

## АНОТАЦІЯ

*Кропивницький Д. Р.* Математичне моделювання та оптимальне керування процесом механічного буріння гвинтовими вибійними двигунами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 174 – автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2023.

Метою дисертаційного дослідження є розроблення математичних моделей процесу механічного буріння гвинтовими вибійними двигунами і на цій основі синтезувати систему оптимального керування.

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і вирішення актуальної науково-практичної задачі оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин гвинтовими вибійними двигунами (ГВД) в умовах невизначеності за критерієм вартості метра проходки з врахуванням раціонального відпрацювання доліт за озброєнням, що дало змогу синтезувати відповідну систему оптимального керування.

Вирішення такої задачі має важливе значення для нафтогазової галузі так як дає змогу підвищити техніко-економічні показники процесу спорудження нафтогазових свердловин.

У вступі розкрито стан наукової проблеми її значущість, обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, відображено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету та визначено основні задачі обраного напрямку дослідження; подано наукову новизну практичне значення отриманих результатів, зроблено аналіз особистого внеску здобувача в публікаціях за темою роботи, подано відомості про кількість публікацій автора та ступінь апробації роботи.

У **першому** розділі описаний технологічний процес поглиблення свердловини та розглянуто його як об'єкт автоматизації, який характеризується великою кількістю режимних параметрів, що в тій чи іншій мірі визначають його ефективність. Показано, що процес буріння є складною системою, в якій відбуваються процеси, що мають різну тривалість, різну природу та характеризується різною кількістю можливих керуючих впливів, вибір яких зумовлений способом буріння. Зазначено, що буріння з використанням гвинтових вибійних доліт має ряд переваг при спорудженні похило-скерованих та горизонтальних свердловин.

Проведений аналіз літературних джерел в області моделювання та ідентифікації процесу буріння як об'єкта автоматизації показав, що на теперішній час не існує задовільної теорії руйнування гірських порід, на основі якої можливе створення математичних моделей придатних для розв'язання задач оптимізації процесу буріння. Тому для розв'язання задач оптимального керування використовують емпіричні моделі, які отримують за результатами спостережень за процесом механічного буріння.

Зазначено актуальність задачі побудови математичних моделей процесу буріння з використанням штучного інтелекту (зокрема, теорії генетичних алгоритмів та нечітких множин) і на цій основі розроблення методу побудови емпіричних моделей придатного для вирішення задачі оптимального керування процесу механічного буріння з застосуванням ГВД та з врахуванням невизначеностей, які притаманні технологічним параметрам.

В **другому** розділі запропоновано математичну модель процесу поглиблення свердловини при бурінні гвинтовими вибійними двигунами, в яку входить аналітична залежність, що встановлює взаємозв'язок між кутовою швидкістю асинхронного двигуна і тиском промивальної рідини. На основі встановленої залежності було зроблено висновок про вибір керуючих дій – осьового навантаження на долото та тиску промивальної рідини на виході із маніфольду.

Для вирішення задачі оптимального керування процесом поглиблення

свердловини за допомогою гвинтових вибійних двигунів створені емпіричні моделі, у яких технологічні параметри (осьове навантаження на долото і тиск промивальної рідини) трактуються як нечіткі величини з трикутною функцією належності. Для спрощення арифметичних операцій над нечіткими числами трикутну функцію належності, яка є недиференційованою в деяких точках, що ускладнює побудову математичної моделі, було апроксимовано гаусовою функцією, яка є диференційованою на всій області визначення.

Запропоновано метод удосконалення емпіричних моделей технологічного процесу буріння, для якого характерним є недостатня кількість інформації про вхідні та вихідні значення параметрів об'єкта. Розроблений метод побудови емпіричних поліноміальних моделей із застосуванням теорії генетичних алгоритмів для випадку, коли вхідні величини моделей – осьове навантаження на долото і тиск промивальної рідини - трактуються як нечіткі величини, що дозволило формалізувати невизначеність процесу поглиблення свердловини.

В **третьому** розділі розроблений метод оптимального керування процесом механічного буріння з ГВД-приводом, який поєднує у собі раціональне відпрацювання доліт за озброєнням і вибір оптимальних керуючих дій – осьового навантаження на долото і тиску промивальної рідини за критерієм мінімуму вартості метра проходки при умові, що відомі обмеження на керуючі дії. Показано, що збільшення осьового навантаження до критичного значення призводить до деформації бурової колони, що може спричинити аварійну ситуацію. Для визначення критичного значення осьового навантаження побудовано систему диференціальних рівнянь, для розв'язку якої використано метод Рунге-Кутта та розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення в середовищі MatLab, результатом якого є побудова графічних залежностей зміни прогину бурильної колони при різних значеннях згинаючого моменту.

За результатами обчислень синтезовано емпіричні моделі визначення точки максимального прогину бурильної колони у вигляді полінома 2-го

порядку, параметри яких обчислено за методом найменших квадратів. Адекватність моделей перевірено за допомогою коефіцієнта кореляції, значення якого дорівнює 0.9997, що свідчить про узгодженість між розрахунковими та експериментальними даними.

Розроблено програмне забезпечення для визначення оптимального часу перебування долота на вибої свердловини та визначення оптимальних значень керуючих дій за критерієм мінімуму вартості метра проходки свердловини.

В **четвертому** розділі розроблено дворівневу схему оптимального керування процесом поглиблення свердловини. Тут розв'язана задача другого рівня керування, яка зводиться до підтримки оптимальних значень керуючих дій, визначених на першому рівні системи.

Для синтезу і аналізу автоматичної системи керування електричним приводом бурового насосу, який є елементом системи оптимального керування процесом буріння розроблено математичні моделі електричного приводу та псевмокомпенсатора бурового насосу.

На основі методу структурних перетворень синтезована каскадно-зв'язана система керування буровим насосним агрегатом, завданням якої є підтримання постійної витрати і тиску бурового розчину. Система має два контури - основний (базовий), за допомогою якого здійснюється стабілізація тиску промивальної рідини на виході із компенсатора і додатковий, функція якого зменшення впливу зовнішніх збурень – температури зовнішнього середовища і моменту на роторі електричного двигуна.

Для визначення параметрів налаштування регуляторів двох контурів розроблена методика розв'язку оптимізаційної задачі з узагальненим квадратичним критерієм.

В результаті аналізу поставленої задачі було зроблено висновок про те, що система автоматичного керування буровим агрегатом володіє астатизмом третього порядку. Тому для базового контуру доцільно обрати регулятор з П-алгоритмом керування, а в додатковий контур, включити П-регулятор, що створює структуру, яка має вищу швидкодію.

Наукова новизна дисертаційної роботи визначається такими положеннями:  
*вперше:*

– формалізована задача оптимального керування процесом поглиблення свердловин з використанням гвинтових вибійних двигунів за вартісним критерієм, що дало змогу розробити метод розв’язання поставленої задачі, який включає в себе два етапи – на першому етапі за допомогою ітераційної процедури визначають тривалість процесу закінчення чергового рейсу буріння, а на другому - обчислюють оптимальні керуючі дії за вартісним критерієм з врахуванням обмежень на осьове навантаження на бурове долото і на тиск промивальної рідини;

– створена математична модель бурового насосного агрегату з регульованим електричним приводом, що дало змогу синтезувати структурну схему каскадно-зв’язаної системи автоматичного керування, яка стабілізує тиск промивальної рідини на виході із маніфольду з корекцією відносно зовнішніх впливів - температури зовнішнього середовища і моменту на роторі електричного приводу;

– *удосконалено* метод створення емпіричних математичних моделей процесу поглиблення нафтогазових свердловин у частині обґрунтування апроксимації трикутної функції належності гаусовською функцією, що дало змогу отримати прості залежності між параметрами таких функцій і на цій основі синтезувати оптимальні за структурою емпіричні моделі, в яких враховано

«розмитість» технологічних параметрів – осьового навантаження на долото і тиску промивальної рідини;

– *знайшов подальший розвиток* метод створення каскадно-зв’язаної системи автоматичної стабілізації тиску бурового розчину на виході із маніфольду з корекцією відносно зовнішніх впливів, що дало змогу створити структурну схему такої системи та формалізувати задачу розрахунку параметрів налаштування регуляторів як основного, так і допоміжного контурів системи керування буровимнасосним агрегатам як задачу нелінійного програмування.

Отримані результати дисертаційного дослідження мають практичне значення, які полягають в розробці алгоритмічного і програмного забезпечення синтезу емпіричних моделей оптимальної складності процесу поглиблення свердловини з використанням методів штучного інтелекту; створенні алгоритмічного і програмного забезпечення для розв'язання задачі оптимального керування процесом буріння з ГВД за критерієм мінімум вартості метра проходки та для обчислення значення критичного навантаження на долото при бурінні свердловини числовим методом, виходячи із допустимого викривлення колони бурильних труб.

Окремі розділи дисертаційної роботи знайшли своє впровадження в навчальний процес при вивченні дисциплін «Оптимальне та адаптивне керування в нафтогазовій промисловості», «Теорія автоматичного керування» студентами спеціальності 174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», що підтверджується відповідним актом.

**Ключові слова:** процес буріння, свердловина, гвинтовий вибійний двигун, тиск, осьове навантаження, оптимізація, автоматизація, система керування, генетичні алгоритми, математичні моделі, моделювання, нечіткі величини, апроксимація, програмне забезпечення.

## ABSTRACT

*Kropyvnytskyi D. R.* Mathematical Modeling and Optimal Control of Mud Motor Drilling Process. - Qualification scientific work on the manuscript rights.

The aim of the dissertation research is to develop mathematical models of the mechanical drilling process using mud motors and, based on this, to synthesize an optimal control system.

The dissertation work provides a theoretical generalization and solution to the current scientific and practical problem of optimal control in the drilling process of oil and gas wells using mud motors under conditions of uncertainty regarding the criterion of the cost per meter of penetration, taking into account the rational utilization of the drilling tool life, which allowed to synthesize the corresponding optimal control system.

The solution to such a problem is of significant importance for the oil and gas industry, as it enables the improvement of the technical and economic indicators of the oil and gas well construction process.

The introduction provides an exposition of the current state of the scientific problem, its significance, and justifies the relevance of the dissertation research topic. It reflects the connection of the dissertation work with scientific programs, plans, and themes. The introduction formulates the purpose and defines the main tasks of the chosen research direction. It presents the scientific novelty and practical significance of the obtained results, analyzes the personal contribution of the researcher in publications related to the work's theme, and provides information about the number of publications by the author and the degree of the thesis's approval.

The first chapter describes, the technological process of well drilling, considering it as an object of automation characterized by a large number of operational parameters that, to some extent, determine its efficiency. It is demonstrated that the drilling process is a complex system in which processes with different durations and natures occur. It is characterized by a varying number of possible control influences, the selection of which depends on the drilling method. It

is noted that drilling using mud motor bits has several advantages when constructing directional and horizontal wells.

The analysis of literary sources in the field of modeling and identification of the drilling process as an object of automation has shown that, at present, there is no satisfactory theory of rock destruction on which the creation of mathematical models suitable for solving optimization problems in the drilling process could be based. Therefore, to address optimal control problems, empirical models are used, derived from observations of the mechanical drilling process.

The relevance of the task of constructing mathematical models of the drilling process using artificial intelligence, specifically the theory of genetic algorithms and fuzzy sets, is noted. And based on this, the development of a method for creation empirical models suitable for solving the problem of optimal control of the mechanical drilling process using mud motors and taking into account the uncertainties inherent in technological parameters.

A mathematical model of the well-drilling process with mud motors is proposed. In the second chapter, which includes an analytical relationship that establishes the connection between the angular velocity of the asynchronous motor and the pressure of the drilling fluid. Based on the established dependency, a conclusion was drawn regarding the choice of control actions – the axial load on the bit and the pressure of the drilling fluid at the manifold outlet.

To address the problem of optimal control in the well-drilling process using mud motors, empirical models have been created. In these models, technological parameters (axial load on the bit and pressure of the drilling fluid) are treated as fuzzy variables with a triangular membership function. To simplify arithmetic operations with fuzzy numbers, the triangular membership function, which is non-differentiable at certain points, complicating the construction of a mathematical model, was approximated by a Gaussian function, which is differentiable across its entire domain.

There was proposed method for improving empirical models of the drilling technological process, which is characterized by an insufficient amount of information about the input and output values of the object's parameters. The



developed method involves constructing empirical polynomial models using the theory of genetic algorithms in cases where the input variables of the models – axial load on the bit and pressure of the drilling fluid – are treated as fuzzy variables. This approach allows the formalizing of uncertainty for the well-drilling process.

A method for optimal control of the mechanical drilling process with a mud motor drive is developed In third chapter. This method combines rational tool life utilization and the selection of optimal control actions – axial load on the bit and pressure of the drilling fluid – based on the criterion of minimizing the cost per meter of penetration, while considering known constraints on control actions. It is demonstrated that increasing the axial load to a critical value leads to the deformation of the drilling column, which can result in an emergency situation. To determine the critical value of the axial load, a system of differential equations is constructed, and the Runge-Kutta method is employed for its solution. Algorithmic and software support in the MatLab environment is developed, resulting in the construction of graphical dependencies illustrating the deflection of the drilling column under various values of bending moment.

Based on the calculation results, empirical models for determining the point of maximum deflection of the drilling column were synthesized in the form of a second-order polynomial. The parameters of these models were calculated using the least squares method. The adequacy of the models was verified using the correlation coefficient, with a value of 0.9997, indicating a high agreement between the calculated and experimental data.

Software has been developed to determine the optimal time for the bit to stay in the wellbore and to identify optimal control values based on the criterion of minimal cost per meter of penetration.

Two-level scheme of optimal control for the well-drilling process has been developed In the fourth chapter. In this section, the problem of the second level of control is solved, which involves maintaining optimal control values determined at the first level of the system.

To synthesize and analyze the automatic control system of the electric drive of

the drilling pump, which is an element of the optimal drilling process control system, mathematical models of the electric drive and the pseudo-compensator of the drilling pump have been developed.

Based on the method of structural transformations, a cascade-interconnected control system for the drilling pump unit has been synthesized. The objective of this system is to maintain a constant flow rate and pressure of the drilling fluid. The system consists of two loops - the primary (base) loop, which stabilizes the pressure of the drilling fluid at the outlet of the compensator, and the additional loop, which functions to reduce the influence of external disturbances, such as the temperature of the external environment and the moment on the rotor of the electric motor.

There was developed a methodology, to determine the tuning parameters of the controllers for the two loops, treating it as an optimization problem with a generalized quadratic criterion.

Upon analyzing the stated problem, the conclusion was drawn that the automatic control system of the drilling unit exhibits third-order astaticism. Therefore, for the primary loop, it is advisable to choose a controller with a PI control algorithm, while for the additional loop, incorporating a P-controller is beneficial, creating a structure with high speed.

The scientific novelty of the dissertation work is determined by the following propositions:

- the problem of optimal control in the well-drilling process using mud motors was formalized based on a cost criterion. This allowed the development of a solution method, which comprises two stages. In the first stage, the duration of the completion of the next drilling cycle is determined through an iterative procedure. In the second stage, optimal control actions are computed based on the cost criterion, taking into account constraints on the axial load on the drill bit and the pressure of the drilling fluid.

- a mathematical model of the drilling pump unit with a controllable electric drive was created, enabling the synthesis of a structural scheme for a cascade-interconnected automatic control system. This system stabilizes the pressure of the drilling fluid at the manifold outlet with corrections for external influences such as the temperature of the

external environment and the moment on the rotor of the electric drive.

- the method for creating empirical mathematical models of the oil and gas well drilling process was improved, particularly in justifying the approximation of the triangular membership function by a Gaussian function. This enhancement facilitated the derivation of simple relationships between the parameters of such functions and, based on this, the synthesis of structurally optimal empirical models. These models take into account the "fuzziness" of technological parameters, such as axial load on the drill bit and pressure of the drilling fluid.

- the method for creating a cascade-interconnected automatic pressure stabilization system for drilling fluid at the manifold outlet with corrections for external influences has been further developed. This development enabled the creation of a structural scheme for such a system and the formalization of the problem as a nonlinear programming task for calculating the tuning parameters of controllers for both the main and auxiliary loops of the drilling pump unit control system.

The obtained results of the dissertation research have practical significance, including the development of algorithmic and software tools for synthesizing empirical models of optimal complexity for the drilling process using artificial intelligence methods. Additionally, algorithmic and software solutions have been created for solving the problem of optimal control of the drilling process with a downhole motor based on the criterion of minimizing the cost per meter drilled and for calculating the critical load on the bit during drilling using numerical methods, considering the allowable deformation of the drill string.

Individual sections of the dissertation have found application in the educational process for students studying disciplines such as "Optimal and Adaptive Control in the Oil and Gas Industry" and "Automatic Control Theory" within the specialty 174 - "Automation, Computer-Integrated Technologies, and Robotics". This is confirmed by the relevant documentation.

**Keywords:** drilling process, well, mud motor, pressure, axial load, optimization, automation, control system, genetic algorithms, mathematical models, modeling, fuzzy variables, approximation, software.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

1. Кропивницька В. Б., Кропивницький Д. Р. Визначення адекватності математичної моделі контролю механічної швидкості проходки свердловини. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. № 2 (35). С. 105-110. <https://core.ac.uk/download/pdf/80561288.pdf>
2. Горбійчук М. І., Кропивницький Д. Р. Математична модель процесу поглиблення свердловини під час буріння гвинтовими вибійними двигунами. *Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв: видавничий дім "Гельветика" , 2021. №1 (484). С. 68-74. <https://eir.nuos.edu.ua/items/6c18ec55-3754-47a9-819e-f89df02f4a24>
3. Горбійчук М. І., Кропивницький Д. Р. Числовий метод обчислення критичного навантаження на долото при бурінні свердловин. *Automation o f technological and business processes*. Odessa, 2021. Volume 13. Issue 1. С. 31-42. <https://doi.-org/10.15673/atbp.v13i1.1998>
4. Горбійчук М. І., Кропивницький Д. Р. Оптимальне керування процесом поглиблення свердловини з врахуванням стану озброєння долота. *Вісник Хмельницького національного університету*. Том 1. №1, 2023 (317). С. 58-66. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-58-66>
5. Mykhail Horbiychuk, Dmytro Kropyvnytskyi, Vitalia Kropyvnytska. Improving Empirical Models of Complex Technological Objects Under Conditions of Uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Харків, 2023. №2(122). С. 53–63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276586>
6. Кропивницький Д. Р., Горбійчук М. І. Побудова математичної моделі бурового насосного агрегату для автоматичної системи керування тиском на його виході. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. № 1 (50). С. 48-59. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-1\(50\)-48-59](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-1(50)-48-59)

### *Опубліковані праці апробаційного характеру:*

7. Кропивницький Д.Р. Структура таблиць бази даних інформаційно-вимірjuвального комплексу СКУБ-М2. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості ІТОТП 2017*: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. аспірантів, молодих вчених і студентів, 10-13 жовтня 2017 р. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017 С. 19-22.

8. Кропивницька В. Б., Кропивницький Д. Р. Взаємозв'язок підсистем процесу буріння свердловин. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості ІТОТП 2017*: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. аспірантів, молодих вчених і студентів, 8 жовтня 2020 р. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. С. 89-90.

9. Кропивницька В. Б., Кропивницький Д. Р. Побудова діаграми Ісікави для структурного аналізу процесу буріння. *«Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення»*: тези доп. міжн. інтернет-конф., 8 червня 2021 р. Тернопіль., 2021. Випуск 59. С. 29-30.  
<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-194/>

10. Кропивницький Д. Р., Кропивницька В. Б. Дослідження амплітудно-фазових характеристик бурильної колони *«Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення»*: тези доп. міжн. інтернет-конф. 7-8 червня 2022 р. Тернопіль., 2022. Випуск 68. С. 85-86.

11. Кропивницький Д. Р., Кропивницький В. Р. Формалізація процесу механічного буріння при використанні гвинтових вибійних двигунів. *Нафтогазова енергетика*: тези доп. міжн.-техн. конф., 21-24 вересня 2021 р. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. С. 50-51.

12. Кропивницький Д. Р. Взаємозв'язок кутової швидкості асинхронного двигуна та тиску промивальної рідини при ГВД-бурінні. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості ІТОТП 2022*: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. аспірантів, молодих вчених і студентів, 13 жовтня 2022 р. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2022. С. 100-102