

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

**Андрейшин Андрій Сергійович**



УДК 622.24:004.384(043.5)

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ  
НАФТОВИДОБУВНОЇ УСТАНОВКИ  
НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор  
**Маляр Андрій Васильович**,  
професор кафедри електромехатроніки і  
комп’ютеризованих електромеханічних систем  
Національного університету “Львівська політехніка”

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Садовой Олександр Валентинович**,  
професор кафедри електротехніки та електромеханіки  
Дніпровського державного технічного університету;

кандидат технічних наук, доцент  
**Борин Василь Степанович**,  
доцент кафедри автоматизації та комп’ютерно-  
інтегрованих технологій Івано-Франківського  
національного технічного університету нафти і газу;

Захист відбудеться “ 25 ” вересня 2020 р. о “ 10 ” год. “ 00 ” хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д **35.052.02** в Національному університеті “Львівська політехніка” ( 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 114 ).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “ 21 ” серпня 2020 р.

*Вчений секретар спеціалізованої*

*вченої ради*



**Коруд В. І.**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Переважна частина нафтових родовищ в Україні і в світі видобувається за допомогою штангових нафтовидобувних установок (ШНВУ), які розосереджені на великій площі родовища. Керування їх роботою потребує впровадження постійно діючого моніторингу стану кожної свердловини та її обладнання, що, в свою чергу, пов'язано з отриманням й обробкою великого обсягу вимірювальної інформації. Отже, для підвищення ефективності процесу видобування нафти потрібна модернізація систем електроприводів ШНВУ на основі оптимізації режимів їх роботи та застосування інноваційних технологій.

Основною тенденцією на теперішній час є впровадження, так званих, “технологій інтелектуальних свердловин” – “intelligent well technology” (IWT). Цей процес потребує проведення значного обсягу наукових досліджень, пов'язаних з експлуатацією свердловини і електротехнічного обладнання. Основною метою створення таких свердловин є автоматичне керування процесом видобування нафти у реальному часі.

Під час синтезу сучасних електромеханічних систем ШНВУ важливим є створення адаптивних алгоритмів керування, які базуються на адекватних математичних моделях як об'єкту керування, так і процесів, що відбуваються в усій системі. Для цього необхідно мати математичні моделі, які придатні для аналізу роботи ШНВУ в різних експлуатаційних режимах. Такі моделі в поєднанні з сучасними обчислювальними методами повинні лягти в основу програмного забезпечення для аналізу та діагностики електромеханічних систем ШНВУ. Окрім того, для успішної реалізації оптимального керування важливим є вибір апаратно-програмного забезпечення, до якого ставляться щораз жорсткіші вимоги, з метою ефективного використання наявних ресурсів. Сказане зумовлює потребу у проведенні досліджень в напрямку сучасних методів керування електроприводами, діагностики та ідентифікації стану нафтових свердловин.

**Актуальність теми.** Особливості видобування нафти штанговими глибинопомповими установками, а саме – відносна складність та висока вартість обладнання й значні витрати електроенергії на одиницю видобутої нафти, особливо з малодебітних свердловин, трудомісткість ремонтів підземної частини обладнання зумовлюють підвищені вимоги до оперативного контролю його стану та функцій керування електроприводом ШНВУ. Це потребує подальшого розвитку та вдосконалення методів дослідження електроприводів ШНВУ. Відомі системи автоматичного керування швидко старіють, відстають від потреб практики і не задовольняють сучасним вимогам щодо ефективної експлуатації свердловин та надійності захисту обладнання та його діагностики. На теперішній час основний акцент робиться на використанні частотно-керованого електроприводу для регулювання продуктивності глибинної помпи. Не завжди такі системи керування є оптимальними для конкретних умов видобування. Тому розроблення сучасних методів діагностики та систем керування ШНВУ, які б забезпечували безперервний автоматичний контроль та раціональну експлуатацію свердловин на базі мікропроцесорних засобів та сучасних досягнень в теорії автоматизованого керування і електроприводу, є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт Національного університету “Львівська політехніка”, тематика яких відповідає координаційним цільовим та галузевим програмам:

– пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки Міносвіти і науки України “Енергетика та енергоефективність” (2010 р.);

– тематичного напрямку наукових досліджень і науково-технічних розробок Львівської політехніки “Оптимальне керування електротехнічними і електромеханічними системами та технологічними процесами за критеріями енергоощадності, електротехнологічної ефективності і електромагнітної сумісності”.

Тема дисертаційної роботи відповідає тематиці наукових робіт кафедри електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем Інституту енергетики і систем керування Національного університету “Львівська політехніка”, де протягом багатьох років ведуться роботи за науковим напрямком “Автоматизація механізованого видобування нафти”.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є вдосконалення існуючих і розроблення нових ефективних способів діагностики стану ШНВУ та синтез на їх основі алгоритмів керування, в яких враховуються всі важливі чинники, що впливають на роботу обладнання свердловини, і на основі яких будуть створені системи комп'ютерної діагностики та керування роботою електроприводів штангових нафтовидобувних установок.

Для досягнення поставленої мети розв'язано наступні завдання:

- проаналізовано існуючі системи керування електроприводами штангових нафтовидобувних установок та технічні засоби їх реалізації;
- розроблено схему системи керування штанговою глибинною помпою на основі нейронної мережі;
- розроблено алгоритм перетворення вхідних даних від давачів первинної інформації в зображення;
- розроблено алгоритм роботи системи розпізнавання образів на основі нейромережі;
- створено базу даних для зберігання еталонних зображень динамограм;
- створено математичну модель електромеханічної системи глибинопомпової установки з нейромережевою системою керування;
- проведено методом комп'ютерного симулювання широкий спектр досліджень по перевірці та аналізу запропонованих теоретичних положень;
- розроблено програмно-апаратний комплекс для здійснення керування роботою нафтовидобувної установки;
- виконано експериментальні дослідження з метою перевірки працездатності розроблених способів та алгоритмів керування роботою ШНВУ.

**Об'єктом дослідження** є процеси в електромеханічних системах штангових нафтовидобувних глибинопомпових установок.

**Предметом дослідження** є методи діагностики стану свердловини й оптимізації режимів роботи нафтовидобувних установок та синтезу систем керування

електроприводами ШНВУ на основі сучасних досягнень в сфері теорії керування, штучних нейронних мереж, електромеханіки та комп'ютерної техніки.

*Методи дослідження.* У роботі для аналізу механічної частини ШНВУ, зокрема верстата-гойдалки, використано методи теоретичної механіки та аналітичної геометрії. В основу розроблених математичних моделей електромеханічної системи ШНВУ покладено методи теорії автоматичного керування, теоретичної електротехніки, електричних машин, теорії штучних нейронних мереж, теорії ймовірності та математичної статистики, теорії розпізнавання образів. Розроблені програми визначення та розрахунку коефіцієнта заповнення глибинної помпи в динамічних режимах базуються на сучасних досягненнях у сфері алгоритмізації та комп'ютерного моделювання.

#### ***Наукова новизна одержаних результатів.***

- Вперше запропоновано метод оперативної діагностики стану глибинопомпової установки на основі рекурентної нейронної мережі, що дало змогу контролювати її поточний стан, і тим самим забезпечити ефективну експлуатацію ШНВУ.

- Отримала подальший розвиток теорія штучних нейронних мереж в контексті створення вхідного фільтра для різних типів нейронних мереж, що дало змогу уніфікувати задачу розпізнавання стану наземного та підземного обладнання свердловини та спроектувати систему автоматичного керування ШНВУ, яка забезпечує раціональний режим нафтовидобування при неповному або зашумленому наборі вхідних даних.

- Удосконалено спосіб оброблення масиву даних, отриманих від давачів, шляхом використання двійкового кодування, у результаті чого створено єдиний підхід щодо діагностування стану свердловини незалежно від масштабу знятої первинної інформації.

- Отримала подальший розвиток теорія предиктивного керування щодо розроблення алгоритмів прогнозування в реальному часі динаміки процесу видобування нафти із малодобітної свердловини, що дало змогу формувати керуючі впливи на систему електроприводу для забезпечення неперервної роботи ШНВУ.

#### ***Практичне значення одержаних результатів.***

Результати теоретичних досліджень, які покладені в основу розроблених алгоритмів й комп'ютерних програм, послужили основою для створення нових та модернізації існуючих систем автоматичного керування ШНВУ. Розроблене програмне забезпечення та запропоновані схемотехнічні рішення можуть бути безпосередньо використані для здійснення ефективного оперативного керування роботою ШНВУ в конкретних умовах експлуатації нафтових родовищ. Розроблена система керування на основі нейронної мережі дає змогу оперативно визначати поточний стан свердловини та її обладнання, що підвищує ефективність процесу нафтовидобування та запобігає виникненню аварійних ситуацій.

Матеріали роботи використані при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України, у яких автор був співвиконавцем:

- "Оптимальне багатокритеріальне керування динамічними процесами технологічних об'єктів на основі теорії нечітких множин", 2011–2013р.р., (ДР № 0111u001230);

– “Підвищення енергоефективності систем житлово-комунального господарства”, 2012–2013р.р., (ДР № 0113u003180).

Результати досліджень пройшли апробацію в НГВУ “Долианафтогаз” та використовуються в навчальному процесі Національного університету “Львівська політехніка” під час курсового проектування та виконання магістерських кваліфікаційних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** До дисертаційної роботи увійшли теоретичні положення, методи й алгоритми, отримані автором особисто. В опублікованих у співавторстві наукових працях автору дисертації належить:

в [1] – синтез нечіткого регулятора та його інтеграція в систему керування електроприводом ШНВУ; в [4, 5, 16, 18, 19] – розробка математичної моделі штангової глибинопомпової установки та електроприводу верстата-гойдалки; в [2, 3, 7, 10] – створення алгоритму розпізнавання образів динамограм та струмограм за допомогою нейронної мережі; в [6, 9] – перевірка ефективних методів розпізнавання образів за допомогою нейронних мереж та їх тестування; в [8, 11, 12, 13, 15] – результати досліджень методами математичного моделювання та фізичного експерименту процесів і характеристик системи керування електроприводом ШНВУ; в [14, 17] – розроблення експериментальної установки для проведення досліджень роботи системи керування електроприводом штангових глибинопомпових установок.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та отримали позитивний відгук на: II Міжнародній конференції молодих вчених “Енергетика та системи керування 2010” (EPECS-2010); Міжнародних науково-технічних конференціях “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”, Харків, 2010 р., 2012 р., 2013 р.; XVIII Міжнародній конференції з автоматичного управління “Автоматика - 2011”, Львів, 2011 р.; XII Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми сучасної електротехніки”, ПСЕ-2012, Вінниця; Міжнародній конференції “Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика” (ICPEES-2013); семінарі НАН України з комплексної проблеми “Наукові основи електроенергетики”: “Моделі та методи комп’ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем”; науково-технічних конференціях Національного університету “Львівська політехніка” і наукових семінарах кафедри “Електромехатроніка і комп’ютеризовані електромеханічні системи”, Львів.

**Публікації.** Основні положення дисертації відображені в 19 публікаціях, у тому числі: 17 статей у наукових фахових виданнях України, з них 7 таких, що входять до наукометричних баз даних (Scopus, Web of Science Core Collection, Index Copernicus); 2 – у матеріалах конференцій та семінарів.

**Структура й обсяг дисертації:** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 175 найменувань, 2 додатків, що підтверджують впровадження результатів роботи. Загальний обсяг роботи – 187 сторінок, у тому числі 166 сторінок основного тексту, 78 рисунків і 11 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано необхідність проведення досліджень, сформульовано мету та основні задачі роботи, дана загальна її характеристика.

У *першому розділі* розглянуто основні проблеми, що виникають під час експлуатації малодобітних свердловин, проаналізовано існуючі системи керування нафтовидобувними установками та способи розпізнавання й обробки вхідних даних, зроблено огляд літератури за темою дисертації та обґрунтовано вибір напрямку досліджень.

Зроблений в дисертації аналіз літературних джерел свідчить, що на теперішній час існує багато готових рішень, які дають змогу діагностувати роботу ШНВУ та встановлювати відповідний режим її роботи. Однак, серед наявних рішень відсутні автоматизовані системи керування процесом нафтовидобування на основі "інтелектуальних свердловин", які можуть забезпечити автоматичне керування нафтовидобувними установками в реальному часі.

Одним із основних завдань під час розроблення системи керування є ідентифікація стану глибинопомпового обладнання. Здійснивши аналіз існуючих способів ідентифікації в роботі показано, що найбільш придатним для розпізнавання стану свердловини та її обладнання є використання нейронних мереж. У порівнянні з класичними підходами це дає змогу більш ефективно реалізувати адаптивне керування. Отже, розвиток і вдосконалення методів діагностики і контролю стану нафтовидобувного обладнання, з метою підвищення його ефективності та надійності, потребує нових теоретичних досліджень та практичних рішень, придатних для реалізації в інтелектуальних системах.

У *другому розділі* на основі аналізу мікропроцесорних засобів та сучасних досягнень в теорії автоматичного керування запропоновано систему керування нафтовидобувною установкою (рис.1). Запропонована система у якості первинної інформації використовує зняті давачами значення зусилля в полірованому штоці ( $P$ ) або струму привідного двигуна за один оберт кривошипа.



Рис.1. Структурна схема системи керування ШНВУ з нейромережею.

Система призначена для плавного регулювання продуктивності помпи у функції коефіцієнта заповнення. Сам коефіцієнт заповнення визначається штучною нейронною мережею на основі знятої динамограми або струмограми. Структурна

схема складається з електромеханічної та “інтелектуальної” частини. Електромеханічна частина схеми містить верстат-гойдалку, асинхронний двигун, перетворювач частоти та регулятор. “Інтелектуальна” частини схеми реалізована на мікроконтролері, який на основі зібраних даних визначає коефіцієнт заповнення помпи і, відповідно, задає швидкість обертання двигуна.

Паралельно до обробки даних формується база даних з типовими динамограмами (струмограмами) та відповідними їм коефіцієнтами заповнення помпи. Їх можна отримати двома способами, які передбачено в алгоритмі – експериментально або використовуючи створену математичну модель ШНВУ. Далі вхідні дані опрацьовує нейронна мережа і вибирає з бази найбільш подібну до вхідної типу динамограму (струмограму) та відповідний їй коефіцієнт заповнення. На основі здійсненого вибору задається певна частота обертання привідного двигуна верстата-гойдалки і, відповідно, продуктивність глибинної помпи.

Під час проектування запропонованої автоматизованої системи однією з головних задач є вибір способу перетворення вхідних даних від давачів в зображення. Проаналізувавши існуючі способи оцифрування динамограми вибрано двійкову систему числення у вигляді матриці одиниць і нулів. Такий підхід підвищує універсальність системи розпізнавання, що дає можливість використовувати її в різних системах керування, де вхідними даними можуть бути динамограми, струмограми або ватметрограми. Для цього в середовищі MATLAB створено програму, яка перетворює в бінарну форму зняту динамограму. Це дає змогу створити базу даних з великою кількістю динамограм при обмежених ресурсах. На рис.2 наведено результат оцифрування знятої динамограми. Обробка струмограм відбувається аналогічним чином.

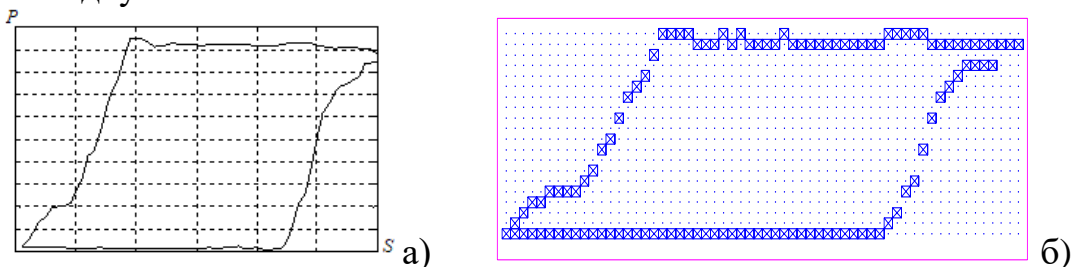


Рис. 2. Типова динамограма знята з ШНВУ (а) та її матричне представлення (б)

Для вибору типу нейронної мережі в дисертаційній роботі здійснено аналіз існуючих нейромереж. З метою визначення оптимальної структури нейромережі проведено ряд математичних експериментів з реально знятими залежностями зусилля в полірованому штоці та струму привідного двигуна діючих нафтовидобувних установок Бориславського НГВУ. Завданням мережі був розрахунок коефіцієнта приналежності вхідної динамограми до одної з типових. Для прикладу на рис.3а показана оцифрована зашумлена динамограма, яка подається на вхід нейронної мережі. У результаті роботи мережі отримуємо гістограму (рис.3б), де показано рівень приналежності вхідного зображення до одного з типових. На рис.3в виведено типову динамограму, яка відповідає вхідній. З рис. 3 видно, що найбільше значення коефіцієнта приналежності має динамограма, яка є в базі даних за номером 2. Це саме той тип динамограми, що подавався на вхід мережі, а тому можна зробити висновок, що мережа коректно розпізнала вхідний сигнал.



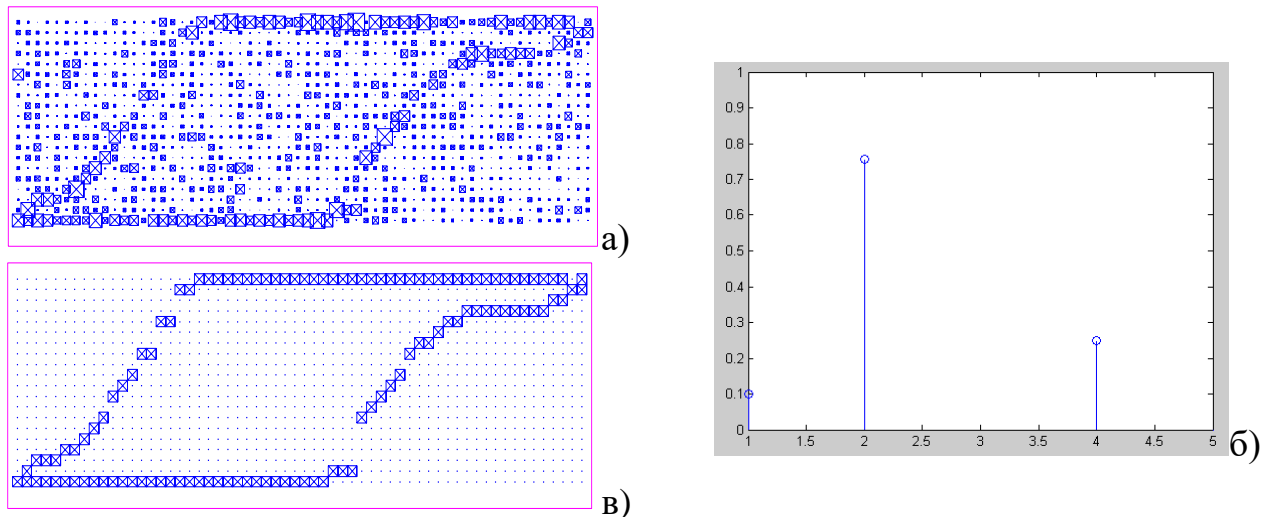


Рис.3. Результати розпізнавання вхідної зашумленої динамограми нейромережею прямого поширення.

У результаті проведених досліджень виявлено, що нейромережі прямого поширення можуть застосовуватись для випадків, де їх вихід не залежить від історії входів. Для оброблення більш складних динамічних вхідних сигналів використовують рекурентні мережі, оскільки вони містять зворотні зв'язки, що модифікують нейрони та призводить до зміни стану мережі. В роботі для тестування працездатності вибрано двошарову модифікацію мережі Хопфілда – нейронну мережу Хемінга (рис.4). Запропонована нейронна мережа має два шари.

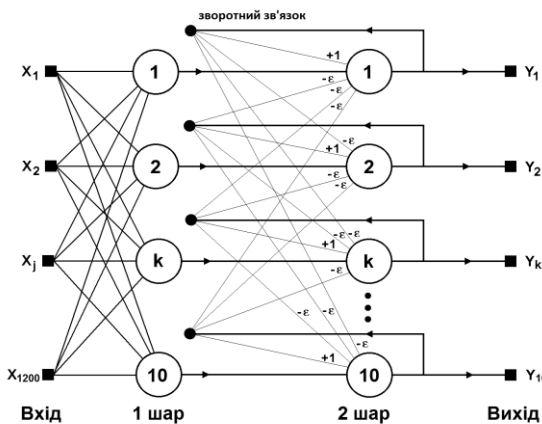


Рис.4. Структура нейронної мережі Хемінга.

Хемінга на алгоритм побітового порівняння масивів. В його основі закладений швидкий пошук елементів по базі даних, що дає змогу за декілька ітерацій видати результат. Така модифікація значно пришвидшила роботу нейронної мережі та збільшила точність розпізнавання вхідного сигналу, що у свою чергу спрощує програмну частину системи керування.

Далі перетворені значення подаються на другий шар. Другий шар – шар Хопфілда має 10 нейронів із зворотними зв'язками. Зв'язки побудовані за принципом “кожний з кожним”. Тип активаційної функції – порогова (*sign*). Якщо виходи другого шару збігаються з його входами, то алгоритм завершується, якщо ні,

то повертається знову до входів другого шару. На рис.4 показано створений алгоритм роботи системи розпізнавання образів на базі нейромережі Хемінга.

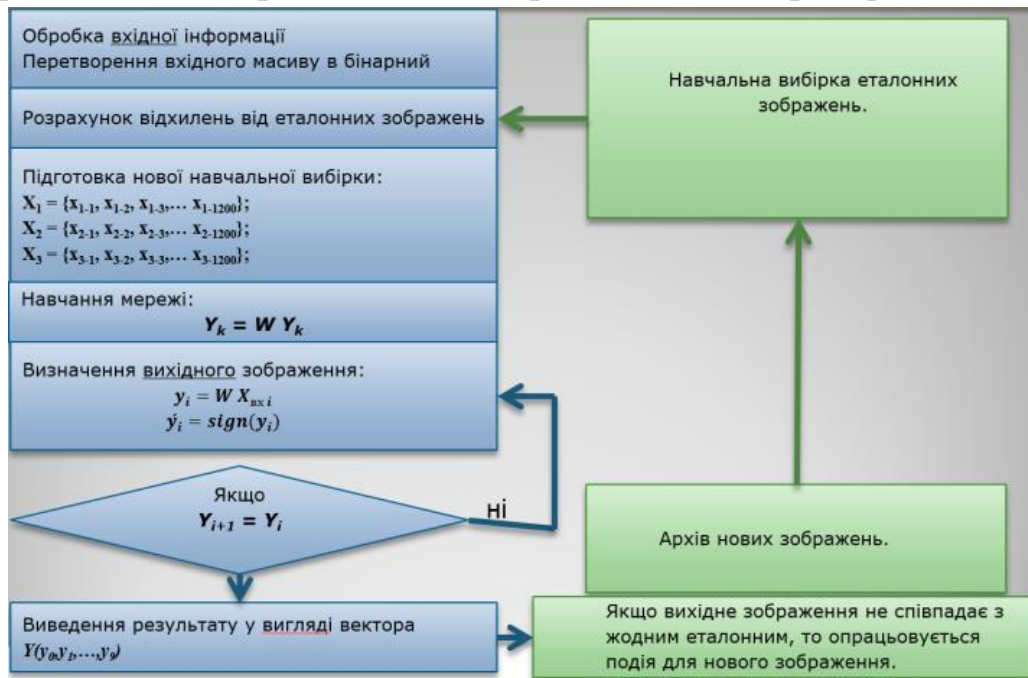


Рис.4. Алгоритм роботи системи розпізнавання образів.

Для розпізнавання нейромережею вхідного сигналу підготовлено навчальну вибірку, що містить 10 зображень, які відповідають значенням коефіцієнта заповнення помпи від 0,5 до 1 з кроком 0,05. Після порівняння вхідного вектора зі всіма еталонними отримуємо вектор з 10-ма елементами. З цих десяти значень вибираються три з найменшими відстанями Хемінга та три еталонних зображення, які відповідають цим відібраним векторам. Це і є навчальна вибірка для наступного шару мережі (мережа Хопфілда).

$$X_1 = \{x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, \dots, x_{1\ 1200}\}; \quad X_2 = \{x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, \dots, x_{2\ 1200}\}; \\ X_3 = \{x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}, \dots, x_{3\ 1200}\}. \quad (1)$$

В другому шарі, згідно з правилами навчання мережі Хопфілда, навчальний вектор перемножується на цей же транспонований. Таким чином, отримуємо три квадратні матриці (2). Ці матриці додаються, а діагональ результуючої матриці  $\mathbf{W}$  замінюється нулями для більшої стійкості мережі  $\mathbf{W}_{ij} = 0$ , для  $i=j$ .

$$\mathbf{W}_1 = X_1 \times X_1^T; \quad \mathbf{W}_2 = X_2 \times X_2^T; \quad \mathbf{W}_3 = X_3 \times X_3^T; \quad \mathbf{W} = \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2 + \mathbf{W}_3. \quad (2)$$

Результуюча матриця  $\mathbf{W}$  (рис.4) множиться на транспонований вектор вхідного зображення  $X_i$  ( $i = 1,2,3$ ). У результаті отримуємо вектор  $\hat{y}$ , який обробляємо за допомогою функції активації  $sign$ . Отриманий вектор  $Y_{i+1}$  порівнюємо з вектором з попередньої ітерації  $Y_i$  (якщо ітерація перша, то порівнюємо з вхідним вектором). Якщо вектори відрізняються, то повертаємося на попередній крок, вибравши інший вектор  $X_i$ . Інакше, порівнюємо отриманий вектор з еталонними і вибираємо відповідний. Якщо немає жодного відповідного вектора, то створюється новий зразок, який за допомогою оператора додається в базу існуючих еталонів.

Для оперативного та одночасного керування роботою багатьох свердловин родовища в дисертаційній роботі створена база даних, в яку записуються дані всіх свердловин, і до якої має доступ контролер кожної свердловини. Такий підхід

значно спрощує процес керування в реальному часі групою нафтовидобувних установок, оскільки дані розпізнавання стану однієї свердловини можуть бути використані для керування іншими (подібними) свердловинами.

У третьому розділі розроблено математичні моделі для аналізу процесів в асинхронному електроприводі ШНВУ.

Ефективність процесу видобування нафти за допомогою ШНВУ потребує надійних систем автоматичного контролю та керування, які в реальному часі повинні мати інформацію про значення координат електроприводу за період обертання кривошипа. Очевидно, що отримати їх оперативно шляхом розрахунку перехідного процесу у зв'язку з значною його тривалістю є складно. В роботі показано, що оскільки часовий період обертання кривошипа наперед точно невідомий, то доцільним є перехід від часових залежностей координат електроприводу до їх залежностей від кута  $\alpha$  повороту кривошипа на основі відомого виразу  $d\alpha/dt = \omega/(p_0 k_i)$ , де  $k_i$  – передавальне число від вала двигуна до кривошипа;  $\omega$  – швидкість обертання ротора в ел. рад/с. Під час вибору математичної моделі електроприводу було враховано той факт, що у якості приводного двигуна верстата-гойдалки застосовуються АД з підвищеним пусковим моментом. Тому для врахування явища витіснення струму ротора та насичення магнітопроводу використано математичну модель, в якій потікозчеплення контурів та власні і взаємні індуктивності визначаються на основі нелінійних характеристик намагнічування елементів магнітопроводу АД, а витіснення струму шляхом представлення обмотки ротора кількома обмотками, отриманими внаслідок розділення стержнів по висоті на елементарні. Таким чином отримано систему рівнянь (3)

$$\frac{d\vec{\psi}_{sxy}}{dt} = \Omega_0 \vec{\psi}_{sxy} - R_s \vec{i}_{sxy} + \vec{u}_{sxy}, \quad (3,a)$$

$$\text{де } \vec{\psi}_{sxy} = \begin{bmatrix} \psi_{sx} \\ \psi_{sy} \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{sxy} = \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix}; \quad R_s = \begin{bmatrix} r_s & \\ & r_s \end{bmatrix}; \quad \Omega_0 = \begin{bmatrix} & -\omega_0 \\ \omega_0 & \end{bmatrix}; \quad \vec{u}_{sxy} = \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \end{bmatrix} -$$

вектори потікозчеплень ( $\vec{\psi}_s$ ), струмів ( $\vec{i}_s$ ), напруг живлення ( $\vec{u}_s$ ) контурів статора та матриці активних опорів ( $R_s$ ) і допоміжна ( $\Omega_0$ ), в якій  $\omega_0$  – кутова частота напруги живлення.

$$\frac{d\vec{\psi}_{rxy}}{dt} = \Omega_r \vec{\psi}_{rxy} - R_r \vec{i}_{rxy}, \quad (3,b)$$

$$\text{де } \vec{\psi}_{rxy} = \begin{bmatrix} \psi_{r1} \\ \vdots \\ \psi_{rn} \end{bmatrix}; \quad \vec{\psi}_{r\xi} = \begin{bmatrix} \psi_{r\xi x} \\ \psi_{r\xi y} \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{rxy} = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ \vdots \\ i_{rn} \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{r\xi} = \begin{bmatrix} i_{rx\xi} \\ i_{ry\xi} \end{bmatrix}; \quad R_r = \begin{bmatrix} R_{r1} & & \\ & \ddots & \\ & & R_{rn} \end{bmatrix};$$

$$R_{r\xi} = \begin{bmatrix} r_{r\xi} & \\ & r_{r\xi} \end{bmatrix}; \quad \Omega_r = \begin{bmatrix} \Omega & & \\ & \ddots & \\ & & \Omega \end{bmatrix}; \quad \Omega = \begin{bmatrix} & \omega_0 - \omega \\ -\omega_0 + \omega & \end{bmatrix}; \quad (\xi = 1, \dots, n) \text{ – вектори}$$

потокзчеплень ( $\vec{\psi}_{rxy}$ ), струмів ( $\vec{i}_{rxy}$ ) і діагональна матриця ( $R_r$ ) приведених до обмотки статора еквівалентних активних опорів контурів ротора (індекси – 1, ..., n).

$$1,5 p_0 (\psi_{sx} i_{sy} - \psi_{sy} i_{sx}) - M_c = M_\partial, \quad (3,в)$$

де  $M_c$  – момент навантаження на валу АД;  $M_\partial$  – динамічний момент системи електроприводу.

Відомо, що система "свердловина-помпа" працює оптимально у випадку встановленої рівноваги між кількістю видобутої рідини та надходженням її до свердловини з пласта. Цього можна досягнути, якщо регулювати кількість ходів верстата-гойдалки так, щоб зберегти встановлене значення коефіцієнта заповнення незмінним. Миттєве значення продуктивності плунжерної помпи верстата-гойдалки, виражене в  $m^3/c$  видобутої рідини, можна визначити за формулою

$$q(t) = \lambda \frac{\pi D^2}{4} S_0 \frac{\omega(t)}{p_0 k_i}, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт подачі помпи;  $D$  – діаметр плунжера помпи;  $S_0$  – величина переміщення плунжера з урахуванням видовження колони штанг і труб.

Кожному значенню продуктивності пласта відповідає своя динамограма, а отже і момент навантаження на валу АД та залежності всіх координат. Для їх розрахунку використано систему рівнянь (3) і механічної частини ШНВУ, що дало змогу визначати частоту гойдань балансира верстата-гойдалки відповідно до зміни дебіту пласта. Для прикладу, на рис.5 наведені періодичні залежності значення моменту навантаження та електромагнітного моменту АД 4AP160S4У3 ( $P_n = 15$ кВт,  $U_n = 380/220$ В), що відповідають різним значенням продуктивності помпи ( $q = 0,018; 0,014; 0,012; 0,010 m^3/c$ ) і, відповідно, різним середнім значенням швидкості обертання кривошипного вала ( $n_{кр} = 18,5; 16,5; 13,5; 12,0$  об/хв) збалансованого верстата-гойдалки 7СК8-3,5-4000, при яких забезпечується неперервна робота ШНВУ.

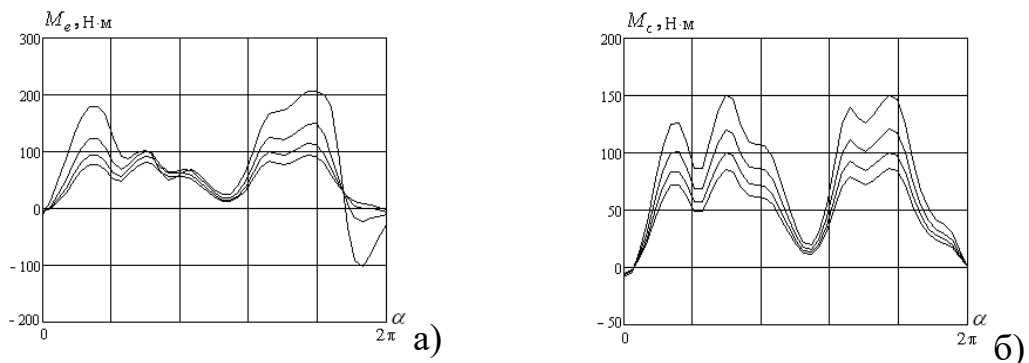


Рис.5. Періодичні залежності електромагнітного моменту АД (а) та моменту навантаження (б) при різних значеннях продуктивності.

Під час роботи автоматизованих систем керування необхідно мати достовірну інформацію не тільки про стан нафтовидобувного обладнання, але й визначити

обмеження, які витікають з умов надійної роботи системи електроприводу. Зміна дебіту свердловини потребує зміни темпу відбору нафти, що зводиться до встановлення відповідних різних швидкостей гойдань балансира. Однак її не завжди можна змінювати в необхідних межах, оскільки можуть виникати перевантаження АД за нагріванням або значенням максимального навантаження.

Для визначення допустимих меж зміни темпів відбору нафти і формування обмежень в роботі розроблено алгоритм розрахунку режимів роботи ШНВУ. Він дає змогу визначати необхідну частоту гойдань балансира в залежності від зміни дебіту пласта і формувати допустимі межі її регулювання, які визначаються вимогами до електроприводу. Як приклад, на рис.6 наведені розраховані періодичні залежності діючого значення струму при різних значеннях частоти обертання кривошипа, які відповідають зображеному на рис.5б навантаженні. На рис.7 наведено статичні характеристики, отримані шляхом оброблення розрахованих періодичних залежностей координат, які дають змогу визначити граничні умови регулювання, що впливають з обмежень роботи двигуна.

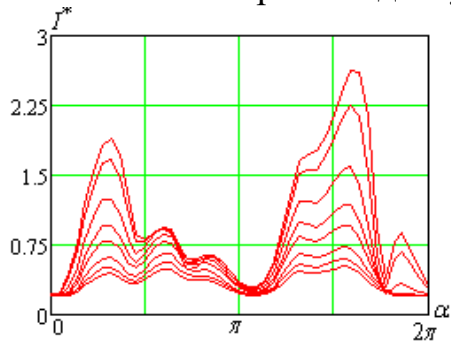


Рис.6. Залежності відносних значень струму двигуна на періоді

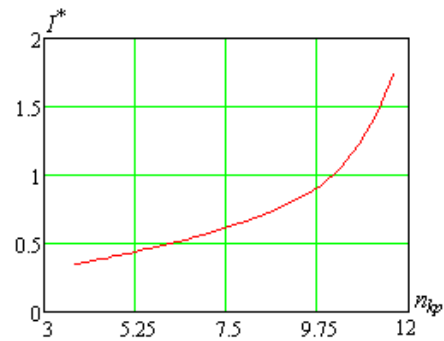


Рис.7. Залежності відносних значень струму двигуна

Аналіз результатів розрахунку показує, що при заданому навантаженні допустимою є швидкість обертання кривошипа, яка не перевищує 10 об/хв.

На основі математичних моделей АД, верстата-гойдалки та штучних нейронних мереж розроблено динамічну модель електроприводу ШНВУ. Схема електромеханічної системи нафтовидобувної установки, яка включає в себе як силову частину, так і систему керування в середовищі MATLAB показана на рис.8.

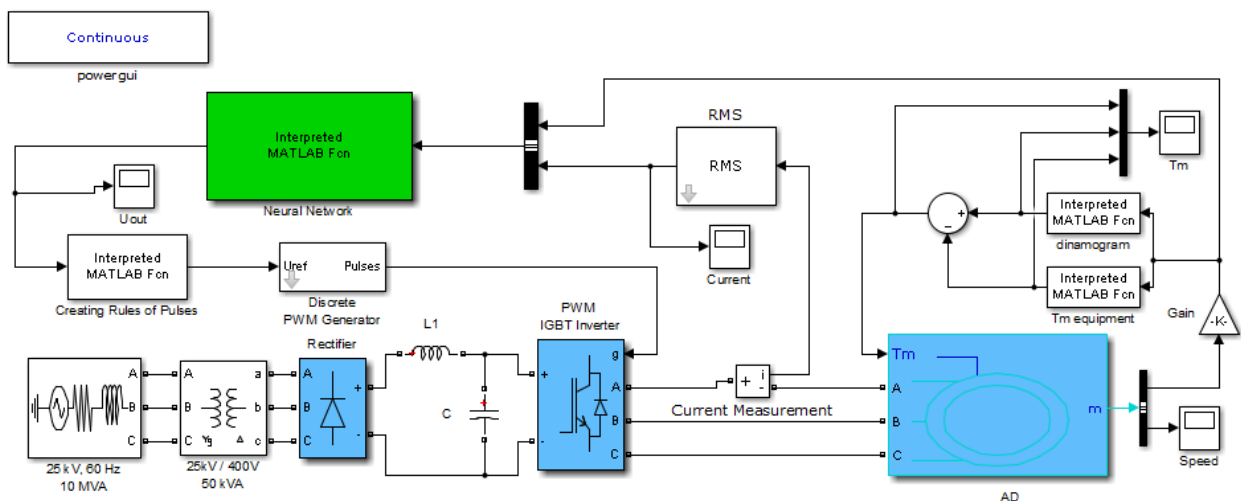


Рис.8. Модель ШНВУ з системою керування

На запропонованій моделі перевірено роботу декількох нейронних мереж щодо доцільності їх використання у системі керування глибинно-помповими установками нафтових свердловин. В таблиці 1 показано точність розпізнавання нейронними мережами зображень динамограм на різних наборах вхідних даних та час навчання вибраних нейронних мереж. З проведених дослідів видно, що рекурентні мережі краще справляються з задачею класифікації зображень, дають більшу кількість правильних результатів в складних умовах експлуатації, мають малий час навчання, що дає змогу використовувати їх в системах реального часу для керування ШНВУ.

Таблиця 1.

Тип нейронної мережі	Елементи з навчальної вибірки	Слабо зашумлені елементи	Сильно зашумлені елементи	Час навчання 20 зображень, с
Одношаровий перцептрон	100%	50%	10%	2,400
Багатошаровий перцептрон	100%	80%	50%	6,740
Мережа Хопфілда	100%	90%	75%	0,540
Мережа Хемінга*	100%	90%	75%	0,385

Створена динамічна модель була використана для відтворення реальних процесів, які відбуваються в електромеханічній системі нафтовидобувної установки.

На рис.10-11 показано приклад зміни коефіцієнта заповнення помпи та відповідної середньої швидкості привідного двигуна на основі поданих на вхід системи динамограм (рис.9), які були зняті на експериментальному зразку автоматизованої системи, що експлуатується в НГВУ “Бориславнафтогаз”.

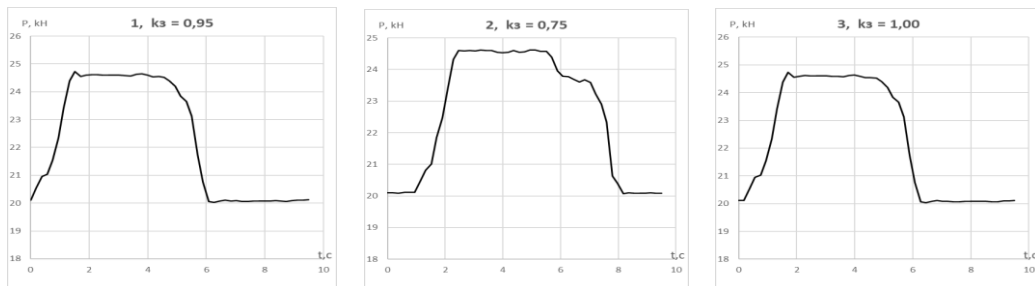


Рис.9. Графіки динамограм при різних коефіцієнтах заповнення

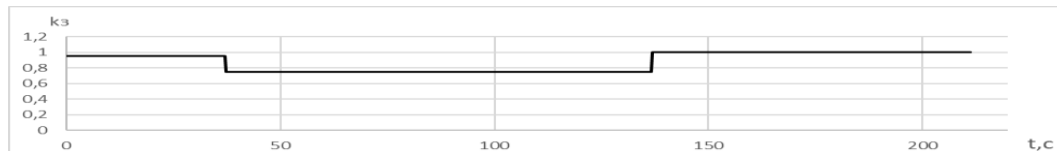


Рис.10. Графік зміни коефіцієнта заповнення

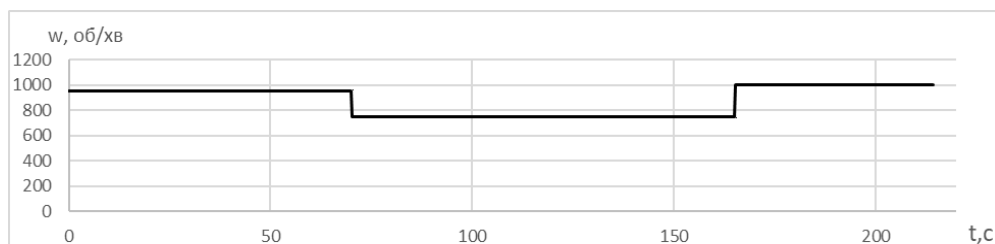


Рис.11. Зміна сигналу завдання швидкості обертання двигуна.

Крім моделювання робочих режимів ШНВУ створена модель може відтворити поведінку системи керування у випадку виникнення аварійної (нештатної) ситуації. Для цього нейронна мережа була навчена розпізнавати найбільш поширені аварії на основі статистичних даних, отриманих з нафтовидобувних підприємств. На рис.12 наведено приклад розпізнавання однієї з типових аварій.

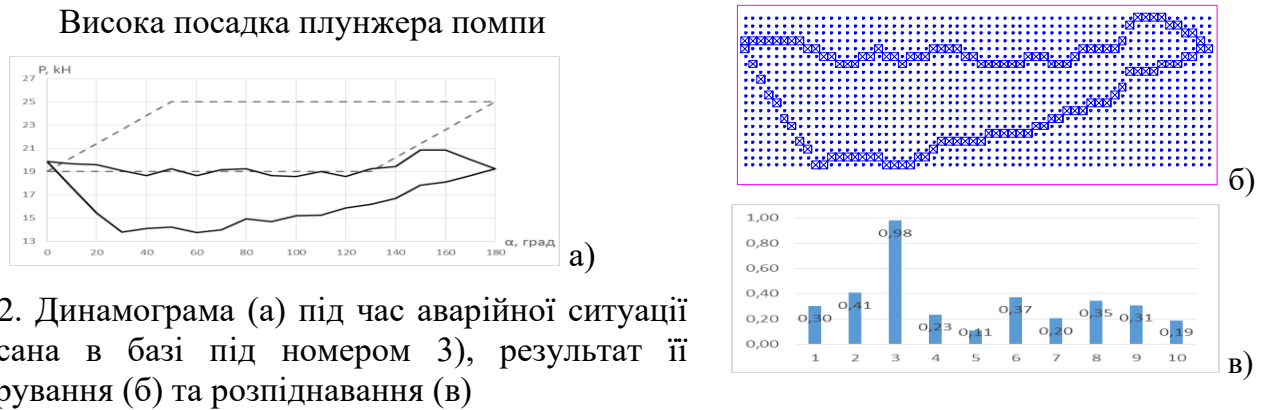


Рис.12. Динамограма (а) під час аварійної ситуації (записана в базі під номером 3), результат її оцифрування (б) та розпізнавання (в)

Алгоритм роботи системи керування працює таким чином, що після аналізу результату розпізнавання система активує той чи інший блок (робота з базою даних, аварійний режим роботи, штатний режим з корекцією завдання для частотного перетворювача). Якщо нейронна мережа отримує сильно зашумлений зразок або зразок з невідомого режиму роботи, то керування передається оператору і він може віднести розпізнаний зразок до вже існуючого класу з навчальної вибірки або створити новий клас. Таке рішення дає змогу в процесі експлуатації з часом підвищити процент правильно розпізнаних зображень.

У четвертому розділі запропонована апаратно-програмна реалізація спроектованої системи керування ШНВУ, яка в реальному часі контролює стан свердловини та вчасно виявляє аварійні режими. Для створення лабораторного зразка системи вибрано апаратну базу на основі мікроконтролера з набором периферійних пристроїв ARM Cortex M3 STM32F107 фірми ST Microelectronics. Для випробувань розроблених алгоритмів взято частотний перетворювач фірми Schneider Electric ATV32H018M2. В штатному режимі роботи – керування швидкістю двигуна – здійснювалось оцифрування вхідного масиву та формування зображення для подальшого розпізнавання. На рис.13 наведено графічне представлення оцифрованого масиву в MATLAB та зображення створене мікроконтролером на LCD екрані.

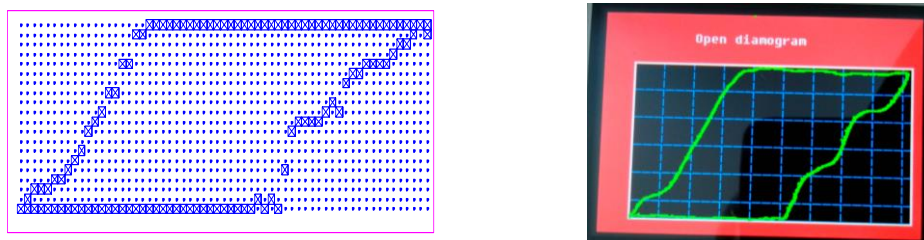


Рис.13. Графічне відображення сформованої бінарної матриці динамограми

Результатом роботи нейронної мережі є правильно розпізнане вхідне зображення та номер класу до якого воно належить. Далі, аналізується результат і, у

разі потреби, змінюється завдання для частотного перетворювача. На рис.14 наведено один з результатів розпізнавання динамограм – робота при не заповненому циліндрі помпи. На вхід подана динамограма, що знята для коефіцієнта заповнення рівному 0,75. Схема відпрацювала збурення за 345 мс, визначила стан свердловини (DIN=0.75) та сформувала керуючий вплив.

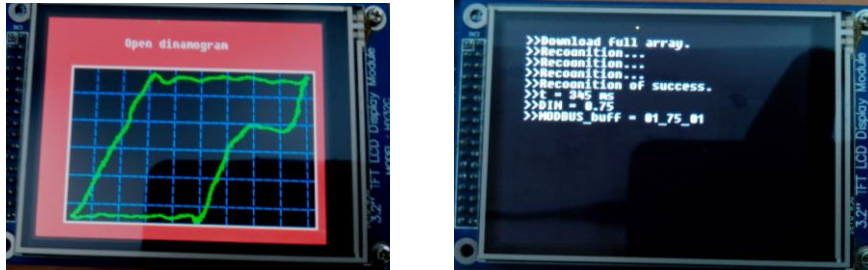


Рис.14. Розпізнавання динамограми з коефіцієнтом заповнення  $k_3 = 0,75$ .

Крім робочих режимів, на стенді проведено ряд експериментів із розпізнавання нештатних (аварійних ситуацій). На рис.15, як приклад, наведено графіки оцифрування та розпізнавання динамограми для згаданого вище аварійного режиму (рис.13а).

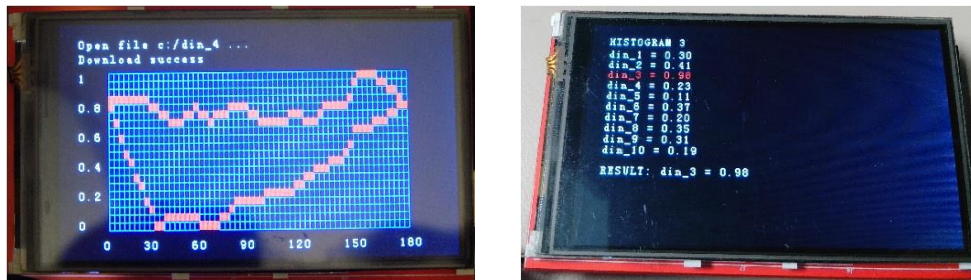


Рис.15. Результат розпізнавання динамограми аварійного режиму

На основі проведених експериментів встановлено, що схема адекватно відтворює та опрацьовує вхідні дані, як динамограм так і струмограм. Отриманий результат розпізнавання передається системі керування ШНВУ, яка приймає рішення про поточний стан установки (нормальна робота, аварійний режим роботи, штатний режим з корекцією завдання для частотного перетворювача).

Оскільки в процесі роботи система має можливість перенавчатися, то вона може адаптуватися для роботи з ШНВУ різних типів з одним апаратним та програмним забезпеченнями. Зокрема, це було підтверджено під час експериментальних досліджень макетного зразка системи на свердловинах НГВУ "Долинанаштогаз". Крім того, розроблена апаратно-програмна платформа дає змогу в подальшому розвивати і доповнювати алгоритми обробки даних без додаткових апаратних засобів.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної проблеми нафтовидобування – вдосконалення існуючих і розроблення нових ефективних методів ідентифікації технологічного стану нафтовидобувного обладнання та синтез на їх основі системи комп'ютерної діагностики та автоматичного керування електроприводом ШНВУ малодебітної свердловини.



1. В технічній літературі описана значна кількість методів і засобів діагностики стану обладнання ШНВУ з метою встановлення раціонального режиму експлуатації малodeбітних свердловин, однак в Україні майже відсутні автоматизовані системи керування роботою ШНВУ провідних світових виробників. Натомість використовуються переносні діагностичні комплекси, які не можуть забезпечити автоматичне керування установками в реальному часі. Підвищення ефективності та надійності систем керування роботою ШНВУ малodeбітних свердловин потребує нових теоретичних і практичних рішень, придатних для реалізації в інтелектуальних системах.

2. Одним з основних завдань під час синтезу автоматизованої системи керування ШНВУ є вибір способу обробки вхідної інформації, якою в основному є динамограми або ватметрограми, та створення алгоритму ідентифікації стану обладнання свердловини. Більшість існуючих методів розпізнавання динамограм мають низку недоліків, які суттєво обмежують їх застосування. Найбільш придатними є методи ідентифікації, які базуються на теорії штучних нейронних мереж. Їх використання дає змогу ефективно вирішувати задачі автоматизації процесу розпізнавання і адаптивного керування роботою ШНВУ, тому актуальною задачею є створення на базі сучасної мікропроцесорної техніки системи керування, яка забезпечує раціональний режим роботи нафтової свердловини в режимі реального часу.

3. Результати застосування штучних нейронних мереж в системах автоматизації процесів нафтовидобутку в значній мірі залежать від структури нейромережі. Аналіз відомих її типів показав, що для створення інтелектуальних систем керування роботою ШНВУ найбільш придатними є рекурентні нейронні мережі, оскільки вони краще адаптуються до зміни характеристик свердловини та її обладнання. Проведені дослідження показали, що ці мережі, зокрема мережа Хемінга, дає можливість при невеликих апаратних ресурсах ефективно розпізнавати необхідну кількість зображень з достатньою точністю. В роботі запропонована модифікація мережі та розроблений алгоритм, який суттєво збільшує швидкодію розпізнавання.

4. Запропонована система керування роботою ШГВУ розроблена за класичним підходом до систем автоматизації промислових установок із зворотним зв'язком за коефіцієнтом заповнення помпи. Унікальністю системи є використання нейронної мережі. Ефективність роботи такої системи залежить від значної кількості факторів. Перш за все – це структурний і параметричний синтез нейронної мережі, формування вхідних даних для навчання мережі та її роботи, адекватність математичної моделі установки та ін.

5. В роботі на основі нелінійних математичних моделей верстата-гойдалки і АД високої адекватності та модифікованої штучної нейронної мережі Хемінга розроблено динамічну модель електроприводу ШНВУ. Створена модель, є основою для створення на сучасній математичній основі "інтелектуальної" системи керування свердловиною, оскільки дає змогу отримувати достовірну інформацію про поведінку всієї електромеханічної системи нафтовидобувної установки в різних умовах роботи.

6. Розроблена математична модель дає змогу аналізувати процеси в асинхронному електроприводі ШНВУ в реальному часі і розраховувати необхідну

для збалансованого щодо дебіту свердловини швидкість обертання ротора АД з метою регулювання частоти напруги живлення, яка в умовах малого дебіту пласта забезпечує неперервну роботу установки з високим коефіцієнтом наповнення помпи і коефіцієнтом потужності. Програма, яка реалізує розроблений алгоритм, має високу швидкодію, що дає змогу оперативно формувати керуючі впливи відповідно до умов роботи установки, з урахуванням обмежень по нагріванню АД. моменту навантаження, струму чи потужності.

7. Розроблений в роботі метод розрахунку механічних характеристик АД дає змогу здійснювати їх аналіз при різних законах регулювання напруги та частоти з метою забезпечення необхідного закону зміни електромагнітного моменту АД. Як показали розрахунки, вигляд механічних характеристик при різних частотах залежить не тільки від закону регулювання, але й від форми пазів ротора, тому класичні заступні схеми не забезпечують необхідної точності результатів визначення електромагнітного моменту.

8. Важливим під час синтезу автоматизованої системи керування ШНВУ є вибір програмно-апаратної бази. В процесі вибору слід враховувати такі фактори, як швидкість оброблення великої кількості даних, можливість обміну інформацією з базою даних на зовнішніх носіях, підтримка сучасних файлових систем, наявність інтерфейсів для зв'язку з зовнішньою периферією (USART, SPI, USB, ETHERNET), обсяг енергоспоживання, зручність в налагодженні та експлуатації.

9. Випробування на тестовому стенді показали, що схема здатна відпрацьовувати різні режими роботи ШГВУ, в тому числі і аварійні. Вона однаково добре обробляє вхідні дані, як динамограми так і струмограми. Результати експериментів, які проводилися на лабораторному стенді збігаються з отриманими під час комп'ютерного моделювання. Створена система керування має можливість перенавчатися, а тому може адаптуватися для роботи з ШГВУ різних типів з одним і тим самим апаратним та програмним забезпеченням.

### **Публікації за темою дисертації**

1. Маляр А.В., Андреїшин А.С., Місюренко В.О. Застосування фазі-регулятора в системі керування електроприводом штангової нафтовидобувної установки. Вісник НТУ ХПІ “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. 2010. С. 569–570.

2. Маляр А.В., Андреїшин А.С. Використання нейромережі для побудови системи керування електроприводом верстата-гойдалки. Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. 2011. № 707. С 72–82.

3. Маляр А.В., Андреїшин А.С., Тацій А.Р. Розпізнавання динамограми верстата-гойдалки за допомогою нейронної мережі. Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика-2011”. м. Львів, 28-30 вересня, 2011. С. 156–157.

4. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андреїшин А.С. Система автоматичного керування роботою штангової глибиннопомпової установки з врахуванням дебіту пласта. Наукові праці ДонНТУ. Серія Електротехніка і енергетика. 2011. Вип. 11(186). С. 267–270.

5. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрєйшин А.С. Визначення навантажень двигунів штангових глибиннопомпових нафтовидобувних установок. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2011. Вип. 03(79). С 200–201.
6. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Вибір нейронної мережі для визначення коефіцієнта заповнення глибинної помпи. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Темат. випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. Кременчук: КрНУ. 2012. Вип. 3/2012 (19). С. 543–545.
7. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрєйшин А.С. Використання нейромережі для визначення коефіцієнта заповнення глибинної помпи. Вісник НУ “Львівська політехніка”. “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. 2012. № 736. С. 94–99.
8. Андрєйшин А.С. Система розпізнавання динамограм нафтової установки на нейронній мережі: XII Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми сучасної електротехніки”. м. Вінниця, 4–8 червня, 2012. 1 електрон. опт. диск (CD-R).
9. Андрєйшин А.С., Маляр А.В., Калужний Б.С., Лещук С.М. Вибір нейронної мережі для розпізнавання стану нафтової свердловини. Вісник НТУ ХПІ “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. 2013. № 36. С.495–496.
10. Андрєйшин А.С. Розпізнавання стану свердловини та нафтовидобувного обладнання на основі нейронної мережі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2013. Вип. 2/2013(22). Ч.2. С.184–188.
11. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Розрахунок параметрів функціонування штангової нафтовидобувної глибиннопомпової установки. Міжвідомчий збірник наукових праць “Відбір і обробка інформації”. 2013. Випуск 38 (114). С. 75–81.
12. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Динамічні та статичні режими роботи електроприводів штангових нафтовидобувних установок. Вісник НУ “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. 2013. № 763. С.54–59.
13. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Дослідження аварійних режимів штангової глибиннопомпової установки. Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2014. Вип. 4/2014(28). С.40–47.
14. Андрєйшин А.С., Маляр А.В., Калужний Б.С., Головач І.Р. Апаратно-програмна реалізація системи керування штанговою глибинно-помповою установкою. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2014. Вип. № 15 (91). С. 165–168.
15. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Розрахунок збалансованого режиму роботи електроприводу штангової нафтовидобувної установки малодебітної свердловини. Науковий вісник Нац. гірничого ун-ту “Електротехнічні комплекси та системи”. Вип. № 4. 2014. С. 39–44.
16. A. Malyar, B. Kaluzhnyi, A. Andreishyn, K. Molnar. Effect of sucker-rod pumping unit walking beam oscillation frequency on asynchronous electric drive. Computation Problem of Electrical Engineering. Vol.6, No.1. 2016. P.p. 25–30.
17. A. Malyar, A. Andreishyn, B. Kaluzhnyi, I. Holovach. Study of the Hamming Network Efficiency for the Sucker-Rod Oil Pumping Unit Status Identificatio. Computation Problem of Electrical Engineering. No.1. 2017. P.p. 43–49.

18. Маляр В.С., Маляр А.В., Андрейшин А.С. Метод розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Електротехніка і електромеханіка. 2019. № 2. С. 9–13.

19. Маляр А.В., Андрейшин А.С. Розроблення математичної моделі задля розрахунку допустимих параметрів робочих режимів частотно-керованого електроприводу штангової нафтовидобувної установки. Технічна електродинаміка. 2019. №2. С. 43-49.

**Андрейшин А. С. Система керування електроприводом нафтовидобувної установки на основі нейронної мережі. Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2020.

Дисертація спрямована на вирішення актуальних проблем нафтовидобувної промисловості України – підвищення ефективності роботи нафтовидобувних установок та впровадження інтелектуальних технологій видобування нафти. В дисертації запропоновано систему керування роботою ШНВУ на базі модифікованої нейронної мережі Хемінга. Удосконалено спосіб представлення даних, отриманих від давачів, у результаті чого створено єдиний підхід щодо діагностики стану свердловини незалежно від масштабу знятої первинної інформації. Розроблено динамічну модель електромеханічної системи керування ШНВУ, яка є основою "інтелектуальної" системи керування свердловиною, і яку використано для відтворення реальних процесів та ідентифікації стану нафтовидобувного обладнання. Запропоновано алгоритм визначення допустимих меж регулювання швидкості привідного двигуна, а також її оптимального значення, що забезпечує збалансований режим відбору рідини із свердловини.

На основі розроблених математичних моделей створено програмне забезпечення та запропоновано схемотехнічні рішення для здійснення ефективного оперативного керування роботою нафтовидобувної установки та запобігання виникненню аварійних ситуацій.

*Ключові слова:* штангова нафтовидобувна установка, асинхронний електропривод, малодебітна свердловина, неперервний режим роботи, динамограма, розпізнавання образів, нейронна мережа, математичне моделювання, система керування.

**Andreyishyn, A.S. Electric Drive Control System for Neural Network-Based Oil Extraction Unit. Manuscript.**

Thesis for a Doctor's of Philosophy Degree in Engineering, specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2020.

The thesis research is aimed at the solution of a number of topical issues in Ukraine's oil industry such as raising the efficiency of oil production units and implementation of intellectual technologies for oil production.

The thesis provides a review of literary sources, which showed that there are currently no automated control systems for oil production on the basis of intellectual wells

in Ukraine. This creates the need for research in the area of developing new ways to control electric drives of sucker-rod pumping units. One of the main tasks in designing a control system is to select informative parameters to identify the status of the pumping equipment. The thesis shows that the most appropriate method of recognizing the state of the well and its equipment is the use of neural networks. To determine the optimal structure of the neural network, a series of mathematical experiments were conducted with the real dependencies of the force in the polished rod and the current of the drive motor of the operating oil production facilities. Based on the comparison of the results of the recognition of experimental curves, it is concluded that recurrent neural networks, in particular the Hemming network, are most suitable for the recognition of load curves or time-current curves. The thesis proposes a modification of the Hemming network, in particular, replacing the first layer of the network with the algorithm of bitwise comparison of data arrays. This modification has greatly improved the performance of the neural network and increased the recognition accuracy of the input signal. Based on the proposed modification of the Hemming neural network, an algorithm for its operation was created. It is shown that bringing an input data set to one standard (binary representation) enhances the versatility of the recognition system, enabling it to be used in different control systems where load curves, time-current curves or active power curves are inputs.

For the rapid control of many oil wells, it is necessary to have equipment characteristics and training samples for each well. To this end, the thesis proposes a database which records the data of all wells, and which is accessible for the controller of each well. This approach significantly simplifies the real-time control of a group of oil production units, since the state recognition data of one well can be used to control other (similar) wells.

The thesis proposes a system for control of a sucker-rod pumping unit based on a modified Hemming neural network with a feedback on the coefficient of filling. Taking into account the specificities of the intermittent operation of stripper wells, a dynamic model of the electromechanical control system of a deep-well sucker-rod pumping unit was developed. Using the developed dynamic model of the electric drive system of the sucker-rod pumping unit, there was proposed an algorithm for determining the admissible limits of control of the driving motor speed and for finding its optimal value that provides a balanced mode of fluid withdrawal from the well.

The mathematical model of the electromechanical system of the oil production unit developed in the thesis is the basis of an intelligent well control system used to reproduce real processes and to identify the state of the oil production equipment. For conducting mathematical experiments in the MATLAB environment, a model of an electromechanical control system for a sucker-rod pumping unit was created. It is based on high-adequacy mathematical models of frequency-controlled asynchronous electric drive and sucker-rod pump, mathematical model of the neural network; a method of calculating the periodic dependencies of the coordinates of the operation mode of an oil production unit based on solving the boundary value problem. This approach makes it possible to obtain the result of mathematical modeling with high reliability and minimal-volume calculations in the timeless domain, which is important for the development of control systems in real time.

Based on the created model, a number of mathematical experiments were carried out, which confirmed the effectiveness of the proposed modification of the Hamming neural

network with respect to the accuracy and speed of recognition of the input arrays of load curves and time-current curves. The example demonstrates that the developed system of sucker-rod pumping unit control can quickly in real time adapt to changing wells operation modes. The thesis presents the modelling of the electromechanical system both in working and emergency modes.

To carry out the experimental studies, a laboratory workbench was created for the electromechanical control system of the sucker-rod pumping unit. The thesis describes the element base and the software used, outlines the schematics of the developed laboratory workbench, the algorithm of operation and the sequence of operations performed during the acquisition of experimental data.

On the basis of the experimental results obtained at the laboratory workbench, it is concluded that the theoretical solutions proposed in the thesis and the application of the developed algorithms are correct.

*Key words:* sucker-rod pumping unit, asynchronous electric drive, marginal well, uninterrupted operation mode, dynamogram, pattern recognition, neural network, mathematical modeling, control system.

#### **Андреишин А.С. Система управления электроприводом нефтедобывающей установки на основе нейронной сети. Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2020.

Диссертация направлена на решение актуальных проблем нефтедобывающей промышленности Украины – повышение эффективности работы нефтедобывающих установок и внедрение интеллектуальных технологий добычи нефти. В диссертации предложена система управления работой ШНВУ на базе модифицированной нейронной сети Хемминга. Усовершенствован способ представления данных, полученных от датчиков, в результате чего создан единый подход к диагностике состояния скважины независимо от масштаба снятой первичной информации. Разработана динамическая модель электромеханической системы управления ШНВУ, которая является основой "интеллектуальной" системы управления скважиной, и которую использовано для воспроизведения реальных процессов и идентификации состояния нефтедобывающего оборудования. Предложен алгоритм определения допустимых пределов регулирования скорости приводного двигателя, а также ее оптимального значения, что обеспечивает сбалансированный режим отбора жидкости из скважины.

На основе разработанных математических моделей создано программное обеспечение и предложены схмотехнические решения для осуществления эффективного оперативного управления работой нефтедобывающей установки и предотвращения возникновения аварийных ситуаций.

*Ключевые слова:* штанговая нефтедобывающая установка, станок-качалка, электропривод, математическая модель, переходный процесс, стационарный режим, краевая задача, оптимизация, система управления, периодическая эксплуатация.