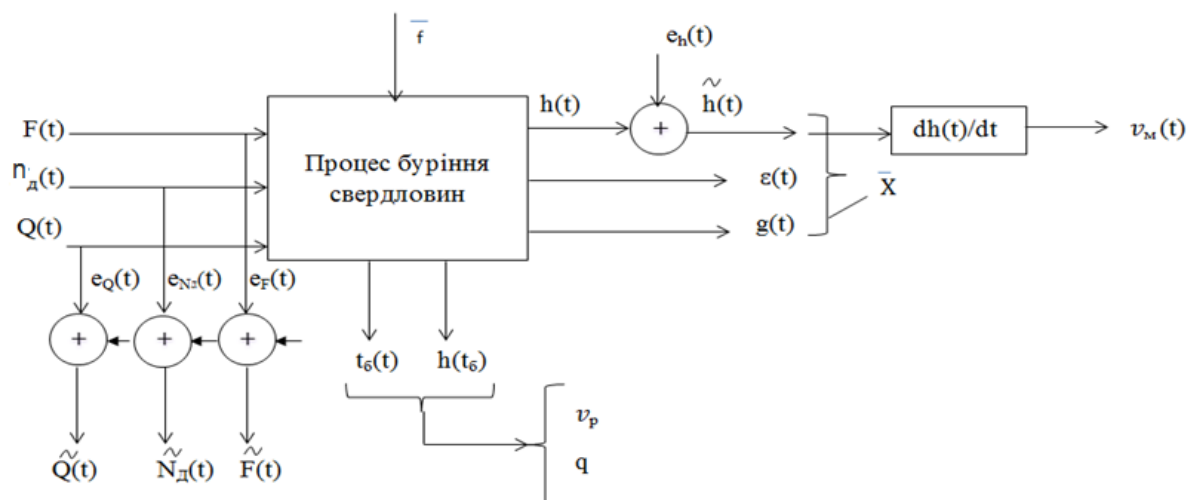


Рисунок 2.1 - Структурна схема об'єкта моделювання [2]

На рис. 2.1 прийняті такі позначення: $\varepsilon(t)$ і $g(t)$ – оцінка стану озброєння та опор долота; f – вектор, який характеризує взаємодію об'єкта з навколишнім середовищем (вектор збурення). Основна компонента цього вектора – це зміна фізико-механічних властивостей розбурювання порід.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

2.2 Схема проведення експерименту на об'єкті керування

Відзначимо, що властивості об'єктів регулювання здебільшого визначаються за статичними і динамічними характеристиками, отриманими експериментальним шляхом. Об'єкти регулювання можуть мати різні джерела збурень. Однак найбільш важливо досліджувати динамічні властивості об'єкта при збуренні, що виникло внаслідок зміни тієї величини, на яку буде впливати регулюючий орган.

Об'єкт повинен бути обладнаний вимірювальними приладами, які дозволяють автоматично записувати зміну вихідної величини в часі після зміни вхідної величини.

При знятті часової характеристики необхідно встановити величини вхідної дії. Ця величина встановлюється, виходячи із можливостей, які диктуються протіканням даного технологічного процесу в об'єкті. Необхідно, щоб зміна вхідної величини була якомога більша. Якщо ж вхідний вплив зробити достатньо більшим не можливо, то можна обмежитися меншою величиною, яка перевершує по величині ті випадкові впливи, які можуть виникнути при знятті часових характеристик.

Часові характеристики запропоновано знімати наступним чином. Перед проведенням експерименту регулюючий об'єкт приводимо у стан рівноваги і забезпечуємо умови, при яких вхідна і вихідна величини постійні. Після стабілізації об'єкта швидким переміщенням органа управління вносять збурення, відмічаючи при цьому час і величину його. Далше слідкують за зміною вихідної величини, записуючи її значення до того часу, поки вихідна величина не прийме нового значення. При автоматичному записуванні перехідного процесу необхідно відмітити час подачі вхідної дії.

Для отримання більш достовірних результатів експерименту по знятті тимчасової характеристики експеримент необхідно повторити 2 – 3 рази.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Док.
						30
<i>Змн.</i>	<i>Док.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Для проведення статистичного дослідження масиву даних проведемо моделювання графіку даного процесу в Matlab [15].

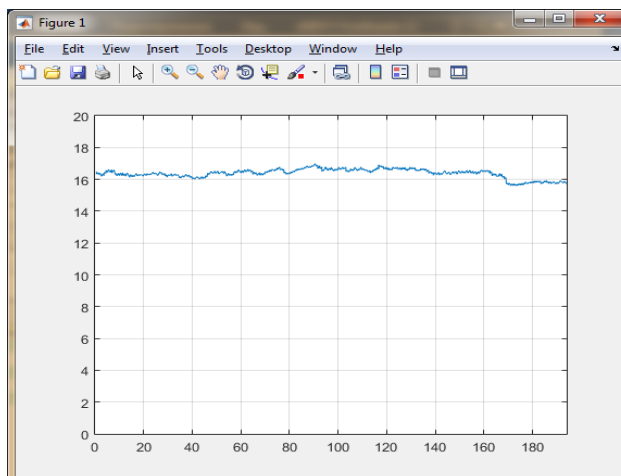


Рисунок 2.3 – Вихідний графік експериментальних даних

Занесемо наші дані в командне вікно (рис. 2.4).

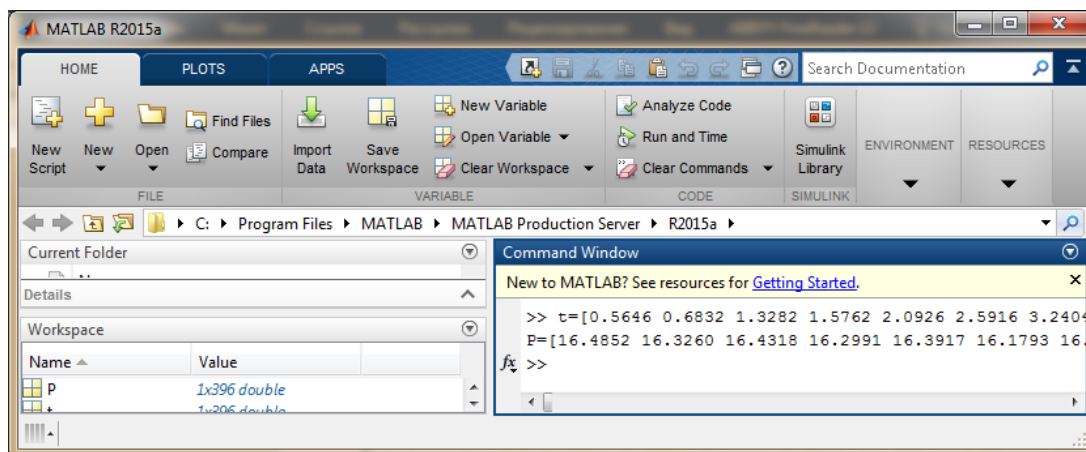


Рисунок 2.4 – Командне вікно із вхідними даними

Однією з важливих характеристик розподілу випадкової величини є її математичне сподівання:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i .$$

Результати обчислень наведені на рис. 2.5.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

випадкового процесу в різні моменти часу.

Це можна зробити за допомогою двохмірної функції розподілу. Інтенсивність зміни випадкового сигналу в часі можна охарактеризувати за допомогою однієї з функцій - автокореляційної функції або функції спектральної щільності. Математичне сподівання похідних значень центрованої випадкової функції, взятих при двох моментах часу t_1 та t_2 називають автокореляційною функцією. Вона визначається за формулою [10]:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t-\tau)dt,$$

де τ - кореляційний зсув (лаг).

Іншими словами, автокореляція - це кореляція ряду з самим собою, з затримкою на τ спостережень. Якщо ж реалізація є сукупністю дискретних значень сигналу, отриманих через рівні проміжки Δt , то інтеграл наближено заміняють сумою:

$$R_x(\tau) = R(k\Delta t) \approx \frac{1}{n-k} \sum_{i=0}^{n-k} x^0(i\Delta t)x^0(i\Delta t + k\Delta t).$$

де $x^0(t) = x(t) - m_x$ - центровані значення.

Для визначення автокореляційної функції використаємо таку програму в Matlab [15]:

```
Rxx=autocorr(P,350);  
>> plot(Rxx),grid
```

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

діапазоні частот від 0 до ∞ . Вона не містить відомостей про фази окремих гармонійних складових. За допомогою попередньої формули можна визначити спектральну щільність по заданій аналітично автокореляційній функції $R(\tau)$.

Застосовуючи до кореляційної функції $R(\tau) = De^{-\alpha\tau}$ перетворення, можна визначити спектральну щільність за формулою:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} De^{-\alpha\tau} \cos b\tau d\tau = \frac{D\alpha}{\alpha^2 + (b - \omega)^2} + \frac{D\alpha}{\alpha^2 + (b + \omega)^2}.$$

Оскільки $y(t) = 0,768e^{-0,005605t} \cdot \cos(-0,018t)$, то:

$$S(\omega) = \frac{0,768 \cdot 0,005}{0,005^2 + (-0,018 - \omega)^2} + \frac{0,768 \cdot 0,005}{0,005^2 + (-0,018 + \omega)^2}.$$

Визначимо спектральну щільність, використовуючи програму Matlab.

По отриманих даних побудуємо залежність S від ω . Так ми отримуємо графік спектральної щільності $S(\omega)$ (рис. 2.12).

```
w=0:0.1:14; S=0.004309./[0.000031416+(-0.01837-w).^2]+
0.004309./[0.000031416+(-0.01837+w).^2]; plot(S),grid
```

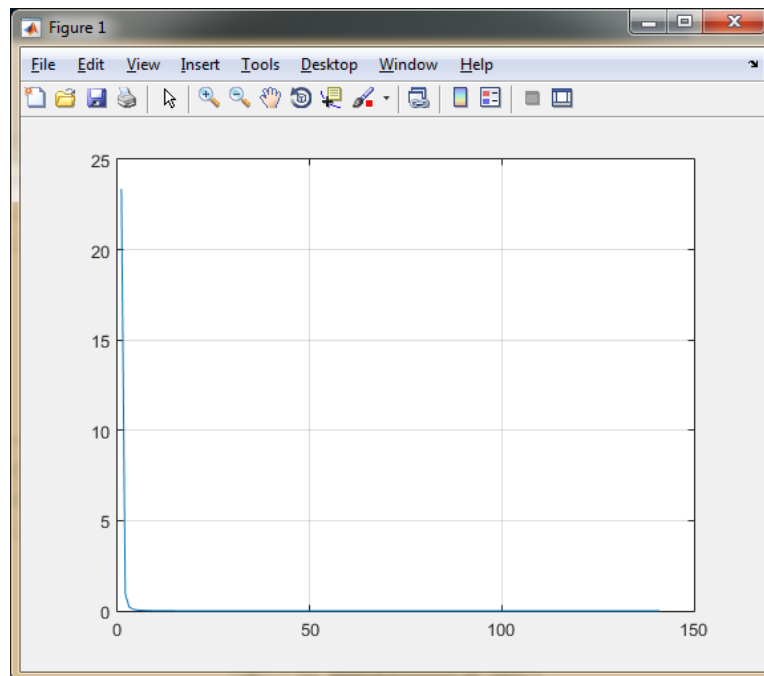


Рисунок 2.12 – Графік спектральної щільності

2.4 Ідентифікація параметрів функції передачі об'єкта

Виходитиме з того, що функція передачі – один із способів математичного опису динамічної системи [12].

Вихідна величина X (керована величина) системи залежить від керувальної дії Y і збурювальної дії Z . Необхідний закон зміни величини X визначається задаючим впливом X_3 . Внаслідок впливу збурення, а також інерційності елементів системи в перехідних і усталених режимах, в системі виникає сигнал відхилення $E = X - X_3$, який називається сигналом помилки.

Результати експерименту подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати експерименту

t,c	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
n(t)	0	15	32	56	72	83	85	85	85	85	85

Перед тим, як приступити до апроксимації перехідної функції переведемо вхідні величини у безрозмірні за такою формулою [31]:

$$y(t) = \frac{n(t) - n_{\min}}{n_{\max} - n_{\min}}, \quad (2.1)$$

де $n(t)$ беремо з таблиці 2.1; $n_{\min}=0$ об/хв. - початкове (нульове) значення; $n_{\max}=85$ об/хв. - максимальне поточне значення; $x(t)$ - поточне значення зміни вихідного сигналу у безрозмірній формі.

Обчислимо формулу (2.1) та отримані результати зводимо в таблицю 2.2. Отримуємо нові вхідні величини і нову перехідну функцію.

Таблиця 2.2 – Значення вхідних і вихідних безрозмірних величин об'єкта

t,c	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
x(t)	0	0,18	0,37	0,66	0,85	0,98	1	1	1	1	1

Апроксимуємо дану функцію з допомогою програми Arrox 1.0.

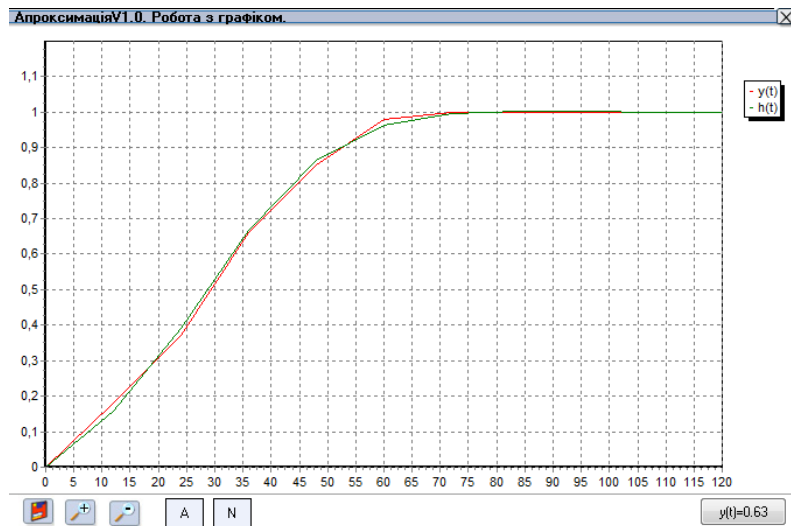


Рисунок 2.13 – Експериментальна і апроксимована крива розгону об’єкта регулювання

Результати:

Поліном знаменника $N=3$, поліном чисельника $M=0$.

Кількість дискрет $N_k=11$, крок дискретизації $T_s=10$.

Вхідне збурення $X_0=1,0000$.

Максимальна похибка $\Delta_{\text{Max}}=2,20\%$ в точці $T=4\text{с}$.

Функція передачі об’єкта керування:

$$W(p) = \frac{1.081p^2 + 0.015p + 1.000}{7.343p^3 + 9.254p^2 + 4.837p + 1.000}$$

Провівши апроксимацію перехідної функції, бачимо, що у точці $T=4\text{с}$ максимальна похибка Δ_{Max} склала $2,20\%$, що не виходить за межі допустимого значення, а, отже, дана динамічна модель є адекватною.

Висновки до розділу

У другому розділі бакалаврської роботи розглядалося математичне моделювання й ідентифікація об’єкта керування. Було розроблено структурну схему об’єкта моделювання. Проводився експеримент на ОК, а також до схеми автоматичної системи стабілізації швидкості двигуна борова насоса

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

підбиралися прилади, які б забезпечували безперебійну роботу даного процесу. На основі проведених досліджень доведено, що процес буріння, як об'єкт керування, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності щодо своїх параметрів і структури, демонструє стохастичну поведінку, яка викликана наявністю різноманітних збурювальних впливів. Контроль й оцінювання автокореляційної функції у реальному часі дасть змогу вирішувати проблему раннього виявлення відхилень об'єкта керування від нормального режиму роботи.

У даному розділі визначено перехідну функцію за допомогою програми Arrox1.0 і отримано експериментальний і апроксимований графіки перехідного процесу, а також функцію передачі. У результаті доведено, що дана модель є адекватною, оскільки значення похибки становить 2,20%.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

3 СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ БУРОВОГО ОБЛАДНАННЯ

3.1 Синтез функціональної структури системи автоматичного регулювання продуктивності бурового насоса

На основі принципової схеми (рис. 2.2) автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса створимо функціональну структуру системи, що наведена на рис. 3.1. [11]

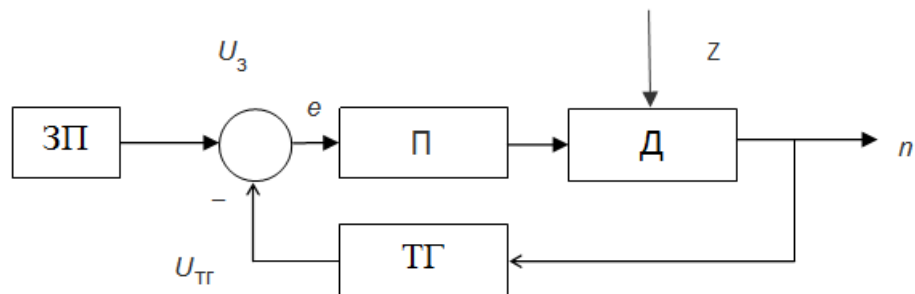


Рисунок 3.1 - Функціональна структура системи автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса: ЗП – задаючий пристрій, П – підсилювач, Д – двигун, ТГ - тахогенератор

Задаюча напруга U_3 поступає на підсилювач П і двигун Д. Частота обертання двигуна n вимірюється тахогенератором ТГ і напруга $U_{ТГ}$ надходить на вхід і сигнал розбалансу e буде дорівнювати:

$$e = U_3 - U_{ТГ}. \quad (3.1)$$

3.2 Синтез алгоритмічної структури системи автоматичного регулювання продуктивності бурового насоса

Складемо алгоритмічну структуру автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса (рис.3.2).

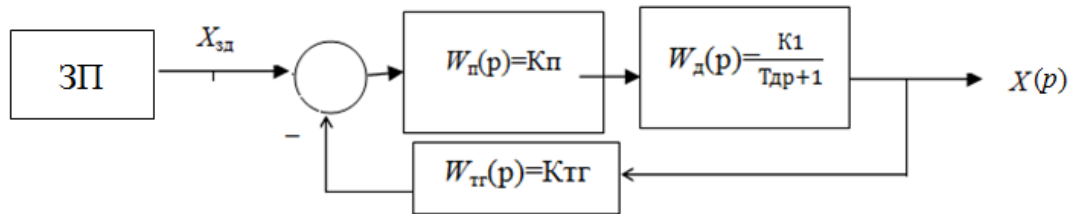


Рисунок 3.2 - Алгоритмічна структура системи автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса

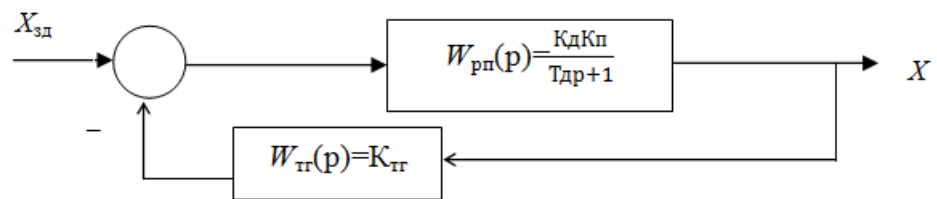


Рисунок 3.3 - Спрощена алгоритмічна структура системи автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса

Скориставшись останньою схемою, знайдемо функцію передачі системи по каналу завдання:

$$\begin{aligned}
 W_з(p) &= \frac{\frac{K_п K_д}{(T_дp+1)}}{1 + \frac{K_п K_д K_тг}{(T_дp+1)}} = \frac{\frac{K_п K_д}{(T_дp+1)}}{\frac{T_дp+1 + K_п K_д K_тг}{(T_дp+1)}} = \\
 &= \frac{\frac{K_п K_д}{(T_дp+1)}}{\frac{T_дp+1 + K_п K_д K_тг}{(T_дp+1)}} = \frac{K_п K_д}{T_дp+1 + K_п K_д K_тг}
 \end{aligned}$$

На основі експериментальних даних визначимо конкретні значення сталих часу і коефіцієнтів передачі:

$$T_д = 0,8 \text{ с ;}$$

$$K_д = 5;$$

$$K_{\text{ТГ}} = \frac{100}{1000} = 0,1;$$

$$K_{\text{П}} = 10.$$

Тоді функція передачі системи набуває такого вигляду:

$$W_3(p) = \frac{50}{0,8p+1+10 \cdot 5 \cdot 0,1} = \frac{50}{0,8p+6}.$$

Запишемо характеристичне рівняння:

$$F(p) = 0.8p + 6.$$

Так як всі коефіцієнти рівняння додатні то виконується необхідна умова стійкості. Із рівняння $0.8p + 6 = 0$ знаходимо корінь $p = -7,5$. Оскільки корінь характеристичного рівняння від'ємний, то показники вибрані правильно і відповідають нормі, оскільки система стійка.

3.3 Вибір додаткових приладів

Як прилад для вимірювання частоти обертання двигуна вибираємо тахометр АРГО127. Тахометр АРГО127 - прилад, призначений для вимірювання частоти.

Клас точності - 1,5.

Діапазон вимірювань - 0 - 5000об/хв.

Вихідний сигнал: 0÷100 В.

Тахометри АРГО127 знайшли широке застосування для контролю частоти обертання вала двигунів внутрішнього згорання. Також застосовуються такі тахометри для контролю частоти обертання робочих органів технологічних машин. У тахометрі АРГО127 є кварцова стабілізація, тому вимірювання не залежать від змін напруги живлення і температури навколишнього середовища. Індикатор оновлює свої покази один раз за секунду. У тахометрі можна робити перемикання між трьома режимами за допомогою перемикача.

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

У приладах АРГО127 може бути задіяна аварійна сигналізація, скидання і обнулення накопичених значень, захист паролем, інформаційний обмін через CAN, або RS-485 для роботи в мережі або зв'язку з комп'ютером.

Висновки до розділу

У третьому розділі розглянуто синтез структури системи автоматичного керування (САК), розроблено функціональну структуру автоматичної стабілізації швидкості двигуна борового насоса. В даному розділі дипломного проекту складено алгоритмічну структуру автоматичної стабілізації швидкості двигуна борового насоса, згідно якої знайдено характеристичне рівняння системи. Визначено конкретні значення сталих часу і коефіцієнтів передачі і перевірено, що вони вибрані правильно. Також вибрано тип тахометра, який б забезпечив надійну роботу автоматичної системи стабілізації швидкості двигуна борового насоса.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	<i>Арк.</i>
						46
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТІЙКОСТІ ТА РЕГУЛЯТОРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПРОДУКТИВНОСТІ НАСОСА

4.1 Вибір критерію стійкості та аналіз стійкості системи

Для аналізу стійкості САР вибираю два критерія: критерій Ляпунова і критерій Найквіста. Ці критерії дозволяють виявити запас стійкості системи та при необхідності прийняти рішення про корегування структури системи.

Спочатку проведемо аналіз стійкості САР за критерієм Ляпунова.

Для стійкості лінійної автоматичної системи регулювання необхідно і достатньо, щоб дійсні частини всіх коренів характеристичного рівняння системи були від'ємними [31].

Передавальна функція замкнутої системи керування:

$$W_{зам}(p) = \frac{50}{0,8p + 6}. \quad (4.1)$$

Запишемо характеристичне рівняння, яке описує автоматичну систему у вигляді:

$$A(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0. \quad (4.2)$$

Тоді:

$$A(p) = 0,8p + 6 = 0.$$

Розв'яжемо дане рівняння, скориставшись функцією polyroots в програмі MATCAD.

$$\text{polyroots} \left(\begin{pmatrix} 0,8 \\ 6 \end{pmatrix} \right) = -0.026$$

Знайшовши корені рівняння, бачимо, що синтезована система є стійкою, тому що всі корені характеристичного рівняння є від'ємними.

Аналіз стійкості САК за критерієм Найквіста.

Критерій Найквіста відноситься до групи частотних критеріїв стійкості.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

Критерій Найквіста заснований на аналізі характеристичного рівняння системи, тому за його допомогою можна судити про стійкість замкнутих і розімкнутих систем [31].

Основне формулювання критерію Найквіста: автоматична система стійка, якщо амплітудно-фазова характеристика $W(j\omega)$ розімкнутого контуру не охоплює точку з координатами $(-1; j0)$.

Припустимо, що $W(p) = K_n = 60$;

$$W_p(p) = \frac{K_d}{T_d p + 1} = \frac{5}{0,8p + 1},$$

$$W_{TP}(p) = K_{TP} = 0,1.$$

Тоді

$$W_p(p) = W_n(p) \cdot W_d(p) \cdot W_{TP}(p). \quad (4.3)$$

$$W_p(p) = \frac{60 \cdot 5 \cdot 0,1}{0,8p + 1} = \frac{30}{0,8p + 1}.$$

Знайдемо АФХ за допомогою програмного продукту Matlab:

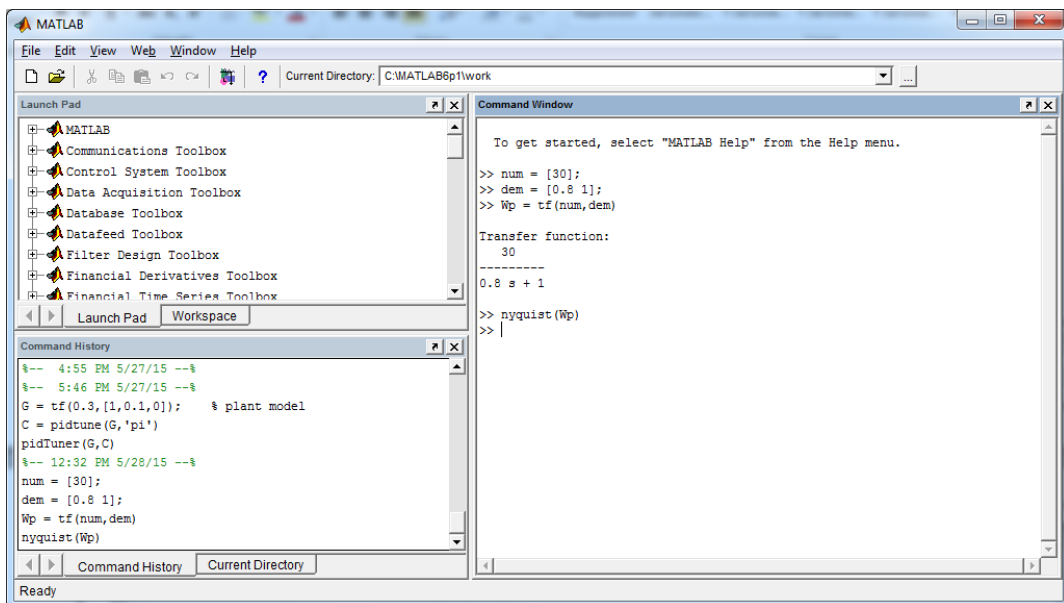


Рисунок 4.1 - Програма побудови АФХ в середовищі MATLAB

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

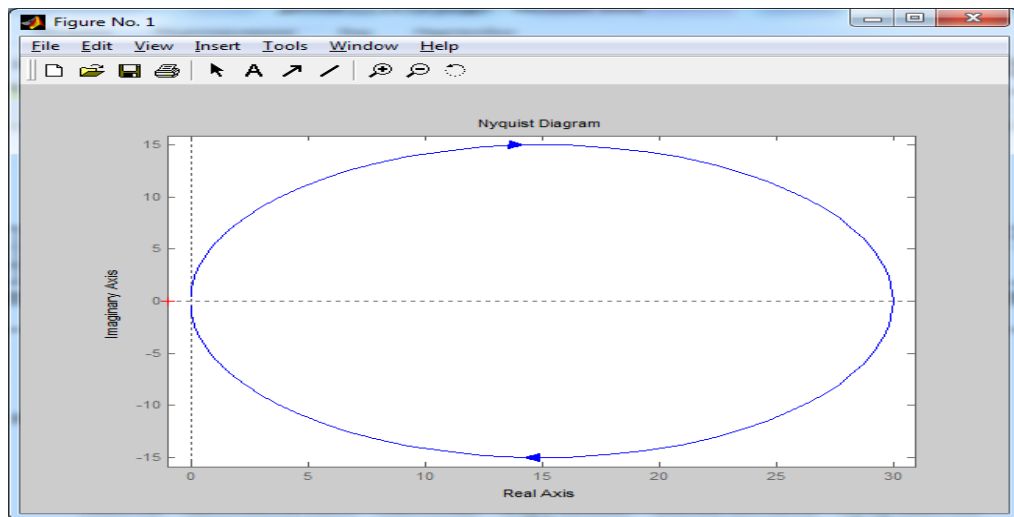


Рисунок 4.2 - Графік АФХ

Отже, система є стійкою, тому що амплітудно-фазова характеристика $W(j\omega)$ розімкнутого контуру не охоплює точку з координатами $(-1; j0)$.

4.2 Аналіз показників якості системи регулювання

Якість автоматичної системи регулювання визначається сукупністю властивостей, які забезпечують ефективне функціонування як самого об'єкту керування, так і керуючого пристрою, тобто всієї системи регулювання в цілому.

Точність системи в перехідних режимах оцінюють за допомогою прямих і непрямих показників.

Прямі показники визначають по графіку перехідного процесу, що виникає в системі при зовнішньому впливі $1(t)$. Одним із головних прямих показників якості є перерегулювання $\sigma(\%)$

$$\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100, \quad (4.4)$$

де $A_1, x(\infty)$ - відповідно перше максимальне відхилення і усталене значення.

Тривалість перехідного процесу (час регулювання) t_n - інтервал часу від моменту прикладання впливу $1(t)$ до моменту, після якого відхилення

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ	Авк.
						49
Змн.	Авк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

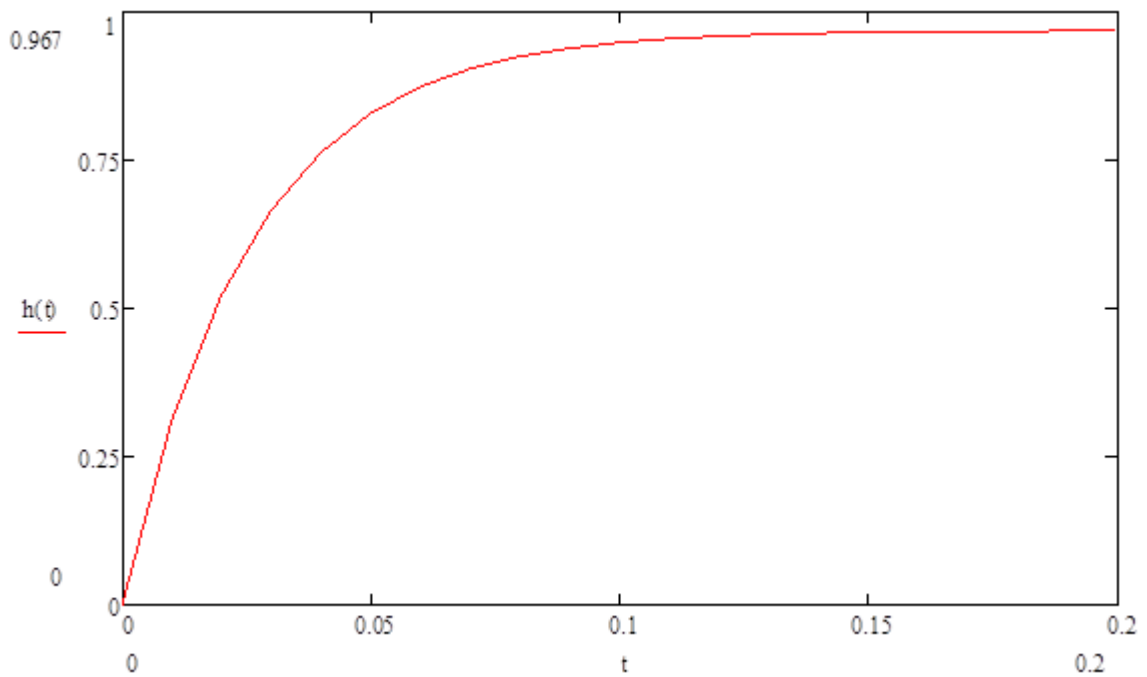


Рисунок 4.4 – Графік перехідного процесу

Визначимо прямі показники якості системи

Час перехідного процесу: $t = 0,17c$;

$$\text{Перерегулювання: } \sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100 = \frac{1-1}{1} \cdot 100 = 0\% ;$$

$$\text{Степінь згасання: } \psi = 1 - \frac{A_3}{A_1} = 1 - \frac{1}{1} = 0$$

Отже дана система стійка, а показники якості відповідають вимогам.

Визначення непрямих показників якості ґрунтується на аналізі АФХ розімкнутого контуру (рис. 4.5).

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

Для опису алгоритмів, які розробляють на цих етапах, доцільно застосовувати одну із спеціалізованих мов програмування на зразок CubiCalc's Expression Language (CEL). Її можливості і синтаксис традиційні для процедурних мов третього покоління. До особливостей CEL слід віднести кількість засобів визначення рівня входження скалярних значень у нечіткі множини, засоби матричної обробки і обміну даними з іншими прикладними програмами або екземплярами CubiCalc, з використанням технології DDE (DynamicDataExchange).

Процес проектування фазі-контролера складається з чотирьох етапів:

- аналіз системи;
- встановлення алгоритмічних ступенів свободи;
- встановлення параметричних ступенів свободи;
- моделювання спроектованого контуру регулювання.

На (рис. 4.9) процес розробки фазі-контролера представлений в наочній формі.

На початку проектування обов'язково треба провести аналіз системи. Процедура аналізу включає в себе як вибір структури контуру регулювання, так і вибір вимірювання величин та вхідних величин фазі-контролера, що визначаються виходячи із результатів вимірювання, визначення вихідних величин фазі-контролера, тобто керувальних величин об'єкта регулювання. На цьому етапі можуть також бути встановленими вхідні і вихідні фільтри, що вимагає вірного добору коефіцієнтів підсилювання або масштабних коефіцієнтів у вхідних і вихідних фільтрах, оскільки вони слугують для узгодження параметрів об'єкта регулювання та параметрами фазі-блока. Ця процедура є обов'язковою при застосуванні нормованого фазі-блока, тому що в такому випадку необхідно узгодити величини системи із вхідними та вихідними величинами фазі-блоку, що змінюються в одиничному інтервалі (наприклад, [-1, 1] або [1,100]).

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	<i>Арк.</i>
						54
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ФАЗИ-КОНТРОЛЕР
ФАЗИ-БЛОК

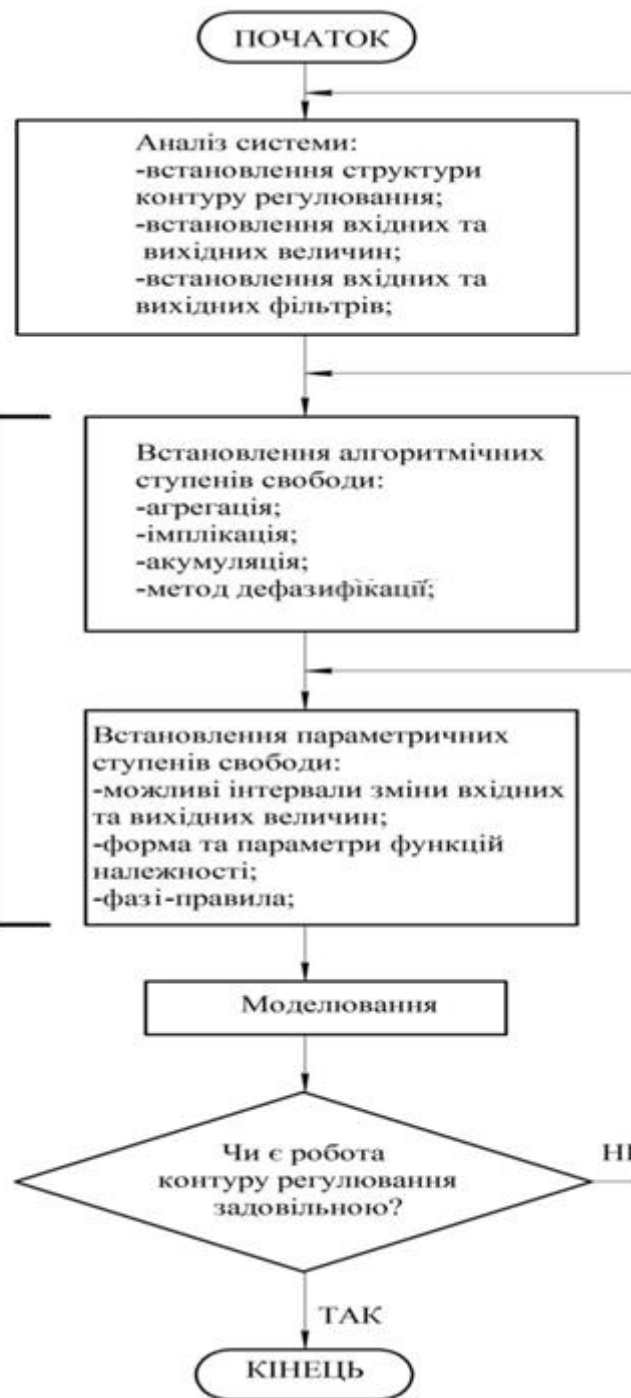


Рисунок 4.9 - Алгоритм розроблення фазі-контролера

Використання нормованих фаззи-блоків дозволяє інколи стандартизувати їх, використовувати той самий фазі-блок в різних системах управління із різними параметрами, змінюючи лише масштабні коефіцієнти вхідних та вихідних фільтрів. Масштабні коефіцієнти вхідних та вихідних фільтрів мають таке ж важливе значення, як і коефіцієнти підсилення в класичних

Завданням оператора є підтримання стану системи оптимальним. Вхідними величинами фазі-контролера будуть похибка регулювання швидкості n , та швидкість її зміни (тобто перша похідна) $\Delta n / \Delta t$, а вихідною величиною є похідна від керуючого сигналу (тобто напруги завдання) ΔU , причому як при зростанні похибки регулювання швидкості Δn , так і при зростанні її похідної $\Delta n / \Delta t$ вхідна величина ΔU зростає або принаймі залишається незмінною. Відповідно для цих цілей ми вибираємо фазі-ПІ-регулятор. Тобто ми використовуємо структуру, в якій до класичної системи керування додається зворотний коригуючий зв'язок фазі-корекції за технологічним параметром. При відхиленні величини швидкості від заданої, вихідною величиною фазі-контролера буде зміна напруги завдання, що подається на регулятор швидкості. Реалізацією такого підходу є структура, наведена на (рис. 4.11). Контур регулювання містить фазі-контролер, що включений в зворотний зв'язок по швидкості головного приводу. Вхідною величиною фазі-контролера буде похибка завдання швидкості і похідна від неї, на виході фазі-контролер утворює коригувальний сигнал, що складається із сигналом завдання на вході класичного регулятора.



Рисунок 4.11 – Контур регулювання з фазі-корекцією у зворотному коригуючому зв'язку

Для реалізації нечіткого ПІ-регулятора вибираємо структуру регулятора Мамдамі-типу, тобто:

R_1 :Якщо $\Delta n \in A$ і $\Delta n / \Delta t \in B$ тоді $\Delta U \in C$.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

Слід зауважити, що взагалі практичне застосування одноконтурної системи із фазі-контролером є дуже обмеженим через проблеми в забезпеченні необхідного ступеня стабільності. Проте правильне налаштування складних систем потребує дуже великих витрат часу (насамперед через відсутність загальнозживаних методів розробки фазі-систем). Задовільні результати можуть бути отримані при вдалій настройці в системі із паралельною фазі-корекцією, оскільки настроювання такої системи потребує значних витрат часу порівняно з настроюванням адаптивних систем і така система має відносно високу надійність: при “випаданні” із контуру фазі-контролера система продовжує задовільно функціонувати.

На етапі встановлення алгоритмічних ступенів свободи здійснюється визначення основних властивостей фазі-блоку. У техніці регулювання як керуючі сигнали можуть бути використані лише однозначні величини, тому акумульована в процесі інференції фазі-множина може бути використана як керуюча величина об’єкта регулювання; необхідна дефазифікація отриманого результату. Процес перетворення нечіткої множини в єдине значення називається “скаляризацією” або “дефазифікацією”. Існує велика кількість методів дефазифікації, метою яких є визначення такої вихідної величини, яка б як можна точніше представила акумульовану фазі-множину. Найпростішим (але найменш часто вживаним) є підхід, коли вибирається одне із правил виводу, результат якого використовується як інтегральний.

Висновки до розділу

У даному розділі дипломного проекту здійснено аналіз стійкості і показників якості синтезованої САР. Було проведено вибір критеріїв стійкості таких як: критерій Ляпунова і критерій Найквіста, за якими визначено, що система стійка. Визначено прямі та непрямі показники якості САР, після чого було зроблено висновок про відповідність системи заданим критеріям стійкості і якості.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Здійснили також процес моделювання поведінки автоматизованої системи на основі теорії нечітких множин. Також розробили процес проектування фазі-контролера, який складається з чотирьох етапів:

1. Аналіз системи.
2. Встановлення алгоритмічних ступенів свободи.
3. Встановлення параметричних ступенів ступенів свободи.
4. Моделювання спроектованого контуру регулювання.

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Проведено аналіз технологічного процесу буріння свердловин як об'єкта автоматичного регулювання. Здійснено аналіз об'єкта керування - процесу автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса. Проаналізовано роботи в області створення методів і засобів керування даним технологічним процесом.

Виконані дослідження щодо математичного моделювання й ідентифікація об'єкта керування, було розроблено структурну схему об'єкта моделювання. Розглянуто планування експерименту на ОК. До схеми автоматичної системи стабілізації швидкості двигуна бурового насоса підбирані прилади, які б забезпечували безперебійну роботу даного процесу. В даному розділі також визначали перехідну функцію за допомогою програми Argox 1.0 і отримали експериментальний і апроксимований графіки перехідного процесу. У результаті встановлено, що модель є адекватною, оскільки значення похибки становить менше 2,5%, а саме 2,20%.

Досліджено синтез структури системи автоматичного регулювання (САР), розроблено функціональну структуру автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса. Складено також алгоритмічну структуру системи автоматичної стабілізації швидкості двигуна бурового насоса, згідно якої знайдено характеристичне рівняння системи. Визначено конкретні значення сталих часу і коефіцієнтів передачі і доведено, що вони вибрані правильно.

Проведено аналіз стійкості і показників якості синтезованої САР за критеріями Ляпунова Найквіста. Визначено, що система стійка. Здійснили процес моделювання поведінки автоматизованої системи на основі теорії нечітких множин. Розроблено процес проектування фазі-контролера, який складається з чотирьох етапів: аналіз системи; встановлення алгоритмічних ступенів свободи; встановлення параметричних ступенів свободи; моделювання спроектованого контуру регулювання.

					БР.АКП-22.00.00.000 ПЗ	Док.
						60
<i>Змн.</i>	<i>Док.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Діхтяренко К.В. Перспектива відродження електробуріння: матеріали 9-ої міжнар. наук.-практич. конф. “Нафта і газ України - 2013, м. Яремна, 4-6 вересня 2013 р / К.В.Діхтяренко, В.П.Червінський. - Л.: “Центр Європи”, 2013. - С.59-60.

2. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: [навч.посібник] / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенцов - Івано-Франківськ: Факел, 2003,- 493 с.

3. Семенцова А.О. Експериментальні оцінки статистичних характеристик потужності, що споживає двигун електробура Е-240-8 у процесі буріння свердловин /А.О.Семенцова // Сбор. научних трудов 8^{го} Всес. Конгр. Нафтогазової енергетики, Вып. №1(38), 2015, том 4. - С.26-36.

4. Головата Ю.Б. Аналіз впливу продуктивності бурових насосів на ефективність процесу поглиблення свердловин електробурами / Ю.Б.Головата. Д.М.Зварич, Г.Н.Семенцов // Нафтогазова енергетика, № 2(26). 2016 р. – С.7-19

5. Бунчак З. Електробур. Парадокси і реальність / З.Бунчак, О.Дудар, О.Кекот. - Електроінформ. -2003. -№ 4. -С. 8-11.

6. Семенцова А. О. Аналіз характеристик занурного електропривода / А.О. Семенцова, К.С. Годлевська, В.О. Дрислюк. // Нафтогазова енергетика №2(18). - 2012. - С.86-97.

7. Федорів М. Й. Аналіз причин відмов основного електрообладнання комплексу для буріння свердловин / М.Й. Федорів, У.М. Николин, С.В. Костишин // Нафтогазова енергетика, 2009.- № 2.-С. 62-65.

8. Костишин В.С. Аналіз енергоефективності нафтоперекачувального насосного агрегату / В. С. Костишин, І.І. Сорохтей // Нафтогазова енергетика. - 2009. - № 2. - С.76-79.

9. Семенцов Г.Н. Система керування із змінною структурою для оптимізації процесу буріння свердловини електробурами; матеріали II

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	<i>Арк.</i>
						61
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докв.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Всеукр.наук.-практ.конф.молодих вчених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» / Г.Н.Семенцов, Л.О.Копистинський. - Івано-Франківськ, 2015. - С. 24-25.

10. Білак Н.В. Апроксимовано-спектральний аналіз випадкового процесу // Проблеми інформації та управління. - 2015. - № 2(50). - С.26-31.

11. Борин В.С. Основи синтезу систем керування об'єктами галузі: лаб.практикум / В.С.Борин, Т.О.Бербець. – ІФНТУНГ: Факел. – 2013. – 36 с..

12. Горбійчук М.І. Моделювання та ідентифікація процесу заглиблення свердловин / М.І. Горбійчук, В.Б. Кропивницька // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – №1(7). – С. 9-13.

13. Шавранський М.В. Методи і алгоритми ідентифікації та прогнозування в умовах невизначеності: Лабораторний практикум. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. – 60 с.

14. Програмування у середовищі GetData Graph Digitizer 2.24. Режим доступу: – https://en.freedownloadmanager.org/Windows-PC/GetData-Graph-Digitizer.html?utm_source=chatgpt.com

15. Програмування у середовищі Matlab. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-mapreduce-hadoop.html>

					БР.АКП–22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Бакалаврська робота на тему «Дослідження автоматизованої системи керування продуктивністю бурового насоса», містить пояснювальну записку в розмірі 65 аркушів друкованого тексту, графічного матеріалу 8 аркушів формату А4.

Перелік креслень графічної частини:

1. БР.АКТ-22.00.00.001 – Структурна схема об'єкта моделювання;
2. БР.АКТ-22.00.00.002- Модель “вхід-вихід” керування типу SI-SO;
3. БР.АКТ-22.00.00.003 - Схема оснащення приладами системи автоматичної стабілізації продуктивності бурового насоса;
4. БР.АКТ-22.00.00.004 - Експериментальна і апроксимована крива розгону та функція передачі об'єкта регулювання;
5. БР.АКТ-22.00.00.005- Функціональна та алгоритмічна структури, характеристичне рівняння;
6. БР.АКТ-22.00.00.006– Аналіз стійкості САК за критерієм Найквіста;
7. БР.АКТ-22.00.00.007- Графік перехідного процесу та графіки АЧХ і ФЧХ;
8. БР.АКТ-22.00.00.008- Система керування з врахуванням рішень оператора.