

Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

2026_Дрогомирецький Я.І._ФІТ_ІТТС_ІСТ-22-1

Автор

Дрогомирецький Я.І.

Науковий керівник / Експерт

Іванюк Н.І.

ІД документу

334340731

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

підрозділ

Каф. ІТТС

ЗВІТ

Дата звіту

6/16/2026

Дата редагування

6/16/2026

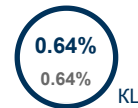
Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



10583

Кількість слів



93318

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		3
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		34

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	2026_Максимів_Н.Р._ФІТ_ІТТС_ІСТ-22-1 6/11/2026	71 (0.67 %)

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)

2	https://repo.nung.edu.ua/bitstreams/d75153dc-df05-4b62-bbfe-2271739b44cb/download	38 (0.36 %)
3	2026_Слівінська_О.Р._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/11/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	28 (0.26 %)
4	2026_Слівінська_О.Р._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/11/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	27 (0.26 %)
5	2026_Слівінська_О.Р._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/11/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	22 (0.21 %)
6	2026_Максимів_Н.Р._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/11/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	21 (0.2 %)
7	2026_Слівінська_О.Р._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/11/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	20 (0.19 %)
8	Математичне моделювання систем і процесів. Комп'ютерний практикум 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	20 (0.19 %)
9	2026_Максимів_Н.Р._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/11/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	19 (0.18 %)
10	2025_Сем'янів_О.Ю._ФІТ_ITTC-AKCM-24-1 12/26/2025 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	18 (0.17 %)

Домашня база даних (9.81 %)



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	2026_Максимів_Н.Р._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/11/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	489 (42) (4.62 %)
2	2026_Слівінська_О.Р._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/11/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	456 (42) (4.31 %)
3	2025_Сем'янів_О.Ю._ФІТ_ITTC-AKCM-24-1 12/26/2025 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	34 (4) (0.32 %)
4	2026_Гера_В.В._ФІТ_ITTC_CI-22-1 6/10/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	21 (2) (0.2 %)
5	2026_Михайлюк_В.А._ФІТ_ITTC ICT-22-1 6/12/2026 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ITTC)	13 (1) (0.12 %)
6	пояснююча записка .doc 12/18/2021 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. НГО)	12 (1) (0.11 %)



2025_Сем'янів_О.Ю._ФІТ_ITTC-AKCM-24-1

12/26/2025

34 (4) (0.32 %)

7	2025_Крохмалюк_Я.І._ФІТ_ІТТС_СІ-21-1	8 (1) (0.08 %)
	6/23/2025	
	Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ІТТС)	

8	2026_Король_В.О._ФІТ_ІТТС_СІ-22-1	5 (1) (0.05 %)
	6/10/2026	
	Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ІТТС)	

Програма обміну базами даних (0.41 %)

#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	---

9	Математичне моделювання систем і процесів. Комп'ютерний практикум	20 (1) (0.19 %)
	3/15/2025	
	National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	

10	2023_61410000_Sinitovych_Myrosлав_Mykhailovych_200141	12 (1) (0.11 %)
	11/21/2024	
	National University "Lviv Politechnika" (National University Lviv Politechnika)	

11	Удосконалення режимів роботи електроприводу конвєсєра з гнучким тяговим елементом	11 (2) (0.1 %)
	5/12/2025	
	Vinnytskiy National Agricultural University (Vinnytskiy National Agricultural University)	

Інтернет (2.39 %)

#	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-------------	---

12	https://repo.nung.edu.ua/bitstreams/d75153dc-df05-4b62-bbfe-2271739b44cb/download	80 (5) (0.76 %)
----	---	-----------------

13	https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/41629/2/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0_%D0%94%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%88%D0%BD%D1%96%D0%B9%20%D0%A2.%D0%86..pdf	76 (9) (0.72 %)
----	---	-----------------

14	https://eir.zp.edu.ua/bitstreams/12f6fcdd-6297-415f-bc17-b0e54241f179/download	29 (3) (0.27 %)
----	---	-----------------

15	https://ela.kpi.ua/bitstreams/f2cbd7fc-f519-4779-a4b6-0768e935768a/download	25 (3) (0.24 %)
----	---	-----------------

16	https://cyberleninka.ru/article/n/k-sozdaniyu-polirynadnogo-nasosa-dlya-energoberegayuschih-pogruzhnyh-neftedobyvayuschih-ustanovok	15 (2) (0.14 %)
----	---	-----------------

17	http://library.nung.edu.ua/katalog-disertats%D1%96i-zakhishchenikh-v-%D1%96fntung-z-1999-po-2011-roki-z-fondu-ntb.html	12 (1) (0.11 %)
----	---	-----------------

18	https://bibliotekanauki.pl/articles/262777.pdf	11 (1) (0.1 %)
----	---	----------------

19	https://dglib.nubip.edu.ua/bitstreams/bd76e4d1-03a6-4e00-bca9-7b9a8a25c9f9/download	5 (1) (0.05 %)
----	---	----------------

Список прийнятих фрагментів

#	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-------	--

2026_Слівінська_О.Р._ФІТ_ІТТС_СІ-22-1	153 (1.45%)
---------------------------------------	-------------

1	БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА КРБ. сі 09.00.00.000 ПЗ Група сі 22-1 ольга слівінська 20...	28 (0.26%)
2	р. 6 Оформлення пояснювальної записки 31.05 10.06.2026 р. 7 Оформлення графічн...	27 (0.26%)
3	Мета роботи – підвищення ефективності та надійності експлуатації газоперекачув...	11 (0.1%)
4	У процесі виконання бакалаврської роботи проведено аналіз конструкції принципі...	11 (0.1%)
5	Зм. Арк. Но докум. Підп. Дата Арк. 8 КРБ. слівінська о р Перевір. Іванюк Н.І. ...	22 (0.21%)
6	Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат а Арк. 9 КРБ	10 (0.09%)
7	Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат а Арк. 10 КРБ	10 (0.09%)
8	ПЗ ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА ОДИНИЦЬ	9 (0.09%)
9	БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА Тема бакалаврської роботи: «Розроблення системи контр...	8 (0.08%)
10	список використаних джерел із 20 найменувань. Перелік креслень графічної части...	12 (0.11%)
11	1Дата закінчення бакалаврської роботи:	5 (0.05%)
2025_Крохмалюк Я.І._ФІТ_ІТТС_СІ-21-1		8 (0.08%)
1	Ярослав Ігорович (прізвище, ім'я, по батькові) УДК	8 (0.08%)
2026_Михайлюк В.А._ФІТ_ІТТС_ІСТ-22-1		13 (0.12%)
1	назва роботи) Інформаційні системи та технології (назва освітньої програми)...	13 (0.12%)
2026_Максимів Н.Р._ФІТ_ІТТС_СІ-22-1		121 (1.14%)
1	Л. Заміховська (посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище) Івано-Франківськ...	71 (0.67%)
2	керівник роботи Іванюк Наталія Іванівна, доц., к.т.н.,пр...	19 (0.18%)
3	1 арк.). 6. Дата видачі завдання 05.05.2026 року Керівник, к.т.н., доце...	21 (0.2%)
4	Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат а Арк. 11 КРБ	10 (0.09%)
https://repo.nung.edu.ua/bitstreams/d75153dc-df0...		15 (0.14%)
1	КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН No п/п Назва етапів бакалаврської роботи Термін виконанн...	15 (0.14%)
2026_Гера В.В._ФІТ_ІТТС_СІ-22-1		9 (0.09%)
1	двох розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на	9 (0.09%)
Математичне моделювання систем і процесів. Комп'...		20 (0.19%)
1	lqballSBN 9781119682660.	20 (0.19%)
2023_61410000_Sinitovych_Myroslav_Mykhailovych_2...		12 (0.11%)
1	Chapman S. J. 2011 Electric Machinery Fundamentals. 5th ed.J.,2011,ElectricMcG...	12 (0.11%)
https://bibliotekanauki.pl/articles/262777.pdf		11 (0.1%)
1	Mohan N. Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling UsingMNPERE	11 (0.1%)

² **БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА** КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ Група ІСТ-22-1

Ярослав Дрогомирецький

2026 Міністерство освіти і науки України

¹² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій і систем

Дрогомирецький ⁷ Ярослав Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.67-213.32(047)

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

«Розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану»

⁵ (назва роботи)

Інформаційні системи та технології

(назва освітньої програми)

126 – Інформаційні системи та технології

¹² (шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня Я. І. Дрогомирецький

¹ (підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Н. І. Іванюк, к.т.н., доц.

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

Допущено до захисту

в.о.Завідувача кафедри

¹⁹ к.т.н., доц. О. Л. Заміховська (посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище) Івано-Франківськ – 2026 Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти) Факультет Інформаційних технологій Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем Освітній рівень бакалавр Спеціальність 126 – Інформаційні системи та технології (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ в.о. Завідувача кафедри ІТТС к.т.н. доц. О. Л. Заміховська «___» травня 2026 року

¹² А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ

Дрогомирецький Ярослав Ігорович

¹² (прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема бакалаврської роботи: «Розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану»

¹ керівник роботи Іванюк Наталія Іванівна, доц., к.т.н.,

¹⁴ (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом закладу вищої освіти від No 163/7 від 07.04.2026 року

2. Термін здачі студентом закінчено ¹⁴роботи 17 червня 2026 року 3. Вихідні дані до проекту (роботи) Нормативно-технічна та науково-

технічна література за тематикою

¹⁴ 14. Зміст розрахунково - пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

Вступ. Сучасний стан систем контролю та управління електровідцентровими насосами в процесі видобутку нафти. Особливості технологічного процесу видобутку нафти з використанням електровідцентрових насосів. Вплив ускладнюючих факторів на технічний стан та ефективність функціонування УЕВН. Моніторинг технічного стану електровідцентрових насосів як основа системи контролю та управління. Розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану. Розроблення вузла частотно-регульованого електроприводу та моделювання його ¹³роботи в програмному середовищі Matlab Simulink. Висновки.

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

- о Установка заглибного електровідцентрового насоса. Загальний вигляд (1 арк.);
- о Узагальнена структура функціонування установки електровідцентрового насоса (1 арк.);
- о Структурна схема системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану (1 арк.);
- о Функціональна схема частотно-регульованого електроприводу (1 арк.);
- о Принципова електрична схема підключення заглибного електродвигуна (1 арк.);
- ¹³ 13. Імітаційна модель частотно-регульованого електроприводу електровідцентрового насосного агрегату в середовищі Matlab Simulink (1 арк.);
- ¹³ 13. Перехідні процеси $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при регулюванні роботи електровідцентрового насоса за допомогою перетворювача частоти ¹(1 арк.).

6. Дата видачі завдання 05.05.2026 року

Керівник, к.т.н., доцент

Н. І. Іванюк

(підпис)

Завдання прийняв студент-бакалавр

Я. І. Дрогомирецький

(підпис)

¹² КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

No

п/п

Назва етапів бакалаврської роботи

Термін виконання

етапів роботи

Примітка

1

Вступ. Сучасний стан систем контролю та управління електровідцентровими насосами в процесі видобутку нафти. Особливості технологічного процесу видобутку нафти з використанням УЕВН.
06.05 - 20.05.2026 р.

2

Вплив ускладнюючих факторів на технічний стан та ефективність функціонування УЕВН. Моніторинг технічного стану електровідцентрових насосів як основа системи контролю та управління. Віб्राція як діагностична ознака технічного стану УЕВН.
16.05 - 24.05.2026 р.

3

Системи управління нафтовидобувними свердловинами механізованим способом. Висновки та постановка задачі досліджень.
20.05 - 31.05.2026 р.

4

Розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану. Розроблення вузла частотно-регульованого електроприводу заглибного електродвигуна.
24.05 – 31.05. 2026 р.

5

Моделювання системи контролю та

управління електровідцентровим насосом
у програмному середовищі Matlab
Simulink. Моделювання системи
обмеження струму заглибного
електродвигуна. Порівняння енергетичних
показників частотно-регульованого
електроприводу електровідцентрового
насоса. Висновки.

28.05 – 05.06.2026 р. 6 Оформлення пояснювальної записки 31.05 – 15.06.2026 р. 7 Оформлення графічного матеріалу 06.06 – 16.06.2026 р. Студент-бакалавр Я. І. Дрогомирецький

(підпис) Керівник роботи, к.т.н., доцент Н. І. Іванюк (підпис) РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота складається зі вступу, 4 двох розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 69 сторінках та містить 89 рисунків, список використаних джерел налічує 20 найменувань.

Тема: Розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану.
Об'єкт дослідження – процес функціонування електровідцентрових насосів у системах механізованого видобутку нафти.
Предмет дослідження – системи контролю та управління електровідцентровими насосами з використанням засобів моніторингу їх технічного стану.

2 Мета роботи – підвищення ефективності та надійності експлуатації електровідцентрових насосів шляхом розроблення системи контролю та управління, яка використовує результати моніторингу технічного стану обладнання та засоби частотного регулювання електроприводу.

Результати бакалаврської роботи:

2 У процесі виконання бакалаврської роботи проведено аналіз конструкції та особливостей експлуатації електровідцентрових насосів, досліджено вплив основних ускладнюючих факторів на їх роботу, розглянуто сучасні методи та засоби моніторингу технічного стану і автоматизованого управління процесом видобутку нафти. За результатами дослідження:
- розроблено структурну схему системи контролю та управління електровідцентровими насосами на базі програмованого логічного контролера SIMATIC S7-300 із використанням програмного комплексу STEP 7 та SCADA-системи WinCC;
- розроблено підсистему моніторингу технічного стану та частотно-регульованого електроприводу на базі перетворювача частоти Sinamics G120 із блоком керування Control Unit CU240S DP та виконано його конфігурацію

із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення Drive ES 5.4, STEP 7 та SIZER;

- розроблено імітаційну модель електроприводу електровідцентрового насоса та основних елементів системи управління в програмному середовищі Matlab Simulink, проведено моделювання її режимів роботи та аналіз отриманих характеристик.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОВІДЦЕНТРОВИЙ НАСОС, СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ, МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ, ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, SCADA-СИСТЕМА, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, MATLAB SIMULINK.

4 ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of an introduction, two chapters, conclusions, and 2 a list of references. The thesis is presented on 69 pages and contains 39 figures and 20 references. Topic: Development of a Monitoring-Based Control System for Electric Submersible Centrifugal Pumps.

Object of research – the operation process of electric submersible centrifugal pumps used in mechanized oil production systems.

Subject of research – control and monitoring systems for electric submersible centrifugal pumps based on the assessment of their technical condition.

2 Purpose of the thesis – to improve the efficiency and reliability of electric submersible centrifugal pump operation by developing a control system that uses technical condition monitoring data and variable-frequency drive technology.

Results of the bachelor's thesis:

During the preparation of the bachelor's thesis, the design features and operating conditions of electric submersible centrifugal pumps were analyzed, the influence of the main complicating factors on their operation was investigated, and modern methods and tools for technical condition monitoring and automated control of the oil production process were considered.² As a result of the study:

- a structural diagram of the monitoring and control system for electric submersible centrifugal pumps² based on the SIMATIC S7-300 programmable logic controller, STEP 7 software package and WinCC SCADA system was developed;
- a subsystem for technical condition monitoring and variable-frequency electric drive control based on the Sinamics G120 frequency converter with the Control Unit CU240S DP was developed and configured using Drive ES 5.4, STEP 7 and SIZER software tools;

- a simulation model of the electric drive and the main components of the monitoring and control system was developed in the Matlab Simulink environment, and simulation of its operating modes and analysis of the obtained characteristics were performed.

Keywords: ELECTRIC SUBMERSIBLE CENTRIFUGAL PUMP, MONITORING AND CONTROL SYSTEM, TECHNICAL CONDITION MONITORING, TECHNICAL DIAGNOSTICS, VARIABLE-FREQUENCY ELECTRIC DRIVE, PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER, SCADA SYSTEM, SIMULATION MODE L, MATLAB SIMULINK.

ЗМІСТ

Ст.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА ОДИНИЦЬ	10
ВСТУП.....	12
1 СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОВІДЦЕНТРОВИМИ НАСОСАМИ В ПРОЦЕСІ ВИДОБУТКУ НАФТИ.....	14
1.1 Особливості технологічного процесу видобутку нафти з використанням електровідцентрових насосів	14
1.2 Вплив ускладнюючих факторів на технічний стан та ефективність функціонування електровідцентрових насосів.....	19
1.3 Моніторинг технічного стану електровідцентрових насосів як основа системи контролю та управління.....	27
1.3.1 Вібрація як діагностична ознака технічного стану та параметр системи контролю й управління електровідцентровими насосами..	27
1.4 Системи контролю та управління нафтовидобувними свердловинами механізованим способом.....	29
1.5 Висновки та постановка задачі досліджень.....	35
2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОВІДЦЕНТРОВИМИ НАСОСАМИ НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ ЇХ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ.....	38
2.1 Структурна схема системи контролю та управління електровідцентровими насосами.....	38
2.2 Розроблення вузла частотно-регульованого електроприводу заглибного електродвигуна.....	39
² 3м. Арк. Но докум. Підп. Дата Арк. 8 КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ	

Розроб. Дрогомирецький

Перевір. Іванюк Н.І. Реценз. Н. контр. Возний Затверд. Заміховська « Розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану »

Літ. Аркушів

69

ІФНТУНГ ІСТ -22-1

2.3 Моделювання системи контролю та управління електровідцентровим насосом у програмному середовищі Matlab Simulink.....	45
2.3.1 Імітаційна модель силового каналу системи контролю та управління електровідцентровим насосом.....	45

2.4 Реалізація алгоритму компенсації ковзання заглибного електродвигуна.....	53
2.4.1 Реалізація алгоритму ІR-компенсації.....	55
2.5 Моделювання системи обмеження струму заглибного електродвигуна..	58
2.6 Порівняння енергетичних показників частотно-регульованого електроприводу електровідцентрового насоса.....	61
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	67
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....	69

2 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

9

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

2 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

10

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 **2** ПЗ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА ОДИНИЦЬ

УЕВН – установка електровідцентрових насосів

ЗВН – заглибний відцентровий насос

ЗЕД – заглибний електродвигун

НКТ – насосно-компресорні труби

ГРП – гідророзрив пласта

ШНМ – штучні нейронні мережі

СЗТ – система заглибної телеметрії

ПТК – програмно-технічний комплекс

НК – наземний комплекс

СМР – система моніторингу та регулювання

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом

СУ – система управління

ПЧ – перетворювач частоти

ПЛК – програмований логічний контролер

ПЧ-АД – система «перетворювач частоти – асинхронний двигун»

1 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

11

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

ВСТУП

Експлуатація нафтових свердловин із використанням електровідцентрових насосів належить до складних технологічних процесів, ефективність яких значною мірою залежить від технічного стану насосного обладнання, режимів його роботи та умов експлуатації свердловини. Електровідцентрові насоси працюють у складному середовищі, що характеризується дією значної кількості взаємопов'язаних параметрів, серед яких особливе значення мають тиск, температура, струм електродвигуна, рівень вібрації, продуктивність насоса, вміст механічних домішок, газовий фактор та обводненість продукції. Зміна цих параметрів безпосередньо впливає на надійність роботи установки, її енергоефективність і тривалість міжремонтного періоду.

Процес видобутку нафти з використанням електровідцентрових насосів супроводжується дією низки ускладнюючих факторів. До них належать технічні, технологічні та геолого-технічні чинники, зокрема підвищений рівень вібрації, зношування робочих органів насоса, зміна глибини спуску обладнання, кривизна свердловини, наявність механічних домішок у пластовій рідині, відкладення солей і парафіну, підвищена температура,

висока в'язкість рідини, значний газовий фактор та низькі вибійнні тиски.

Сукупна дія цих факторів може призводити до погіршення режимів роботи електровідцентрового насоса, зниження його продуктивності, збільшення енергоспоживання, виникнення аварійних ситуацій і передчасного виходу обладнання з ладу.

Однією з найбільш інформативних ознак погіршення технічного стану електровідцентрового насоса є підвищення рівня вібрації. Воно може бути зумовлене зношуванням підшипникових вузлів, робочих коліс, направляючих апаратів, порушенням центрування валу, засміченням проточних каналів або дією механічних домішок у видобувній рідині.

¹ Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

12

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Підвищена вібрація не лише погіршує роботу насосного агрегату, а й може спричинити пошкодження фланцевих з'єднань, обрив окремих елементів установки та її аварійне падіння на вибій свердловини. Тому своєчасне виявлення ознак погіршення технічного стану є важливою умовою забезпечення надійної та безпечної експлуатації електровідцентрових насосів.

У сучасних умовах ефективна експлуатація електровідцентрових насосів неможлива без застосування систем контролю, діагностування та автоматизованого управління, які забезпечують безперервний або періодичний моніторинг основних параметрів роботи обладнання.

Використання даних моніторингу дає змогу не лише фіксувати поточний стан установки, а й своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму, прогнозувати розвиток дефектів, формувати попереджувальні сигнали та приймати обґрунтовані керуючі рішення.

Такий підхід сприяє підвищенню надійності роботи насосного обладнання, зменшенню кількості аварійних зупинок і підвищенню ефективності процесу видобутку нафти.

Особливе значення в системах контролю та управління електровідцентровими насосами має поєднання засобів технічного моніторингу з частотно-регульованим електроприводом. Частотне регулювання дає можливість змінювати режим роботи заглибного електродвигуна відповідно до фактичного стану насоса та умов експлуатації свердловини.

У разі виявлення небажаних змін у роботі обладнання система управління може коригувати частоту обертання, обмежувати струм електродвигуна, зменшувати навантаження на насос або формувати сигнал про необхідність технічного обслуговування.

Таким чином, актуальним є розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами, яка базується на моніторингу їх

¹ Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

13

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

технічного стану та забезпечує прийняття керуючих рішень з урахуванням діагностичних параметрів.

Така система дозволяє підвищити ефективність експлуатації насосного обладнання, зменшити ризик аварійних відмов, оптимізувати енергоспоживання та забезпечити стабільність технологічного процесу видобутку нафти.

Бакалаврська робота присвячена розробленню системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану.

У роботі передбачається проаналізувати особливості експлуатації електровідцентрових насосів, визначити основні діагностичні параметри їх технічного стану, обґрунтувати структуру системи контролю та управління, а також розглянути можливість використання частотно-регульованого електроприводу для підвищення ефективності роботи насосної установки.

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

1 СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОВІДЦЕНТРОВИМИ НАСОСАМИ В ПРОЦЕСІ ВИДОБУТКУ НАФТИ

1.1 Особливості технологічного процесу видобутку нафти з використанням електровідцентрових насосів

Невід'ємною складовою комплексу обладнання, що використовується в нафтовидобувній галузі, є насоси та насосне обладнання. За обсягами видобутку нафти найбільшого поширення набули установки електровідцентрових насосів (УЕВН). Електромеханічним перетворювачем енергії в таких установках є заглибний асинхронний електродвигун. Однак ефективна експлуатація цього обладнання потребує застосування сучасних систем контролю та управління, здатних забезпечити стабільність технологічного процесу і своєчасне виявлення відхилень від нормальних режимів роботи [1]. Найбільшого поширення серед лопатевих динамічних насосів у нафтовидобувній промисловості набули відцентрові насоси, які забезпечують створення значного напору за необхідної подачі рідини, мають достатньо високий коефіцієнт корисної дії та характеризуються високою надійністю [2, 3].

Заглибний електровідцентровий насос (ЗЕВН) (рис. 1.1) приводиться в дію

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд заглибного електровідцентрового насоса.

заглибним електродвигуном (ЗЕД) (рис. 1.2).

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Рисунок 1.2 – Загальний вигляд заглибного електродвигуна ЕДСТ220–117М.

Електроенергія до електродвигуна подається спеціальним силовим кабелем (рис. 1.3), який прокладається вздовж насосно-компресорних труб у свердловині.

Рисунок 1.3 – Силовий кабель марки КПБП-90.

Розташування електродвигуна безпосередньо біля насоса дозволило суттєво спростити передачу механічної енергії та використовувати насоси великої потужності. Саме ці конструктивні особливості зумовили широке застосування УЕВН у сучасному механізованому видобутку нафти. Установки ЕВН є економічно ефективними під час перекачування значних об'ємів рідини порівняно з іншими типами насосного обладнання. Вони характеризуються відносно невеликим енергоспоживанням та високим коефіцієнтом корисної дії. Оскільки в свердловині розташовані лише насос і електродвигун, а станція управління та трансформатор знаходяться на поверхні і не потребують складного технічного обслуговування, експлуатація електроприводу є достатньо простою. Застосування установок ЕВН також дає змогу ефективно боротися з відкладеннями парафіну в колоні насосно-компресорних труб. Для цього використовуються труби зі спеціальним захисним покриттям, автоматизовані пристрої подачі реагентів у свердловину та механічні скрепки. Наземне обладнання має порівняно невеликі габарити і не потребує встановлення

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

спеціальних фундаментів, тому може розміщуватися на компактних майданчиках або в контейнерному виконанні.
Схема установки ЕВН наведена на рис. 1.4.

Рисунок 1.4 – Установка заглибного електровідцентрового насоса:

1 – електродвигун; 2 – гідрозахист; 3 – газосепаратор; 4 – насос; 5 – обсадна труба свердловини; 6 – високовольтна кабельна лінія; 7 – насосно-компресорна труба; 8 – трансформатор, що підвищує напругу; 9 – станція управління;
10 – силова кабельна лінія (0,4 кВ); 11 – комплектна трансформаторна підстанція.

¹ Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

У заглибний відцентровий насос пластова (свердловинна) рідина, що являє собою суміш нафти, води, розчиненого газу та механічних домішок, надходить через захисну сітку у нижній частині установки. Сітка виконує функцію первинної фільтрації, запобігаючи потраплянню великих механічних частинок до робочих органів насоса.

Далі рідина подається в насосно-компресорні труби. Оскільки заглибний асинхронний електродвигун є герметизованим і маслозаповненим, його необхідно захистити від проникнення пластової рідини. Для цього між насосом і двигуном встановлюється вузол гідрозахисту. Для отримання необхідного напору при обмежених габаритах установки електродвигуни забезпечують частоту обертання насоса близько 2800–2950 об/хв [2]. У разі підвищеного вмісту вільного газу в пластовій рідині до складу установки включають газосепаратор або диспергатор. Електродвигуни живляться високою напругою через спеціальний кабель від підвищувального трансформатора, розташованого на поверхні.

Кабель прокладається вздовж насосно-компресорних труб. На більшій частині довжини застосовується круглий або плоский кабель, а безпосередньо біля насосного агрегату використовується тільки плоский кабель, що забезпечує оптимальний зазор між корпусом установки та стінками свердловини. Саме величина цього зазору визначає допустимі габарити УЕВН [4]. Застосування підвищувального трансформатора також дає змогу компенсувати втрати напруги в кабельній лінії.

Для пуску, зупинки та керування режимами роботи установки використовується станція управління, яка забезпечує автоматичний контроль і регулювання роботи електроприводу. Крім того, станція управління здійснює відображення основних параметрів електродвигуна та контролює додаткові параметри, зокрема стан ізоляції кабельної лінії. Сучасні станції управління забезпечують підтримання необхідних режимів функціонування

² Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

системи «пласт – свердловина – насосна установка» та виконують діагностування технічного стану вузлів УЕВН.

Колона насосно-компресорних труб обладнується зворотним і спускним клапанами. Зворотний клапан забезпечує утримання рідини в колоні труб під час зупинки насоса, що значно полегшує його повторний запуск. Спускний клапан призначений для зливу рідини з колони труб під час підйому установки зі свердловини.

Обсадні колони свердловин мають різні внутрішні діаметри, тому установки ЕВН виготовляються у кількох типорозмірах. Зменшення діаметра

установки призводить до певного зниження її основних технічних характеристик — подачі, напору та коефіцієнта корисної дії. Кожна установка має власне умовне позначення, яке містить інформацію про допустимий діаметр обсадної колони, номінальну продуктивність та орієнтовний напір насоса.

Для всіх основних вузлів УЕВН (насосів, електродвигунів, газосепараторів тощо) встановлені відповідні технічні вимоги та стандарти, які регламентуються нормативними документами та технічними умовами підприємств-виробників.

Умови роботи електровідцентрових насосів характеризуються агресивним середовищем, підвищеними температурами та складністю виконання ремонтних робіт. Тому сучасні конструкції насосів передбачають використання нових матеріалів, спеціальних сплавів для виготовлення валів і робочих коліс, а також застосування частотно-регульованих електроприводів, що дозволяють оптимізувати режими роботи обладнання та підвищити його надійність.

Аналіз конструкції та особливостей функціонування електровідцентрових насосів свідчить, що їх робота залежить від значної кількості взаємопов'язаних технологічних і технічних параметрів. Для забезпечення надійної та енергоефективної експлуатації необхідним є

² Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

19

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

безперервний контроль цих параметрів і своєчасне виявлення відхилень від штатних режимів роботи. Саме тому сучасні системи видобутку нафти дедалі частіше оснащуються засобами моніторингу технічного стану та автоматизованими системами керування, які забезпечують оперативне прийняття рішень щодо зміни режимів роботи насосної установки.

1.2 Вплив ускладнюючих факторів на технічний стан та ефективність функціонування електровідцентрових насосів

Процес видобутку нафти супроводжується дією значної кількості ускладнюючих факторів, тому одним із головних завдань є мінімізація їх негативного впливу, що дає змогу підвищити ефективність експлуатації обладнання, знизити експлуатаційні витрати та збільшити міжремонтний ресурс насосних установок. Дослідження показують, що фактори, які впливають на надійність роботи УЕВН, можна поділити на три основні групи: технічні (вібрація та зношування вузлів), технологічні (глибина спуску, кривизна свердловини, темп набору кривизни) та геолого-технічні (підвищений вміст механічних домішок, відкладення солей і парафіну, температура робочого середовища, обводненість продукції, висока в'язкість і газовий фактор, низькі вибійнні тиски).

Основними проблемами, які ускладнюють механізований видобуток нафти, є підвищений вміст механічних домішок, наявність вільного газу, висока температура пластової рідини та недостатнє охолодження насосної установки. Сукупна дія цих факторів призводить до прискореного зношування обладнання та передчасного виходу його з ладу. Одним із перших проявів розвитку дефектів є збільшення рівня вібрації, яка супроводжує роботу електровідцентрового насоса і різко зростає внаслідок зношування його елементів.

¹ Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

20

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Насамперед зношуються захисні втулки валу та маточини напрямних апаратів. Ця пара тертя працює як радіальний підшипник ковзання. У зазор між втулкою і маточиною неминуче потрапляє пластова рідина, яка виконує роль мастильного середовища.

За нормальних умов експлуатації та відповідного складу пластової

рідини цей вузол може працювати тривалий час. Проте наявність піску та інших механічних домішок значно прискорює процес зношування. Особливу небезпеку становлять дрібні абразивні частинки, які проникають у зазор між втулкою та маточиною напрямного апарата. Це призводить до ексцентричного обертання валу, збільшення навантаження на підшипникові вузли та подальшого прогресуючого руйнування деталей насоса.

При зміщенні валу відносно осі обертання виникають додаткові осьові та радіальні навантаження, що призводить до його деформації та збільшення навантаження на опорні елементи конструкції. У результаті процес зношування прискорюється і з часом досягає критичних значень.

Аналогічний механізм характерний і для пари тертя «захисна втулка – втулка підшипника».

Радіальне абразивне зношування в насосах із плаваючими робочими органами супроводжується також осьовим зношуванням. Воно проявляється у стиранні упорних кілець та контактних поверхонь насосної ступені. Осьові зусилля, які створюються робочими колесами, сприймаються упорними кільцями, поверхні яких, подібно до підшипників ковзання, охолоджуються та змащуються пластовою рідиною.

Більшість насосів сконструйовані таким чином, що за номінальних режимів роботи осьове зусилля спрямоване вниз. Абразивні частинки, потрапляючи в зону контакту шайби робочого колеса та бурта напрямного апарата, призводять до стирання матеріалу упорних кілець і металевих поверхонь насосної ступені.

¹Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

21

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Аналогічно осьове навантаження, яке діє на вал, сприймається вузлом п'яти насоса, що викликає зношування підп'ятників і шайби п'яти. Зношування валу найчастіше проявляється утворенням глибоких кільцевих канавок. Причиною цього є електрохімічна корозія, а присутність механічних домішок додатково підсилює інтенсивність руйнування, порушуючи захисні оксидні плівки на поверхні металу. Тому під час конструювання насосів необхідно уникати використання матеріалів, що утворюють гальванічні пари, а також застосовувати матеріали з близькими електрохімічними потенціалами.

До ускладнюючих факторів належать також засмічення та зношування елементів заглиблених електровідцентрових насосів абразивними частинками після проведення гідророзриву пласта або частинками гірських порід, відкладення солей на робочих органах насоса, перегрів та відмови вузлів через підвищену температуру, а також вплив вільного газу у пластовій рідині, що відкачується [5].

Частка свердловин, робота яких ускладнюється утворенням сольових відкладень, становить близько 8–10 % від загального експлуатаційного фонду і має тенденцію до зростання зі збільшенням обводненості продукції. Підвищений вміст механічних домішок у пластовій рідині призводить до перекриття прохідних каналів напрямних апаратів і робочих коліс насоса, що викликає зниження продуктивності установки, прискорений знос її вузлів та збільшення амплітуди вібрації. Підвищений рівень вібрації може стати причиною послаблення або руйнування фланцевих з'єднань, а також аварійного виходу обладнання з ладу. Аналіз залежності аварійності УЕВН від концентрації механічних домішок показує, що найбільша кількість відмов спостерігається при їх вмісті на рівні 200–500 мг/л. За подальшого збільшення концентрації механічних домішок кількість аварійних відмов зменшується, однак при цьому істотно зростає споживаний струм

¹Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

22

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

електродвигуна, що може призвести до перегріву та пошкодження кабельної лінії.

Кількість аварій також залежить від вмісту води у видобувній продукції. Корозійне руйнування свердловинного обладнання, у тому числі електровідцентрових насосів, обумовлене агресивністю пластових вод. Особливо гостро ця проблема проявляється на родовищах, які перебувають на пізній стадії розробки та використовують різні типи вод для підтримання пластового тиску. Такі води часто містять підвищену кількість сульфатів і мікроорганізмів, які створюють сприятливі умови для розвитку корозійних процесів. Залізобактерії безпосередньо не руйнують метал, однак під утвореними ними відкладеннями виникають локальні електрохімічні неоднорідності, що сприяють розвитку корозії та активізації діяльності сульфатовідновлювальних бактерій. Для захисту від корозії широко застосовується магнієво-цинковий протекторний захист, при якому корпус насоса виконує роль катода, а протектор – анода, що дозволяє локалізувати корозійні процеси на захисному елементі. Значна кількість відмов електровідцентрових насосів також пов'язана з відкладенням солей на їх робочих органах. Незважаючи на порівняно невеликий вміст солей у пластових флюїдах, вони присутні як у пластовій воді, так і в нафті. Під час роботи насоса його робочі колеса нагріваються, що сприяє утворенню соляних відкладень на їх поверхнях. З часом такі відкладення зменшують прохідні перерізи проточної частини насоса, що призводить до погіршення його гідравлічних характеристик, зниження продуктивності та напору. Дослідження показують, що однією з основних причин аварійних відмов електровідцентрових насосів, пов'язаних з обривом установки та її падінням на вибій свердловини, є підвищений рівень вібрації. Саме тому параметри вібрації належать до найбільш інформативних діагностичних ознак

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

23

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

технічного стану насосного обладнання і повинні безперервно контролюватися засобами системи моніторингу.

Таким чином, більшість факторів, що негативно впливають на роботу електровідцентрових насосів, супроводжуються зміною контрольованих параметрів, таких як вібрація, температура, споживаний струм, тиск і продуктивність установки.

Безперервний моніторинг цих параметрів дає змогу своєчасно виявляти розвиток дефектів, прогнозувати можливі відмови та використовувати отриману інформацію для автоматичного коригування режимів роботи насосної установки. Це підтверджує доцільність розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану.

1.3 Моніторинг технічного стану електровідцентрових насосів як основа системи контролю та управління

Функціонування електровідцентрових насосів характеризується значною кількістю взаємопов'язаних параметрів, які визначають ефективність процесу видобутку нафти та надійність роботи обладнання.

До таких параметрів належать електротехнічні характеристики, технологічні параметри насосної установки, параметри пласта та свердловини, а також показники технічного стану окремих вузлів УЕВН.

За даними різних досліджень, кількість можливих дефектів, які можуть виникати під час експлуатації електровідцентрових насосів і призводити до аварійних відмов обладнання, становить від 30 до 50 найменувань.

На рис. 1.5 наведено узагальнену структуру функціонування УЕВН.

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

24

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Ефективне управління процесом видобутку нафти неможливе без своєчасного отримання достовірної інформації про технічний стан насосного обладнання. Саме тому в сучасних автоматизованих системах усе більшого поширення набувають підсистеми моніторингу та технічного діагностування, які забезпечують збір, оброблення та аналіз великого обсягу експлуатаційної інформації в режимі реального часу.

Сучасні методи оброблення інформації, що застосовуються в системах підтримки прийняття рішень, дозволяють використовувати інтелектуальні алгоритми аналізу даних, зокрема технології штучних нейронних мереж. Їх застосування є доцільним для розв'язання задач оперативного діагностування технічного стану УЕВН в умовах значної кількості взаємопов'язаних параметрів та складності формалізації процесів, що відбуваються під час експлуатації нафтових свердловин [6].

Традиційно під час оцінювання технічного стану УЕВН контролюються такі параметри, як витрата та тиск рідини, частота обертання валу, потужність насоса, температура, густина та в'язкість рідини, що перекачується, а також температура корпусу установки. Для заглибного електродвигуна основними контрольованими параметрами є номінальна потужність, напруга живлення, споживаний струм, крутний момент на валу,

² Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

25

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

опір ізоляції обмоток та струм холостого ходу. Разом з тим зазначені параметри характеризують переважно режим роботи установки і не забезпечують повної інформації щодо розвитку дефектів її окремих вузлів. У зв'язку з цим сучасні системи моніторингу технічного стану УЕВН використовують значно ширший перелік діагностичних ознак, що дозволяє своєчасно виявляти початкові стадії деградації обладнання та прогнозувати можливість виникнення аварійних ситуацій. При цьому задача діагностування технічного стану розглядається як задача класифікації, у якій на основі аналізу сукупності вимірних параметрів визначається поточний стан насосної установки.

Одним із перспективних підходів є використання комплексу штучних нейронних мереж, кількість яких відповідає числу можливих класів технічного стану УЕВН. У такій системі кожна навчена нейронна мережа аналізує вхідні експлуатаційні параметри та формує оцінку ймовірності виникнення конкретного дефекту. Використання окремого класифікатора для кожного типу несправності дозволяє підвищити достовірність діагностування та зменшити обсяг необхідної навчальної вибірки.

У сучасних системах моніторингу технічного стану контроль параметрів здійснюється як під час запуску установки, так і в процесі її роботи на стаціонарному режимі та під час зупинки. При цьому виконується одночасна реєстрація миттєвих значень споживаного струму заглибного електродвигуна, напруги живлення, параметрів вібрації та тиску водонафтової суміші на гирлі свердловини. Отримані значення порівнюються з еталонними або гранично допустимими величинами, визначеними під час введення обладнання в експлуатацію.

Як інформативні параметри для оцінювання технічного стану УЕВН використовують:

- амплітуду та спектральний склад споживаного струму електродвигуна;
- величину ковзання ротора та навантаження на валу;

¹ Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

26

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

- рівень вібрації та її спектральні характеристики;
- температуру обмоток електродвигуна;

- тиск на прийомі насоса та буферний тиск;
- фізико-хімічні властивості пластової рідини.

Особливе місце серед діагностичних параметрів займає контроль вібрації, оскільки саме зміна її рівня та спектрального складу дозволяє своєчасно виявляти розвиток більшості дефектів насосного обладнання. У процесі деградації технічного стану електродвигуна, насоса, фланцевих і різьбових з'єднань амплітуда вібрації в окремих частотних діапазонах поступово зростає, що може бути використано як критерій оцінювання стану обладнання.

Для діагностування технічного стану електровідцентрових насосів використовуються спеціалізовані засоби контролю, які забезпечують вимірювання струму електродвигуна, вібрації та тиску за допомогою відповідних датчиків. Вимірювальна інформація надходить до цифрової системи збору даних, де виконується її оброблення та формуються висновки щодо технічного стану обладнання. Додатково під час аналізу враховуються параметри штатної системи контролю технологічного процесу, зокрема динамічний рівень пластової рідини, продуктивність установки та фізико-хімічні характеристики видобуваної суміші.

Одночасний аналіз параметрів струму, вібрації, тиску та температури забезпечує можливість комплексної оцінки стану УЕВН і дозволяє ¹ виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку. Такий підхід створює передумови для переходу від планово-попереджувального ¹ обслуговування до обслуговування за фактичним технічним станом обладнання.

Таким чином, застосування сучасних засобів моніторингу та інтелектуальних методів оброблення інформації забезпечує підвищення достовірності діагностування електровідцентрових насосів і створює інформаційну основу ² для побудови ефективних систем контролю та

² Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а
Арк.
27

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

управління процесом видобутку нафти. Результати моніторингу технічного стану можуть бути використані для автоматичного коригування режимів роботи насосної установки, своєчасного виявлення небезпечних відхилень та підвищення надійності експлуатації УЕВН.

1.3.1 Вібрація як діагностична ознака технічного стану та параметр системи контролю й управління електровідцентровими насосами

² Одним із найбільш інформативних діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан електровідцентрових насосів, є ² рівень вібрації. Аналіз вібраційних процесів дозволяє своєчасно виявляти дефекти

підшипникових вузлів, робочих коліс, валів, муфтових та різьбових з'єднань, а також оцінювати загальний технічний стан насосної установки. Тому контроль параметрів вібрації є не лише важливою складовою технічного діагностування, а й одним із ключових засобів підвищення ефективності системи контролю та управління УЕВН.

Для контролю технічного стану електровідцентрових насосів під час їх експлуатації широко використовуються системи занурювальної телеметрії (СЗТ). Типова система складається із занурювального блоку та наземного блоку збору й оброблення інформації. Занурювальний блок забезпечує вимірювання та передачу основних параметрів роботи установки, серед яких:

- тиск на прийомі насоса;
- температура обмоток заглибного електродвигуна;
- температура навколишнього середовища;
- рівень вібрації за трьома координатними осями;
- опір ізоляції силового кабелю.

Передача інформації від занурювального блоку до наземної частини системи здійснюється по силовому кабелю. У наземному блоці виконується оброблення, архівування та візуалізація отриманих даних для оператора.

¹ Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а
Арк.

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Аналіз цієї інформації дозволяє оцінювати технічний стан УЕВН у режимі реального часу та своєчасно попереджати виникнення аварійних ситуацій. Слід зазначити, що інтегральна оцінка рівня вібрації за середньоквадратичними значеннями віброприскорення чи віброшвидкості не завжди забезпечує необхідну достовірність оцінювання технічного стану обладнання. Значно більш інформативним є аналіз часових реалізацій та спектрального складу вібраційних сигналів, який дозволяє визначати характерні частоти виникнення дефектів та прогнозувати подальший розвиток несправностей.

Найбільшу інформативність забезпечує вимірювання вібрації безпосередньо у свердловині за допомогою засобів занурювальної телеметрії. Разом із тим передача великого обсягу первинної інформації на поверхню є складним технічним завданням через обмежену пропускну здатність каналу зв'язку та вплив електромагнітних перешкод. Тому перспективним напрямом є попереднє оброблення вібраційних сигналів безпосередньо у занурювальному блоці системи.

Одним із найбільш поширених методів аналізу вібраційних сигналів є спектральний аналіз із використанням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Його застосування дозволяє виділити найбільш інформативні гармонійні складові сигналу та передавати до наземної системи лише необхідні діагностичні параметри, що значно зменшує обсяг передаваної інформації без істотної втрати її інформативності.

Експериментальні дослідження показують, що основна частина енергії вібраційних коливань, пов'язаних із механічними дефектами насосного обладнання, зосереджена в низькочастотній області. Найбільш інформативними є складові, що відповідають частоті обертання ротора, а також її гармоніки та субгармоніки, які виникають при дисбалансі, зношуванні підшипників, послабленні кріплень та інших несправностях.

¹ Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

29

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Таким чином, контроль параметрів вібрації та застосування сучасних методів їх цифрового оброблення є одним із найефективніших способів моніторингу технічного стану електровідцентрових насосів. Використання результатів вібраційного контролю у складі автоматизованої системи контролю та управління дозволяє своєчасно виявляти розвиток дефектів, оптимізувати режими роботи насосного обладнання та підвищити надійність і ефективність процесу видобутку нафти.

1.4 Системи контролю та управління нафтовидобувними свердловинами механізованим способом

На сучасному етапі розвитку нафтовидобувної галузі значна увага приділяється не лише розробленню систем автоматичного управління механізованим видобутком нафти з використанням установок електровідцентрових насосів і штангових глибиннонасосних установок, але й створенню інтелектуальних систем комплексного моніторингу та адаптивного управління технологічними процесами. Основною тенденцією є інтеграція засобів контролю, технічного діагностування та автоматичного регулювання в єдиний програмно-технічний комплекс.

Як приклад сучасної системи контролю та управління розглянемо програмно-технічний комплекс (ПТК) ArtLiftControl [14], призначений для забезпечення ефективного ресурсозберігаючого управління нафтовидобувними свердловинами механізованого фонду шляхом безперервного моніторингу підземних і наземних параметрів їх роботи, збору та оброблення телеметричної інформації, а також адаптивного регулювання продуктивності насосного обладнання.

Інформаційно-організаційна структура ПТК ArtLiftControl розроблена з урахуванням світового досвіду побудови систем дистанційного моніторингу

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

та інтегрується у п'ятирівневу модель організації інформаційно-керуючих систем. У комплексі із суміжними інформаційними системами, що використовуються на об'єктах нафтогазовидобутку, вона відповідає концепції інтелектуального родовища (рис. 1.6).

Рисунок 1.6 – П'ятирівнева модель організації систем віддаленого моніторингу на базі ПТК ArtLiftControl

ArtLiftControl є спеціалізованим програмно-апаратним комплексом, побудованим за ієрархічним принципом. До складу комплексу входять засоби свердловинної об'язки, заглибні та наземні датчики, кабельні й модерні лінії зв'язку, контролери, серверне обладнання та автоматизовані робочі місця операторів. Усе обладнання сертифіковане та відповідає вимогам експлуатації в складних кліматичних умовах. На нижньому рівні до ПТК підключаються станції управління УЕВН, системи заглибної телеметрії, гирлові датчики та інші пристрої контролю технологічних параметрів свердловини. Отримана інформація передається до кушових контролерів, де виконується її первинне оброблення та підготовка до передачі на верхні рівні системи. Програмне забезпечення комплексу включає програмне забезпечення нижнього рівня (кушових контролерів), серверне програмне забезпечення та програмне забезпечення автоматизованих робочих місць операторів. Серверна частина забезпечує накопичення, архівування та оброблення інформації, а також обмін даними із суміжними системами, зокрема

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

системами телемеханіки та інформаційно-аналітичними системами управління виробництвом.

Для передачі даних між центральним сервером і контрольованими об'єктами використовуються різні типи каналів зв'язку: аналогові та цифрові FM-канали, RadioEthernet, GPRS та інші сучасні телекомунікаційні технології. Клієнтські автоматизовані робочі місця, як правило, встановлюються у технологічних службах нафтогазовидобувних управлінь. Типову структуру комплексу технічних засобів системи моніторингу і регулювання рівня АСУТП/телемеханіки наведено на рис. 1.7. Залежно від особливостей розташування свердловин та умов експлуатації можуть застосовуватися різні варіанти побудови структури АСУТП/телемеханіки на базі ПТК ArtLiftControl.

Рисунок 1.7 – Типова структура комплексу технічних засобів системи моніторингу і регулювання рівня АСУТП/телемеханіки

Для родовищ із великою кількістю окремо розташованих свердловин доцільним є використання каналів зв'язку стандарту GPRS (рис. 1.8),

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Рисунок 1.8 – Схема організації системи моніторингу з використанням GPRS-зв'язку

а для кушових майданчиків – застосування бездротових мереж на основі

технології Wi-Fi (рис. 1.9).

Рисунок 1.9 – Схема організації системи моніторингу з використанням технології Wi-Fi

1
Зм. Арк. No докум. Підп. Дат
а
Арк.
33

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

Як базове апаратне забезпечення ПТК ArtLiftControl використовуються інтелектуальні кушові контролери серії Crossmaster 1.0 та Crossmaster 2.0.

Контролери призначені для побудови багаторівневих автоматизованих систем керування технологічними процесами, збору інформації та реалізації алгоритмів локального управління нафтовидобувними свердловинами. Контролери забезпечують збір та первинне оброблення інформації, реалізацію алгоритмів локального управління, функції захисту, блокування та обмін даними із верхнім рівнем системи.

Програмне забезпечення контролерів працює автономно та не залежить від функціонування програмного забезпечення верхнього рівня. У разі втрати зв'язку з диспетчерським пунктом контролери забезпечують підтримання безпечних режимів роботи обладнання та виконання необхідних функцій автоматичного керування.

Апаратна конфігурація контролерів повністю задовольняє поточні потреби та забезпечує можливість подальшого розширення системи. Загальний вигляд комплексу телемеханіки серії Crossmaster наведено на рис. 1.10.

Рисунок 1.10 – Загальний вигляд комплексу телемеханіки серії Crossmaster

1
Зм. Арк. No докум. Підп. Дат а Арк. 34 КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ Використання програмно-технічного комплексу ArtLiftControl

забезпечує реалізацію сучасних функцій моніторингу та управління установками електровідцентрових насосів, серед яких:

- дистанційне встановлення та коригування параметрів роботи УЕВН;
- керування частотою обертання заглибного електродвигуна;
- автоматичне коригування режимів роботи залежно від зміни технологічних параметрів;
- автоматизований вивід свердловини на технологічний режим;
- підтримання заданого вибірного тиску;
- підтримання заданої продуктивності свердловини;
- контроль параметрів циклічної роботи обладнання;
- формування попереджувальних повідомлень про виникнення передаварійних ситуацій;
- накопичення, зберігання та аналіз інформації про технічний стан насосного обладнання.

Комплекс забезпечує управління режимом роботи кожної окремої свердловини в реальному масштабі часу. Передбачено як прості режими керування (пуск, зупинка, встановлення частоти обертання заглибного електродвигуна), так і автоматичні режими підтримання заданих технологічних параметрів, зокрема тиску на прийомі насоса або вибірного тиску. Однією з важливих функцій комплексу є автоматизований вивід свердловини на робочий режим із використанням спеціальних алгоритмів адаптивного керування.

Таким чином, сучасні програмно-технічні комплекси забезпечують інтеграцію функцій моніторингу технічного стану, автоматичного контролю та адаптивного управління роботою електровідцентрових насосів.

Використання таких систем дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормальних режимів експлуатації, оперативно коригувати параметри роботи

Зм. Арк. No докум. Підп. Дат
а
Арк.
35

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

насосної установки та підвищувати ефективність і надійність процесу

видобутку нафти.

1.5 Висновки та постановка задачі досліджень

У розділі розглянуто особливості технологічного процесу видобутку нафти з використанням електровідцентрових насосів, проаналізовано конструкцію установки ЕВН та її основних складових — заглибного відцентрового насоса, заглибного електродвигуна, системи живлення та допоміжного обладнання. Встановлено, що ефективна та безаварійна експлуатація електровідцентрових насосів потребує застосування сучасних систем контролю та управління, здатних оперативно реагувати на зміну режимів роботи та технічного стану обладнання.

Проведено аналіз основних ускладнюючих факторів, що впливають на роботу електровідцентрових насосів. Встановлено, що технічні (вібрація, зношування вузлів), технологічні (глибина спуску, кривизна свердловини, режим роботи) та геолого-технічні чинники (механічні домішки, відкладення солей і парафіну, температура, обводненість продукції, газовий фактор та низькі вибірні тиски) суттєво впливають на надійність і довговічність насосного обладнання. Показано, що одним із найбільш інформативних параметрів, який відображає зміну технічного стану УЕВН, є рівень вібрації. Розглянуто сучасні підходи до моніторингу технічного стану електровідцентрових насосів та визначено основні діагностичні параметри, які можуть бути використані для оцінювання працездатності обладнання. До таких параметрів належать вібрація, споживаний струм і напруга електродвигуна, тиск і витрата рідини, температура, а також фізико-хімічні характеристики пластової рідини. Проаналізовано можливості використання систем заглибної телеметрії та сучасних методів цифрової обробки інформації для побудови систем моніторингу технічного стану УЕВН.

1 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

36

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Встановлено, що застосування вібраційного контролю та спектрального аналізу вібраційних сигналів забезпечує своєчасне виявлення дефектів насосного обладнання і може бути використане як інформаційна основа для прийняття рішень у системах автоматичного контролю та управління.

Проаналізовано сучасні програмно-технічні комплекси моніторингу та управління нафтовидобувними свердловинами механізованого фонду. Розглянуто структуру та функціональні можливості програмно-технічного комплексу ArtLiftControl, який забезпечує інтеграцію функцій дистанційного моніторингу, збору й оброблення телеметричної інформації та адаптивного управління режимами роботи електровідцентрових насосів.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що підвищення ефективності та надійності експлуатації електровідцентрових насосів доцільно забезпечувати шляхом поєднання засобів моніторингу технічного стану з сучасними системами автоматичного контролю та управління, які використовують результати діагностування для формування керуючих впливів.

З урахуванням виконаного аналізу в бакалаврській роботі поставлено такі задачі:

- розробити структурну схему системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану;
- обґрунтувати вибір технічних засобів моніторингу та частотно-регульованого електроприводу;
- розробити структурну схему системи контролю та управління й принципову схему електроприводу установки;
- розробити імітаційну модель електроприводу електровідцентрового насоса в програмному середовищі Matlab Simulink та провести дослідження її основних режимів роботи;

2 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

37

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

- оцінити ефективність використання результатів моніторингу технічного стану для підвищення надійності та енергоефективності роботи електровідцентрових насосів.

2 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

38

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОВІДЦЕНТРОВИМИ НАСОСАМИ НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ ЇХ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

2.1 Структурна схема системи контролю та управління електровідцентровими насосами

У розділі 1 було встановлено, що ефективна експлуатація установок електровідцентрових насосів неможлива без використання сучасних систем автоматичного контролю та управління, які забезпечують не лише пуск і зупинку обладнання, але й безперервний моніторинг його технічного стану. Одним із головних елементів такої системи є станція управління, яка виконує функції збору, оброблення та відображення технологічної інформації, а також формування керуючих впливів на електропривід установки. На рис. 2.1 наведено структурну схему системи контролю та управління електровідцентровим насосом. До її складу входять основні вузли установки: пристрій введення силового кабелю, заглибний електродвигун, протектор, газосепаратор, відцентровий насос, система заглибної телеметрії та наземна станція управління.

Рисунок 2.1 – Структурна схема системи контролю та управління електровідцентровим насосом

2 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

39

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Основу системи становлять програмований логічний контролер та частотно-регульований електропривід, які забезпечують автоматичне керування режимами роботи насосної установки. Інформація про технологічні параметри та технічний стан УЕВН надходить від датчиків системи заглибної телеметрії та інших первинних перетворювачів до контролера, де здійснюється її оброблення та аналіз. До основних контрольованих параметрів належать рівень вібрації насосної установки, температура заглибного електродвигуна, тиск на прийомі насоса, споживаний струм і напруга живлення, частота обертання електродвигуна, продуктивність установки та інші технологічні параметри. На основі результатів моніторингу контролер формує керуючі сигнали, які через частотний перетворювач забезпечують автоматичне регулювання роботи установки. При цьому реалізуються такі функції, як дистанційне встановлення та зміна уставок, регулювання частоти обертання заглибного електродвигуна, автоматична корекція режимів роботи залежно від зміни технологічних параметрів, підтримання заданого вибірного тиску та продуктивності, автоматизований вивід свердловини на робочий режим, попередження та локалізація передаварійних ситуацій, накопичення та архівування інформації про технічний стан обладнання. Таким чином, запропонована структурна схема забезпечує інтеграцію підсистем моніторингу технічного стану, автоматичного контролю та керування електровідцентровим насосом, що дозволяє підвищити надійність роботи обладнання та ефективність процесу видобутку нафти.

2.2 Розроблення вузла частотно-регульованого електроприводу заглибного електродвигуна

Для реалізації функцій автоматичного контролю та управління електровідцентровим насосом доцільним є застосування сучасного частотно-

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

40

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

регульованого електроприводу, який забезпечує плавне регулювання швидкості обертання заглибного електродвигуна та підтримання оптимальних режимів роботи насосної установки.

Використання частотного регулювання дозволяє не лише підвищити енергоефективність системи, але й зменшити динамічні навантаження на механічні вузли, що позитивно впливає на їх довговічність.

Для побудови системи управління було використано частотний перетворювач Sinamics G120, вибір якого здійснено з урахуванням потужності заглибного електродвигуна та вимог до реалізації алгоритмів автоматичного керування.

Асинхронний електропривід керується блоком управління³ Control Unit CU240S DP, який взаємодіє із силовим модулем³ Sinamics G120 Power Module. Живлення силового модуля здійснюється від³ трифазної мережі через мережевий дросель.

Функціональна схема частотно-регульованого електроприводу наведена на рисунку 2.2.

Рисунок 2.2 – Функціональна схема частотно-регульованого електроприводу

2 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

41

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

Блок управління CU240S DP обмінюється інформацією з програмованим логічним контролером SIMATIC S7-300 через промислову мережу Profibus DP.

Така архітектура забезпечує інтеграцію електроприводу до загальної системи контролю та управління електровідцентровою насосною установкою.

Конфігурування частотного перетворювача виконується за допомогою персонального комп'ютера із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення Drive ES 5.4, STEP 7, SIZER та STARTER.

У процесі конфігурування здійснюється налаштування параметрів роботи електроприводу, обмін даними між контролером і модулем керування, а також формування алгоритмів автоматичного регулювання.

Блок керування забезпечує контроль і управління силовим модулем та заглибним електродвигуном у різних режимах експлуатації. Крім основних функцій керування частотою обертання електродвигуна, він реалізує функції автоматичного регулювання, захисту обладнання та підтримання заданих технологічних параметрів. Завдяки параметризації система може бути адаптована до конкретних умов експлуатації нафтової свердловини.

Модульна структура частотно-регульованого електроприводу забезпечує можливість його подальшого розширення та модернізації. Програмне середовище STARTER дозволяє виконувати конфігурування та діагностування обладнання, а також налаштовувати параметри роботи приводу відповідно до вимог технологічного процесу (рис. 2.3).

2 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

42

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

Рисунок 2.3 – Вікно конфігурації частотного електроприводу в програмному

Для забезпечення плавного пуску та зупинки установки, зменшення механічних навантажень і підвищення ресурсу роботи основних вузлів електроприводу були налаштовані параметри розгону та сповільнення. Час розгону та час гальмування встановлено рівними 2 с, що відповідає вимогам технологічного процесу запуску електровідцентрової насосної установки (рис. 2.4).

Рисунок 2.4 – Налаштування параметрів розгону та сповільнення електроприводу

2 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат
а
Арк.
43

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Для реалізації алгоритмів автоматичного контролю та управління електровідцентровим насосом розроблено структуру взаємодії програмованого логічного контролера та частотного електроприводу. Обмін інформацією між пристроями здійснюється через мережу Profibus DP, що забезпечує оперативну передачу даних про стан електроприводу та технологічні параметри установки (рис. 2.5–2.6).

Рисунок 2.5 – Підключення частотного електроприводу Sinamics G120

Рисунок 2.6 – Відображення комунікаційної мережі у підпрограмі NetPro

2 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат
а
Арк.
44

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

На рис. 2.7 наведено принципову електричну схему підключення заглибного електродвигуна до системи частотно-регульованого електроприводу.

Рисунок 2.7 – Принципова електрична схема підключення заглибного електродвигуна

Запропонований вузол частотно-регульованого електроприводу забезпечує реалізацію функцій автоматичного керування електровідцентровим насосом, а також створює технічну основу для використання результатів моніторингу технічного стану під час формування керуючих впливів.

2 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат
а
Арк.
45

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Це дозволяє адаптувати режими роботи насосної установки до поточних умов експлуатації та підвищити її надійність, енергоефективність і довговічність.

2.3 Моделювання системи контролю та управління електровідцентровим насосом у програмному середовищі Matlab Simulink

Для дослідження процесів функціонування системи контролю та управління електровідцентровим насосом, а також аналізу впливу зміни режимів роботи на параметри електроприводу було використано програмне середовище Matlab Simulink.

Це графічне середовище імітаційного моделювання, яке дозволяє за

допомогою блок-діаграм будувати математичні моделі динамічних систем, у тому числі дискретних, безперервних та гібридних, а також досліджувати їх поведінку в різних режимах експлуатації.

2.3.1 Імітаційна модель силового каналу системи контролю та управління електровідцентровим насосом

Силовий канал системи контролю та управління електровідцентровим насосом включає такі основні функціональні складові:

- частотний перетворювач;
- трифазний заглибний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором;
- механічну систему, яка моделює навантаження на вал електродвигуна.

На рис. 2.8 наведено структурну схему силового каналу системи контролю та управління.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

46

КРБ. ІСТ - 09.00.00.006 ПЗ

Рисунок 2.8 – Структурна схема силового каналу системи контролю та управління в нерухомій системі координат α, β

Модель заглибного електродвигуна реалізована на основі структурної схеми двофазного асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α, β .

Схема містить такі функціональні блоки:

- 1 – формувач фазної напруги, який виконує функції частотного перетворювача та забезпечує керування електродвигуном;
- 2 – модель двофазного асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α, β , яка імітує роботу заглибного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором;
- 3 – одномасова механічна система, що моделює навантаження на валу двигуна.

Вхідними величинами структурної схеми є фазні напруги статорних обмоток заглибного електродвигуна, які описуються такими виразами:

(2.1)

Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

47

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

На рис. 2.9 наведено імітаційну модель силового каналу електроприводу з нелінійно зростаючим навантаженням.

Рисунок 2.9 – Імітаційна модель силового каналу електроприводу з нелінійно зростаючим навантаженням

У програмному середовищі Matlab Simulink побудовано імітаційну модель силового каналу електроприводу. Для цього створено модель асинхронного електродвигуна (рис. 2.10), параметри якої визначаються на основі еквівалентних схем заміщення.

Рисунок 2.10 – Імітаційна модель заглибного електродвигуна в нерухомій системі координат

Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

48

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Еквівалентні індуктивності обмоток:

- статора

(2.2)

ГнL 067.1029.1038.01

- ротора

(2.3)

ГнL 081.1029.1052.02

Коефіцієнт розсіювання визначається за виразом (2.4):

21

2

1

LL

L

(2.4)

082.0

081.1067.1

029.1

1

2

еквівалентний опір - за формулою (2.5):

2

2

2

21

L

L

RRRэ

(2.5)

ОмRэ 589.7

081.1

029.1

949.3011.4

2

2

а електромагнітні постійні часу – за співвідношеннями (2.6) та (2.7):

э

э

R

L

T 1

(2.6)

сТ э 012,0

589,7

067,1082,0

2

2

2

R

L

T

(2.7)

сТ 247,0

949,3

081,1

2

На вхід моделі двигуна подаються фазні напруги статорних обмоток, позначені як 1 та 1 .

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Відповідні сигнали формуються блоком формування фазних напруг, модель якого наведена на рис. 2.11.

Рисунок 2.11 – Імітаційна модель формувача фазної напруги при номінальних параметрах мережі живлення

За допомогою m-файлу задаються основні параметри моделі, необхідні для проведення моделювання (рис. 2.12).

Рисунок 2.12 – Параметри m-файлу імітаційної моделі

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Для перевірки працездатності моделі виконано моделювання прямого пуску заглибного електродвигуна при номінальних параметрах мережі живлення та заданому навантаженні.

Результати моделювання наведені на рис. 2.13.

Рисунок 2.13 – Результати моделювання перехідних характеристик $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при прямому пуску під навантаженням

Аналіз отриманих перехідних характеристик свідчить про адекватність побудованої імітаційної моделі. Розрахункові параметри роботи заглибного електродвигуна узгоджуються з результатами математичного моделювання, що підтверджує можливість використання моделі для подальшого дослідження системи контролю та управління.

Для імітації роботи частотно-регульованого електроприводу до моделі введено можливість зміни параметрів вольт-частотної характеристики.

Підсистема блоку формування фазної напруги наведена на рис. 2.14.

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Рисунок 2.14 – Імітаційна модель формувача фазної напруги

На вхід формувача фазної напруги подається сигнал від задатчика інтенсивності, який реалізовано за допомогою блоку Lookup Table. Його налаштування здійснюється відповідно до параметрів розрахованої вольт-частотної характеристики.

Рисунок 2.15 – Задатчик інтенсивності з параметрами налаштування

За аналогічним принципом за допомогою блоку Lookup Table реалізовано модель навантаження електроприводу (рис. 2.16). Параметри навантаження визначаються на основі механічних характеристик заглибного електродвигуна при номінальному навантаженні.

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

На рис. 2.17 наведено результати моделювання перехідних процесів електроприводу при зміні режимів роботи системи контролю та управління електровідцентровим насосом.

Розглянутий цикл роботи включає пуск двигуна при частоті 5 Гц (зона I), розгін до частоти 25 Гц (зона II), вихід на номінальну частоту 50 Гц (зона III), перехід на мінімальну частоту (зона IV) та повну зупинку агрегату (зона V).

13 Рисунок 2.17 – Перехідні процеси $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при заданому циклі роботи електровідцентрового насоса

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

53

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Отримані результати моделювання підтверджують адекватність побудованої імітаційної моделі. Значення параметрів електроприводу, отримані в процесі моделювання, відповідають розрахунковим даним і можуть бути використані для дослідження алгоритмів автоматичного контролю та управління електровідцентровим насосом.

2.4 Реалізація алгоритму компенсації ковзання заглибного електродвигуна

Для забезпечення необхідної точності регулювання швидкості обертання заглибного електродвигуна в системі керування реалізовано алгоритм компенсації ковзання. Його застосування дозволяє зменшити похибку регулювання швидкості при зміні навантаження та підвищити якість функціонування системи контролю та управління електровідцентровим насосом.

Компенсація ковзання здійснюється шляхом автоматичного коригування частоти у каналі формування фазної напруги. Для налаштування модуля компенсації ковзання визначається передавальна функція системи:

1)(
)(
01
1

pT
k
II
f

pW
is
is
is ,

(2.8)

де T_{is} - постійна часу ланцюга зворотного зв'язку, що знаходиться з:

H
HH
is
H
HH
I
Sf
k
II
Sf
1
1
01

239.0319.0 isk

де T_{is} – постійна часу ланки зворотного зв'язку, яка знаходиться з

eіs TT 4 (2.10)

де T_e - еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора та ротора ЗЕД

с

sf

T

кн

е 023,0

138,0502

1

2

1

1

(2.11)

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

54

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

1092.0

074.0

1

)(

ppT

k

pW

is

is

is (2.12)

На вхід блоку з передавальною функцією (рис. 2.18) подається сигнал діючого значення струму статора I_d .

Рисунок 2.18 – Реалізація контуру компенсації ковзання

Вихідний сигнал надходить до блоку формування фазних напруг, де підсумовується із сигналом задатчика інтенсивності. У результаті цього відбувається автоматична корекція частоти живлення, що забезпечує підтримання швидкості обертання валу двигуна на заданому рівні. На рис. 2.19 показано зміну частоти живлення після застосування алгоритму компенсації ковзання.

Рисунок 2.19 – Графік зміни частоти після застосування компенсації ковзання

На рис. 2.20 наведено перехідні характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$, отримані із застосуванням контуру компенсації ковзання.

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

55

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

Рисунок 2.20 – Перехідні процеси $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ із застосуванням контуру компенсації ковзання

Результати моделювання показують, що використання алгоритму компенсації ковзання дозволило усунути похибку регулювання швидкості обертання валу заглибного електродвигуна при номінальному навантаженні. Пуск двигуна здійснюється при скоригованій частоті 5,3 Гц, розгін – при частоті 26,4 Гц, а вихід на номінальний режим відповідає частоті 52,8 Гц. Крім підвищення точності регулювання швидкості, застосування компенсації ковзання забезпечує збільшення перевантажувальної здатності електроприводу. При зміні навантаження відсутні значні кидки струму, а його максимальне значення не перевищує 38 А, що позитивно впливає на надійність роботи електровідцентрового насоса.

2.4.1 Реалізація алгоритму IR-компенсації

При роботі заглибного електродвигуна на частотах, нижчих за номінальну, величина створюваного електромагнітного моменту зменшується. Для підвищення критичного моменту та забезпечення

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

56

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

стабільної роботи електроприводу використовується алгоритм IR-компенсації.

Його принцип полягає у компенсації втрат напруги, які виникають внаслідок падіння напруги на активному та реактивному опорах статорної обмотки і особливо проявляються при роботі на малих частотах живлення. Для налаштування модуля IR-компенсації визначається відповідна передавальна функція:

1
)(
1
1

pT
k
I
U
pW
iR
iR
is

(2.13)

де значення коефіцієнта передачі ланцюга зворотного зв'язку

1)85.075.0(RkiR

(2.14)

41.3iRk

де TiR - постійна часу ланцюга зворотного зв'язку, що знаходиться з:

eiR

TT 4

(2.15)

де Te – еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора та ротора ЗЕД.

c

sf
T
кн
е 023,0
138,0502
1
2
1
1

(2.16)

1092.0

41.3

1

) (

ppT

k

pW

iR

iR

iR (2.17)

На рис. 2.21 наведено реалізацію контуру IR-компенсації.

Рисунок 2.21 – Реалізація модуля IR-компенсації

На вхід блоку з передавальною функцією подається сигнал діючого значення струму статора I_d , а вихідний сигнал надходить до блоку

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

57

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

формування фазних напруг, де підсумовується із сигналом напруги, сформованим частотним перетворювачем.

У результаті відбувається автоматична корекція величини напруги живлення. Для запобігання перенасиченню магнітної системи двигуна блок Saturation обмежує збільшення напруги на рівні 15 % від її номінального значення.

На рис. 2.22 наведено перехідні характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$, отримані із застосуванням IR-компенсації.

Рисунок 2.22 – Перехідні характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ із застосуванням IR-компенсації

Використання алгоритму IR-компенсації дозволило підвищити надійність роботи електроприводу, особливо при роботі на мінімальній частоті живлення 5 Гц. У результаті моделювання встановлено, що застосування компенсації забезпечує збільшення електромагнітного моменту приблизно на 10 % порівняно з режимом без компенсації.

При цьому автоматичне обмеження величини напруги на рівні 15 % від номінального значення запобігає перенасиченню магнітної системи електродвигуна та забезпечує стабільну роботу системи контролю та управління електровідцентровим насосом.

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

58

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ

2.5 Моделювання системи обмеження струму заглибного електродвигуна

Для забезпечення надійної роботи заглибного електродвигуна та захисту його від перевантажень у системі частотно-регульованого електроприводу передбачено застосування контуру обмеження струму.

Реалізація такого контуру дозволяє автоматично підтримувати допустимий рівень струму статора при виникненні перевантажень та запобігати аварійним режимам роботи насосної установки.

Структурну схему контуру обмеження струму наведено на рис. 2.23.

Рисунок 2.23 – Структурна схема контуру обмеження струму

Передавальна функція ПІ-регулятора обмеження струму визначається виразом [7]:

pT
pT
kpW
PT
PT
PT

1
) (2.18)

Постійна часу регулятора струму визначається за співвідношенням:
сТТ ЕРТ 0221.01 (2.19)

Коефіцієнт підсилення регулятора струму обчислюється за відповідними виразами:

ТЕТТІ
ЕЕ
РТ
Takk
RT
k

11
(2.20)

3103.027071.0124.7
58.7023.0

PTk

1
Зм. Арк. No докум. Підп. Дат
а
Арк.
59

КРБ. ІСТ - 09.00.00.000 ПЗ
де k - коефіцієнт передачі по каналу частоти
ГцА
Rf
U
k
ЕН
Н
I /124.7
58.750
2700
11
1

(2.21)

КТ - коефіцієнт зворотного зв'язку по струму:
AKI /17071.0

2
1

(2.22)

αT - коефіцієнт типового налагодження контуру струму на модульний оптимум (МО);
T_е - еквівалентна постійна часу оптимізованого контуру струму.

сТ

n
T
T I3Y
T
ТОС
TE 0003,00002,0
2
0002,0

.
. , (2.23)

де Тост = Тшим $\cdot 10^{-13}$ 0,0002с – інтервал квантування сигналів у ланцюзі зворотного зв'язку контуру струму;
пт – коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнення аперіодичною ланкою (при налаштуванні контуру струму на МО);
Тзу.и = Тшим $\cdot 10^{-13}$ 0,0002 с – інтервал часу затримки подачі управління регулятора струму до ключів інвертора.

На рис. 2.24 наведено імітаційну модель регулятора обмеження струму.

Рисунок 2.24 – Імітаційна модель регулятора обмеження струму

На рис. 2.25 представлені графіки перехідних процесів $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$, отримані із застосуванням контуру обмеження струму та моменту.

1 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

60

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

Рисунок 2.25 – Перехідні характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ із застосуванням контуру обмеження струму

Повна імітаційна модель частотно-регульованого електроприводу, реалізована у програмному середовищі Matlab Simulink, наведена на рис. 2.26.

Рисунок 2.26 – Імітаційна модель частотно-регульованого електроприводу електровідцентрового насосного агрегату в середовищі Matlab Simulink

1 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

61

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

Результати моделювання підтверджують коректність роботи системи обмеження струму. У момент виникнення перевантаження (близько 11,5 с) система автоматично впливає на канал формування фазної напруги, що приводить до зменшення електромагнітного моменту та швидкості обертання заглибного електродвигуна.

Подальша робота електроприводу здійснюється із підтриманням допустимого значення струму, що забезпечує захист двигуна від перевантажень і підвищує надійність роботи електровідцентрового насоса.

2.6 Порівняння енергетичних показників частотно-регульованого електроприводу електровідцентрового насоса

Однією з важливих переваг застосування частотно-регульованого електроприводу є можливість підвищення енергоефективності роботи насосної установки.

Для оцінювання ефективності запропонованої системи проведено порівняння енергетичних показників електроприводу, реалізованого за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ–АД), із традиційною схемою прямого пуску заглибного електродвигуна без регулювання швидкості.

У традиційних системах видобутку нафти регулювання подачі насоса часто здійснюється методом дроселювання, тобто зміною гідравлічного опору за допомогою регулювальної засувки без зміни швидкості обертання електродвигуна.

На рис. 2.27 наведено залежності подачі насоса при регулюванні методом дроселювання та шляхом зміни частоти обертання електродвигуна.

1 Зм. Арк. Но докум. Підп. Дат

а

Арк.

62

Рисунок 2.27 – Залежності подачі насоса при регулюванні:
а – методом дроселювання; б – шляхом зміни частоти обертання електродвигуна

Метод дроселювання є простим у реалізації, проте характеризується низькою енергетичною ефективністю, оскільки електродвигун працює практично у номінальному режимі незалежно від необхідної продуктивності насоса.

Натомість використання частотно-регульованого електроприводу дозволяє змінювати швидкість обертання електродвигуна відповідно до необхідної подачі, що забезпечує суттєве зменшення споживання електроенергії.

Припустимо, що необхідно зменшити подачу насоса на 20 %. У випадку використання дроселювання електродвигун працює при номінальних параметрах мережі живлення.

Повна потужність, що споживається електродвигуном, визначається за виразом [14]:

$$S = 3 UI \quad (2.15)$$

де (U) – фазна напруга; (I) – споживаний струм.

При регулюванні методом дроселювання повна потужність становить:

$$S = 3217838 = 235 \text{кВА} \quad (2.16)$$

Для забезпечення 80 % від номінальної подачі при використанні частотно-регульованого електроприводу достатньо знизити швидкість

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а
Арк.
63

обертання двигуна до $\omega = 249 \text{ рад/с}$, що відповідає частоті живлення $f = 40 \text{ Гц}$.

У цьому випадку споживана повна потужність становить:

$$S_{пч} = 3145030,65 = 133 \text{кВА} \quad (2.17)$$

На рис. 2.28 і 2.29 наведено результати моделювання перехідних процесів при регулюванні продуктивності насоса методом дроселювання та за допомогою частотно-регульованого електроприводу відповідно.

Рисунок 2.28 – Перехідні процеси $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при регулюванні подачі методом дроселювання

На рис. 2.29 наведено перехідні характеристики частотно-регульованого електроприводу електровідцентрового насоса. Роботі установки при обмеженні подачі до 80 % від номінального значення відповідає зона IV.

1 Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а
Арк.
64

Рисунок 2.29 – Перехідні процеси $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при регулюванні подачі за допомогою перетворювача частоти

Результати моделювання свідчать, що застосування частотно-регульованого електроприводу забезпечує необхідну продуктивність електровідцентрового насоса при частоті живлення 40 Гц та характеризується значно вищою енергетичною ефективністю порівняно з традиційним способом регулювання методом дроселювання.

При цьому споживана потужність зменшується приблизно на 40 %, а також знижуються динамічні навантаження на електродвигун і механічні вузли насосної установки.

Таким чином, використання частотно-регульованого електроприводу у складі системи контролю та управління електровідцентровим насосом дозволяє не лише забезпечити необхідні технологічні режими роботи, але й істотно підвищити енергоефективність, надійність та довговічність

¹ обладнання.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

65

КРБ. ICT - 09.00.00.000-ПЗ¹

ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської роботи проведено аналіз

особливостей технологічного процесу видобутку нафти з використанням установок електровідцентрових насосів та сучасних підходів до побудови систем їх контролю й управління.

За результатами виконаного дослідження отримано такі результати:

- розглянуто конструкцію та принцип роботи установки електровідцентрового насоса, проаналізовано особливості її функціонування та визначено основні технологічні параметри, що впливають на ефективність процесу видобутку нафти;
- досліджено вплив ускладнюючих факторів на технічний стан і надійність роботи УЕВН. Встановлено, що одним із найбільш інформативних параметрів для оцінювання технічного стану насосного обладнання є рівень вібрації, який може бути використаний як діагностична ознака розвитку дефектів та як інформаційний параметр системи автоматичного контролю й управління;
- проаналізовано сучасні методи та засоби моніторингу технічного стану електровідцентрових насосів, а також сучасні програмно-технічні комплекси управління нафтовидобувними свердловинами механізованого фонду. Показано доцільність інтеграції підсистем моніторингу технічного стану із системами автоматичного керування;
- розроблено структурну схему системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану. Запропонована система передбачає використання даних системи загальної телеметрії для формування керуючих впливів та автоматичного коригування режимів роботи насосної установки;
- розроблено вузол частотно-регульованого електроприводу на базі перетворювача частоти Sinamics G120, який керується модулем Control Unit

² Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

66

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

CU240S DP та взаємодіє із силовим модулем Sinamics G120 Power Module.

Система управління електроприводом реалізована із застосуванням програмованого логічного контролера SIMATIC S7-300 та спеціалізованого програмного забезпечення Drive ES 5.4, STEP 7 і SIZER;

- розроблено імітаційну модель частотно-регульованого електроприводу електровідцентрового насоса в програмному середовищі Matlab Simulink та проведено дослідження її основних режимів роботи. Результати моделювання підтвердили працездатність запропонованих технічних рішень і показали, що застосування частотно-регульованого електроприводу дозволяє знизити споживання електроенергії приблизно на 40 % порівняно з традиційною схемою прямого пуску електродвигуна. Отримані результати підтверджують доцільність використання систем моніторингу технічного стану у поєднанні із сучасними засобами автоматичного контролю та частотно-регульованого управління для підвищення надійності, енергоефективності та безаварійності експлуатації електровідцентрових насосів у процесі видобутку нафти.

² Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

КРБ. ICT - 09.00.00.006 ПЗ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Заміховський Л. М., Заміховська О. Л. Підвищення довговічності робочих органів електровідцентрових насосів для видобутку нафти: монографія. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. 164 с. ISBN 978-966-694-222-0.
2. Федорович Я. Т. Машини та обладнання для видобутку нафти і газу: навчальний посібник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. 344 с.
3. Федорович Я. Т., Джус А. П. Машини та обладнання для видобутку нафти і газу: практикум. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. 124 с.
4. Заміховський Л. М., Калявін В. П. Технічна діагностика заглибних електроустановок для видобутку нафти: монографія. Снятин: Прут-Принт, 1999. 224 с.
5. Korovin Y. S. Methods and tools for operational diagnostics of electrical submersible pumps based on neural networks. Abstract of Ph.D. dissertation. Taganrog, 2009.
6. Yamaliev V. U., Shubin S. S., Salakhov T. R. Analysis of the technical condition of electrical submersible pumps using artificial neural networks. Problems of Geology and Subsurface Development. Ufa State Petroleum Technological University, 2011. P. 405–407.
7. Method for diagnostics of an electrical submersible centrifugal pump. URL: http://www.ntpo.com/patents_pumps/patents_pumps/pumps_988.shtml (дата звернення: 15.06.2026).
8. Абдулін Ф. С. Видобуток нафти і газу : навчальний посібник. Київ : Техніка, 2001. 256 с.
9. Ivanovsky V. N., Darishchev V. I., Sabirov A. A. et al. Well Pumping Units for Oil Production. Moscow : Oil and Gas Publishing House, 2002. 824 p.
10. Kitabov A. N. Detection of Submersible Motor Faults by Vibration Parameters. Proceedings of Mavlyutov Readings. Ufa, 2010. Vol. 2. P. 107–108.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дат

а

Арк.

68

КРБ. ICT - 09.00.00.000 ПЗ

11. Mataev N. N. Improving the Efficiency of Electrical Submersible Pump Installations in Oil and Gas Production Enterprises. Ph.D. Thesis. Omsk, 2004. 178 p.
12. Kudryavtsev A. V., Engalychev I. R., Kitabov A. N. Increasing the Informative Value of Vibration Measurements Using Downhole Telemetry Systems. Oilfield Engineering. 2011. No. 3. P. 4–13.
13. ARTLIFTCONTROLTM Intelligent Technology for Integrated Monitoring and Adaptive Control of Mechanized Well Stock. Cross Automation Group. URL: <https://crossgroup.ru> (дата звернення: 15.06.2026).
14. REDA Electric Submersible Pump Systems Catalog. SLB (Schlumberger). URL: <https://www.slb.com/products-and-services/artificial-lift/electric-submersible-pumps> (дата звернення: 15.06.2026).
15. Catalog of Submersible Electric Motors. Rimera Group. URL: <https://www.rimera.com> (дата звернення: 15.06.2026).
16. Siemens. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller. System Manual. URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 15.06.2026).
17. Siemens. WinCC (TIA Portal) V15 GMP Engineering Manual. Configuration Manual. URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 15.06.2026).
18. Qbal A., Moïnoddin S., Reddy B. P. Electrical Machine Fundamentals with Numerical Simulation using MATLAB/Simulink. John Wiley & Sons, 2021. 496 p. ISBN 9781119682660.
19. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2011. 704 p. ISBN 9780073529547.
20. Mohan N. Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink. Minneapolis : MNPERE, 2014. 1024 p. ISBN 9780971529250.

Тема бакалаврської роботи: «Розроблення системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану».

Обсяг пояснювальної записки: 69 сторінок, 39 рисунків, ² **список використаних джерел із 20 найменувань. Перелік креслень графічної частини – КРБ. ІСТ - 09.00.00.001** – Установка заглибного електровідцентрового насоса. Загальний вигляд (1 арк.);
– КРБ. ІСТ - 09.00.00.002 – Узагальнена структура функціонування установки електровідцентрового насоса (1 арк.);
– КРБ. ІСТ - 09.00.00.003 – Структурна схема системи контролю та управління електровідцентровими насосами на основі моніторингу їх технічного стану (1 арк.);
– КРБ. ІСТ - 09.00.00.004 – Функціональна схема частотно-регульованого електроприводу (1 арк.);
– КРБ. ІСТ - 09.00.00.005 Е1 – Принципова електрична схема підключення заглибного електродвигуна (1 арк.);
– КРБ. ІСТ - 09.00.00.006 – Імітаційна модель частотно-регульованого електроприводу електровідцентрового насосного агрегату в середовищі Matlab Simulink (1 арк.);
– КРБ. ІСТ - 09.00.00.007 – Перехідні процеси $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при регулюванні роботи електровідцентрового насоса за допомогою перетворювача частоти ² (1 арк.).

Дата закінчення бакалаврської роботи: 16 червня 2026 року.

Студент-бакалавр _____ Дрогомирецький Я.І.