

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОПИСТИНСЬКИЙ ЛЕВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.516.77: 622.24.054

ДИСЕРТАЦІЯ
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ
НАВАНТАЖЕННЯМ ЕЛЕКТРОБУРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
МЕТОДУ КОРИГУВАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Галузь знань 15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Л. О. Копистинський

Науковий керівник: **Семенцов Георгій Никифорович**, доктор технічних наук,
професор

Івано-Франківськ – 2018

АНОТАЦІЯ

Копистинський Л. О. Автоматизація процесу керування навантаженням електробурів з використанням методу коригування структури системи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018.

У дисертаційному дослідженні вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності процесу буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин електробурами, що досягається розробленням системи адаптивного управління із змінною структурою, з урахуванням апріорної та поточної невизначеності об'єкта керування щодо його параметрів і структури.

Здійснено аналіз сучасних методів синтезу керувальних впливів в бурінні і тенденцій світової автоматики щодо існуючих підходів до проблеми автоматизованого управління бурінням свердловин електробурами. Подано характеристику процесу буріння свердловин електробурами як об'єкта керування.

Проаналізовано існуючі методи і засоби автоматизації процесу буріння свердловин електробурами. Виявлено, що на даний момент немає систем автоматизації, які забезпечують ефективне управління цим процесом при бурінні похило-скерованих і горизонтальних свердловин в умовах апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта керування.

Розглянуто і проаналізовано систему автоматизованого управління режимами буріння нафтових і газових свердловин електробурами. Показано, що для підвищення ефективності управління доцільно здійснювати адаптацію системи до зміни геосередовища шляхом використання додаткового блока адаптації, побудованого на засадах Fuzzy Logic.

За результатами аналізу сформульована загальна постановка задачі, що дало змогу запропонувати узагальнену функціональну структуру системи автоматизованого керування бурінням свердловин електробурами та сформулювати

математичну модель об'єкта керування. Досліджено вплив різних механічних характеристик долота на сумісну механічну характеристику електробура та отримано інформаційні моделі, що дозволяє використати їх у системі on-line моніторингу, для оптимального руйнування породи.

З'ясовано причини нестабільності роботи електробурів, що дало змогу виявити причини зміни їх параметрів, з'ясувати які еквівалентні параметри системи змінюються і що змінюється в об'єкті керування.

На основі аналізу методів адаптивного і робастного керування вибрано спосіб адаптації системи керування процесом буріння свердловин електробурами, який ґрунтується на зміні структури системи за допомогою додаткового блока адаптації, який дозволяє змінювати керовану величину в залежності від умов буріння.

На засадах методів Fuzzy Logic і діаграм Вейча розроблено правила зміни структури блока адаптації, за яких система керування набуває властивості пристосовуватися до мінливості параметрів та характеристик електробура і навколишнього середовища, що дозволило отримати характеристичне поле та синтезувати структурні схеми блока адаптації на елементах базису І, АБО, НІ.

Отримано рівняння, що визначає рівні коригувальних сигналів додатних зворотних зв'язків за частотою обертання долота і глибиною свердловини, які повинні бути введені в систему автоматичного регулювання потужності двигуна електробура. Це дало змогу синтезувати структури адаптивної системи керування процесом буріння свердловин електробурами з урахуванням інформації про орієнтування бурового інструменту.

На основі реалізації процедури послідовного R/S-аналізу проаналізовано фрактальні розмірності та показники Херста для таких параметрів і показників процесу буріння свердловини електробурами: осьового навантаження на долото; струму навантаження двигуна електробура; потужності, що споживає двигун електробура; механічної швидкості буріння; часу, що витрачається на буріння 1 м свердловини; питомих витрат енергії. Виявлено, що найбільшу силу тенденції

мають питомі витрати енергії, струм, потужність, яку споживає двигун електробура і час, витрачений на буріння 1 м свердловини.

Аналіз досліджуваних часових рядів показав, що вони є персистентними і процесу буріння властива трендовість. Це явище запропоновано використати для вирішення завдань раннього виявлення відхилень технологічного процесу від норми в реальному часі.

Оцінено автокореляційні впливи досліджуваних часових рядів, що підтверджує трендостійкість даних рядів. Така тенденція буде продовжена у майбутньому впродовж певного відрізка часу. Це сприяє вирішенню завдань системи адаптивного управління процесом буріння свердловин електробурами шляхом зміни структури системи.

Використано алгоритм Фаррара-Глобера для виявлення явища мультиколінеарності між показниками процесу буріння свердловин електробурами. Встановлено зв'язок між досліджуваними параметрами процесу буріння в різні моменти часу за допомогою автокореляційної функції та функції спектральної щільності. Автокореляційні функції підтвердили, що досліджуваний процес є стаціонарним та ергодичним. Оскільки існує щільний зв'язок між досліджуваними параметрами, то запропоновано використовувати для автоматичного керування процесом буріння електробурами один із досліджуваних параметрів – струм навантаження двигуна електробура або потужність, яку споживає електробур.

Запропоновано метод трансформації автоматизованої системи управління процесом буріння свердловин, який побудований на засадах бази правил Мамдані-типу, що дозволить значно покращити ефективність функціонування системи підтримки процесів прийняття рішень щодо оптимізації управління даним процесом.

На основі аналізу стійкості і показників якості системи автоматичного регулювання процесом буріння глибоких свердловин електробурами, яка має змінну структуру, доведено, що найбільш раціональною є структура, яка забезпечує автоматичну стабілізацію активної потужності двигуна електробура.

Система у цьому випадку є робастною за показниками запасу стійкості і коливальності. Із збільшенням глибини свердловини доцільним буде перехід на автоматичне регулювання потужності на валі двигуна електробура, замість регулювання осевого навантаження на долото.

Синтезовано структуру FL-блока адаптації для визначення необхідних керувальних дій на основі бази правил Мамдані-типу про показники процесу буріння вертикальних і похило-скерованих свердловин електробурами. Використання FL-блока адаптації в автоматизованій системі управління процесом буріння дозволяє скоротити час адаптації процесу до змін умов буріння порівняно з тривалістю операцій, що виконує бурильник.

Запропоновано удосконалену структуру системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами, яку можна використовувати для буріння нафтових і газових свердловин, а також на сланцевий газ. Вона передбачає статичну оптимізацію процесу поглиблення свердловини на основі поточної інформації даних геолого-технічного наряду, що закладені в локальну базу даних, та архівних даних, що містяться в базі даних.

Розроблено функціональну структурну систему для керування процесом буріння свердловини, за допомогою якої оптимізується вибір режиму буріння та покращується процес керування бурінням. Для цього запропоновано підтримувати такі параметри як осьове зусилля на долото або активну потужність двигуна електробура. Зміну керованої величини з осевого зусилля на активну потужність двигуна електробура запропоновано здійснювати при переході долота на горизонтальні ділянки свердловини за командою від блока адаптації. Система обробляє подану поточну інформацію з пульта управління із бази даних та від давачів ваги колони бурильних труб й активної потужності електробура. Алгоритм керування забезпечує статичну оптимізацію процесу буріння шляхом пошуку оптимальних значень керувальних дій згідно з критерієм оптимізації – мінімумом собівартості метра проходки.

Забезпечення ефективності системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин електробурами здійснюється шляхом пошуку оптимального

режиму буріння, а також швидкою перебудовою з одного режиму на інший у зв'язку зі зміненими умовами. З підвищенням якості процесу керування знижуються витрати на буріння свердловини.

Основні положення дисертаційної роботи успішно апробовані та впроваджені.

Ключові слова: автоматизоване управління, буріння, електробур, синтез, Fuzzy Logic, адаптивна система, база правил Мамдані-типу.

ABSTRACT

Kopystynskyy L. O. Automation of the process for controlling the loading of electric drills using the method of the system structure adjusting. – The qualification scientific work on the manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences (a Doctoral Degree in Philosophy), specialties 05.13.07 – Automation of Control Processes. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2018.

The thesis is devoted to the research of the urgent scientific and applied task to increase efficiency of the drilling process in sloping and horizontal wells with electric drills that is achieved by developing an adaptive control system with an alternating structure, taking into account the prior and current uncertainty of the control object concerning its parameters and structure.

The analysis of modern methods of synthesis of driving influences in drilling and trends of world automation is carried out having involved existing approaches to the problem of automated drilling control with electric drills. The characteristic of the wells drilling process with electric drills is given as a control object.

The existing methods and means of automation of the drilling wells process with electric drills are analyzed. It is revealed that at the moment there are no automation systems to provide efficient control of this process when drilling horizontal and sloping wells under prior and current uncertainty as to the structure and parameters of the control object.

The system for automated control of modes of oil and gas wells drilling with electric drills is considered and analyzed. In order to improve the efficiency of management it is required to adapt the system for changing the geo-environment by using an additional adaptation block based on Fuzzy Logic.

According to the results of the analysis a general statement of the problem is developed, which enables to propose a generalized functional structure of the automated control system of wells drilling with electrodrills and to form a mathematical model of the control object. The influence of different mechanical characteristics of the bit on the joint mechanical characteristics of electric drill is studied and information models are obtained that could be used in the on-line monitoring system for optimal rock destruction.

The reasons for the instability of the electric drill operation were identified, which made it possible to find out the reasons for changing their parameters as well as changes in the equivalent system parameters and the control object.

Based on the analysis of adaptive and robust control methods, the method of adapting the control system of the drilling process with electric drills is chosen, which is formed on changing the system structure by the means of an additional adaptation unit, which enables to change the controlled value depending on the drilling conditions.

On the basis of Fuzzy Logic and Weich diagrams, the rules for changing the structure of the adaptation block are developed, according to them the control system gets properties to adapt to parameters and characteristics alternation of an electrodrill and the environment, which allows to obtain a characteristic field and synthesize the structural schemes of the adaptation block on the elements of the basis AND, OR, NO.

The obtained equation determines the levels of corrective signals of positive feedback on the frequency of the bit rotation and the well depth, which must be introduced into the automatic control system of the electric engine power. This enables to synthesize the structures of an adaptive system for managing the process of drilling wells with electric drills, taking into account the information about the positioning of the drilling tool.

Based on the implementation of the sequential R/S analysis procedure, the fractal dimensions and Hurst parameters were analyzed for such parameters and characteristics of the well drilling process with electric drills as: axial load on the bit; current of electric engine load; the power consumed by the electric drill engine; mechanical speed of drilling; time used for drilling 1 m well; specific energy consumption. The specific energy consumption, current, power consumed by the electric drill engine and the time spent on drilling 1 m well proved to be the most important tendencies.

The analysis of the studied time series showed that they are persistent and the process of drilling is inherent in trend. This phenomenon is proposed to be used to solve the problems of early detection of deviations of the technological process from the norm in real time.

Autocorrelation influence of the investigated time series is estimated, which confirms trend stability of the series. This trend will continue in the future over a certain period of time. It contributes to solving tasks of adaptive control system in the drilling process with electro drills when modifying the system structure.

The Farrar-Glauber algorithm is used to detect phenomena of multicollinearity between the indexes of the drilling process with electric drills. By the means of the autocorrelation function and the spectral density function the connection between the investigated parameters of the drilling process at different moments of time is established. Autocorrelation functions have confirmed that the research process is stationary and ergodic. Since there is a tight connection between the studied parameters, it is proposed to use one of the studied parameters - current of engine load electro drill or power consumed by an electro drill for automatic control of drilling with electro drills.

The method of transformation of the automated system of management of the well drilling process is proposed based on the principles of the Mamdani-type rules base, which will significantly improve the efficiency of the operation of the decision processes support system to optimize management of the given process.

On the basis of the analysis of stability and quality indicators for the automatic regulation system of the drilling process of deep wells with electric drills, which has a

variable structure, that the most rational structure is proved to be one, which provides automatic stabilization of the active power of the electric drill engine. In this case the system is robust in terms of stability and volatility. With an increase in well depth, it would be advisable to use automatic power control on the shaft of the electric drill engine, instead of adjusting the axial load on the bit.

The structure of the FL-unit of adaptation is synthesized to determine the necessary control actions based on the set of the Mamdani-type rules concerning the parameters of the drilling process of vertical and sloping wells with electric drills. The use of the FL-adaptation unit in the automated drilling control system reduces the process adaptation time to changes in drilling conditions compared to the duration of operations performed by the driller.

The advanced structure of the automated control system for the process of drilling wells with electric drills is proposed, which can be used for drilling oil and gas wells, as well as shale gas. It involves static optimization of the process of deepening the well on the basis of current geological and technical data, incorporated into the local database, and archival data contained in the database.

The functional structural system for managing the well drilling process has been developed, which optimizes the choice of drilling mode and improves the drilling control process. To do this, it is suggested to maintain such parameters as the axial force on the bit or the active power of the electric drill engine. A change in the controlled magnitude of the axial force on the active power of the electric drill engine is proposed to be carried out when the bit is used in horizontal wells according to the order given from the adaptation unit. The system processes the current information from the remote control from the database and from the sensors of the column weight of the drill pipe and the active power of the electric drill. The control algorithm provides static optimization of the drilling process by finding the optimal values of control actions in accordance with the optimization criterion - the minimum cost of the meter of the penetration.

Ensuring the efficiency of the system of automated control for the process of drilling wells with electric drills is carried out by finding the optimal drilling mode, as

well as rapid rebuilding from one mode to another due to changed conditions. With increasing quality of the control process, the cost of drilling wells is reduced.

The main provisions of the thesis have been successfully tested and implemented.

Keywords: automated control, drilling, electric drill, synthesis, Fuzzy Logic, adaptive system, set of Mamdani-type rules.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Копыстинский Л., Кропуньська В., Лагойда А., Сементсов Г. Analysis of Interrelations Between the Criteria Of Optimal Control Over The Process of Drilling the Wells. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2/3 (86) : Control Processes. 2017. P. 40-50. ISSN 1729-3774 (індексується та реферується наукометричними базами Scopus, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus та ін.).

2. Кропуньська В., Копыстинский Л., Сементсов Г. Development of a Set of Methods for Preforecasting Fractal Time Series Analysis to Determine the Level of Persistence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3/4 (87) : Mathematics and Cybernetics. Applied Aspects. 2017. P. 10-17. ISSN 1729-3774 (індексується та реферується наукометричними базами Scopus, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus та ін.).

3. Копистинський Л. О. Сумісні механічні характеристики електробурів і доліт. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ. 2017. № 2(28). С. 95-102. ISSN 1993-9868.

4. Копистинський Л. О. Синтез структури цифрового логічного пристрою для підтримання процесів прийняття рішень у системі адаптивного управління бурінням свердловин електробурами. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. Івано-Франківськ. 2017. № 4(65). С. 55-58. ISSN 1993-9973.

5. Гутак О. В., Головата Ю. Б., Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Сучасний підхід до побудови систем оптимального керування технологічними

комплексами у нафтогазовій галузі промисловості. *Нафтогазова енергетика* 2(20). Івано-Франківськ, 2013. С. 117-127. ISSN 1993-9868.

6. Семенцова А. О., Копистинський Л. О. Методи і прилади контролю енергетичних параметрів ефективності буріння свердловин електробурами. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 2(35). С. 181-188. ISSN 1993-9965.

7. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О., Данилів А. Р. Аналіз мультиколінеарності незалежних змінних та її впливу на оцінки параметрів математичних моделей багатовимірних об'єктів. *Наука и инновации в современном мире : Техника и технологии. Книга 2. Глава 9. Монография. Одесса : Куприенко С. В., 2017. С. 137-149.*

8. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Показники якості автоматичних систем регулювання режимів буріння нафтових і газових свердловин електробурами. *Naukowa mysl informacyjnej powieki. Przemysł*, 2014. С. 21-28.

9. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О., Гутак О. В. Автоматична система зі змінною структурою для керування процесом буріння свердловин електробурами. *Wykształcenie i nauka bez granic – 2013 : Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 7-15 grudnia 2013. Przemysł : Nauka i studia, 2013. Vol.47. С. 29-36.*

10. Семенцова А. О., Годлевська К. С., Копистинський Л. О. Удосконалення характеристик занурного частотно-регульованого електропривода. *Naukowa Przestrzeń Europy – 2013 : Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 7-15 kwietnia 2013. Przemysł : Nauka i studia, 2013. Vol. 47. С. 78-84.*

11. Семенцова А. О., Плитус А. В., Копистинський Л. О., Гутак О. В. Результати аналізу статистичних характеристик моменту на долоті при бурінні свердловин електробурами. *Dny vědy – 2013 : Materiály IX Mezinárodní vědecko - praktická konference. Praha, 2013. С. 61-69.*

Праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Копистинський Л. О. Метод трансформації автоматизованої системи управління процесом буріння свердловин як стохастично-хаотичним об'єктом, що

розвивається в часі. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : 3-я Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 10-13 жовтня 2017. Івано-Франківськ, 2017. С. 10-13.

13. Копистинський Л. О. Управління процесом буріння з інтелектуальною підтримкою процесів прийняття рішень. *Автоматика – 2017* : XXIV Міжнародна конф. з автоматичного управління, 13-16 вересня 2017. Київ, 2017. С. 155-156.

14. Копистинський Л. О., Кропивницька В. Б. Керування процесом буріння свердловин на засадах енергоінформаційного підходу. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2017* : III Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 19-20 квітня 2017. Київ, 2017. С. 23-24.

15. Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Робастне і адаптивне керування технологічним процесом поглиблення свердловин електробурами. *Автоматизація, контроль та управління* : пошук ідей та рішень АКУ-2016, 23-27 травня 2016. Покровськ, 2016. С. 39-40.

16. Гутак О. В., Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Адаптація математичної моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами в реальному часі. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2016* : III Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 20-21 квітня 2016. Київ, 2016. С. 36-37.

17. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Пристрій для контролю потужності на валі двигуна електробура. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання* : 5-а наук.-практ. конф. студентів і молодих учених. Івано-Франківськ, 2015. С. 100-102.

18. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Система автоматизованого керування процесом буріння свердловин електробурами. *Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології* : Збірка доповідей Міжрегіональної наук.-практ. конф. молодих учених, 16-17 листопада 2015. Красноармійськ, 2015. С. 197-199.

19. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Система керування із змінною структурою для оптимізації процесу буріння свердловин електробурами.

Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості : Матеріали II всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 6-9 жовтня 2015. Івано-Франківськ, 2015. С. 56-57.

20. Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Визначення оптимальних параметрів режиму буріння методом бар'єрних функцій. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2014* : I Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 16-17 квітня 2014. Київ, 2014. С. 7-8.

21. Копистинський Л. О. Fuzzy-підхід до контролю моменту на валу бурових механізмів. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання* : 4-а наук.-практ. Конф. студентів і молодих учених. Івано-Франківськ, 2013. С. 82.

22. Копистинський Л. О. Огляд каналів зв'язку для передачі інформації з вибою свердловини у процесі буріння. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : Всеукраїнська наук.-практ. конф. аспірантів, молодих учених і студентів, 8-11 жовтня 2013. Івано-Франківськ, 2013. С. 22-25.

23. Семенцов Г. Н., Гутак О. В., Головата Ю. Б., Копистинський Л. О. Новітній підхід до побудови систем керування нового покоління з принципово іншими показниками якості. *Нафта і газ України* : 9-а Міжн. наук.-практ. конф. Яремче, 2013. С. 116-117.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ.....	23
1.1 Характеристика об'єкта керування	23
1.2 Аналіз методів та технічних засобів автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами	39
1.2.1 Регулятори подачі долота.....	39
1.2.2 Контроль кута нахилу свердловини, азимута і положення відхилювача	43
1.2.3 Методи автоматизованого управління буровою установкою	50
1.3 Вибір методу та аналіз проблем, що виникають під час побудови адаптивних систем керування із змінною структурою	56
1.4 Вибір та обґрунтування напряму досліджень	63
РОЗДІЛ 2	
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АДАПТИВНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ	65
2.1 Загальна постановка задачі адаптивного керування	65
2.1.1 Обґрунтування необхідності адаптації в автоматизованій системі управління процесом буріння свердловин електробурами.....	65
2.1.2 Математична модель об'єкта керування	69
2.1.3 Механічні характеристики занурного електродвигуна, долота і сумісні механічні характеристики електробура	75
2.2 Причини нестабільності роботи електробурів	82
2.3 Вибір способу адаптації	90
2.3.1 Класифікація задач оптимального керування	90
2.3.2 Класифікація задач і методів адаптивного керування	92
2.4 Розроблення правил зміни структури блоку адаптації	96
2.4.1 Обґрунтування вибору параметрів, що є основними для розроблення правил зміни структури керувального пристрою	96

2.4.2 Вибір кількості термів для нечіткого опису базових змінних в F -перетворенні осьового навантаження на долото $F(t)$ і потужності двигуна електробура $P(t)$	101
2.5 Синтез функціональної структури адаптивної системи керування процесом буріння свердловин електробурами	113
Висновки до розділу 2	119
РОЗДІЛ 3	
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ	
3.1 Розроблення методу передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів для визначення рівнів персистентності показників процесу буріння свердловин електробурами	121
3.1.1 Постановка задачі передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів.....	121
3.1.2 Практичне застосування сукупності методів визначення рівнів персистентності параметрів і показників процесу буріння свердловин електробурами	124
3.2 Аналіз мультиколінеарності (МК) показників процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами	127
3.3 Метод трансформації автоматизованої системи управління процесом буріння свердловин як стохастично-хаотичним об'єктом, що розвивається в часі	134
3.4 Автоматична система зі змінною структурою для керування процесом буріння свердловин електробурами	137
3.5 Показники якості автоматичних систем регулювання режимів буріння нафтових і газових свердловин електробурами.....	142
Висновки до розділу 3	147

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ	150
4.1 Синтез структури FL-блока адаптації для визначення необхідності керувальних дій на основі бази знань користувача про параметри процесу буріння.....	150
4.2 Розроблення функціональних схем, алгоритмів і приладів контролю енергетичних показників ефективності процесу буріння свердловин електробурами	153
4.3 Удосконалена структура системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами	169
Висновки до розділу 4	171
ВИСНОВКИ.....	172
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	175
ДОДАТКИ	193

ВСТУП

Актуальність теми. Накопичений в Україні досвід буріння електробурами похило-скерованих, горизонтальних та розгалужено-горизонтальних свердловин свідчить, що цей перспективний спосіб буріння характеризується якісно новими особливостями. Насамперед, це зумовлено необхідністю оперативного контролю траєкторії ствола свердловини з метою зменшення ймовірності відхилення його від проектного профілю, а також труднощами передачі необхідних для ефективного руйнування порід осьових навантажень на долото внаслідок підвищеного тертя бурильної колони об стінки свердловини.

Оскільки в даних умовах буріння можливостей осьових навантажень як керувальних впливів недостатньо для досягнення мети управління (стабілізації заданого навантаження на долото), то виникає необхідність переходу до нової структури системи автоматичної подачі долота з іншою метою управління, тобто стабілізацією потужності, яку споживає двигун електробура.

Складається ситуація, що є більш невизначеною порівняно з автоматичною стабілізацією осьового навантаження на долото при бурінні вертикальних свердловин. Тому, перш ніж планувати і управляти переходом до нової структури системи управління бурінням, необхідно сформулювати мету. Визначення нової мети керування процесом буріння електробурами входить до циклу управління і має вирішуватися за безпосередньої участі бурильника.

Для управління процесом поглиблення свердловини система управління повинна мати властивість самонавчання з короткотерміновим прогнозуванням та можливість формування нового циклу прийняття рішень щодо можливої зміни структури. Вирішити проблему адаптації системи управління бурінням до виниклих змін геосередовища можливе, якщо представити її як елементарний крок у процесі її трансформаційного розвитку і пристосувань до спонтанних змін геосередовища. Така адаптація системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами до конкретних геолого-технологічних умов є важливою науково-прикладною задачею, розв'язок якої особливо актуальний для

нафтогазовидобувної галузі промисловості України, оскільки дозволяє забезпечити надійний підбір оптимального сполучення параметрів режиму буріння навіть в умовах, коли змінюється геосередовище, а також – контролювати осьове навантаження на долото під час буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин за потужністю, яку споживає двигун електробура, а отже, зменшити енерговитрати на процес поглиблення свердловини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу автор виконував відповідно до основного наукового напрямку діяльності кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ).

Науковою базою дисертації стали результати, отримані в процесі виконання науково-дослідних робіт, здійснених за планами наукових досліджень ІФНТУНГ у рамках держбюджетних тем: «Розробка теоретичних основ і математичного забезпечення систем автоматизованого управління технологічними процесами галузі» (затв. Науковою радою ІФНТУНГ 07.10.2010 р. пр. № 8), «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР № 011U005890).

У межах зазначених тем дисертант був безпосереднім виконавцем розділів робіт, пов'язаних з розробленням і дослідженням адаптивної системи управління процесом буріння свердловин електробурами із змінною структурою.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин електробурами, що досягається розробленням системи адаптивного управління із змінною структурою, з урахуванням апріорної та поточної невизначеності об'єкта керування щодо його параметрів і структури.

Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням таких основних завдань:

- аналізування сучасних методів автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами;

- дослідження фрактальної розмірності і показника Херста для параметрів та показників процесу буріння свердловин електробурами і виявлення персистентності досліджуваних часових рядів та встановлення ступеня мультиколінеарності між енергетичними показниками процесу;

- розроблення бази правил зміни структури для блока адаптації, за яких автоматизована система управління набуває властивості пристосовуватися до мінливості параметрів та характеристик електробура і геосередовища;

- удосконалення структури системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами, аналізування стійкості і показників якості, а також синтезування фази-блока адаптації для визначення необхідних керувальних дій на основі бази знань користувача про параметри процесу буріння.

Об'єктом дослідження є технологічний процес буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин електробурами, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта керування.

Предметом дослідження є автоматизовані системи управління процесом буріння свердловин електробурами.

Методи дослідження

В основу досліджень покладено методи теорії автоматичного керування для визначення функцій передачі, аналізу стійкості систем, показників якості; метод послідовного *R/S*-аналізу – для ідентифікації хаотичних послідовностей за допомогою показника Херста *H*; методи математичної статистики – для дослідження ергодичності динамічних процесів; метод Мандельброта-Хадсона – для фрактального аналізу часових рядів; автокореляційний аналіз – для з'ясування ступеня статистичного зв'язку між різними значеннями випадкової послідовності, яку створює поле вибірки даних; методи схемо- та системотехніки покладені в основу розроблення структури адаптивної системи управління; методи алгебри логіки і Fuzzy Logic – для синтезу блока адаптації.

Вірогідність дослідження підтверджується коректною математичною постановкою завдань, що охоплюють раніше виконані дослідження в галузі розроблення автоматизованих систем управління процесом буріння свердловин

електробурами, обґрунтованим використанням окремих положень фрактального аналізу часових рядів, методу послідовного *R/S*-аналізу, теорії автоматичного керування, методу Fuzzy Logic; адекватністю розроблених моделей реальному технологічному процесу; задовільною збіжністю результатів теоретичних досліджень; використанням достатнього за обсягом статистичного матеріалу.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше:

- на основі послідовного *R/S*-аналізу визначено фрактальні розмірності і показники Херста для таких параметрів та показників процесу буріння свердловин як осьове навантаження на долото; струм навантаження електробура; потужність, яку споживає двигун електробура; механічна швидкість буріння; питомі витрати енергії; час, витрачений на буріння 1 м свердловини, що дозволило зробити висновок, що досліджувані часові ряди є персистентними;

- за допомогою алгоритму Фаррара-Глобера встановлено зв'язки між досліджуваними параметрами процесу буріння в різні моменти часу та їх ступінь мультиколінеарності, що дозволило запропонувати використовувати для автоматичного керування процесом буріння свердловин електробурами потужність, яку споживає двигун електробура;

- на засадах методів Fuzzy Logic і діаграм Вейча розроблено правила зміни структури блока адаптації, за яких автоматизована система управління бурінням набуває властивості пристосовуватися до мінливості параметрів та характеристик електробура і навколишнього геосередовища, що дозволило отримати характеристичне поле та синтезувати структурні схеми блоків адаптації на засадах Fuzzy Logic і на елементах базису I, АБО, НІ.

Удосконалено:

- структуру системи автоматизованого управління процесом буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин електробурами з урахуванням FL-блока адаптації і додатних зворотних зв'язків за частотою обертання долота і глибиною свердловини, що дає змогу визначити необхідні керувальні дії на основі бази знань користувача про параметри процесу буріння і поточних даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблено метод коригування структури автоматизованої системи управління буріння електробурами, який дозволяє оперативно змінювати структуру системи управління під час буріння похило-скерованих, горизонтальних та розгалужено-горизонтальних свердловин.

Запропонований метод інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень і практичні рекомендації щодо адаптивного управління шляхом зміни структури системи управління процесом буріння свердловин електробурами прийняті до впровадження на підприємствах ТзОВ «МІКРОЛ» (Акт від 7.11.2017 р.), ТзОВ СКБЗА (Акт від 20.11.2017 р.), Стрийського ВБР (Акт від 6.10.2017 р.) та Прикарпатського УБР (Акт від 23.10.2017 р.); впроваджені в навчальний процес кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ІФНТУНГ (акт від 9.10.2017 р.) для студентів спеціальності 6.050202 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології в дисциплінах «Автоматизація технологічних процесів і виробництв», «Основи комп'ютерно-інтегрованих технологій», «Нечіткі системи контролю» та для студентів спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології при виконанні магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною завершеною роботою автора. Всі положення, що виносяться на захист, отримані автором особисто. Теоретичне обґрунтування, наукові результати, практичні розробки, висновки та рекомендації, що висвітлені в роботі, належать автору і є його теоретичним та практичним внеском у розвиток автоматизації процесів керування в бурінні. Внесок автора в роботи, що виконані у співавторстві, наведено у списку опублікованих праць.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і одержали позитивну оцінку на: 3-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (Івано-Франківськ 2017 р.); XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2017» (Київ 2017 р.); 4-ій Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів

«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2017» (Київ 2017); II Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень» (Красноармійськ 2016 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2016» (Київ 2016 р.); 5-ій науково-практичній конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ 2015 р.); II Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (Івано-Франківськ 2015 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2014» (Київ 2014 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції аспірантів, молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (Івано-Франківськ 2013 р.); 4-ій науково-практичній конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ 2013 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації автором опубліковано 23 роботи, з яких 6 написаних без співавторів. У тому числі 6 у наукових фахових виданнях (2 – у наукометричній базі Scopus), 1 – у монографії, 16 – у матеріалах міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Обсяг дисертації – 236 сторінок. Дисертація містить 126 рисунків, 114 формул, 24 таблиці і 180 посилань на літературні джерела.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

1.1 Характеристика об'єкта керування

Енергетична стратегія розвитку нафтогазовидобувної промисловості України [1, 2] передбачає вирішення складних науково-технічних завдань, пов'язаних з роботами з освоєнням нових нафтових і газових родовищ та глибокозалеглих пластів. Для цього необхідно ширше розгорнути роботи з буріння нафтових і газових свердловин, збільшити середні швидкості буріння свердловин, обсяги розвідувального буріння, а також буріння глибоких і надглибоких свердловин.

Поставлені завдання можна вирішити як шляхом покращення технології буріння свердловин, так і шляхом створення нових, більш досконалих бурових установок, широкого впровадження автоматизації технологічних процесів і комп'ютерно-інтегрованих технологій. Використання сучасного обладнання і новітніх засобів автоматизації допоможе створити установки, що дозволить забезпечити високі швидкості проходки за мінімальних витрат по всій глибині свердловини.

Однак вирішення цього завдання потребує виконання ряду серйозних наукових досліджень у напрямі удосконалення способів буріння. Одним із найбільших перспективних способів буріння нафтових і газових свердловин є електробуріння (рис. 1.1) [4].

Занурний двигун електробура має ряд важливих переваг [3] порівняно з привідними двигунами інших типів, використовуваними в бурінні:

- безпосередній зв'язок двигуна електробура з долотом покращує технологію буріння;
- створюються сприятливі умови для автоматичного керування електробуром і для неперервного контролю за роботою занурного двигуна;

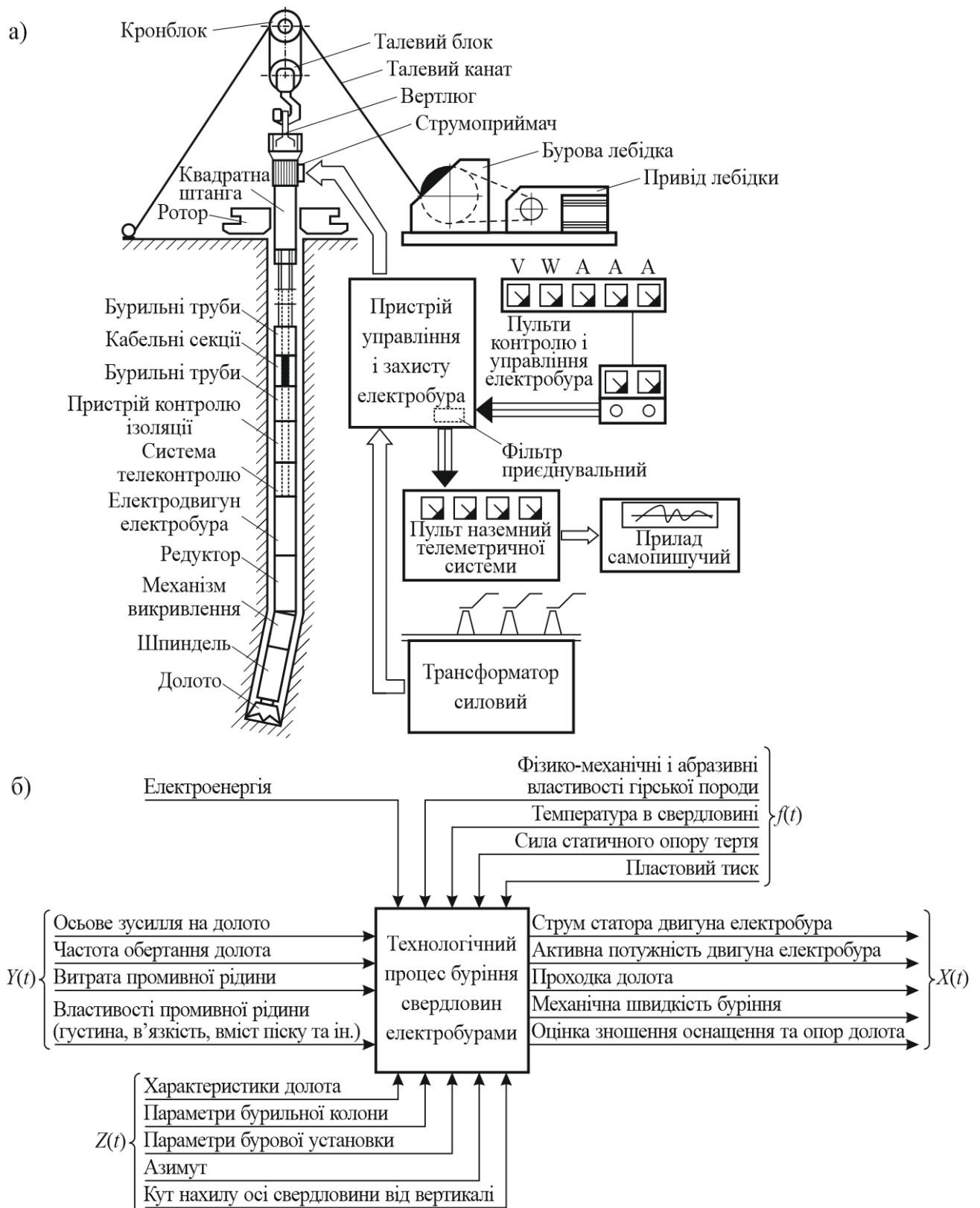


Рис. 1.1. Структура системи управління (а) та структура моделі (б) процесу буріння свердловин електробурами:

$Y(t)$ – керувальні дії на вході об'єкта; $Z(t)$ – некеровані параметри, що визначаються режимами буріння; $f(t)$ – збурювальні впливи; $X(t)$ – показники процесу буріння, що визначаються множиною вхідних параметрів

- спеціальна апаратура електробура і кабель дають змогу контролювати кривизну свердловини;

- робота двигуна електробура не залежить від якості і кількості промивальної рідини. Це сприяє ефективному застосуванню електробурів для буріння з промиванням обваженими розчинами і стисненим повітрям;

- збільшується термін експлуатації бурильних труб, зменшується витрата металу.

Спосіб буріння свердловин електробурами широко поширений не тільки в Україні, але й в Азербайджані, Туркменістані, Башкортостані (Росія) та інших країнах світу [4, 5]. Якщо основним недоліком перших електробурів була велика синхронна швидкість обертання двигуна (600÷1000 об/хв), то завдяки використанню редукторів швидкість обертання електробурів виробництва заводу «Потенціал» сьогодні складає 455÷690 об/хв (табл. 1.1) [9, 16].

Таблиця 1.1

Електробури для буріння нафтових і газових свердловин

Параметри	Діаметр електробура, мм				
	164	190	215	240	290
Діаметр використовуваного долота, мм	187,3 190,5	212,7 215,9	244,5	269,9 295,3	349,2 393,7
Глибина буріння, м	8000	6000	5000	5000	3500
Максимальне осьове навантаження, кН	250	300	350	400	450
Потужність електродвигуна, кВт	55 65	125	175	210	180
Крутний момент двигуна, кНм	0,39 0,90	1,7	2,4	2,8	3,78
Швидкість обертання, об/хв	675	675	680	690	455

Іншим недоліком електробуріння є висока аварійність системи струмопідводу, оскільки електроенергія подається на двигун за допомогою кабельних секцій, змонтованих у бурильних трубах (рис. 1.2, табл. 1.2)

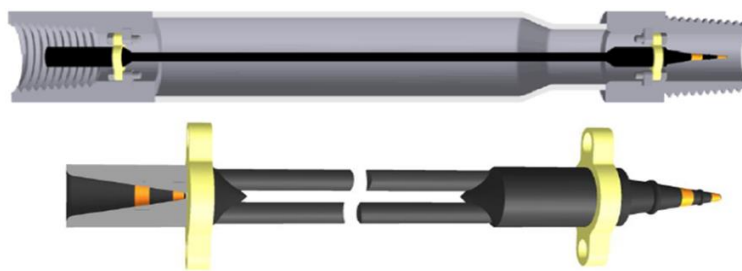


Рис. 1.2. Кабельна секція, що змонтована в бурильній трубі

Таблиця 1.2

Габаритні розміри кабельних секцій

Тип кабельної секції та модифікації	Вага, кг	Довжина, мм
КСТ1-ТГ	29	12260
КСТ1-ТГ-01	29	12310
КСТ1-ТГ-02	29	12420
КСТ1-ТГ-03	23	12260
КСТ1-ТГ-04	23	12310
КСТ1-ТГ-05	23	12420

Буріння трифазним електробуром вимагало створення трипровідного струмопідводу для з'єднання двигуна з поверхнею землі, що логічно, змушує забезпечити його чисельними штепсельними рознімами у місцях згвинчування окремих труб. Згодом ця система еволюціонувала в систему «два проводи – труба», де одним із проводів є колона бурильних труб [3].

Кабельні секції, що є складовою частиною поточного живлення двигуна, призначені для передачі електричної енергії від поверхні землі до електробура (система живлення «два проводи – труба») напругою до 3000 В та струмом 165 А з короткочасним збільшенням до 400 А. Їх можна експлуатувати під гідростатичним тиском до 115 МПа та за температури навколишнього середовища від -30 °С до +100 °С

Велика кількість контактних з'єднань призводить до частих пошкоджень струмопідводу, особливо при бурінні на великих глибинах, і створює великі гідравлічні опори в трубах та замкових з'єднаннях. Цих недоліків можна уникнути, якщо застосовувати колтубінгові бурові установки [4, 6] (рис. 1.3, 1.4, 1.5).

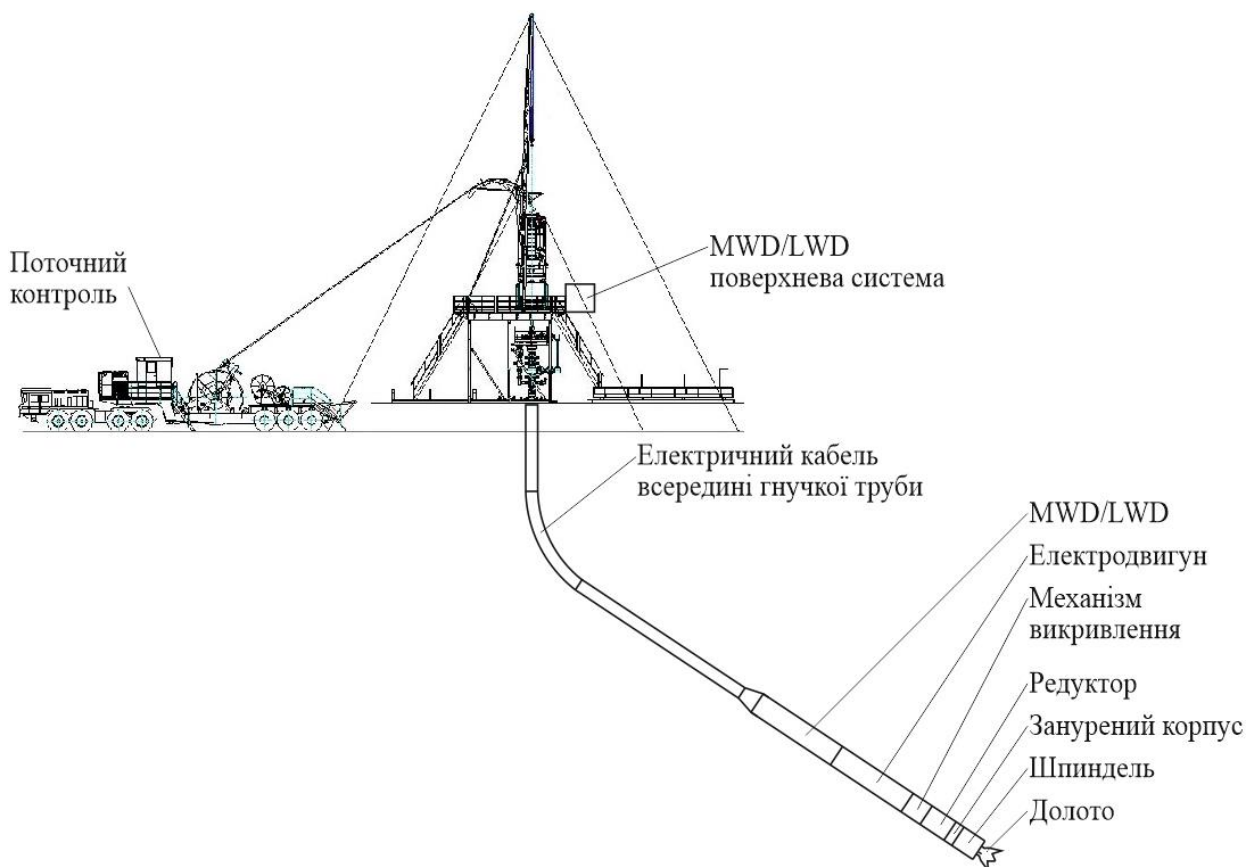


Рис. 1.3. Колтюбінгова бурова установка для буріння електробуром



Рис. 1.4. Приклад колтюбінгової бурової установки з діаметром труби 106 мм

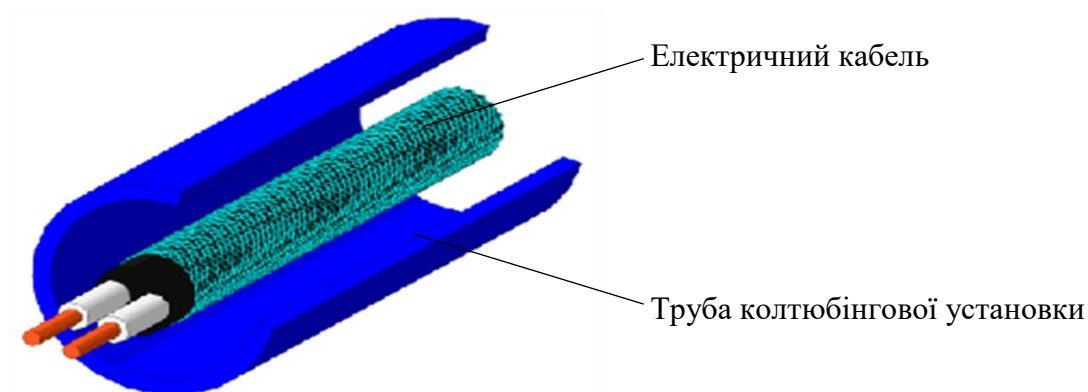


Рис. 1.5. Схема розташування електричного кабелю в трубі колтюрінгової установки

У ряді країн завдяки величезним технологічним зусиллям був розроблений і постійно вдосконалюється спосіб електробуріння із застосуванням гнучкого безперервного намотуваного трубопроводу (замість колони бурильних труб) – колтюрінгове буріння. Цей спосіб є намаганням обійти проблеми, пов'язані з наявністю численних штепсельних рознімів.

Створення нових колтюрінгових технологій буріння мало на меті такі цілі:

- підвищення надійності процесу буріння внаслідок відсутності безперервного обертання колони бурильних труб;
- будівництво похилених і навіть горизонтальних керовано-спрямованих свердловин (значення цього напрямку важко переоцінити в умовах буріння на морському шельфі, у важкопрохідних місцевостях; але збільшення віддачі нафтоносних пластів і в багатьох інших ситуаціях);
- впровадження найдосконалішого способу передачі енергії – електричного [3].

Конструкція сучасного електробура складається з електродвигуна та з'єднаних з ним редуктора та шпинделя. Електродвигун – це занурена оливнонаповнена високовольтна трифазна асинхронна електрична машина з короткозамкненим секційним ротором (рис. 1.6, рис. 1.7) [3].

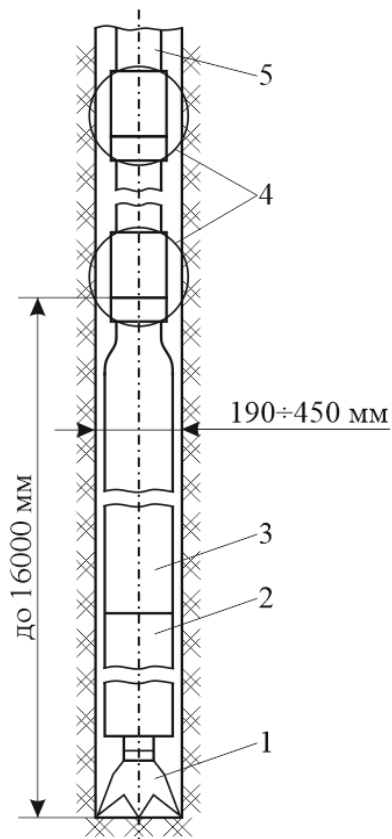
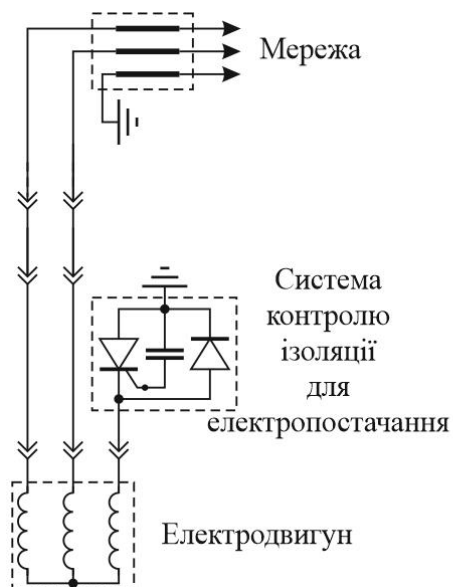


Рис. 1.6. Схема устави для буріння з занурним двигуном:

1 – долото; 2 – шпindelь (вальниця для передавання осьового тиску на вибій);
3 – двигун; 4 – замки труб; 5 – труба



**Рис. 1.7. Конструкція електродвигуна електробура і схема його живлення
«два проводи – труба»**

Живлення електробура здійснюється від мережі високої напруги $U=6$ кВ за допомогою додаткових трансформаторів напруги 6 кВ/0,4 кВ і 6 кВ/0,8÷2,4 кВ (рис. 1.8).

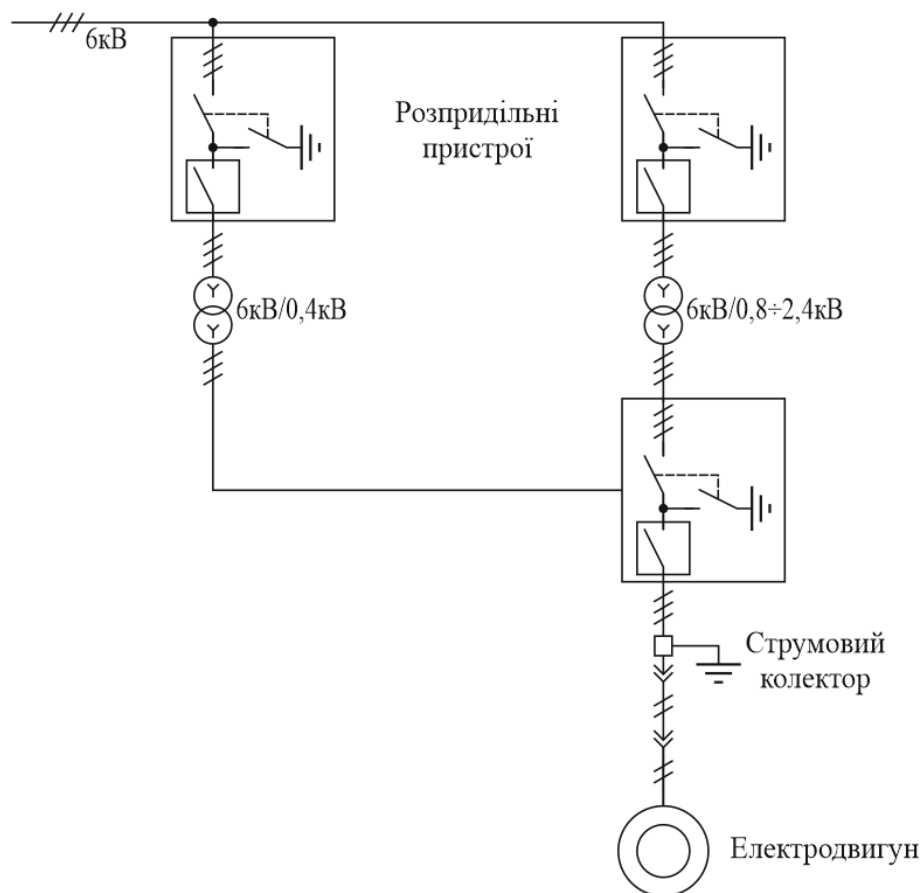


Рис. 1.8. Схема живлення електробура

Електроенергія на двигун подається за допомогою кабельних секцій, змонтованих у бурильних трубах. Характеристика двигуна електробура не залежить від його положення в просторі та глибини свердловини, на якій він перебуває. Це дає змогу передавати більше потужності на велику глибину і в надто викривлені свердловини [5].

Все це робить електробуріння особливо ефективним при спорудженні горизонтальних та глибоких свердловин, а також при проходці додаткових горизонтальних стовбурів у вже пробурених свердловинах [4, 5]. На рис. 1.9÷1.11 та табл. 1.3 і 1.4 наведено приклади вертикальних профілів свердловин: «1»-Донбас, «350»-Долина, «358»-Долина, «801»-Долина, пробурених за допомогою електробурів [4].

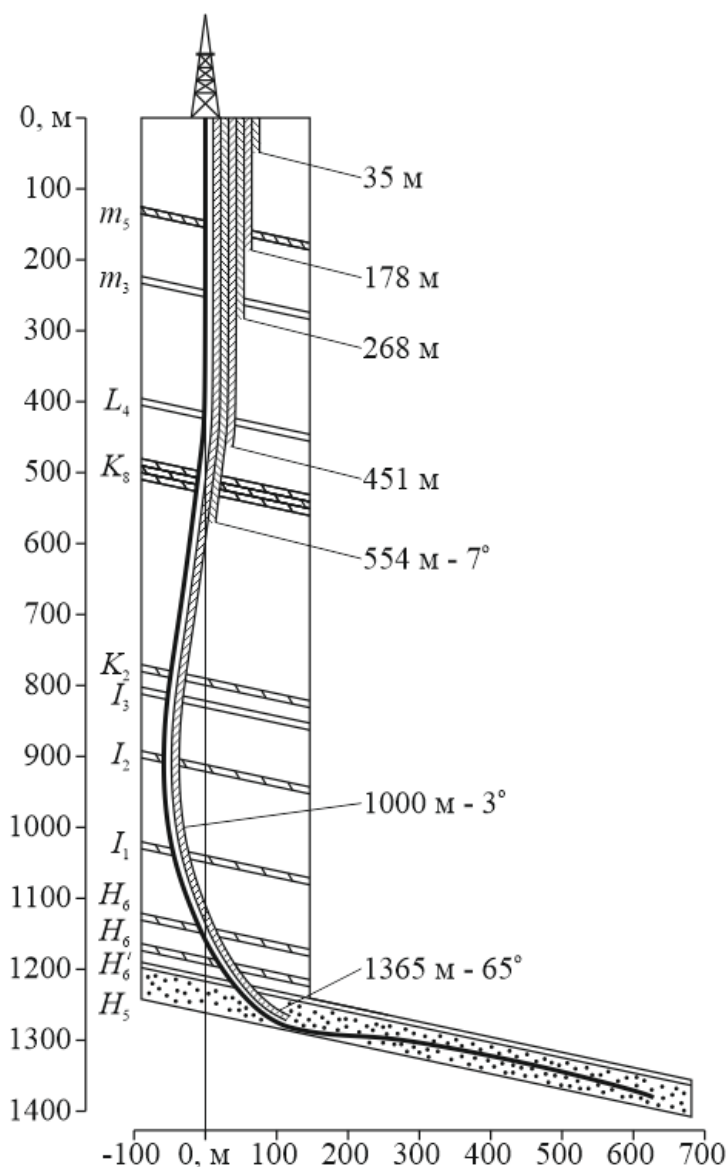


Рис. 1.9. Вертикальний профіль горизонтальної свердловини «1»-Донбас

Таблиця 1.3

Техніко-економічні показники для буріння свердловини «1»-Донбас

Характеристика	Значення
Довжина ствола	1870 м
Метод буріння: - роторне - електробуріння	0-451 м 451-1870 м
Горизонтальна довжина стовбура	525 м
Навантаження	95 т
Буріння свердловин за період включаючи горизонтальний стовбур	335 днів 84 днів
Загальні витрати на буріння	165 м/бурова установка·місяць

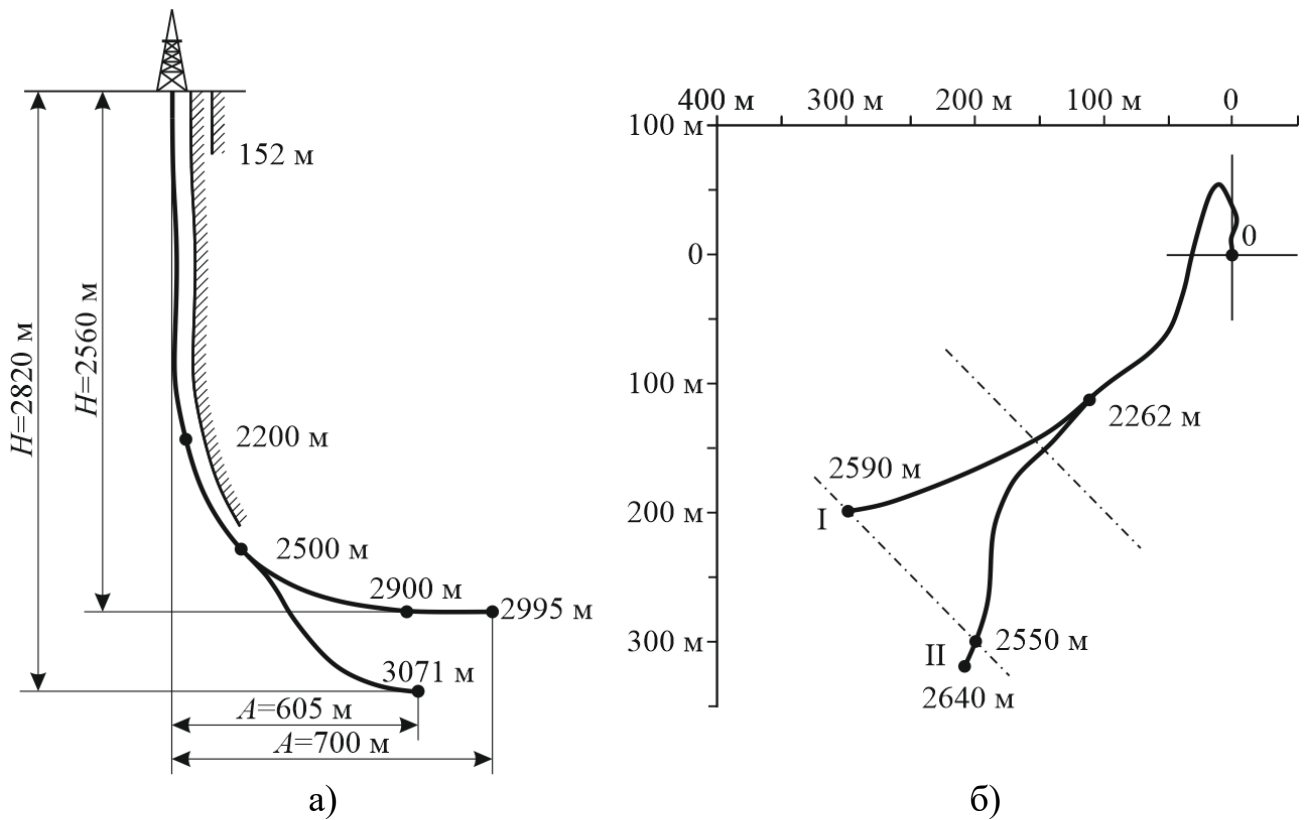


Рис. 1.10. Вертикальні профілі горизонтальних розгалужених свердловин:

а) «350»-Долина; б) «358»-Долина

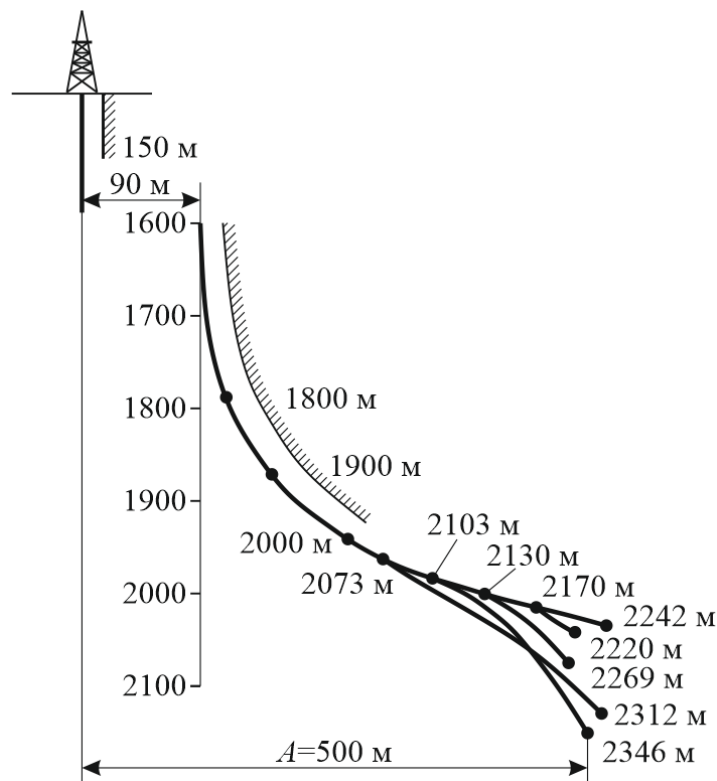


Рис. 1.11. Вертикальний профіль горизонтально розгалуженої свердловини

«801»-Долина

Техніко-економічні показники для буріння свердловини «801»-Долина

Характеристика	Значення
Глибина	2913 м
Кількість доліт	116 шт.
Проходка одним долотом	25,1 м
Швидкість проходки	2,6 м/год
Буріння свердловин за період включаючи горизонтальний стовбур	335 днів 84 дня
Загальна швидкість буріння	324 м/блок·місяць

Для контролю ефективності передачі енергії до вибою і напрямку буріння свердловини призначена надзвичайно складна телеметрична система під назвою Measuring While Drilling (MWD) – вимірювання під час буріння [3, 4]. За допомогою цієї системи (рис. 1.12) контролюють частоту обертання і момент на долоті, тиск на вибій, кути, що визначають траєкторію керовано-спрямованої свердловини, а також дані геофізичних досліджень.

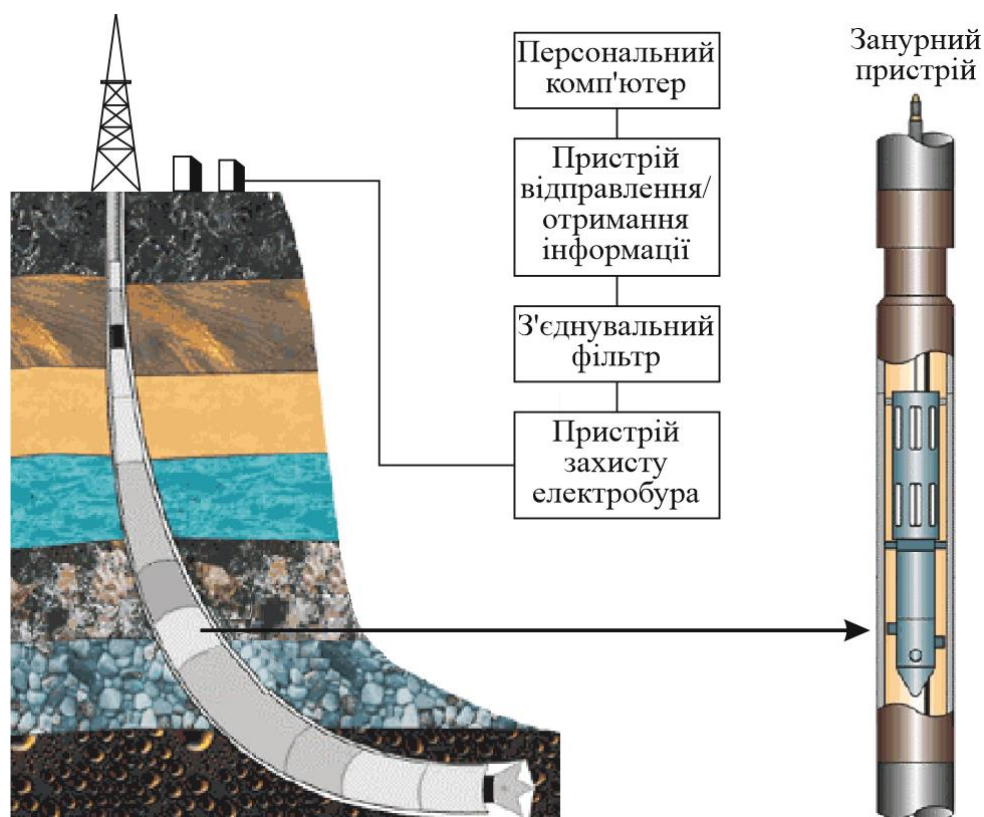


Рис. 1.12. MWD для управління електробурінням (телевимірювання кабелем живлення)

Аналізування літературних джерел [3÷7 та ін.] показало, що ідею перенесення бурового електродвигуна на вибій свердловини і розроблення електробурів було вирішено шляхом використання асинхронного трифазного двигуна із короткозамкненим ротором як найбільш надійного і простого.

З самого початку вдалось надзвичайно ефективно вирішити проблему захисту електричного двигуна від проникнення бурового розчину за допомогою системи, що автоматично підтримує потрібну перевагу тиску в оливнонаповненому двигуні над тиском бурового розчину і компенсує втрату оливи через ущільнення вала. Найбільший ризик для всієї концепції створення електробура полягав у вірі в працездатність трифазного струмопідводу, що має працювати за напруги понад 1000 В і містить кілька сотень триконтактних штепсельних рознімів при бурінні глибоких свердловин (до 7000 м), розміщених у буровому розчині, який фактично є електролітом [3].

До того конструкція рознімів має обмеження, що зумовлені необхідністю їх автоматичного з'єднання при згвинчуванні секцій («свічок») труб, на яких електробур опускають у свердловину. Також окремі контакти розніму мають бути співвісними (рис. 1.13).

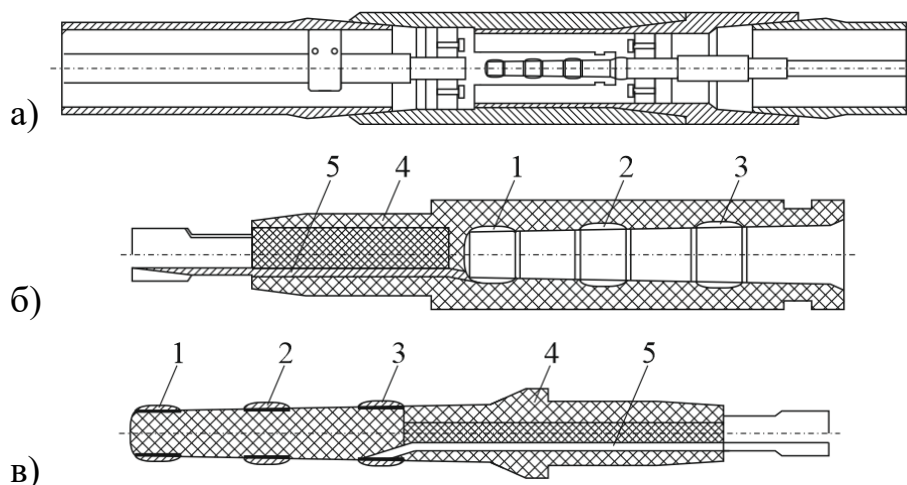


Рис. 1.13. Триконтактний штепсельний рознім струмовідводу для буріння електробуром:

- а) розміщення розніму в замку бурильної труби; б) контактна муфта;
в) контактний стрижень; 1, 2, 3 – контакти; 4 – тіло муфти і стрижня;
5 – мідна шина

Електробуріння набуло в СРСР значного поширення, особливо в регіонах зі складними геологічними умовами та для буріння керовано-спрямованих свердловин [3, 7]. Слід відзначити просту систему телеметрії, що використовує струмопідвід для передачі даних від глибинного апарату орієнтування та інших параметрів процесу буріння.

Практично за всіма показниками ефективність класичного електробуріння з двигуном, що опускається в свердловину на згвинчуваних трубах, перевищує інші способи буріння. Треба додати, що в окремих експериментах, проведених (там, де дозволяють геологічні умови) на Прикарпатті і в Башкортостані було одержано феноменальні результати при продуванні вибою повітрям: збільшення механічної швидкості буріння у 3-5 разів і проходки на долото – в 4-9 разів [3, 7]. Такі результати є недосяжними для роторного буріння і для буріння з гідравлічними двигунами.

Проте, практика показує, що надійність трифазного струмопідводу є недостатньою. Перехід від трипровідного струмопідводу до системи «два проводи – труба» (ДПТ) не дав особливо відчутного ефекту, оскільки і рознім надалі залишається струмопровідним елементом.

Проте ще на самому досвітку електробуріння спеціалісти розуміли: виходом із ситуації могло б бути створення зануреного електродвигуна, придатного для живлення його через однопровідний струмопідвід (система «один провід – труба»). Радикальне підвищення надійності пояснюється тим, що всередині штепсельних рознімів немає струмопровідних частини. Враховуюче це, природно, що фахівці звернули увагу на можливість використання колекторного двигуна постійного струму [3].

Тому в цьому напрямі було задіяно ряд науково-дослідних організацій [3]. Однак роботи завершилися невдачею через низку банальних причин:

- неможливість забезпечити нормальну комутацію в достатньо потужній машині малого діаметра й великої довжини;
- шкідлива дія іскріння на колекторі на рідке середовище (трансформаторну оливу).

Очевидно, дотримуючись мети: перетворення струмопідводу в ланку постійного струму, – необхідно шукати принципово інші, ніж щітково-колекторний апарат і додаткові полюси. Можливі варіанти інвертора (перетворювача постійного струму в струмопідводі у змінний струм). Фахівці інноваційного підприємства «Електробур» виконали успішний варіант комутаційного пристрою, побудованого з використанням силових напівпровідникових приладів та тісно інтегрованого в електричну машину на основі постійних магнітів і в систему однопровідного струмопідводу [3, 4]. Здійснено ґрунтовні випробовування лабораторного взірця безколекторного електробура постійного струму діаметром 164 мм. Створено теоретичні основи, що дозволяють екстраполювати результати лабораторних досліджень на промисловий варіант електробура.

Слід зазначити, що підвищення надійності струмопідводу в новому електробурі визначатиметься не тільки його однопровідністю. При живленні двигуна електробура постійним струмом напруга, що діє на ізоляцію, може бути зменшена приблизно в 2 рази порівняно з електробуром змінного струму (за таких самих втрат і поперечного перерізу жили кабелю). Це визначається трьома факторами: тепер на ізоляцію впливає діюче значення напруги, а не її амплітуда; через струмопідвід передається тільки активна потужність; труба проводить струм своїм повним перерізом, а не приблизно одноміліметровим поверхневим шаром, як на змінному струмі за частоти 50 Гц (ефект витіснення в феромагнетику).

Така нова концепція дає змогу створити електробур дуже малого діаметра (близько 100 мм), а це відкриває нові технологічні можливості (наприклад, прорізування бокових горизонтальних стовбурів у старих діючих і недіючих свердловинах для максимального вилучення нафти з покладів), може радикально змінити всі уявлення про вартість буріння нафтових і газових свердловин [3].

На рис. 1.14÷1.16 наведено перспективні варіанти розвитку електробурів для проходки нафтових і газових свердловин [4].

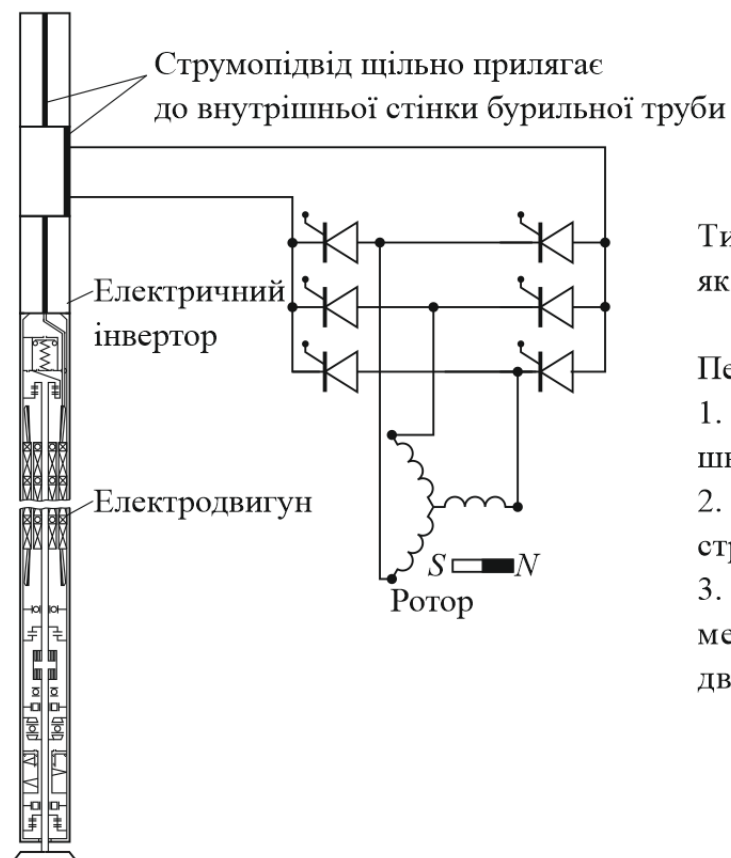


Двигун постійного струму використовують як занурний електродвигун

Переваги:

1. Можливість безперервного регулювання швидкості обертання вала.
2. Можливість створення однопровідного струмопідводу (провід - труба).

Рис. 1.14. Електробур постійного струму (в майбутньому)



Тиратронний двигун використовують як занурний електродвигун

Переваги:

1. Можливість безперервного регулювання швидкістю обертання електродвигуна.
2. Можливість створення однопровідного струмопідводу (провід - труба).
3. Довжина тиратронного електродвигуна менша від довжини асинхронних двигунів.

Рис. 1.15. Тиратронний двигун електробура (в майбутньому)

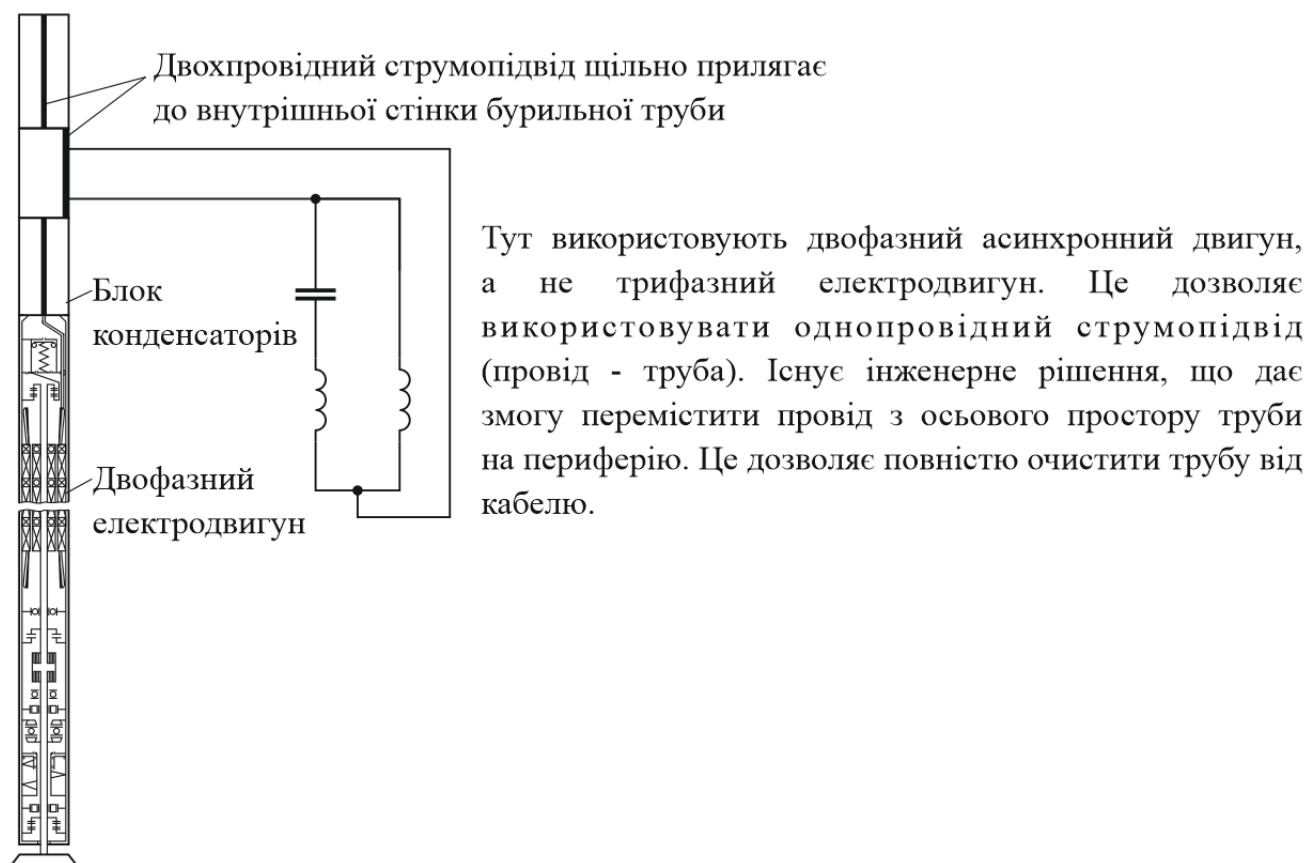


Рис. 1.16. Конденсаторний електробур (у майбутньому)

Відзначимо, що в електробурінні порівняно з бурінням гідравлічними двигунами найбільш повно використовують гідравлічну потужність насосів, що передається на вибій тільки для промивання. Покращуються також умови очищення свердловини від вибуреної породи, збільшується механічна швидкість буріння та проходки на долото. Проте найбільшою перевагою електробурів є можливість, завдяки наявності струмопідводу, мати надійний канал зв'язку для передачі вимірюваної інформації з вибою свердловини на поверхню від зануреної телеметричної апаратури і чітко орієнтувати необхідну траєкторію ствола [5].

Застосування у бурінні різних конструкцій двигунів електробурів та різноманітних систем живлення дозволить значно розширити використання електробуріння в нафтогазовидобувній промисловості.

1.2 Аналіз методів та технічних засобів автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами

1.2.1 Регулятори подачі долота

Перший автоматичний регулятор подачі долота для бурових установок розробив американець Хілд в 1924 р. [7]. Одним із перших вітчизняних регуляторів був автомат подачі долота Харківського електромеханічного заводу. У цьому регуляторі використовувалась система електроприводу генератор–двигун. Основним його недоліком була низька швидкість подачі та низька надійність контактної системи керування, а також мала вантажопідйомність.

З 1940 року застосовували більш досконалий буровий автоматичний регулятор типу БАР для підтримки на визначеному рівні струму електробура, а також заданого значення навантаження на долото при турбінному і роторному бурінні та ручного керування швидкістю подачі бурового інструменту. Регулятори типу БАР застосовували в основному при електробурінні. Один з них БАР 1-150, разом зі станцією керування КУЭБ-61, випробовували в Долинській спеціалізованій конторі електробуріння на Прикарпатті на свердловині № 85. Як і інші регулятори, він мав ряд суттєвих недоліків, зумовлених застосуванням диференційного редуктора [29].

Вперше глибоке регулювання швидкості обертання виконавчого двигуна застосовано в електричних автоматах типу АВЕ-1 [74]. Регулятор забезпечував підтримування заданого осьового навантаження на долото, стабілізацію навантаження двигуна електробура за наявності спеціальної приставки ПЕБ, проробку свердловини за законом зменшення швидкості подачі із збільшенням навантаження на долото, постійну швидкість подачі і підйому інструмента.

У 1959-1960 рр. в тресті «Станіславбурнафта» випробовували регулятор АЕПД-2 [76, 77]. Він забезпечував підтримання постійної швидкості подачі або підйому інструмента і стабілізацію струму якоря системи «генератор–двигун». Основним недоліком його, як і інших регуляторів, була велика похибка вимірювання маси бурильного інструменту.

На зміну цьому регулятору прийшов більш досконалий регулятор подачі долота електричний типу РПДЕ-3. У 1962 р. були розроблені три модифікації регуляторів РПДЕ-3 для підтримання заданого значення осьового навантаження на долото при турбінному і роторному способах буріння. Для визначення маси бурильної колони було використано, як і в регуляторі АВЕ-1, ресорний давач маси типу ДМР-2. Застосування регуляторів подачі долота типу РПДЕ-3 дозволило збільшити механічну швидкість буріння на 10-15 % і проходку на долото на 6-10 %, що дало суттєву щорічну економію коштів [76, 77].

Автоматичні регулятори подачі долота РПДЕ-6, РПДЕ-7, РПДЕ-8 – подальша модернізація електромашинних регуляторів РПДЕ-3. У РПДЕ-6 замість електропривода за системою «генератор–двигун» застосований електропривід за системою «теристорного перетворювача–двигун» (ТП-Д), який володіє високою швидкодією, підвищеним ККД, має меншу масу та габарити. Він більш економічний у результаті зменшення кількості електричних машин на буровій. Електропривід регулятора РПДЕ-6 забезпечував необхідні режими роботи і дозволяв в широких межах змінювати швидкість двигуна.

Для буріння свердловин електробуром був створений регулятор АВТ-2 (автомат ваги-струму), який представляє собою регулятор РПДЕ-3 з спеціальними приставкою ПЕБ і пультом керування [76, 77]. Регулятор забезпечує:

- підтримання заданого значення активної складової струму двигуна електробура з обмеженням навантаження на долото;
- підтримання заданого значення осьового навантаження на долото (маси на гаку) з обмеженням активної складової струму двигуна електробура;
- підтримання заданого значення швидкості подачі або підйому інструмента.

У режимі буріння за активної складової струму і осьового навантаження на долото бурильник може встановлювати два задані значення уставки – активного струму електробура і осьового навантаження на долото. Однак при цьому завжди підтримується тільки один із параметрів, близький до заданого: в енергоємних породах – активна складова струму, а в неенергоємних – осьове навантаження на долото.

Буріння з автоматичною подачею долота за осьовим навантаженням рекомендовано проводити в неенергоємних породах за високих осьових навантажень. Для використання як параметра регулювання активної складової струму двигуна електробура в регуляторі АВТ-2 є додатковий вузол, за допомогою якого вводять у схему регулятора сигнал, пропорційний цьому параметру.

Проведені дослідження [76, 77] показали, що застосування регуляторів АВТ-2 при електробурінні збільшує механічну швидкість завдяки кращому використанню потужності електробура на вибої, а також значно зменшує можливу кількість зупинок двигуна від перенавантаження порівняно з подачею долота вручну.

Декілька регуляторів АВТ-2 проходили промислові випробування в Долинському УБР на Прикарпатті. При випробуваннях на буровій № 60СД було встановлено, що зі збільшенням глибини свердловини автомат не забезпечує заданого навантаження на долото внаслідок періодичних покачувань буровим інструментом під час буріння, а також автомат складний у налазці і громіздкий. Але досвід експлуатації регуляторів РПДЕ і АВТ в умовах Долинського УБР показав [76, 77], що застосування їх дозволяє збільшити проходку на долото на 6-10 % і механічну швидкість буріння на 10-15 %. Застосування регуляторів подачі долота дозволило скоротити кількість аварій електробурів і зупинок, викликаних вимкненням двигуна електробура у разі перенавантаження. Крім того, використання автоматичної подачі долота значно полегшило роботу бурильника.

При бурінні електробуром вертикальних свердловин глибиною 2000-2500 м покази наземного індикатора маси достатньо точно відповідають осьовому навантаженню на долото. Але ця відповідність порушується у разі бурінні похило-скерованих, горизонтальних, а також глибоких свердловин у результаті великих втрат на тертя колони бурильних труб об стінки свердловини. У цих умовах навантаження на долото може бути досить точно визначене за потужністю, споживаною двигуном електробура, яка залежить від моменту на

його валі і за постійної швидкості обертання і буріння в однорідній породі прямо пропорційна осьовому навантаженню на долото [10, 76÷79].

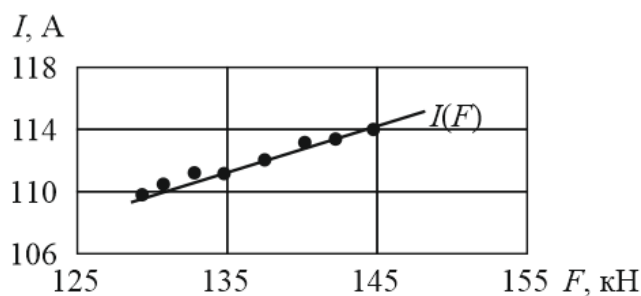


Рис. 1.17. Графік залежності струму двигуна електробура від осьового навантаження на долото

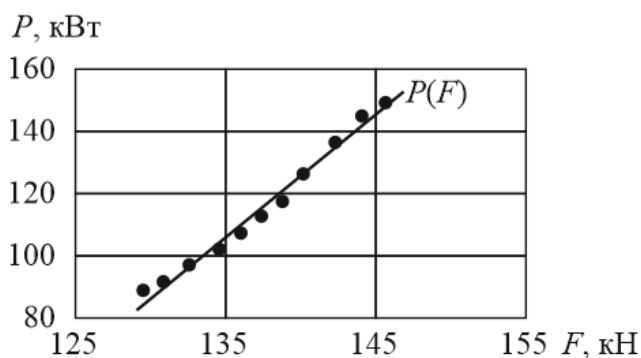


Рис. 1.18. Графік залежності активної потужності електробура від осьового навантаження на долото

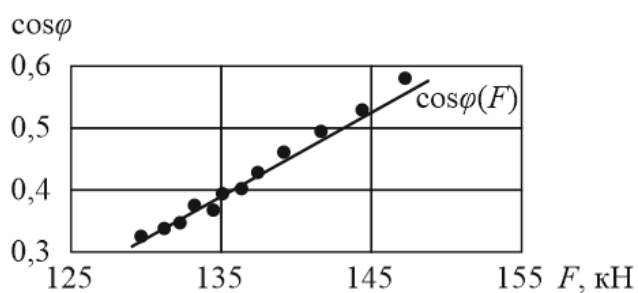


Рис. 1.19. Графік залежності коефіцієнта потужності електробура від осьового навантаження на долото

На рис. 1.17÷1.19 наведені графіки залежностей активної потужності $P(F)$, струму статора $I(F)$ і коефіцієнта потужності $\cos\varphi(F)$ електробура Е215-8 від осьового навантаження F на долото У295С3Г, отримані в інтервалі буріння 1132-1135,75 м свердловини № 346Д за напруги живлення $U=1250$ В. Як видно з

графіків, залежність між осьовим навантаженням на долото і потужністю, споживаною двигуном електробура, носить лінійний характер [77].

Отже, для оцінювання фактичного осьового навантаження на долото може бути використана потужність, споживана двигуном електробура. Активна складова струму в процесі поглиблення свердловини зі збільшенням осьового навантаження змінюється незначно, особливо при розбурюванні малоенергоємних порід, і не завжди може бути використана для регулювання параметрів режиму буріння. Крім того, застосування несиметричного струмопідводу за системою «два проводи–труба» спричиняє значний коефіцієнт несиметрії струмів фаз двигуна електробура. Експериментальні дослідження показали [77], що в умовах Долинського УБР за постійного осьового навантаження на долото, струми в трьох фазах двигуна електробура E215-8 відрізняються на $20\div 40$ А, в двигуна електробура E240-8 – на $20\div 50$ А. За такої асиметрії навантажень за струмом однієї фази важко робити висновок про навантаження в інших фазах двигуна. У цьому випадку навантаження двигуна найбільш повно можна визначити активною потужністю, що пропорційна потужності на долоті [30]. Стабілізація потужності на долоті є складним завданням, оскільки потребує створення вибійних давачів моменту та швидкості обертання.

1.2.2 Контроль кута нахилу свердловини, азимута і положення відхилювача

Для проводки похило-скерованих експлуатаційних свердловин, за допомогою яких здійснюється розкриття нафтоносного горизонту, було розроблено телеметричну систему СТЕ для вимірювання кута нахилу свердловини, азимута, положення відхилювача при бурінні електробурами [16].

Дослідні взірці телеметричної системи СТЕ-66 вперше випробувано у промислових умовах Долинського управління бурових робіт ще в 1967 р. при бурінні свердловини 67-СД. Широке впровадження цієї системи в Долинському нафтопромисловому районі почалось у 1972 році.

Система СТЕ складається [16, 25] з глибинного блока з вимірним пристроєм, який входить у компонування низу бурильної колони і надземного приймально-реєструвального пристрою. Глибинний вимірний пристрій має герметичний контейнер, у якому розміщені давачі та електронні перетворювачі, що формують електричний сигнал для інформації про вимірювальні вибірні параметри. Структура сигналу забезпечує неспотворену передачу інформації через провідний канал зв'язку на поверхню.

У склад надземного пристрою входить приєднувальний фільтр і приймальний пульт з показувальними приладами. У пульті передбачено вихід для ввімкнення стандартних виносних приладів, які встановлюються біля поста бурильника, і самопишучих приладів. Сигнали в приймальному пульті, що одержані з вибою, перетворюються у напругу постійного струму, яка потім подається на показувальні прилади.

Середня частина корпусу глибинного пристрою виготовлена з немагнітної труби діаметром 164 мм або 215 мм, тому телесистеми позначають відповідно СТЕ-164, СТЕ-215. Довжина телесистеми – 10 м. Границі вимірювальних параметрів подані в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Границі вимірювання параметрів

Кут нахилу	0–55°; 55–110°
Азимут	0–360°
Кут нахилу відхилювала	0–360°

Система СТЕ у процесі буріння свердловини:

а) орієнтує відхилювач за заданим азимутом на вертикальній ділянці ствола свердловин, що дозволяє задавати й підтримувати проектний напрям при зарізуванні похилих чи нових стволів;

б) підтримує заданий допуск на величину відхилення ствола свердловини від вертикалі при бурінні в умовах, які викликають довільне її викривлення;

в) підтримує проектну траєкторію свердловини і забезпечує досягнення нею заданої точки через зміну напрямку дії відхилювача відносно апсідальної площини (на похилених ділянках ствола свердловини);

г) визначає і обчислює кут закручування бурильної колони в процесі буріння;

д) здійснює орієнтування спеціальних інструментів і обладнання в процесі буріння багатовибійних і розгалужено-горизонтальних свердловин;

є) веде неперервний запис параметрів, часу буріння та глибини свердловини.

Розглянемо схему блока давачів системи (рис. 1.20). Робота давача азимута ДА заснована на застосуванні чутливого елемента – магнітного стрижня, встановленого уздовж магнітного меридіана. Принцип дії давачів кута нахилу ДН і положення відхилювача ґрунтується на застосуванні ексцентричних тягарців Г. Чутливі елементи усіх давачів пов'язані з роторами синусно-косинусних оберտальних трансформаторів, які утворюють вихідні сигнали. Давачі ДА, ДН укріплені на рамі давача ДПО разом з ексцентричними тягарцями, що стабілізують рамку в апсідальній площині, повертаючи її по осі а – а.

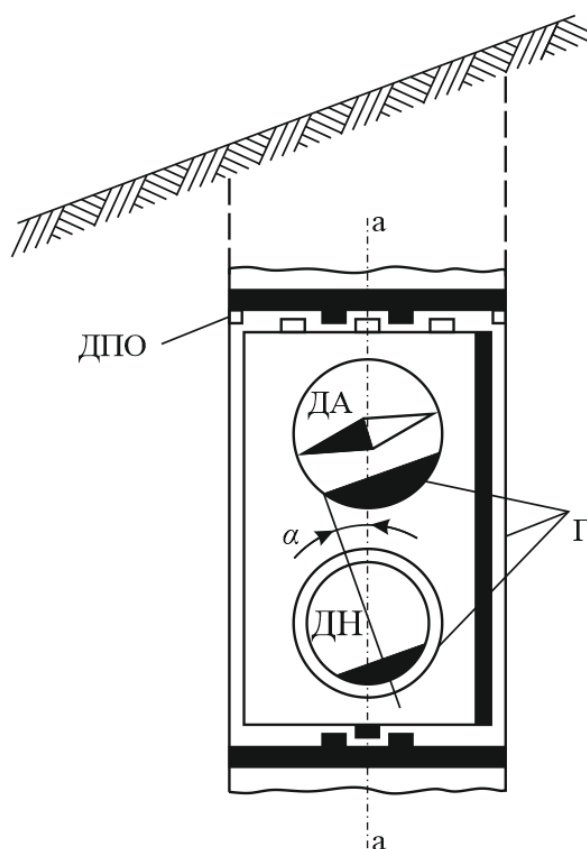


Рис. 1.20. Блок давачів системи

Після спуску в свердловину відхилювач і телеметрична система займають довільне положення відносно напрямку її викривлення.

Схема визначення кута повороту відхилювача подана на рис. 1.21.

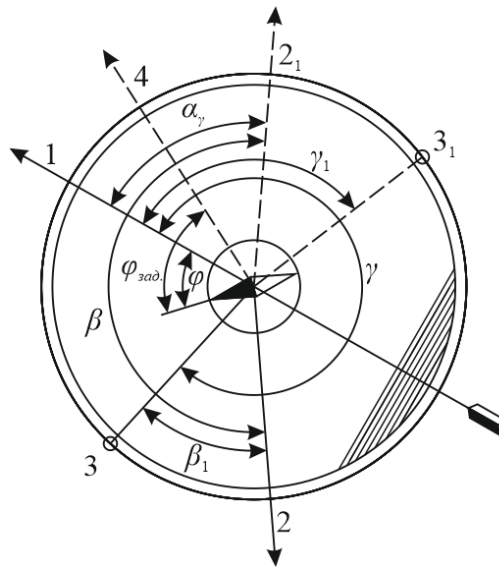


Рис. 1.21. Схема визначення кута повороту відхилювача:

φ – фактичний азимут свердловини; $\varphi_{зад}$ – необхідний азимут викривлення свердловини; β_1 – кут збирання, тобто зміщення між позначкою відхилювача (її нанесено в напрямі дії відхилювача) і 0. Визначають кут зміщення за годинниковою стрілкою від позначки відхилювача до 0 способом, аналогічним до визначення кута при збиранні навантажувального контактора; α_y – кут установки відхилювача; γ , γ_1 – кути між апсидальною площиною і поперечною віссю до і після орієнтування. Значення кутів γ і γ_1 дорівнюють числовим показанням приладу «Відхилювач».

Кут повороту бурильної колони для встановлення відхилювача у потрібному напрямі визначають як: $\beta = \beta_1 \pm (360^\circ - \gamma)$. Знак «+» при α_y куті застосовують зі збільшенням азимута, знак «-» – із зменшенням.

Важливе значення при бурінні з телеметричною системою надається куту γ_1 , положення нульової позначки відносно площини викривлення, тому що положення відхилювача відносно телесистеми для певного компонування постійне і визначається кутом β_1 . Надалі кут γ_1 називатимемо кутом положення

відхилювача. Величина його залежить від кута β_1 компонування і конкретних умов завдання за зміною параметрів викривлення.

Числові значення кута положення відхилювача визначають за формулою (рис. 1.22)

$$\gamma_1 = \beta_1 \pm \alpha_y. \quad (1.1)$$

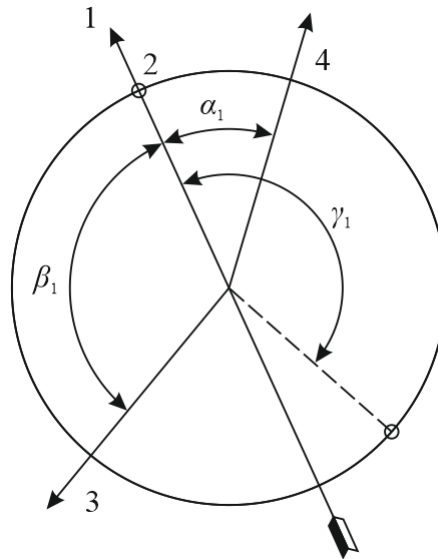


Рис. 1.22. Схема визначення кута положення відхилювача

Розраховують кут положення відхилювача під час спуску інструмента. Після спуску на вибій, нагвинчування квадратної штанги і поновлення циркуляції, вмикають живлення електробура і приладів СТЕ. На приладі відмічають поточне значення кута γ . Необхідний кут повороту бурильної колони β для встановлення в потрібному напрямі обчислюють за формулою:

$$\beta = 360^\circ - \gamma + \gamma_1. \quad (1.2)$$

Повертаючи бурильну колону за годинниковою стрілкою на кут β , одержують дані, рівні куту положення γ_1 , який контролюють у процесі поглиблення свердловини. Конструктивне виконання блока давачів дозволяє встановлювати відхилювач за заданим азимутом у вертикальній ділянці свердловини за сукупністю показів підземних приладів «Азимут» і «Відхилювач».

Для орієнтації відхилювача при врізуванні похилого ствола (чи забурюванні нового) у вертикальній свердловині в напрямі заданого азимута $\varphi_{зад}$ необхідно знайти суму:

$$\Sigma_1 = \beta_1 \pm \varphi_{зад}. \quad (1.3)$$

Потім визначають суму Σ_2 – поточних показів зазначених вище приладів після спуску бурильної колони в свердловину. Вираховують різницю $\Sigma_1 - \Sigma_2$. Якщо вона додатна, то дорівнює кутіві повороту колони β . Якщо від’ємна, то $\beta = 360^\circ - (\Sigma_1 - \Sigma_2)$. Колону після повороту на кут β розходжують. При цьому стрілки приладів мають бути встановлені на позначеннях, сума яких дорівнює Σ .

Найбільш ефективними для робіт із забурювання нового ствола є електробури з механізмами подвійного викривлення типу МИ2 разом з телесистемою СТЕ.

Уперше така система була використана при бурінні свердловини 400-СД Долинського управління бурових робіт [19] для забурювання нових стволів в інтервалах глибини 3389-3412 м і 3544-3635 м. Забурювання проводили у зв’язку з прихопленістю нижньої частини бурильного інструмента в свердловині. Пробурений розріз був складений міцними породами. Середня проходка на долото У269ТЗ за механічної швидкості 1,3-1,4 м/год складала 4-5 м. Забурювання проводилось після установки цементного мосту. Спочатку використовували таку компоновку: алмазне долото 267 мм, електробур Е215-8 разом з механізмом викривлення МИ2 і телесистему СТЕ-215. До цього алмазне долото застосовували разом з електробуром і механізмом викривлення для забурювання нових стовбурів експлуатаційних свердловин на глибині 2300 м. Однак за 18 год роботи алмазне долото повністю було спрацьоване, а пробурено лише 15 м. Далі буріння здійснювали долотами У268Т. Були застосовані інтенсивні відхилювачі МИ215-1×1,5 і МИ215-1,5×1,5 довжина кожного плеча яких становила 3,2 м, а середнього – 3 м. На роботу для утворення виступу витратили 8 доліт. Тривалість фрезерування на кожне довбання не перевищувало 2,5 год в інтервалі одного метра. За більш тривалої роботи спостерігалось значне зношення опор шарошок.

Рівномірності подачі досягали за допомогою автомата подачі долота типу АВТ-2. Для збільшення виступу до розмірів, більших від половини розміру

долота, поступово збільшували осьове навантаження. У процесі роботи постійно контролювали покази приладів про режим роботи електробура і положення відхилювача. Таким компонуванням пройдено 23 м за 17 довбань, останні чотири з них проведено за нормального режиму буріння.

Крім цього, застосовували електробур разом з інтенсивним відхилювачем та телеметричною системою СТЕ-215 також для забурювання нового ствола на свердловині 400-СД. Це дало змогу забурити відгалуження з горизонтального і значно викривленого ствола в процесі проводки розгалужено-горизонтальних свердловин.

Успішно впроваджений спосіб забурювання нового ствола без установки цементного моста був застосований на п'яти свердловинах (96-СТР, 129-СД, 160-СД, 97-СТР, 148-СД) глибиною 1810-2755 м.

Було доведено, що для забурювання нового ствола свердловини без встановлення цементного мосту доцільні такі компонування:

а) для стовбура діаметром 190 мм – долото 190 мм, електробур Е164-8 з механізмом потрійного викривлення МІ164-1×1,5+МІ164-1,5×1,5 і телесистеми СТЕ-164;

б) для стовбура діаметром 269 мм долото 269 мм, електробур Е215-8 з механізмом подвійного викривлення МІ215-1×1,5 або МІ215-1,5×1,5 і телесистема СТЕ-215.

Аналіз відпрацьованих доліт показав, що найбільш ефективними є спеціальні зарізні алмазні долота. Однак їх краще застосовувати в необсадженому стовбурі свердловини, тому що при спуску жорсткої компоновки по стовбуру, обсадженому проміжною колоною, спостерігається сильне викришування алмазів на ріжучій та калібрувальній поверхнях долота.

У процесі забурювання нового стовбура свердловини без встановлення цементного моста велике значення має правильна оцінка одержуваної інформації: наявність реактивного моменту на долоті за приладом «Відхилювач», величина потужності, яку споживає електробур, взаємозв'язок механічної швидкості забурювання та осьового навантаження, характер відпрацювання доліт тощо. При

цьому є можливість безпосередньо «намацати» виступ шляхом посадки на нього бурильного інструмента при протилежному положенні відхилювача. Наявність цементного моста не дозволяє зробити таку перевірку. Використання зазначеного способу забурювання нових стовбурів сприяє значній економії часу і засобів, витрачених на встановлення цементного моста.

1.2.3 Методи автоматизованого управління буровою установкою

Використання автоматизованих засобів для механізмів подачі долота, що входять до складу спускопідйомного агрегату бурової установки, і їхніх нових якостей, що вимагає технологія буріння, а також впровадження мікропроцесорної техніки, є одним із додаткових резервів підвищення ефективності бурових робіт [6, 3, 17, 18, 20, 22]. Запропонована [11, 12] концепція злагодженого керування такими складними агрегатами бурової установки, якими є насосна і спускопідйомна установки та занурний двигун у процесі буріння свердловини. На її основі розроблені три схеми автоматизованих систем управління режимам буріння (АСУ РБ) для сучасних бурових установок, що забезпечують реалізацію перспективних технологій буріння і ремонту свердловин [92]:

- АСУ режимами буріння для традиційних бурових установок;
- АСУ режимами електробуріння;
- АСУ для колтюбінгових бурових установок.

Для структурної схеми управління традиційною буровою установкою характерним є роздільне управління буровим насосним агрегатом (БНА) і механізмом подачі долота (МПД). Спочатку з пульта управління насосами включають буровий насос і встановлюють необхідну частоту його ходів. Після цього, вже з пульта бурильника переходять до процесу буріння, встановлюючи задане навантаження на долото, причому за параметр регулювання приймають навантаження на гаку, яке визначають за показами індикатора ваги.

Необхідність зміни структурної схеми управління основними агрегатами бурової установки і переходу від типової, що склалася впродовж багатьох років,

до автоматизованих систем, зумовлена неможливістю підтримання заданих параметрів режиму буріння при проходці похило-скерованих і горизонтальних свердловин з великим відхиленням вибою, навіть у разі вживання високоточних телеметричних систем контролю вибійних параметрів, що спричиняє зниження ефективності і якості будівництва свердловин. Це зумовлено істотним важкопрогнозованим впливом сил тертя бурильної колони об стінки свердловини, що вимагає пошуку альтернативних способів управління режимом буріння, незалежних від характеру взаємодії бурильної колони із стінками свердловини, а саме переходу до двоконтурного управління: за навантаженням і витратою. Практична реалізація цього способу можлива тільки в автоматизованих системах управління із злагодженим управлінням БНА і МПД [11, 12].

Намічений перехід від аналогових до цифрових мікропроцесорних систем управління агрегатами і механізмами бурової установки відкриває широкі перспективи для реалізації різних алгоритмів управління буровим комплексом і дійсного переходу до АСУ РБ, у тому числі АСУ РБ із злагодженим управлінням основними агрегатами і нетрадиційними параметрами регулювання.

Ідея використання непрямих способів контролю режимів роботи занурних двигунів (контроль швидкості, крутного моменту, струму електробура) та ін. має давню історію і була спрямована на автоматизоване управління процесом [26÷28].

Однак недоліком існуючих систем є складність інформаційного забезпечення у зв'язку з необхідністю організації каналу зв'язку між вибоєм і гирлом свердловини. Крім того, такі АСУ не передбачають злагодженого управління основними агрегатами бурової установки в процесі поглиблення свердловини.

Структурні схеми автоматизованих систем з узгодженим управлінням мають як однакові риси, так і суттєві відмінності, що обумовлені функціональними особливостями обладнання. Загальним для таких систем (рис. 1.23, 1.24) [92] є те, що об'єднання систем керування БНА та МПД здійснюється на основі загального програмованого мікроконтролера з пристроєм введення і налаштування та пультом керування та використанням трьох типів каналів: енергетичних (передача силових факторів), інформаційних (передача сигналів від давачів) та каналів

управління (зміна режиму роботи виконавчих агрегатів – частоти ходів насосу, гальмівного моменту на барабані лебідки, швидкості подачі колони гнучких труб та ін.).

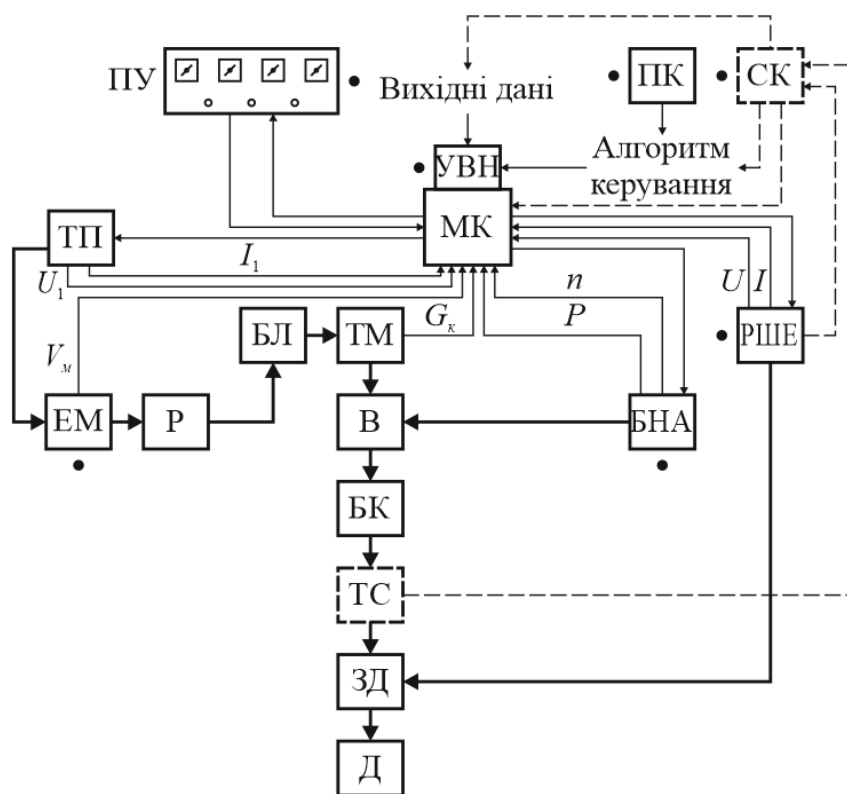


Рис. 1.23. АСК режимів електробуріння:

- – точки управління; ПУ – пульт управління; МК – мікроконтролер; УВН – пристрій введення і налаштування; ПК – переносний комп'ютер; СК – інформаційна система; ТП – тиристорний перетворювач; ЕМ – електрична машина; Р – редуктор; БЛ – барабан лебідки; ТМ – талевий механізм; В – вертлюг; БК – бурильна колона; ТС – телесистема; ЗД – занурний двигун; Д – долото; БНА – буровий насосний агрегат; РШЕ – регулятор швидкості електробура; \Rightarrow – енергетичні канали; \rightarrow – інформаційні канали; \dashrightarrow – канали управління

Через передачі керувальних впливів на відповідні регулятори – швидкості, напруги, струму – як основний параметр регулювання використовують не навантаження на гаку, а нетрадиційний параметр, який залежить від крутого моменту занурного двигуна, та вимірюваний на поверхні (струм привідного електродвигуна бурового насоса, тиск на вході промивального насоса колтюбінгової установки або струм електробура). При цьому керування режимом

буріння може здійснюватись як зміною навантаження на долото, так і зміною витрати промивальної рідини в межах технологічно допустимого діапазону залежно від відхилення поточного значення параметра регулювання від заданого бурильником або оператором колтюбінгу. Тобто використовують двоконтурну схему регулювання, що створює найсприятливіші умови підтримання заданого режиму буріння занурним двигуном. Алгоритми керування створюють на основі моделювання динамічних процесів, що відбуваються у протяжних хвилеводах гідравлічної напірної лінії та бурильної колони з урахуванням характеристик наземного та вибійного обладнання, а також можливих збурень у системі.

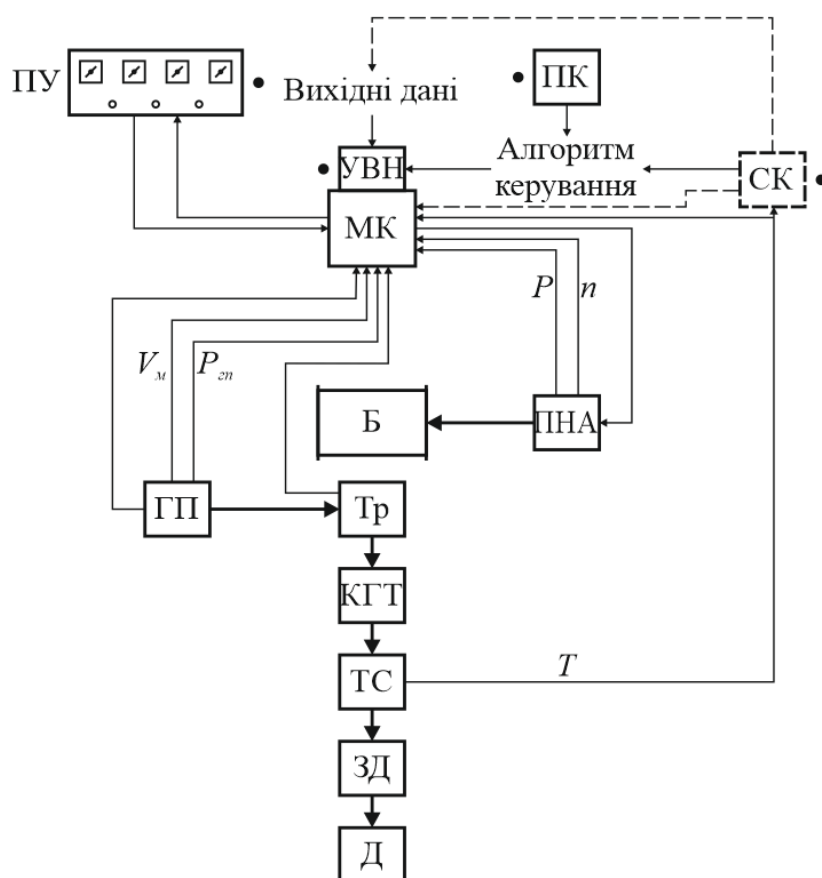


Рис. 1.24. АСК для колтюбінгового устаткування:

- – точки управління; ПУ – пульт управління; МК – мікроконтролер;
- УВН – пристрій введення і налаштування; ПК – переносний комп'ютер;
- СК – стаціонарний комп'ютер; КГТ – колона гнучких труб; Б – барабан з КГТ;
- Тр – транспортер; ТС – телесистема; ЗД – занурний двигун; Д – долото;
- ГП – об'ємна гідропередача; ПНА – промивальний насосний агрегат;
- ➔ – енергетичні канали; → – інформаційні канали; - ➔ – канали управління

АСУ РБ для традиційних бурових установок з дискретними різьбовими колонами та електробуріння мають майже схожу структуру. Параметром регулювання є струм відповідно електродвигуна БНА та електробура.

АСУ для колтюбінгової установки (рис. 1.24) з точки зору регулювання режиму буріння має відмінності, пов'язані з її принциповими особливостями. Навантаження на долото здійснюється не за шляхом створення необхідного гальмівного моменту на барабані лебідки та відповідного перерозподілу ваги колони (талевий механізм відсутній), а шляхом примусового подання верхнього кінця за допомогою гідромеханічного транспортного агрегату (інжектора), так що основним елементом системи регулювання стає силовий аксіально-поршневий насос. Другою особливістю є неможливість повороту неперервної бурильної колони у випадку необхідності орієнтування положення корпусу занурного двигуна у свердловині. Дві останні відмінності зумовлюють необхідність використання в вибійному компонуванні телеметричних систем та спеціальних ланок, що в свою чергу змінює вимоги до регулювання колтюбінгової установки.

У цьому зв'язку АСУ колтюбінговою установкою доцільно об'єднати з вибійною телеметричною системою та додатковим параметром регулювання, відображає режим навантаження занурного двигуна, використовувати кут становлення його корпусу, інформація про який передається на поверхню від телеметричної системи у режимі реального часу.

Дані структурні схеми АСУ можуть бути реалізовані шляхом модернізації існуючої системи регулювання, що перебуває в експлуатації, та проектованої системи.

Сучасні бурові установки з цифровими системами керування приводами [23, 24, 31÷52] оснащені стаціонарним керувальним комп'ютером, тому запропоновані схеми можуть бути реалізовані більш простим способом – шляхом розширення програмного забезпечення системи за мінімальної зміни стандартного комплексу, що управляє обладнанням [92]. Так, структурна схема злагодженого регулювання транспортувальним та промивальним насосними агрегатами базової колтюбінгової установки М40 передбачає перехід від гідромеханічного до

електрогідравлічного регулювання золотниковим гідророзподілювачем у контурі регулювання подачі силового насоса інжектора (кута нахилу диска) та розроблення пристрою регулювання швидкості силового агрегату промивального насоса [11, 92].

Для бурових установок з мікропроцесорним управлінням розширення програмного забезпечення зводиться до введення в блоки автоматичного управління БНА і МПД додаткових алгоритмів [6].

Крім обґрунтованого моделювання процесів у системі і вибору структури АСУ для мікропроцесорних систем, основне значення має вибір оптимальних алгоритмів управління. Злагоджене функціонування БНА і МПД підвищує керованість бурового комплексу і дозволяє реалізовувати різні, у тому числі складні, алгоритми управління.

Для структурних схем рис. 1.23, 1.24 можливе використання як типових алгоритмів, управління, заснованих на жорсткій підтримці заданого значення основного параметра регулювання (струму або навантаження), так і нестандартних алгоритмів, в яких задіяні додаткові параметри: навантаження на гаку G_k (інжекторі), механічна швидкість буріння v_m , частота ходів насоса n , кут положення корпусу γ вибійного двигуна та ін., що сприяє ідентифікації процесів у динамічній системі і відповідному коригуванню поточної координати завдання [58, 59]. У таких алгоритмах реалізуються: можливості адаптивного управління у функції декількох параметрів, тобто здійснюється перехід до так званих інтелектуальних систем управління нового покоління з гнучкими процедурами прийняття рішення, які дозволить подолати відомі труднощі, що виникають під час розроблення АСУ РБ, а також ідентифікувати і усунути дезорієнтувальний вплив збурювальних чинників, наприклад, внаслідок зашламування затрубного простору свердловини у разі незадовільного очищення вибою тощо [11, 12, 92].

Основні принципові труднощі розроблення алгоритмів управління режимом буріння пов'язані з тим, що [62, 63]:

- об'єкт управління – система з невідомою, змінною в часі динамічною характеристикою;

- управляючі (від системи управління) і збурювальні (від вибою) впливи передаються із запізнюванням через протяжні хвилеводи, що вимагає використання прогнозувальних оцінок.

Відзначимо, що розглянуті АСУ РБ виконані за схемою дискретного ПД-регулятора. Вибір ПД регулятора заснований на багатолітньому позитивному досвіді використання таких регуляторів у різних галузях техніки з гарантованою якістю управління технологічними об'єктами, а також їх універсальністю, що дозволяє використовувати ці регулятори як в аналоговому, так і цифровому варіантах АСУ РБ. Останнє важливе, оскільки дозволяє упроваджувати АСУ РБ на бурових установках різних поколінь [11].

Відповідальним моментом у створенні АСУ РБ і реалізації ефективних алгоритмів управління є обґрунтований вибір необхідної кількості і необхідного типу давачів технологічних параметрів [64÷70, 75]. Давачі використовують як серійні (для вимірювання швидкості і струму електродвигунів, частоти ходів насоса), так і нестандартні цифрові (для вимірювання тиску і швидкості подачі колони) [6].

АСУ для колтюбінгу і електробуріння перебувають у стадії розроблення, їхні промислові випробування планується провести за узгодженням з розробниками бурових установок.

1.3 Вибір методу та аналіз проблем, що виникають під час побудови адаптивних систем керування із змінною структурою

Для зручності вибору раціонального методу автоматизованого управління процесом електробуріння об'єднаємо переваги та недоліки проаналізованих методів у табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Методи автоматизованого управління процесом електробуріння свердловин

№	Методи автоматизованого управління	Переваги	Недоліки
А	Підтримання заданого осьового навантаження на долото (БАР, АВЕ-1, РПДЕ, АВТ-2)	<ul style="list-style-type: none"> - збільшення механічної швидкості буріння на 10÷15 %; - можливість збільшення проходки на долото на 6÷10 %; 	<ul style="list-style-type: none"> - недостатня точність контролю осьового навантаження на долото; - значний вплив глибини свердловини на результати вимірювань осьового навантаження на долото
В	Стабілізація заданого значення активної складової струму двигуна електробура (БАР, АВТ-1, АВТ-2)	<ul style="list-style-type: none"> - скорочення кількості гальмувань двигуна порівняно з подачею долота вручну; - збільшення механічної швидкості буріння внаслідок кращого використання потужності електробура; - скорочення кількості зупинок двигуна від перенавантаження порівняно з ручним керуванням 	<ul style="list-style-type: none"> - зі збільшенням глибини свердловини система не забезпечує заданого навантаження на долото через періодичні коливання інструменту під час поглиблення
С	Стабілізація заданого значення швидкості подачі і підйому інструменту (АВЕ-1, Мікроматік, АЕПД-2, РПДЕ, АВТ-2)		<ul style="list-style-type: none"> - недостатня точність контролю ваги бурового інструменту; - висока вимога до точності вимірювання механічної швидкості буріння

№	Методи автоматизованого управління	Переваги	Недоліки
D	Методи пошуку екстремуму одного з показників процесу буріння – максимуму механічної швидкості буріння, мінімуму собівартості метра проходки (AIC-1, АТБ-1, метод С.Д. Rodgers, метод Е.А. Вольгемута, М.Г. Ескіна, метод М.А. Фінгеріта)	- підвищення ефективності процесу буріння; - можливість забезпечення пошуку максимуму або мінімуму одного з показників процесу буріння	- висока складність методів, що обмежує можливість їх використання на виробництві; - усі методи групуються на припущення про лінійність об'єкта; - неможливість отримання інформації про поточний стан долота в режимі реального часу
E	Стабілізація потужності, яку споживає двигун електробура	- підвищення величини потужності, яка доводиться до долота; - можливість підвищення ефективності руйнування породи на вибої свердловини	- складність алгоритму обробки інформації щодо врахування змінних втрат потужності в двигуні і струмопідводі
F	Методи адаптивного керування	- можливість керувати процесом буріння за неповної апріорної інформації	- наявність у складі критеріїв оптимальності проходки на долото, що визначається лише після завершення рейсу долота
G	Підтримка процесів прийняття рішень щодо управління процесом буріння	- полегшення процедури прийняття рішень бурильником	- значний вплив величини лагу на можливості застосування методу

Отже, проведений аналіз методів та засобів управління процесом електробуріння свердловин показав, що порівняно з іншими, методи адаптивного керування, що характеризується більшою універсальністю, можуть бути використані для побудови систем автоматизованого управління з принципово іншими показниками якості. Вони мають високу точність та дають змогу керувати об'єктом за неповній і навіть за незначній апріорної інформації, полегшують процедури прийняття рішень бурильником.

З адаптивних методів керування вибір доцільно зробити на користь адаптивних систем із змінною структурою. У них використовуються особливі властивості нелінійних систем для виявлення контрольованих змін динамічних властивостей системи керування. Особливі режими є додатковим джерелом інформації про зміну умов роботи системи. Вони наділяють систему керування властивостями, завдяки яким динаміка об'єкта керування перебуває в межах заданих показників незалежно від умов буріння, якщо вони змінюються.

Однією із найбільш важливих проблем в управлінні електробурінням є вибір керованої величини в процесі поглиблення. Проте такий вибір потребує додаткової інформації про прогностні значення показників процесу буріння. Їхнім джерелом є геолого-технічний наряд на будівництво свердловини і поточна інформація.

Існуючі системи керування електробурами, що реалізують принцип керування за відхиленням, не передбачають коригування завдання, яке необхідне у зв'язку із збільшенням глибини свердловини і зношенням долота, що призводить до неповного використання потужності занурного електродвигуна. Водночас оцінювання завантаження занурного електродвигуна пов'язане з великими труднощами, що обумовлені постійним збільшення тиску і температури (до 200°C) на вибої свердловини, зміною довжини струмопідводу: великими похибками існуючих засобів контролю енергетичних та технологічних параметрів і показників процесу буріння.

Регулятори подачі долота при електробурінні, що забезпечують стабілізацію активної складової струму статора занурного двигуна в енергоємних породах або

осьового навантаження на долото в малих енергоємних породах, мають значну статичну похибку, яка досягає 19 % [7]. Встановлено також, що за суттєвої зміни осьового навантаження на долото, відхилення активної складової і повного струму статора електродвигуна несуттєві. Ці обставини приводять до необхідності вибору іншої регульованої величини для керування процесом електробуріння, особливо похило-спрямованих і горизонтальних ділянок свердловин, коли неможливо контролювати осьове навантаження на долото прямими методами.

З урахуванням обмеженості потужності двигунів електробурів, специфічних умов їх роботи, завдання більш повного використання потужності занурного двигуна електробура шляхом зміни структури адаптивної системи керування є важливим і актуальним [71÷73].

Ще одна проблема, з якою доводиться стикатися у процесі розроблення адаптивної системи керування із змінною структурою, пов'язана з витратами енергії на поглиблення свердловин електробурами і необхідністю їх мінімізації, тобто застосування методів оптимального керування [82].

Проблема оптимального керування буровими установками як нелінійними стохастичними об'єктами, що функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності під впливом зовнішніх збурень, є основною у сучасній теорії керування. Відомі методи синтезу адаптивних систем оптимального керування [53÷55] складними об'єктами, що діють у випадкових середовищах, привели до створення різноманітних спроб поліпшити якість систем керування. Проте усіх їх об'єднує одна спільна риса – параметри об'єкта керування вважають або постійними, або такими, що змінюються у часі за якимось прийнятним законом, а нелінійні характеристики лінеаризують. Такі вимушені припущення пояснюються складністю проблеми керування, але при вирішенні практичних завдань такий підхід може дати незадовільні результати.

Слід відзначити, що шляхи вирішення проблеми оптимального керування складними об'єктами запропонував ще в 60-х роках ХХ століття Фельдбаум О. А. у вигляді концепції дуального керування, як узагальнювальної ідеї адаптивного

керування [53, 55]. Вона полягає у тому, що вхідна керувальна дія виконує не тільки функцію оптимального керування, але й водночас разом з вихідним показником процесу використовується для ідентифікації об'єкта керування. Отже, завдання оптимального керування було узагальнене шляхом об'єднання у режимі реального часу трьох підзавдань: ідентифікації структури та параметрів об'єкта керування; визначення керувальної дії; оптимізації руху керувальної системи за допомогою аналітичних регуляторів.

Потужність сучасних комп'ютерів дозволяє перші два підзавдання дуального керування успішно вирішувати на практичному рівні. Проте, останнє підзавдання не достатньо коректно вирішене й досі (навіть якщо його вирішувати за допомогою відомого принципу максимуму). Необхідність удосконалення самих об'єктів керування, підвищення вимог до автоматизованих систем керування, які працюють, як правило, у взаємодії з іншими об'єктами, привели не тільки до формулювання нових завдань керування, але й до істотної зміни підходу до їх вирішення [60, 61]. З'явилося розуміння того, що сучасні системи адаптивного керування повинні мати [55] ще й такі важливі властивості як робастність та синергетичність, а також забезпечувати гарантований результат. Враховуючи технологічні особливості процесу буріння свердловин електробурами, розуміємо, що виникає також необхідність використання під час синтезу автоматизованих систем керування когнітивних концепцій (уявлення, розуміння, пояснення, сприйняття, переконання), а також методів накопичення знань шляхом самонавчання і ментальних методів ухвалення рішень.

Наступна проблема пов'язана з тим, що у теперішній час у нафтовій і газовій промисловості спостерігається активне використання технологічного обладнання на основі мехатронних систем. Мехатроніка як синтез механіки, новітньої електроніки та ІТ-технологій [56] є новою галуззю науки і техніки, пов'язаною зі створенням та експлуатацією машин і систем з комп'ютерним керуванням, що ґрунтується на знаннях в галузі механіки, електроніки і мікропроцесорної техніки, інформатики і комп'ютерного інтелектуального керування машинами й агрегатами.

Синергетичні мехатронні системи як новітній метод побудови електромеханічних систем нового покоління з принципово новими якостями дозволяють формувати синергетичні ефекти. Синергетичний ефект SE формується в управлінні електробурінням, що є об'єктом синергетичної мехатронної системи, як множина ефектів, отриманих у результаті їх накладання і синхронізації у просторі і часі. Цей ефект існує тільки тоді, коли він належить системно-синергетичному об'єднанню таких ефектів:

$$SE = Ef_{EMK} \cap Ef_{HE} \cap Ef_{IT} \cap Ef_{CAK}, \quad (1.4)$$

де Ef_{EMK} – ефект від використання електромеханічних компонентів об'єкта керування електробура;

Ef_{HE} – ефект від застосування новітньої силової електроніки і мікропроцесорної техніки в системі керування електробурінням;

Ef_{IT} – ефект від ІТ-технологій й усіх видів забезпечення автоматизованої системи управління (функціонального, математичного, алгоритмічного, лінгвістичного, інформаційного, програмного, організаційного, ергономічного правового, методичного);

Ef_{CAK} – ефект від автоматизованого управління електробурінням на основі таких інтелектуальних технологій як штучні нейронні мережі, нечітка логіка, еволюційні методи.

Синергетичний ефект SE визначається як сума усіх зисків, отримання яких було б неможливе за умов автономного функціонування складових мехатронної системи, включаючи технологічні, інформаційні, економічні та інші складові таких зисків. Джерелами синергетичного ефекту є економія витрат на буріння, результативність керування, основана на більш ефективному використанні фондів бурового підприємства після створення такої системи [57].

Врахування перелічених вище проблем, що виникають зі створенням ефективної системи управління електробурінням із змінною структурою, на засадах синергетики дають змогу об'ємно та багатовимірно дослідити певні явища в процесі буріння й отримати оригінальні наукові результати.

1.4 Вибір та обґрунтування напряму досліджень

Проведений аналіз об'єкта досліджень показав, що для забезпечення успішного виконання основних завдань нафтогазовидобуних компаній, а саме: створення основних засобів компанії (розвідувальних та експлуатаційних нафтових і газових свердловин), а також оптимізації використання інвестицій в будівництво і реконструкцію свердловин, необхідно створювати єдину систему контролю, управління і оптимізації витрат на буріння свердловин.

Основою для створення такої системи для електробуріння мають стати прогресивні інформаційні технології.

Аналіз відомих методів та засобів показів, що:

- існує сім методів автоматизованого управління процесом електробуріння свердловин. Переваги і недоліки кожного з них подано в табл. 1.6;

- з проаналізованих методів найбільш поширений метод адаптивного керування як такий, що за довільної зміни параметрів об'єкта керування і навколишнього середовища змінює параметри регулятора подачі долота так, щоб динамічні властивості системи для заданих впливів залишались незмінними. У разі відсутності апріорної інформації про параметри об'єкта керування і навколишнього середовища здійснюється автоматичний пошук оптимального режиму роботи системи відповідно до заданого критерію якості;

- необхідність передавати більше потужності на великі глибини і в надто викривлені свердловини унеможливорює застосування осьового навантаження на долото як керованої величини, особливо при спорудженні горизонтальних, розгалужено-горизонтальних та глибоких свердловин, а також при проходці додаткових горизонтальних стволів у вже пробурених свердловинах, де неможливо забезпечити ефективний контроль осьового навантаження на долото;

- підвищення ефективності методу адаптивного керування електробурінням та розширення сфери його застосування можливе шляхом удосконалення даного методу в напрямі створення адаптивної системи із змінною структурою, що залежно від умов роботи електробура організує використання енергетичних

показників процесу буріння як додаткових джерел інформації про зміни умов роботи системи, завдяки яким динаміка процесу поглиблення свердловини перебуває в межах заданих показників незалежно від умов буріння, що змінюється;

- хаотична природа об'єкта керування, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта, унеможливорює застосування традиційних способів оброблення поточної інформації про процес поглиблення свердловини електробурами.

Тому метою роботи є удосконалення адаптивного методу автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами та розроблення алгоритмічного і математичного забезпечення для його реалізації.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АДАПТИВНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

2.1 Загальна постановка задачі адаптивного керування

2.1.1 Обґрунтування необхідності адаптації в автоматизованій системі управління процесом буріння свердловин електробурами

Технічний прогрес у розвитку буріння нафтових і газових свердловин зумовив створення автоматизованих систем більш високої точності, продуктивності і надійності. Такі системи мають забезпечувати умови високоефективного ведення процесу буріння при зміні параметрів і структури об'єкта керування. У зв'язку з цим подальший розвиток теорії і практики автоматизованого управління бурінням проходить шляхом виявлення граничних можливостей систем, створення оптимальних систем, здатних функціонувати в умовах апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта керування під впливом недосяжних для вимірювань збурень [4, 14, 23, 24, 116, 117].

У процесі розроблення і дослідження таких систем керування, що є основними об'єктами вивчення технічної кібернетики, виникає ряд проблем [107], основними з яких є розроблення методів для:

- вирішення завдань керування, які дозволяють подолати труднощі, що виникають внаслідок наявності значної кількості взаємодіючих елементів системи;
- адаптації системи до умов буріння, зміни параметрів і структури об'єкта керування в процесі роботи, до випадкового характеру збурювальних впливів;
- ідентифікації об'єкта керування.

Загалом оптимальна система керування бурінням може бути представлена у вигляді структури, що наведена на рис. 2.1.

На систему діють зовнішні входні $X_3(t)$ і збурювальні $Z(t)$ впливи. У системі виробляються керувальні дії $Y(X_3, X)$, що забезпечують потрібні фазові координати $X(t)$ об'єкта керування.

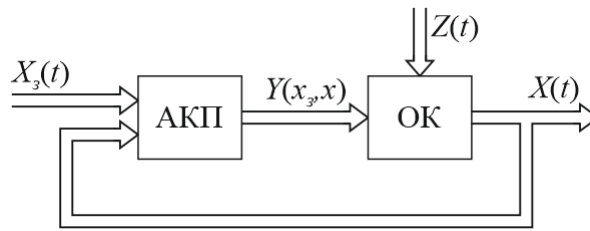


Рис. 2.1. Структура оптимальної системи керування:

$X_3(t)$, $Z(t)$ – зовнішні входні і збурювальні впливи; $Y(X_3, X)$ – керувальні дії; $X(t)$ – фазові координати об'єкта керування (ОК); АКП – автоматичний керувальний пристрій

Знаходження оптимальних керувальних дій $Y^*(X_3, X)$, що забезпечують оптимізацію процесу буріння в часі при заданих початкових $X(t_0)$ і кінцевих $X(t_k)$ значеннях фазових координат, є розв'язанням задачі оптимального керування.

Постановці і розв'язанню задачі оптимального керування бурінням, як і будь-яким іншим об'єктом, передують виконання певних процедур [83, 104]:

- досить точний математичний опис об'єкта керування;
- формулювання мети керування;
- опис середовища, в якому функціонує об'єкт керування;
- математичне формулювання критерію оптимальності, що має в робочому діапазоні екстремум, досягнення якого свідчить про оптимальну поведінку або стан системи.

З математичної точки зору задача синтезу оптимальних систем керування бурінням свердловин належить до класу варіаційних задач. У термінах варіаційного числення названі процедури означають, що:

- інформація про процес буріння як об'єкт керування і його зв'язки з середовищем має бути задана у вигляді диференціальних, різницевих або різницево-

диференційних рівнянь, що зв'язують між собою координати об'єкта керування з керувальними і збурювальними впливами;

- мета керування має бути сформульована у вигляді граничних умов, початкових і кінцевих значень координат об'єкта керування;

- інформація про середовище, в якому функціонує об'єкт керування, має бути задана у вигляді керувальних і збурювальних дій, що впливають на об'єкт керування;

- критерій оптимальності має бути функціоналом втрат або вигоди; його в процесі буріння слід екстремізувати.

Процес буріння свердловин електробурами належить до класу об'єктів керування, статичні і динамічні характеристики яких змінюються непередбачувано в широкому діапазоні [4, 7, 8]. При цьому неможливо описати фізичні процеси, що відбуваються під час функціонування системи керування в змінних реальних умовах. Значне ускладнення задач керування процесом буріння за умов відсутності практичної можливості для ретельного вивчення і опису процесу привело до необхідності створення адаптивної системи керування. Оскільки елементи пристосування в принципі існують у будь-якій автоматичній системі [73, 104], відзначимо умови і вимоги до систем автоматичного керування, які не можуть бути вирішені традиційними методами неадаптивного керування.

З існуючих наукових досліджень є [14, 21, 23, 87, 121, 136] відомо, що створення адаптивних систем керування бурінням здійснюється за умов недостатнього обсягу апріорних відомостей про внутрішні і зовнішні умови роботи об'єкта керування. Тому адаптивні методи керування мають сприяти досягненню високоякісного керування за умов апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта керування, який функціонує під впливом завад, недосяжних для вимірювання. Однак слід мати на увазі, що у міру ускладнення завдань, покладених на систему керування, ця невизначеність зростає. Отже, основним завданням адаптивного керування процесом буріння свердловин електробурами є пошук достатньо ефективних способів подолання

труднощів, що виникають під час створення високоякісних автоматизованих систем керування.

Відзначимо, що необхідність адаптації в автоматизованій системі керування процесом буріння свердловин електробурами викликана ще й нестационарністю роботи електробурів як об'єктів керування. Ця нестационарність залежить від способу управління двигуном електробура і від властивостей механізмів (шпинделя, редуктора, долота, механізму викривлення, геофізичного пристрою орієнтування бурового інструменту електробура), які виявляються в процесі поглиблення свердловини [7, 8]. Зміни параметрів електробурів відбуваються внаслідок зміни моменту інерції робочого механізму, частот пружних механічних коливань, спектрального складу інтенсивності збурювальних і керувальних дій, що змушує переналаштовувати параметри регулятора подачі долота для мінімізації динамічних похибок системи керування.

Окрім цього, слід враховувати, що в адаптивних системах управління окремі функції з отримання, обробки і аналізу недостатньої інформації про керований процес буріння мають здійснюватися не на стадії проектування, а самою системою в процесі поглиблення свердловини [4, 97÷108, 111, 116]. Це сприяє суттєвому зменшенню впливу невизначеності на якість керування процесом поглиблення свердловин електробуром, компенсуючи дефіцит апріорних знань на стадії проектування.

Отже, адаптивне керування процесом буріння свердловин електробурами має здійснювати оптимальний перебіг процесу керування в умовах апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта керування і недосяжних для вимірювання збурень. На рис. 2.2 наведено узагальнену функціональну структуру адаптивної системи керування процесом буріння свердловин електробурами.

Пунктиром позначено основну частину системи керування, до складу якої входять регулятор подачі долота і електробур. Вона здійснює оптимальний хід процесу поглиблення свердловин під впливом вхідного впливу X , і збурення Z . Реалізація адаптивного керування здійснюється додатковим блоком адаптації,

завдання якого є обробка інформації про поточний стан об'єкта керування системи загалом і навколишнього середовища, а також дотримування сигналу F переналаштування параметрів регулятора подачі долота відповідно до прийнятого критерію якості роботи адаптивної системи.

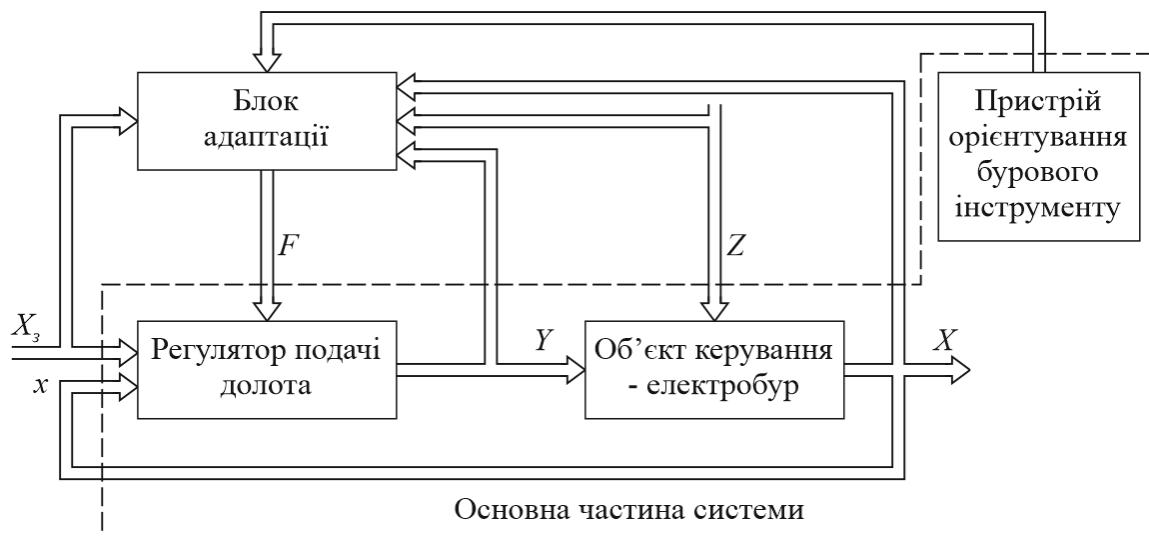


Рис. 2.2. Функціональна структура адаптивної системи керування бурінням свердловин електробурами:

X – вектор стану ОК; Z – вектор збурень; X_3 – вектор вхідних впливів; Y – вектор параметрів керування з координатами y_1, y_2, \dots, y_m ; F – сигнал переналаштування регулятора подачі долота відповідно до прийнятого критерію якості роботи адаптивної системи

2.1.2 Математична модель об'єкта керування

Для вирішення сформульованих задач адаптивного керування бурінням зручно використати нормальну систему рівнянь, що описують поведінку багатовимірною об'єкта керування [83, 134]:

$$\dot{X}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + \sum_{j=1}^m b_{ij}y_j + \sum_{j=1}^l c_{ij}z_j, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.1)$$

При цьому врахуємо, що вихідні змінні позначені символом x , а вхідні (керувальні) – символом y (рис. 2.1).

У матричній формі Коші це рівняння записується так [105]:

$$\dot{X} = AX + BY + CZ, \quad (2.2)$$

$$\text{де } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix},$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_l \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1l} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nl} \end{bmatrix}.$$

Матриці – стовпчики X , Y і Z є векторами. Вектор X є вектором стану, а його координати x_1, x_2, \dots, x_n – фазовими координатами (змінними стану об'єкта). Вектор Y – вектором керувальних дій, а його координати y_1, y_2, \dots, y_m – параметрами керування. Вектор Z – є вектором збурень, а його координата z_j – j -м збурювальним впливом, що діє на входи об'єкта керування.

Вираз (2.1) можна використовувати як математичну модель об'єкта керування (ОК).

Поведінку двигуна електробура, як і будь-якого двигуна, характеризує основне рівняння динаміки [7, 8], а саме рівняння Д'Аламбера:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_\partial - M_{on}, \quad (2.3)$$

де J – момент інерції приводу, приведений до валу двигуна;

$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ – частота обертання двигуна, яка є показником його стану;

α – кут повороту двигуна;

M_∂ – крутний момент на валі двигуна;

M_{on} – момент опору, приведений до валу двигуна.

J – постійна величина, яка характеризує акумулюючу властивість двигуна електробура як об'єкта керування.

Якщо $M_\partial = M_{on}$, то $\omega = const$, але при будь-яких змінах M_∂ і M_{on} частота обертання ω буде зростати, або спадати згідно рівняння (2.3) в залежності від знаку $M = M_\partial - M_{on}$.

Такий одноємнісний об'єкт підпорядковується закону, згідно якого проходить обмін енергії між об'єктом і зовнішнім середовищем. В узагальненій формі цей закон може бути виражений у вигляді двох залежностей

$$M_{\partial} = f_{\partial}(\omega) \text{ і } M_{on} = f_{on}(\omega). \quad (2.4)$$

Ці залежності мають нелінійний характер, які для спрощення аналізу властивостей об'єкта керування необхідно лінеаризувати. Припустимо, що до подачі зовнішнього впливу об'єкт перебуває в статичному режимі, тобто $M_{\partial} = M_{on}$; $\omega = \omega_0$. Після ступінчастої зміни крутного моменту двигуна на величину ΔM_{∂} згідно з рівнянням (2.3) відбувається зміна частоти обертання на величину $\Delta\omega = \omega - \omega_0$. Зміна частоти обертання до збільшення, або зменшення крутного моменту двигуна або моменту опору. Аби знайти нові значення M_{∂} і M_{on} необхідно залежності (2.4) розкласти в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} M_{\partial} = f_{\partial}(\omega) &\rightarrow M_{\partial} = M_{\partial_0} + \Delta M_{\partial} + \left(\frac{\partial M_{\partial}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \cdot \Delta\omega, \\ M_{on} = f_{on}(\omega) &\rightarrow M_{on} = M_{on_0} + \Delta M_{on} + \left(\frac{\partial M_{on}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \cdot \Delta\omega. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Враховуючи, що $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, підставимо значення M_{∂} , M_{on} і ω в рівняння (2.3)

$$J \frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)}{dt} = M_{\partial_0} + \left(\frac{\partial M_{\partial}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \cdot \Delta\omega - M_{on_0} - \left(\frac{\partial M_{on}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \cdot \Delta\omega. \quad (2.6)$$

Дане рівняння можна спростити, враховуючи, що в початковому стані $M_{\partial_0} = M_{on_0}$. Врахуємо ще той факт, що похідна від ω_0 , яка є постійною величиною, дорівнює 0. Тоді рівняння (2.6) можна переписати так

$$J \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = M_{\partial} + \left(\frac{\partial M_{\partial}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \cdot \Delta\omega - \left(\frac{\partial M_{on}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \cdot \Delta\omega, \quad (2.7)$$

або

$$J \frac{d(\Delta\omega)}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_{on}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} - \left(\frac{\partial M_{\partial}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \right] \Delta\omega = M_{\partial}, \quad (2.8)$$

Величини $\frac{\partial M_\delta}{\partial \omega}$, $\frac{\partial M_{on}}{\partial \omega}$ для даної точки $\omega = \omega_0$ розглядаються як постійні.

Отже, в результаті лінеаризації ми отримали звичайне лінійне диференціальне рівняння з постійними коефіцієнтами.

Останнє рівняння зв'язує ΔM_δ з $\Delta \omega$, але воно дійсне лише для малих відхилень крутного моменту двигуна M_δ і частоти обертання ω від значень M_0 і ω_0 .

Для переходу до рівнянь у відносних одиницях використаємо базові значення статичного режиму M_0 і ω_0 . У цьому випадку $\frac{\Delta \omega}{\omega_0} = x$, $\frac{\Delta M_\delta}{M_0} = y$, $\Delta \omega = \omega_0 x$, $\Delta M_\delta = M_0 y$. Тепер можна підставити ці значення в рівняння (2.8):

$$J \frac{\omega_0 dx}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_{on}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} - \left(\frac{\partial M_\delta}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \right] \omega_0 x = M_0 y. \quad (2.9)$$

Розділимо праву і ліву частину рівняння (2.9) на M_0

$$J \frac{\omega_0}{M_0} \frac{dx}{dt} + \frac{\omega_0}{M_0} \left[\left(\frac{\partial M_{on}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} - \left(\frac{\partial M_\delta}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \right] x = y. \quad (2.10)$$

Коефіцієнт, що стоїть перед x , позначимо

$$\delta = \frac{\omega_0}{M_0} \left[\left(\frac{\partial M_{on}}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} - \left(\frac{\partial M_\delta}{\partial \omega} \right) \Big|_{\omega=\omega_0} \right]. \quad (2.11)$$

Коефіцієнт δ є коефіцієнтом самовирівнювання двигуна електробура.

Якщо поділити ліву і праву частину рівняння (2.10) на δ , то це рівняння можна привести до стандартної форми

$$T_0 \frac{dx}{dt} + x = K_0 y, \quad (2.12)$$

де $T_0 = \frac{J \omega_0}{M_0 |\delta|}$ – стала часу двигуна електробура;

$K_0 = \frac{1}{|\delta|}$ – безрозмірний коефіцієнт передачі двигуна електробура.

З виразу (2.12) випливає, що чим більше δ , тим менша стала часу T_0 і коефіцієнт передачі K_0 .

Оскільки більш зручною формою запису диференціальних рівнянь є функція передачі, скористуємося прямим перетворенням Лапласа

$$L\left\{T_0 \frac{dx}{dt} + x\right\} = L\{K_0 y\},$$

$$(T_0 s + 1)X(s) = K_0 Y(s),$$

і визначим функцію передачі як відношення зображення за Лапласом вихідної величини $X(s)$ до зображення за Лапласом вхідної величини $Y(s)$ при нульових початкових умовах

$$W(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1} = \frac{X(s)}{Y(s)}. \quad (2.13)$$

Користуючись рівнянням (2.13), можна визначити перехідну характеристику двигуна електробура при нульових початкових умовах

$$h(t) = L^{-1}\left\{\frac{K_0}{(T_0 s + 1)s}\right\} = K_0 \left(1 - e^{-\frac{1}{T_0}t}\right).$$

У моделі (2.3) за керувальну дію приймаємо момент двигуна M_δ , хоча насправді керувальною дією є напруга, а точніше, напруга на статорі асинхронного двигуна електробура. Тому у більш складних моделях об'єкта до рівняння (2.3) необхідно додати ще модель взаємозв'язку момента двигуна M_δ з конкретною керувальною дією – напругою живлення [7]:

$$M_\delta = \frac{3pU_1^2 \frac{R_2}{s}}{3080,34 \left[\left(R_1 + c_1 \frac{R_2}{s} \right)^2 + (x_1 + c_2)^2 \right]}, \quad (2.14)$$

де 3 – кількість фаз;

p – число пар полюсів;

U_1 – напруга на затискачах двигуна, В;

R_2 – приведений опір ротора, Ом;

s – ковзання ротора відносно поля статора;

R_1 – опір фаз обмотки статора, Ом;

$$c_1 = \frac{U_1}{-E_{1(s=0)}};$$

$E_{1(s=0)}$ – електрорушійна сила на намагнічуючому контурі двигуна при синхронній швидкості;

x_1 – індуктивний опір обмотки статора, Ом;

x_2 – приведений індуктивний опір ротора, Ом.

На керувальні дії і фазові координати накладені обмеження, суть яких впливає з фізичної сутності процесу буріння свердловин електробуром як об'єкта керування і процесів, що відбуваються в системі керування.

Проходка $h(0)$, зношення опор $g(0)$ і оцінка відносного зношення озброєння долота $\varepsilon(0)$ на початку рейсу набувають таких значень [21, 22]:

$$h(0) = 0; g(0) = 0; \varepsilon(0) = 1 \text{ при } t = 0, \quad (2.15)$$

а в кінці рейсу долота

$$h(t_\sigma) \geq 0; 0 \leq g(t_\sigma) \leq 1; 1 \leq \varepsilon(t_\sigma) \leq (1+m)^2 \text{ при } t = t_\sigma, \quad (2.16)$$

де m – коефіцієнт, що визначається геометрією зубців шарошки і формою зношення.

Технологічні обмеження

$$\begin{aligned} F(t) &\in [F_{\max}, F_{\min}] \forall t \in [t_0, t_\sigma], \\ n(t) &\in [n_{\max}, n_{\min}] \forall t \in [t_0, t_\sigma], \\ Q(t) &= \text{const} \forall t \in [t_0, t_\sigma], \\ U_{\min} &\leq U \leq U_{\max}, \\ 0 &\leq M_\delta \leq (M_\delta)_{\max}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

де $F(t)$ – осьове навантаження на долото;

$n(t)$ – швидкість двигуна електробура;

$Q(t)$ – витрата бурового розчину;

U – напруга живлення;

M_δ – момент на долоті.

Вибір напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора U_{mp} при увімкненому електробурі в режимі неробочого ходу, визначається за формулою [7]

$$U_{mp} = 1,1(U_{ном} + 0,49I_{ном}L), \quad (2.18)$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга електродвигуна, В;

$I_{ном}$ – номінальний струм, А;

L – глибина вибою свердловини, м.

Отримані значення напруги використовуються для вибору найближчого ступеня напруги трансформатора. Для компенсації втрати напруги із збільшенням глибини буріння оператор збільшує напругу трансформатора при вимкненому двигуні електробура через 500÷3000 м в залежності від потужності двигуна електробура. Контроль напруги здійснюється за величиною струму неробочого ходу електродвигуна. Якщо струм неробочого ходу перевищує задане значення, напругу зменшують на один ступінь.

2.1.3 Механічні характеристики занурного електродвигуна, долота і сумісні механічні характеристики електробура

З існуючих наукових досліджень [7, 8, 82, 84, 116, 121] відомо, що явища, які супроводжують процес буріння свердловин, вивчені недостатньо: не з'ясовані характер і механізм процесу руйнування гірських порід і основні параметри, що визначають процес буріння; не встановлено характер великої кількості факторів, що впливають на величину моменту на долоті. Все це не дозволяє з достатньою точністю визначити величину статичного моменту долота і встановити закономірність зміни величини моменту на долоті в функції різних змінних.

Відомо, що швидкість n долота, осьове навантаження F на долото, зношення озброєння ε і опор долота g , буримість породи та інші параметри суттєво впливають на зусилля, що виникають на валі долота і визначають величину статичного моменту.

Проте розроблення адаптивної системи керування процесом буріння електробурами, що відповідає сучасним вимогам технології буріння, а також підвищення швидкості проходки свердловин з додержанням технічних і економічних норм обумовлюють необхідність уточнення статичних характеристик доліт та сумісних механічних характеристик електробурів.

Основними факторами, що впливають на величину моменту на валі і визначають навантаження на долото, є осьове навантаження на долото, фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід, конструктивне виконання долота та ін.

Отже, важливою задачею є встановлення математичної залежності між моментом навантаження і швидкістю обертання долота з урахуванням основних факторів, які визначають механічну характеристику долота.

Відзначимо, що для широкого класу виконавчих механізмів залежність моменту виконавчої машини від швидкості обертання має такий вигляд [8]:

$$\frac{M_0}{M_n} = \frac{M_m}{M_n} + \left(1 - \frac{M_m}{M_n}\right) \left(\frac{n}{n_n}\right)^{K-1}, \quad (2.19)$$

де M_0 , M_m , M_n – статичний момент, момент тертя і номінальний момент виконавчого механізму;

n , n_n – поточне і номінальне значення швидкості;

K – постійний коефіцієнт, $K = 0,1,2,3,\dots$

За умов незначних змін швидкості долота механічну характеристику долота можна описати формулою (2.19) шляхом вибору відповідної величини K . Проте ця характеристика буде адекватною лише для конкретного випадку і долота, а отже, не є універсальною. Коефіцієнт K необхідно визначати для конкретних умов.

Для встановлення математичного зв'язку між моментом і швидкістю обертання долота слід врахувати вплив усіх факторів, що супроводжують процес руйнування породи. Оскільки це неможливо, то обмежимося урахуванням лише основних факторів, які найбільш суттєво впливають на величину моменту і механічну характеристику долота.

Складемо рівняння балансу механічної енергії, що підводиться до долота:

$$W_{\text{дол}} = W_m + W_n, \quad (2.20)$$

де $W_{\text{дол}}$ – механічна енергія, що підведена до долота;

W_m – механічна енергія, що витрачається на процес буріння;

W_n – механічна енергія, обумовлена переміщенням точки прикладання навантаження на долото.

З літературних джерел [8] відомо, що

$$W_{\text{дол}} = A \left[\frac{2\pi n}{60} \int_0^t M dt + Fh \right], \quad (2.21)$$

де A – термічний еквівалент механічної роботи, ккал/кг·м;

h – проходка на долото за час буріння t , с.

Тоді з (2.21) отримаємо

$$M_{\text{дол}} = \frac{60}{2\pi n} \left(\frac{P_{\text{дол}}}{A} - F \frac{h}{t} \right), \quad (2.22)$$

де $P_{\text{дол}}$ – потужність на валі долота.

Тепер розглянемо зміну потужності $P_{\text{бур}}$, що витрачається на буріння. Якщо відома буримість породи, то [8]

$$P_{\text{бур}} = \frac{\beta}{K'} f \frac{h}{t} d^2, \quad (2.23)$$

де $\beta = \frac{2h_{\text{сер}}}{d_{\text{ш.сер}}}$ – коефіцієнт, який враховує зміну діаметра свердловини при

бурінні;

$h_{\text{сер}}$ – середня величина кроку зубців озброєння шарошки;

$d_{\text{ш.сер}}$ – середній діаметр шарошки;

d – діаметр свердловини;

K' – коефіцієнт пропорційності.

Водночас, відомо [8], що

$$\frac{h}{t} = [h_0 + c(1 + K \lg n)]n, \quad (2.24)$$

де h_0 – проходка долота, що відповідає осьовому навантаженню F_0 ; при $F \leq F_0$ величина h_0 не залежить від n ;

c – коефіцієнт, що залежить від осьового навантаження F , механічних властивостей породи та геометричних розмірів долота;

K – коефіцієнт, який залежить від глибини руйнування породи і для різних порід має своє значення.

З рівнянь (2.22), (2.23), (2.24) отримаємо

$$M_{\text{дол}} = \frac{60}{2\pi} [h_0 + c(1 - K \lg n)] \left(\frac{\beta t d_0^2}{K'A} - F \right). \quad (2.25)$$

Оскільки $M = 975 \frac{N}{n}$, то використовуючи рівняння (2.23) і (2.24), отримаємо

$$M_{\text{дол}} = 3F(h_0 + c) - 3FcK \lg n. \quad (2.26)$$

Цей вираз є рівнянням механічної характеристики долота.

На рис. 2.3 зображена крива 1 зміни моменту на долото залежно від швидкості обертання, побудована за рівнянням (2.26). Для порівняння додатково наведені криві механічної характеристики 2 для випадку, коли швидкість регулюється за постійної потужності і крива 3 за постійного моменту.

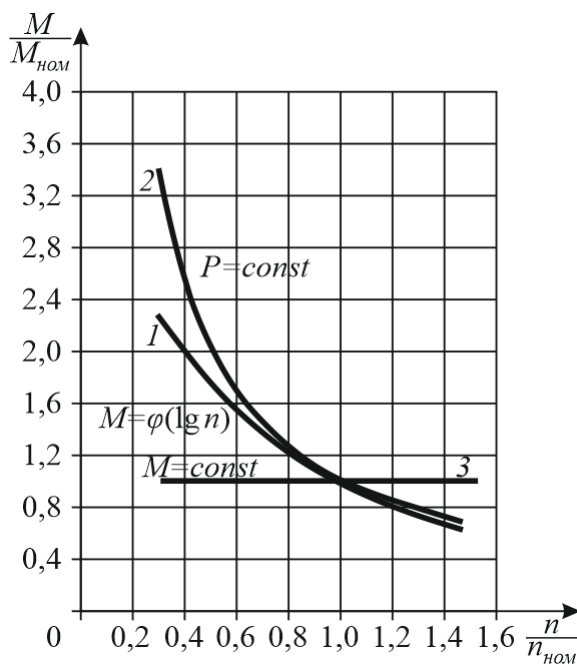
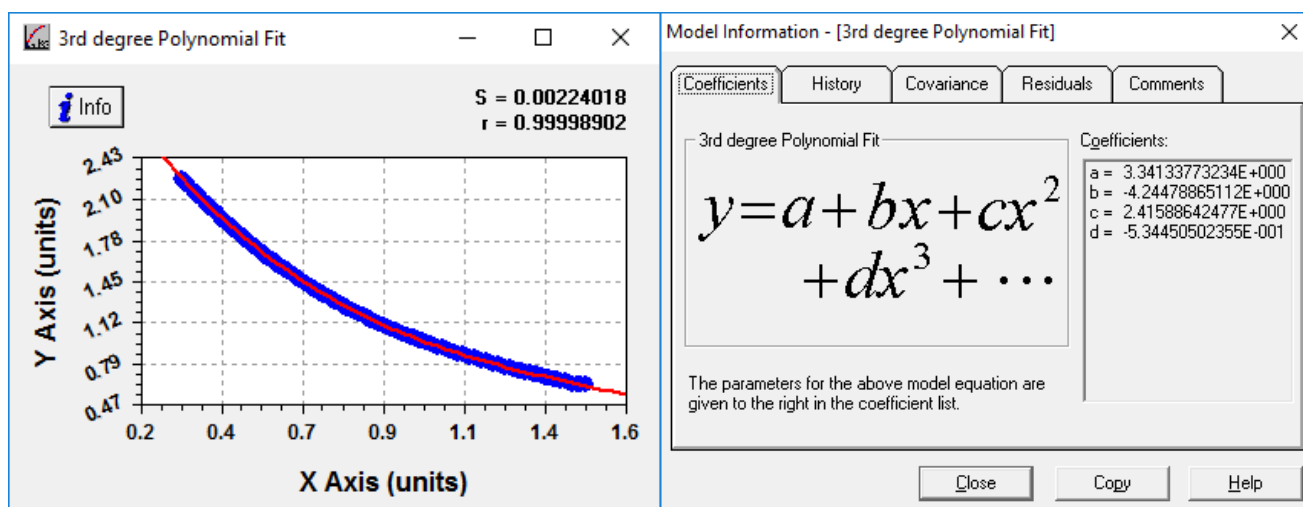
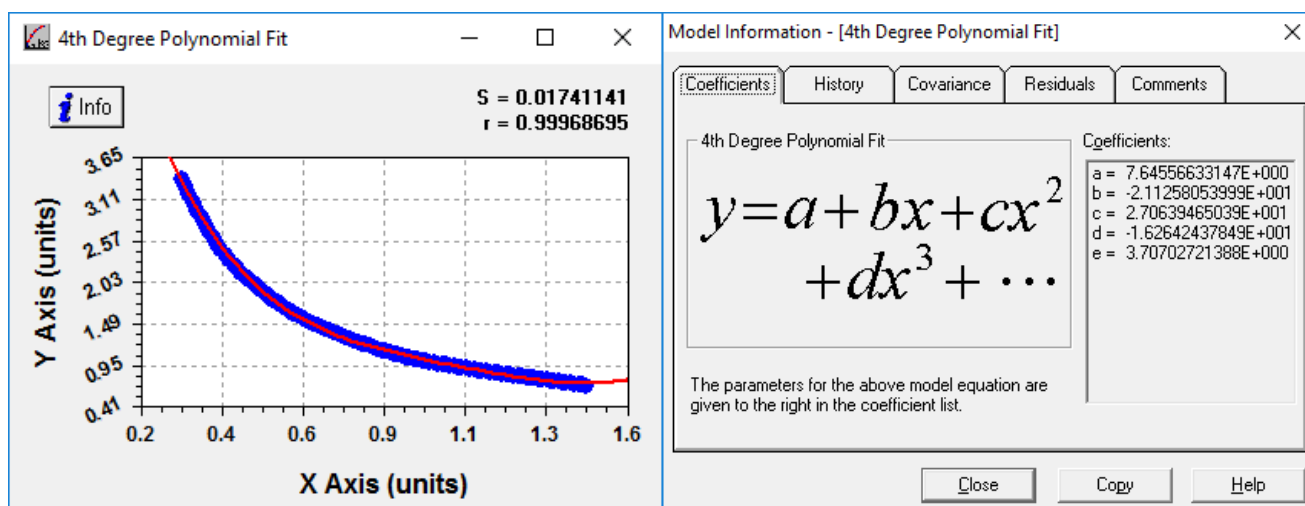


Рис. 2.3. Механічні характеристики долота

Інформаційні моделі механічних характеристик (1), (2) долота наведені на рис. 2.4.



Для 1 – $M = f(\lg n)$



Для 2 – $P = const$

Рис. 2.4. Вікна програмного середовища Curve Expert для інформаційних моделей механічних характеристик долота (1) і (2)

Для порівняння впливу різних механічних характеристик долота на сумісну механічну характеристику електробура розглянемо це питання на прикладі механічної характеристики електробура ЕП240-8-В5 [16].

Механічна характеристика (1) електробура ЕП240-8-В5 наведена на рис. 2.5. Вона побудована за паспортними даними занурного двигуна за допомогою рівняння Клосса [135].

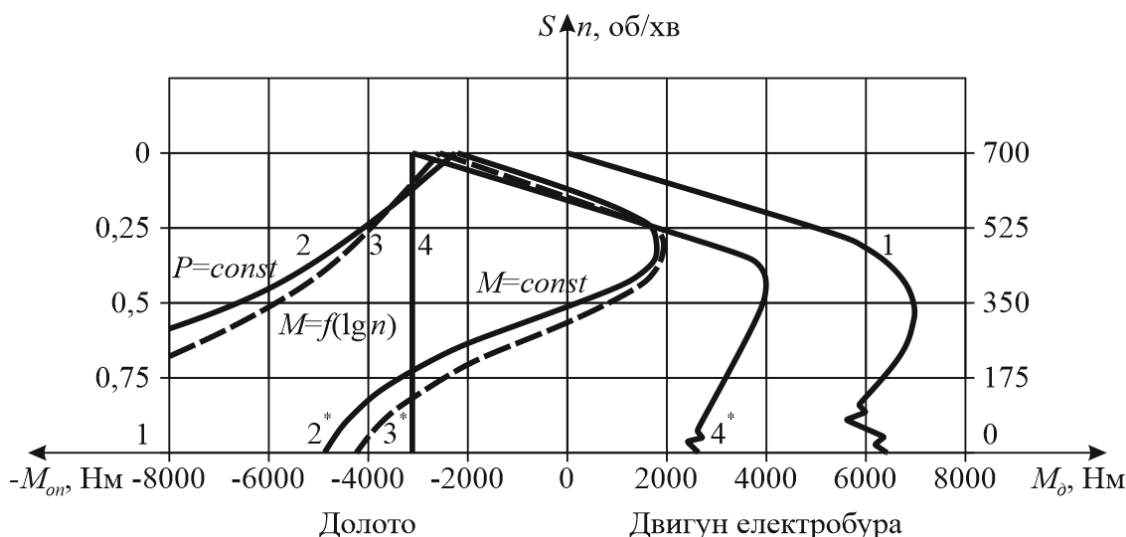
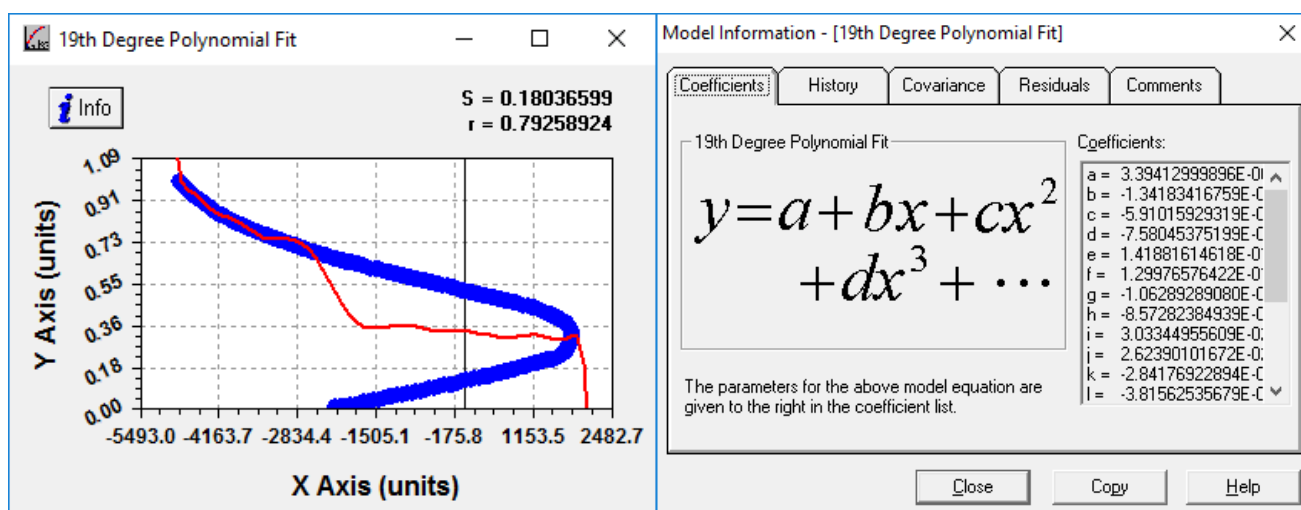


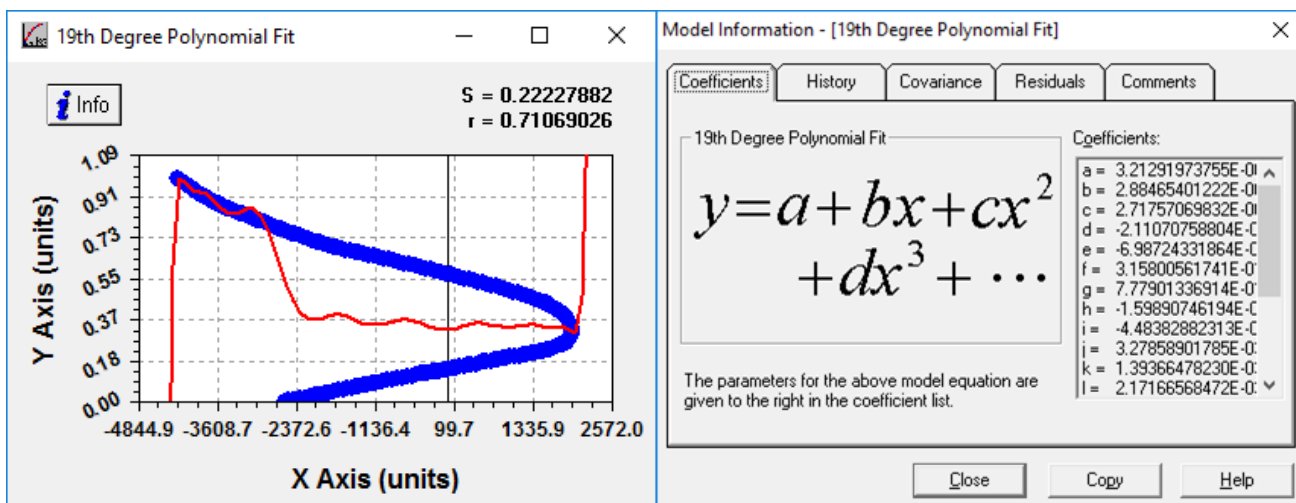
Рис. 2.5. Механічні характеристики занурного електродвигуна (1) і долота (2, 3, 4) при різних законах керування і сумісні механічні характеристики (2*, 3*, 4*) для електробура ЕП240-8-В5

(потужність номінальна $P_{ном} = 210$ кВт, напруга номінальна 1700 В, струм номінальний $I = 144$ А, номінальна швидкість 690 об/хв, $M_{ном} = 2800$ Нм, $M_{max} = 7000$ Нм, ККД = 75 %, $\cos \varphi = 0,66$, маса 3639 кг)

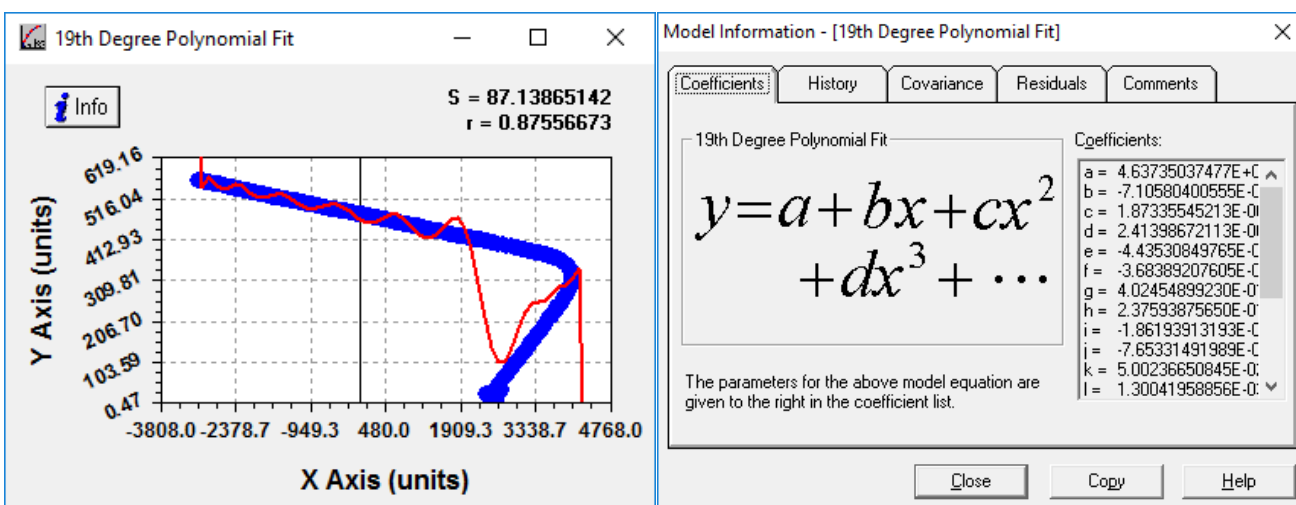
На рис. 2.6 подані інформаційні моделі механічних характеристик занурного двигуна та долота, побудовані за допомогою програмного середовища Curve Expert.



Для 2*



Для 3*



Для 4*

Рис. 2.6. Вікна програмного середовища Curve Expert для інформаційних моделей механічних характеристик занурного електродвигуна та долота

Сумісні механічні характеристики електробура побудовані для трьох механічних характеристик доліт – 2 – $P = const$, 3 – $M = f(\lg n)$, 4 – $M = const$. Аналіз характеристик показує, що з точки зору забезпечення потужності на валі електробура, для оптимального руйнування породи доцільно використовувати долота з механічними характеристиками (2) або (3). Жорсткість сумісних механічних характеристик електробура при цьому майже однакова й інформаційні моделі (рис. 2.5) забезпечують їх апроксимацію з високим коефіцієнтом кореляції

$r = 0,999$ і середньоквадратичними відхиленнями для $M = f(\lg n) - S = 0,002$, для $P = const - S = 0,017$.

Отже, побудовані інформаційні моделі адекватно описують зв'язок між поточними значеннями моменту і швидкості занурного двигуна електробура, що дозволяє використати їх у системі on-line моніторингу.

2.2 Причини нестабільності роботи електробурів

Можливість здійснення процесу адаптації в системі електробуріння ґрунтується на вивченні властивостей навколишнього середовища і об'єкта керування та використання результатів цього вивчення для відповідної зміни алгоритму функціонування системи [96÷99]. Адаптацію доцільно застосовувати в системах автоматичного управління процесом електробуріння, оскільки зміни структури і параметрів керування в процесі поглиблення свердловин передбачити неможливо [100, 101].

Сучасні електробури призначені для буріння вертикальних, похило-скерованих і розгалужено-горизональних нафтових і газових свердловин, а також для буріння свердловин інших призначень (будівництва фундаментів і фундаментів опор мостів, прокладання трубопроводів підводними та іншими перешкодами, буріння на воду тощо [9, 16]).

Електробури в сукупності з автоматизованою системою управління та інформаційним і програмним забезпеченням є сучасною мехатронною системою [176], що має складні динамічні властивості та містить різноманітні лінійні, нелінійні стаціонарні і нестаціонарні ланки: оливнонаповнений електродвигун змінного струму, який перетворює електричну енергію в механічну; механічну частину (шпиндель, редуктор, механізм викривлення), що передає перетворену енергію робочому органу електробура – долоту; систему керування, що містить як силове регульоване джерело живлення так і підсистему, яка забезпечує автоматичну подачу долота. Усі ці елементи створюють єдину електромеханічну (мехатронну) систему, складові частини якої щільно пов'язані між собою.

Виходячи з цього нестабільність роботи електробурів може залежати як від властивостей долота, так і від стану електричної частини приводу в процесі поглиблення свердловини.

На рис. 2.7 наведено алгоритмічну структуру відомої системи стабілізації активної складової струму статора двигуна електробура (або ваги на гаку), керування яким здійснюється за допомогою регулятора подачі долота типу АВТ-2 [29]. Система залежно від положення перемикача Π режимів роботи забезпечує стабілізацію активної складової струму статора двигуна електробура або ваги бурильної колони, що вимірюється на гаку.

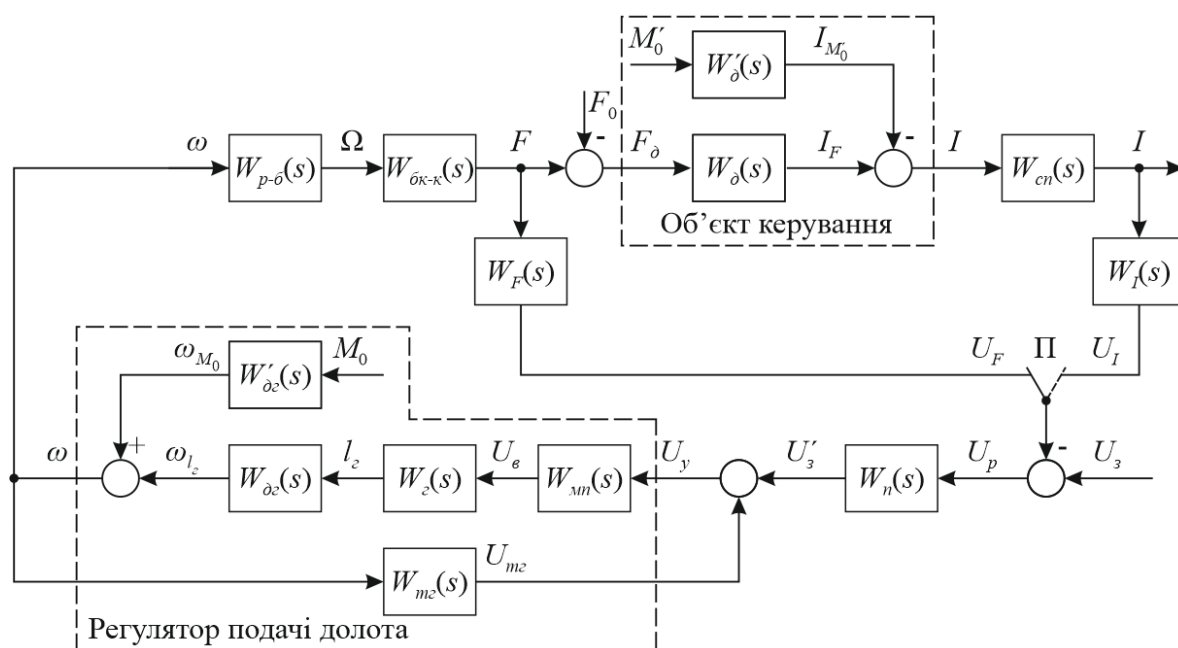


Рис. 2.7. Алгоритмічна структура системи автоматичного керування активної складової струму статора двигуна електробура (або ваги бурильної колони на гаку) з використанням регулятора подачі долота типу АВТ-2:

Π – перемикач режимів роботи

Виконавчим механізмом системи є привід Г-Д (генератор-двигун) із збудженням від магнітного підсилювача. Керувальний сигнал U'_3 формує електронний підсилювач залежно від величини і знака сигналу розузгодження U_p , що дорівнює різниці між напругою U_3 , пропорційною заданому впливу, та U_I (або U_F), пропорційною струму навантаження (або осьовому навантаженню на долото).

Окрім головного від'ємного зворотного зв'язку в системі стабілізації застосовано від'ємний зворотний зв'язок по швидкості ω двигуна системи Г-Д.

Двигун електробура в алгоритмічній схемі представлений двома ланками з функціями передачі $W_o(s)$ і $W'_o(s)$, вихідні величини яких віднімаються.

Керувальна дія (осьове навантаження на долото F_d) від приводу подачі передається електробуру через механічну систему – лебідку з редуктором, барабаном $W_{p-\delta}(s)$, талеву систему і бурильну колону $W_{\delta k-k}(s)$.

Якщо знехтувати величиною відношення ковзання двигуна до його критичного значення, а також коливаннями напруги живлення і частоти змінного струму, то двигун електробура можна розглядати як інерційну ланку першого порядку з функцією передачі [29]

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1}, \quad (2.27)$$

де K_o – коефіцієнт передачі двигуна електробура, А/кН;

T_o – електромеханічна стала часу двигуна електробура, с.

Проте ця функція передачі не враховує збурення, що є недосяжними для вимірювання. Крім цього, коефіцієнти передачі електробурів є нестабільні (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Показники електробурів і коефіцієнти передачі

Найменування показника	Діаметр електробура, мм				
	164	190	215	240	290
Струм номінальний, А	89	125	131	144	165
Осьове навантаження, кН	150	200	160÷180	250÷300	250÷500
Коефіцієнт передачі	0,593	0,625	0,774	0,576	0,55

Нестабільними також є електромеханічні сталі часу двигунів електробурів різних потужностей, довжини і діаметрів.

Струмопідвід системи «два проводи – труба» (ДП-Т), де одним із проводів є бурильна колона, наближено описують [82] функцією передачі безінерційної ланки

$$W_{cn}(s) = K_{cn}, \quad (2.28)$$

де K_{cn} – коефіцієнт передачі, А/а; який практично $K_{cn} = 1$.

Функціонування системи ДП-Т характеризується [3] наявністю кількох сотень штепсельних рознімів у місцях згвинчування окремих труб. Конструкція рознімів має обмеження, зумовлені необхідністю їх автоматичного з'єднання при згвинчуванні окремих труб, на яких електробур опускається у свердловину. Причинами нестабільності роботи системи ДП-Т є те, що на ізоляцію кабеля впливає амплітуда напруги змінного струму, а через струмопідвід передається не тільки активна потужність, але й реактивна. Труба в системі ДП-Т проводить змінний струм приблизно одноміліметровим поверхневим шаром при частоті 50 Гц (ефект витиснення в феромагнетику).

Давач струму – це інерційна ланка першого порядку з невеликим значенням сталої часу [10]:

$$W_I(s) = \frac{K_c}{T_c s + 1}, \quad (2.29)$$

де K_c – коефіцієнт передачі, В/А;

T_c – електромеханічна стала часу, с.

Електронний підсилювач реалізує найпростіший алгоритм – пропорційний:

$$W_n(s) = K_n, \quad (2.30)$$

де K_n – коефіцієнт підсилення, В/В.

Магнітний підсилювач є статичною інерційною ланкою першого порядку

$$W_{mn}(s) = \frac{K_{mn}}{T_{mn} s + 1}, \quad (2.31)$$

де K_{mn} – коефіцієнт передачі підсилювача, В/В;

T_{mn} – електромеханічна стала часу, с.

Функція передачі генератора постійного струму, згідно з його лінійною моделлю [83], має такий вигляд:

$$W_z(s) = \frac{K_z}{T_e s + 1}, \quad (2.32)$$

де K_z – коефіцієнт передачі генератора, В/В;

T_e – електромагнітна стала часу обмотки збудження, с.

Функція передачі двигуна постійного струму за керувальним впливом – ЕРС генератора – дорівнює [83]:

$$W_{\partial z}(s) = \frac{K_{\partial z}}{T_M T_J s^2 + T_M s + 1}, \quad (2.33)$$

а за збурювальним впливом (моментом навантаження):

$$W'_{\partial z}(s) = \frac{-K'_{\partial z}(T_J s + 1)}{T_M T_J s^2 + T_M s + 1}, \quad (2.34)$$

де $K_{\partial z} = \frac{1}{C_e \Phi_o}$ – коефіцієнт передачі двигуна за керувальним впливом, $1/c/V$;

$K'_{\partial z} = \frac{r_J}{C_M C_e \Phi_o^2}$ – коефіцієнт передачі двигуна за збурювальним впливом,

$1/c/Hm$;

C_e – конструктивна стала двигуна, $V/V\delta(1/c)$;

C_M – конструктивна стала двигуна, $Hm/A \cdot V\delta$;

Φ_o – магнітний потік збудження, Вб;

T_J – електромеханічна стала часу якірної обмотки, с;

$T_M = \frac{2\pi r_J J}{C_M C_e \Phi_o^2}$ – електромеханічна стала часу двигуна, с;

r_J – активний опір якірної обмотки, Ом;

J – сумарний момент інерції двигуна і приведений до валу двигуна моменту інерції робочого механізму, Hm^2 .

Окрім температурної нестабільності опорів обмоток, що змінюються повільно та впливають на сталі часу обмоток збудження і якоря, в системі Г-Д є ще параметри, що змінюються швидко, і нестабільність яких залежить від багатьох факторів. Коефіцієнт передачі K_z генератора залежить від нелінійності характеристики «вхід – вихід», сталі часу T_e , T_M , T_J також залежать від U_y , U_δ ; опори і індуктивності обмоток є функціонально залежними від фазових координат

та керувальних впливів; при регулюванні потоку збудження Φ_o змінюються сталі часу і коефіцієнт передачі; навіть за постійного струму збудження не можна стверджувати, що потік збудження $\Phi_o = const$, оскільки на результуючий потік збудження впливає реакція якоря.

Редуктор, барабан лебідки і тахогенератор можна вважати безінерційними ланками з функціями передачі

$$W_{p-\delta}(s) = K_{p-\delta}; \quad (2.35)$$

$$W_{mz}(s) = K_{mz}, \quad (2.36)$$

де $K_{p-\delta}$ – коефіцієнт передачі системи «редуктор – барабан лебідки», $1/c/1/c$;

K_{mz} – коефіцієнт передачі тахогенератора, $B/1/c$.

Проте найбільш складною ланкою в системі подачі долота є ланка «бурильна колона – канат талевої системи».

У зв'язку з тим, що бурильна колона має фрактальну структуру і збільшується в процесі поглиблення свердловини, математичний опис її властивостей як елемента системи автоматики є досить складним. У [84] запропоновано систему «бурильна колона – канат» описувати трансцендентною функцією передачі

$$W_{\delta k-k}(s) = \frac{\gamma}{\gamma W_{\delta k}(s) - s}, \quad (2.37)$$

де γ – жорсткість каната, H/M ;

$W_{\delta k}(s)$ – функція передачі бурильної колони.

Водночас параметри такої ланки змінюють дискретно у міру нарощування труб і збільшення глибини свердловини. Це значно ускладнює використання функції передачі (2.37) для аналізу системи керування.

Було доведено [84, 85], що для малих глибин (до 250 м) можлива апроксимація функції передачі інерційною ланкою першого порядку

$$W_{\delta k-k}(s) = \frac{K_{\delta k-k}}{Ts + 1}, \quad (2.38)$$

а для великих глибин – коливальною ланкою

$$W_{\text{бк-к}}(s) = \frac{K_{\text{бк-к}}}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}, \quad (2.39)$$

де $K_{\text{бк-к}}$ – коефіцієнт передачі ланки «бурильна колона – канат», $\frac{\text{кН}}{1/\text{с}}$;

$T = \sqrt{1,5Q_0} \cdot h$ – стала часу ланки, с;

$\zeta = \frac{Q_1}{2\sqrt{Q_0}} \cdot h$ – коефіцієнт загасання, с;

h – довжина бурильної колони, м;

$Q_0 = 0,38 \cdot 10^{-7}$, $\frac{\text{с}^2}{\text{м}^2}$; $Q_1 = \frac{R}{67,46} \cdot 10^{-7}$, $\frac{\text{с}^2}{\text{м}^2}$;

R – коефіцієнт втрат.

Числові значення коефіцієнтів Q_0 і Q_1 визначені [85] для таких умов буріння: зовнішній діаметр бурильних труб $D = 114,3 \cdot 10^{-3}$ м; товщина стінки труби $\Delta = 10^{-2}$ м; маса погонного метра труби $m = 26,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$; модуль Юнга $E = 20,601 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; довжина обважених бурильних труб $h_{\text{обт}} = 25$ м; маса обважених бурильних труб $156 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$; маса занурного двигуна 3900 кг.

Отже, причинами нестабільності роботи електробурів є:

- зміни коефіцієнтів передачі системи Г-Д (або ТП-Д) механізму подачі долота;
- нестабільність параметрів електромагнітних контурів у колі Г-Д, або ТП-Д (реакція якоря, насичення магнітопроводів, трансформаторів, дроселів, зміна параметрів якірного ланцюга та ін.);
- залежність потоку збудження двигуна від реакції якоря, зсуву щіток з геометричної нейтралі та ін.;
- повторно-короткочасний режим роботи механізму подачі долота.

Ще більше параметри електробура, як об'єкта керування, залежать від його механічної частини при зміні умов роботи – моменту інерції, пружності механічних елементів. Наприклад, при бурінні похило-скерованих свердловин

глибиною приблизно 5000 м, а в майбутньому – до 6000 м, як правило, погано відомі гірничо-технологічні умови, фізико-механічні властивості гірських порід, траєкторія руху електробура. Окрім цього, майже невідомі параметри зовнішнього середовища (температура до 200°C, вібрації, дуже великий гірничий тиск, прискорення на долоті в 100 разів більше $g = 9,81$ [7]), зношення долота. Отже, причинами нестабільності роботи електробурів є зміни не тільки властивостей електричної частини, але й властивостей механічної частини бурової установки в процесі поглиблення свердловини, а саме:

- зміни моментів інерції, жорсткостей, коефіцієнтів механічних передач;
- нестабільність збурювальних впливів на механічну частину електробура;
- взаємний вплив механічних параметрів механізму подачі долота, бурильної колони і електробура з долотом.

У табл. 2.2 наведені узагальнені відомості про можливі причини нестабільності роботи електробурів і найбільш характерні особливості зміни їхніх параметрів.

Таблиця 2.2

Причини нестабільності роботи електробурів

Об'єкт керування	Причини зміни параметрів	Що змінюється в об'єкті керування	Які еквівалентні параметри системи змінюються
Процес буріння нафтових і газових свердловин електробурами	Технологічна, зміна геометрії свердловини, переміщення електробура, заміна долота, знос долота, взаємозв'язки з пружними елементами системи (бурильною колоною, талевою системою), зміна потоку промивальної рідини, нелінійність магнітної системи двигуна електробура; недостатня узгодженість параметрів механізму подачі долота з параметрами бурильної колони.	Сумарний момент інерції. Параметри пружного зв'язку між колоною бурильних труб і долотом. Довжина бурильної колони. Довжина струмопідводу.	Електромеханічна стала часу Функція передачі Власна частота коливань бурильного інструменту. Коефіцієнти передачі елементів бурильного інструменту.

Аналіз причин нестабільності роботи електробурів показав також, що зі зміною осьового навантаження на долото повний струм і активна складова струму статора змінюються несуттєво (відношення робочого номінального струму до струму неробочого ходу за номінальної напруги складає для електробурів різних типів $1,06 \div 1,36$) [9, 16], що пояснюється конструктивними особливостями двигунів електробурів. А збільшення опору в колі статора здійснюється за рахунок струмопідводу [29]. Все це вимагає проведення додаткових досліджень динамічних властивостей бурильної колони, функції передачі електробура з урахуванням недосяжних для вимірювань збурень, вибору іншої керованої величини, створення адаптивної системи керування із змінною структурою.

2.3 Вибір способу адаптації

2.3.1 Класифікація задач оптимального керування

Технологічний процес поглиблення нафтових і газових свердловин електробурами як об'єкт керування є невідтворюваним нелінійним стохастично-хаотичним процесом, що розвивається в часі і здійснюється за умов апріорної та поточної невизначеності щодо його параметрів і структури [6, 14, 15, 23, 102]. Він перебуває під впливом різного типу адаптивних та мультиплікативних збурень, не досяжних для вимірювань. Ці збурення впливають як на поведінку об'єкта, так і на визначення його моделі в реальному часі, особливо при бурінні свердловин на важкодоступні сланцеві поклади.

Основними підходами, які використовує сучасна теорія керування щодо побудови ефективних систем автоматизованого управління такими складними технологічними об'єктами в умовах невизначеності, є оптимальне, робастне та адаптивне керування [44, 106÷111]. Поєднання таких методів сучасної теорії керування дозволяє ефективно використовувати переваги кожного з них.

Задачі оптимального керування залежно від типу накладених обмежень прийнято поділити на два типи [104]:

- класичного типу, коли накладені обмеження задають у вигляді рівності

$$f_k(X, Y, t) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, l, \quad \text{або} \quad |Y| = Y_{\max}. \quad (2.40)$$

Як, наприклад, при релейному керуванні. Проте при оптимальному керуванні електроприводами, до яких належить керування електробурами, такий тип задач буває не часто [105];

- некласичного типу, коли обмеження задані у вигляді нерівностей

$$f_k(X, Y, t) \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, l, \quad \text{або} \quad -Y_{i_{\max}} \leq Y_i \leq Y_{i_{\max}}. \quad (2.41)$$

Відзначимо, що в практиці оптимізації і роботи електроприводів найбільш часто використовують задачі з обмеженнями некласичного типу. Проте задачі некласичного типу формально можна привести до класичного типу.

За видом граничних умов задачі оптимального керування електробурами можна класифікувати так [105÷108]:

а) задача з закріпленими кінцями траєкторії руху, коли значення фазових координат у початковій t_0 і кінцевій t_k моменти часу керування є фіксованими конкретно заданими і відомими величинами. Це найбільш розповсюджений клас задач, коли треба перевести об'єкт керування із конкретної відомої точки фазового простору в іншу конкретну точку фазового простору при виконанні якогось критерію оптимальності і заданих обмеженнях;

б) задачі з рухомою кінцевою, початковою або обома кінцями траєкторії руху, коли значення фазових координат задані лише на початку або лише в кінці, або не задані ні на початку, ні в кінці процесу керування. Характерною задачею з рухомим правим кінцем є задача проходження двигуном електробура, як об'єктом керування, заданого шляху за мінімальний час без зупинки в кінці керування та при відомих початкових фазових координатах і певних обмеженнях на керувальний вплив та деякі фазові координати. Задачею з рухомим початковим кінцем і фіксованим правим кінцем є вибір моменту початку гальмування двигуна, якщо відомі фазові координати в кінці гальмування, критерій оптимальності і обмеження. Прикладом задачі з рухомими лівим і правим кінцями є задача синтезу закону керування двигуном із будь-якого довільного початкового

стану для повороту валу двигуна на заданий кут за мінімальний час без зупинки в кінці відпрацювання за відомих обмежень;

в) задача із вільним правим кінцем, коли значення фазових координат об'єкта керування в кінці руху співпадають з усім фазовим простором, тобто на правий кінець траєкторії руху об'єкта керування жодних обмежень не накладено. Прикладом є задача проходження об'єктом керування максимального шляху з заданою кількістю енергії (максимальна проходка на долото при заданих осьовому навантаженні на долото і швидкості електробура та ін.).

2.3.2 Класифікація задач і методів адаптивного керування

Адаптивне керування має здійснювати оптимальний перебіг процесів керування за умов невизначеності або неповноти інформації щодо умов роботи системи. Отже, основними задачами адаптивного оптимального керування є [105, 109, 110, 111]:

- за довільної зміни параметрів об'єкта керування і навколишнього середовища в системі необхідно так змінювати параметри регулятора, щоб динамічні властивості системи для заданих впливів залишалися незмінними. При цьому передбачається, що система була оптимізована;

- за відсутності апріорної інформації про параметри об'єкта керування і навколишнього середовища здійснюється автоматичний пошук оптимального режиму роботи системи відповідно до заданого критерію якості.

Задачі адаптивного керування вирішуються ідеально [55], якщо в системі немає зовнішніх збурень і шумів вимірювань, невідомі характеристики об'єкта керування представлені постійними параметрами і динамічний порядок реального об'єкта дорівнює порядку його математичної моделі.

Зрозуміло, що в більшості практичних випадків щодо процесу буріння свердловини електробурами ідеальні умови не виконуються.

Тому для розв'язування задач адаптивного керування процесом буріння застосовують різноманітні прийоми адаптації, що залежать від конкретних вимог та умов їхнього функціонування.

Наприклад, якщо координати і параметри системи, що несуть інформацію про її нестационарність і використовуються для створення компенсаційних зв'язків, є недосяжними для вимірювань, то можна застосувати спостерігальні пристрої, які відновлюють необхідні параметри і координати системи [112].

Може бути застосований прийом, пов'язаний з оцінюванням параметрів та ідентифікацією системи шляхом її збудження і автоматичного самоналаштування параметрів або структур автоматичного керування пристроєм [55, 106].

Якщо функціонуюча система керування процесом буріння свердловин електробурами постійно перебуває під впливом різного роду збурювальних дій, то стан системи можна оцінювати, використовуючи природні динамічні процеси, оскільки вони мають достатній спектр частот [89, 90].

Загалом у розв'язуванні задач адаптивного керування можна виділити декілька етапів, що є типовими [105, 108, 111].

1-ий етап. Методами теорії автоматичного і оптимального керування синтезуємо структуру автоматичного керувального пристрою (регулятора), виходячи з того, що необхідна для цього інформація про об'єкт керування і навколишнє середовище відома. Отриману таким методом структуру регулятора можна назвати ідеальною.

2-ий етап. Вибираємо структуру адаптивної системи керування, виходячи із принципів, що покладені в основу її побудови.

3-ій етап. Розробляємо правило зміни параметрів і структури ідеального керувального пристрою, згідно з яким система набуває властивості пристосованості до зміни параметрів і характеристик об'єкта керування та навколишнього середовища.

4-ий етап. Обґрунтовуємо працездатність системи шляхом підтвердження того, що принципи, які закладені в основу адаптивної системи керування, дають очікуваний ефект.

Класифікація адаптивних систем керування залежно від способів реалізації контрольованих змін у системі для адаптації в процесі її експлуатації [104] наведена на рис. 2.8.

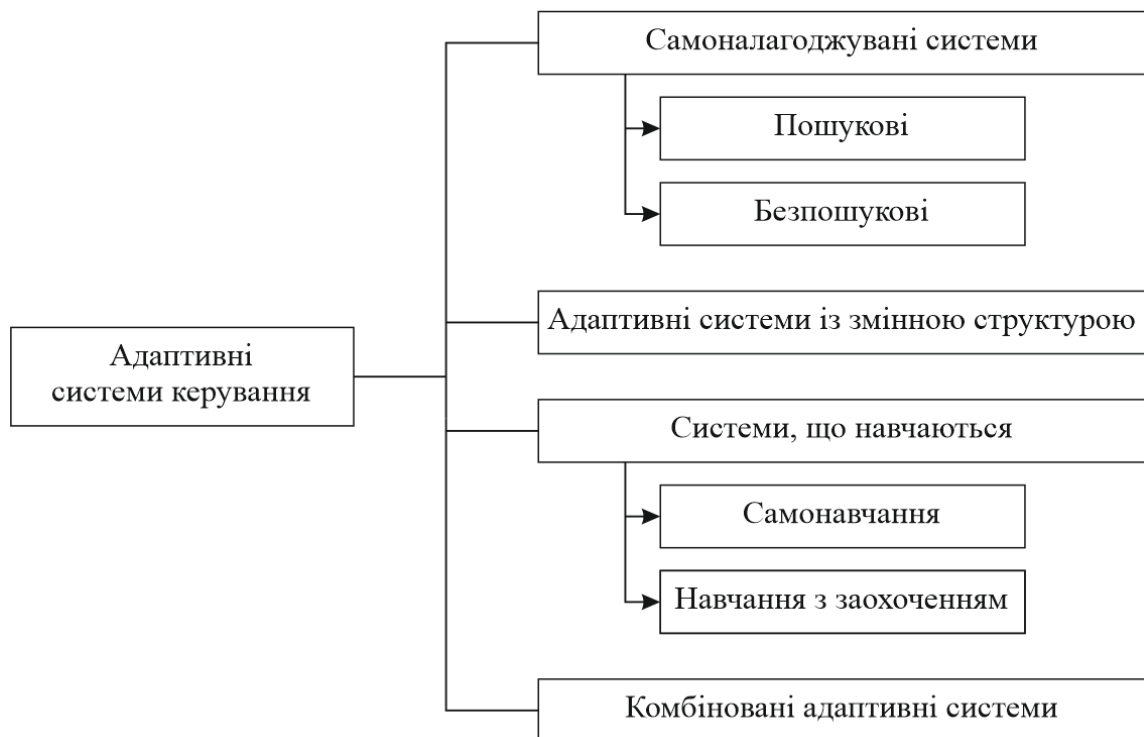


Рис. 2.8. Класифікація адаптивних систем керування

Самоналагоджувані системи характеризуються наявністю спеціальних контурів самоналаштування, за допомогою яких оцінюють статичні і динамічні властивості системи та формують контрольовані впливи, що наближають систему до певного еталону, який задають як правило, у вигляді критерію якості роботи. При цьому контур самоналаштування служить для зміни параметрів або структури основного контуру оптимізації. Задача контуру самоналаштування зводиться до забезпечення екстремального значення критерію якості роботи системи в умовах апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта керування та неповної апріорної інформації про умови роботи системи. Пошук і підтримання екстремального значення критерію якості можна здійснювати або пробними керувальними впливами і наступним оцінюванням поведінки системи, або аналітичним визначенням умов екстремуму. Залежно від цього такі системи поділяють на пошукові і безпошукові. До пошукових належать

системи з пошуком екстремуму методом найшвидшого спуску, методом градієнту Гауса-Зейделя, із випадковим пошуком. Безпошукові системи використовують інформацію про частотні і часові характеристики, межу стійкості, поведінку еталонної моделі.

В адаптивних системах із змінною структурою використовувани особливі режими або властивості нелінійних систем для організації контрольованих змін динамічних властивостей системи керування. Спеціально організовані особливі режими є додатковим джерелом інформації про умови роботи системи, що змінюються в часі. В іншому випадку систему керування наділяють властивостями, завдяки яким динаміка керованого процесу перебуває в межах заданих показників якості.

Адаптивні системи, що навчаються, застосовують, якщо не тільки недостатній обсяг апіорної інформації про об'єкт керування, але й якщо немає можливості встановити причино-наслідкові зв'язки в структурі самої системи внаслідок її складності. Накопичення і узагальнення інформації в процесі навчання системи здійснюється за допомогою зовнішнього або внутрішнього «еталонного досвіду». Залежно від способу накопичення знань такі системи бувають самонавчальними та з навчанням із заохоченням [104].

У комбінованих адаптивних системах керування використовувани сполучення різних принципів самоналаштування і навчання.

Все зазначене вище дозволяє зробити висновок, що стандартні методи адаптивного керування не можуть бути безпосередньо використані для компенсації зовнішніх збурень, що впливають на процес буріння свердловин електробурами, оскільки останні належать до класу не параметричних, а сигнальних невизначеностей. Ця обставина викликає необхідність розвитку спеціального методу адаптивного керування процесом поглиблення похило-скерованих свердловин електробурами, побудованого на поєднанні позитивних властивостей робастного і адаптивного керування.

2.4 Розроблення правил зміни структури блоку адаптації

2.4.1 Обґрунтування вибору параметрів, що є основними для розроблення правил зміни структури керувального пристрою

При електробурінні вибій свердловини і гирло свердловини зв'язані кабелем, що підводить енергію до двигуна електробура. Потужність і струм, що вимірюються на поверхні, залежать не тільки від осьового навантаження на долото, але й від гірничо-технологічних умов буріння, які постійно змінюються. Ці особливості використаємо для розроблення правил зміни структури керувального пристрою. Враховуватимемо, що момент на долоті $M_{дол}$ за постійної швидкості двигуна залежить на відносно тривалих ділянках часу лише від осьового навантаження на долото $F_{дол}$, тобто [29]:

$$M_{дол} = M_{ном} \cdot F_{дол}, \quad (2.42)$$

де $F_{дол}$ – фактичне осьове зусилля на долоті;

$M_{ном}$ – питомий момент, який задають для конкретного стратиграфічного горизонту, типорозміру долота і параметрів режиму буріння.

Величину $M_{ном}$ визначається емпіричним методом для кожного стратиграфічного горизонту на основі аналізу матеріалів досліджень режимів буріння опорно-технологічних свердловин. Величину $M_{ном}$ для деяких стратиграфічних горизонтів наведено [16] в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Питомі енергетичні параметри електробурів, віднесені до площі вибою S

Питомі енергетичні параметри	Тип електробура				
	ЕП164-8-В5	ЕП190-8-В5	ЕП215-8-В5	ЕП240-8-В5	ЕП290-12-В5
P/S , кВт/см ²	0,228	0,347	0,376	0,369	0,147
$M_{ном}/S$, кН·м/см ²	0,003	0,0047	0,0051	0,0049	0,003
M_{max}/S , кН·м/см ²	0,0066	0,0099	0,0180	0,012	0,0065

Слід мати на увазі, що величина $M_{ном}$ не залежить від осьового навантаження, а також мало залежить від швидкості обертання в межах $n = 400 \div 700$ об/хв.

З іншого боку потужність P і струм I , які споживає двигун електробура, залежать від моменту на валі $M_{\text{дол}}$. Тому підтримувати задане значення P або I – означає підтримувати задане значення моменту $M_{\text{дол}}$, а отже, і значення фактичного зусилля на долоті $F_{\text{дол}}$ впродовж досить тривалого інтервалу часу.

У свердловинах, які мають великий нахил, внаслідок зависання інструменту під час буріння рекомендовано [25] контролювати осьове навантаження на долото за величиною потужності і питомим моментом за формулою

$$F_{\text{дол}} = \frac{975(P_{\text{дол}} - P_o)}{M_{\text{нум}} \cdot n}, \quad (2.43)$$

де $P_{\text{дол}}$ – потужність на долоті, кВт;

P_o – потужність, витрачена на обертання долота без створення осьового навантаження, кВт;

$M_{\text{нум}}$ – питомий момент для даного типу долота, що працює в конкретній породі з певною швидкістю обертання;

n – швидкість обертання долота з даним електробуром, об/хв.

Потужність на долоті може бути обчислена за формулою [95]:

$$P_{\text{дол}} = (P_e - P_{\text{сн}})\eta - P_{\text{шп}} - \frac{F_{\text{дол}} \cdot f \cdot d \cdot n}{195 \cdot 10^2}, \quad \text{кВт}, \quad (2.44)$$

де P_e – потужність, яку споживає електробур, разом із втратами в струмопідводі, кВт;

$P_{\text{сн}}$ – втрати потужності в струмопідводі, кВт;

η – ККД двигуна електробура, $\eta = 60 \div 75 \%$; визначається з технічних даних електробурів [16];

$P_{\text{шп}}$ – втрати потужності на тертя в шпинделі без осьового навантаження, кВт; $P_{\text{шп}} = 2$ кВт для електробурів діаметром 164, 190 мм; $P_{\text{шп}} = 4$ кВт для електробурів діаметром 215, 240 і 290 мм [16];

$f = 0,003$ – умовний коефіцієнт тертя в упорному підшипнику шпинделя, приведений до валу;

d – внутрішній діаметр упорного підшипника шпинделя, $d = 75 \div 130$ для різних електробурів.

Втрати потужності в струмопідводі обчислюють за формулою [16]:

$$P_{cn} = R_k(I_A^2 + I_B^2) + R_{mp}I_C^2, \text{ кВт}, \quad (2.45)$$

де I_A, I_B, I_C – струми в фазах A, B, C, A ;

$R_k = R_{20}(1 + \alpha_1 t_{cp,k})$ – опір кабелю, Ом;

$R_{20} = 0,37 \div 0,38, \text{ Ом/км}$ – опір кабелю за температури 20°C ;

$\alpha_1 = 0,004$ – тепловий коефіцієнт для міді;

$t_{cp,k} = \frac{t_{поверх} + t_{виб}}{2}$ – середня температура вздовж ствола свердловини

приймається для труб за температурою бурового розчину, для кабелю на 20°C вище від температури бурильних труб;

$R_{mp} = R_{mp20}(1 + \alpha_2 t_{cp,mp})$ – опір труби, Ом;

$\alpha_2 = 0,006$ – тепловий коефіцієнт для сталі.

Значення опору колони бурильних труб довжиною 1 км при температурі 20°C R_{mp20} [16] наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Значення опору колони бурильних труб довжиною 1 км залежно від струму за температури 20°C

Діаметр труби, мм	Опір, Ом	Величина струму, А				
		50	75	100	125	150
Н 140	R_{mp}	0,2	0,25	0,29	0,33	0,36
	X_{mp}	0,31	0,34	0,38	0,4	0,43
Н 127	R_{mp}	0,24	0,30	0,36	0,41	0,46
	X_{mp}	0,32	0,36	0,4	0,44	0,48
Н 114	R_{mp}	0,28	0,34	0,4	0,45	0,5
	X_{mp}	0,32	0,36	0,4	0,44	0,48

Оскільки питомий момент M_{nut} змінюється в процесі поглиблення свердловин, то слід встановити обмеження $F < F_{дол}$, де $F_{дол}$ – задане значення допустимого навантаження на долото. У цьому випадку навантаження на долото є

обмежувальним параметром. Його можна визначити за показами наземного індикатора ваги бурильної колони.

Отже, система адаптивного керування має змінювати свою структуру [114] таким чином, щоб забезпечити буріння свердловини або шляхом регулювання осьового навантаження F на долото, або струму I , що споживається двигуном електробура, який залежить від моменту на долоті $M_{\text{дол}}$. Від моменту $M_{\text{дол}}$ залежить і активна потужність P двигуна електробура. Тому доцільно порівняти ці два чинники з позиції доцільності використання їх як керованої величини.

Відзначимо, що сучасні регулятори подачі долота забезпечують стабілізацію осьового навантаження на долото з точністю ± 4 кН, а при бурінні в неоднорідних породах $\approx \pm 11$ кН. Точність підтримання заданого значення активної складової струму двигуна електробура залежить від частотного спектра збурень, що діють на електробур з боку вибою, і при різних змінах моменту на валі дорівнює $15 \div 20$ % відносно до номінального значення [29]. Коефіцієнт статизму системи, стабілізації активної складової струму навантаження двигуна електробура дорівнює 0,19.

Аналіз роботи регуляторів подачі долота АВТ-2 довів, що зі зміною осьового навантаження на долото повний струм і активна складова струму статора змінюється несуттєво. Це пояснюється конструктивними особливостями двигуна електробура і збільшеним за допомогою струмопідводу змінним опором у колі статора [29]. Тому доцільно вибрати іншу регульовану величину, яка більш повно характеризувала б процес поглиблення свердловини в умовах, якщо покази індикатора ваги не відповідають дійсному осьовому зусиллю на долоті. Водночас слід врахувати, що у міру зношення озброєння шарошкового долота при бурінні з $F = \text{const}$, питома потужність на долоті зменшується, що супроводжується зниженням ефективності буріння [113].

Відомо [115], що при бурінні вертикальних свердловин глибиною до $2000 \div 5000$ м покази наземного індикатора ваги досить точно відповідають осьовому навантаженню на долото. Проте ця відповідність порушується під час буріння викривлених, похило-скерованих, розгалужено-горизонтальних, а також

глибоких (понад 5000 м) свердловин через великі втрати на тертя бурильної колони об стінки свердловини. За таких умов навантаження на долото можна досить точно визначити непрямим методом – за потужністю, яку споживає двигун електробура [120]. Слід відзначити, що регульованим параметром системи АВТ-2 в енергоємних породах є активна складова струму двигуна електробура. Проте із збільшенням осьового навантаження F на долото величина струму змінюється дуже мало, в той час як активна потужність зростає досить суттєво (рис. 2.9).

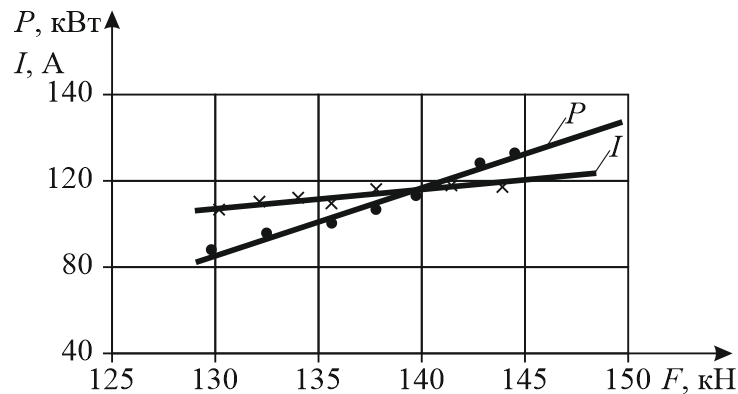


Рис. 2.9. Графіки залежностей активної складової струму I та потужності P , що споживає двигун електробура Е215-8 від осьового навантаження F на долото У295,3СТ (свердловина № 346Д, $U = 1250$ В, інтервал буріння 1150÷1165,7 м)

Коефіцієнти передачі для кожної із залежностей, побудованих в одному масштабі такі:

$$K_I = \frac{\Delta I}{\Delta F} = \frac{111,5 - 110}{15} = 0,1 \frac{\text{А}}{\text{кН}}, \quad K_P = \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{129 - 90}{15} = 2,2 \frac{\text{кВт}}{\text{кН}},$$

тобто

$$\frac{K_P}{K_I} = 22.$$

Цей факт свідчить на користь потужності на долоті як керованої величини. Але для підвищення точності вимірювання потужності на долоті слід враховувати втрати потужності в несиметричному струмопідводі ДП-Т; втрати, зумовлені силами тертя, пропорційними осьовому навантаженню на долото; втрати

потужності в оливнонаповненому двигуні електробура, а також вплив ковзання двигуна, яке може суттєво відхилитися від номінального значення [116, 117, 118].

Отже, параметрами, що характеризують процес буріння електробурами і є основними для розроблення правил зміни структури керувального пристрою, за яких система керування набуває властивості пристосовуватися до змін параметрів і характеристик електробура та навколишнього середовища, є осьове навантаження на долото і потужність на долоті [119÷121].

Типові графіки зміни в часі осьового навантаження на долото $F(t)$ і потужності, яку споживає двигун електробура, при змінах міцності розбурювальної породи наведено на рис. 2.10.

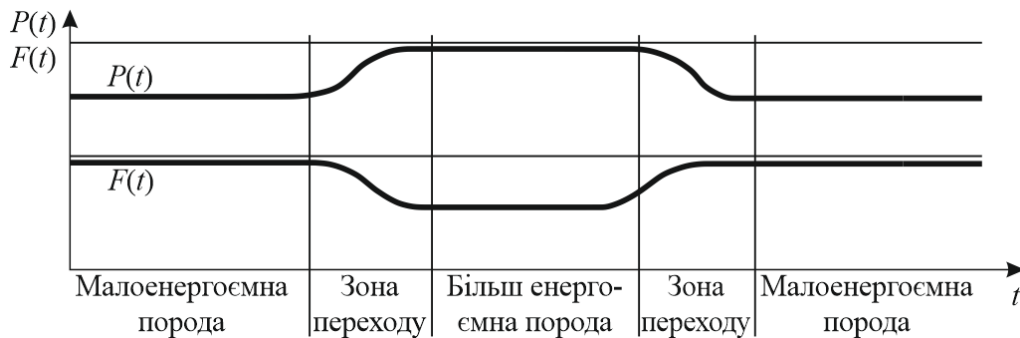


Рис. 2.10. Графіки зміни в часі осьового навантаження на долото $F(t)$ і потужності, яку споживає двигун електробур $P(t)$, при зміні міцності розбурювальної породи

Оскільки об'єкт керування функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта, то для формування правил зміни структури системи використаємо метод Мамдані-типу [122÷131, 137].

2.4.2 Вибір кількості термів для нечіткого опису базових змінних в F -перетворенні осьового навантаження на долото $F(t)$ і потужності двигуна електробура $P(t)$

Оскільки блок адаптивного керування містить модуль

$$F \Rightarrow RB \Rightarrow F^{-1}$$

(фазифікація \rightarrow база правил \rightarrow дефазифікація),

який здійснює статичне перетворення нормалізованих вхідних сигналів $X(-1 < x < 1)$ у контрольований сигнал $Y(0 < y < 1)$, то необхідно вибрати кількість термів для нечіткого опису осьового навантаження на долото $F(t)$ і потужності занурного двигуна електробура $P(t)$.

Статична характеристика даного модуля залежить не тільки від форми функції належності, але й від кількості лінгвістичних змінних (термів), прийнятих для нечіткого опису вхідних змінних у перетвореннях F і F^{-1} та методу дефазифікації [128, 129]. Правильний підбір форми термів, їх кількості та бази правил дозволяють реалізувати лінійне і будь-яке нелінійне перетворення $Y = f(X)$.

Для розв'язання задачі вибору кількості термів потрібні такі початкові дані [128]:

- назва вхідного параметру X_i , $i = \overline{1, n}$;
- поле допуску параметра a показника процесу буріння $(X_0 - T_n; X_0 - T_e)$, де T_n , T_e – нижнє і верхнє допустимі відхилення параметра X_i від X_0 (номіналу);
- діапазон $[X_{i_{\min}}, X_{i_{\max}}]$ зміни параметра X_i ;
- назва кожного лінгвістичного терму.

Щоб визначити кількість термів, скористаємося методикою, викладеною в роботі [128], з урахуванням того, що відхилення досліджуваних параметрів $F(t)$ і $P(t)$ від граничних значень неприпустимі. Оскільки створюємо базу правил для нечіткої системи з двома входами і одним виходом, то очевидно, що для цього необхідні навчальні дані у вигляді множини пар

$$[x_1(t), x_2(t), y(i), i = 1, 2, 3, 4, \dots], \quad (2.46)$$

де $x_1(t)$, $x_2(t)$ – сигнали, що подаються на вхід блоку адаптації;

$y(i)$ – очікуване значення вихідного сигналу.

Слід сформулювати такі нечіткі правила, щоб сконструйований на їхній основі блок адаптації при отриманні вхідних сигналів генерував коректні (що мають найменшу похибку) вихідні сигнали.

Першим кроком є розділення просторів вхідних і вихідних сигналів на зони.

Припустимо, що відомі мінімальне і максимальне значення кожного сигналу. За ними можна визначити інтервали, в яких перебувають їхні допустимі значення. Наприклад, для вхідного сигналу x_1 такий інтервал позначимо $[\underline{x}_1; \bar{x}_1]$. Якщо значення \underline{x}_1 та \bar{x}_1 відомі, то можна скористатися навчальними даними і вибрати з них відповідно мінімальне і максимальне значення

$$\underline{x}_1 = \min(x_1), \bar{x}_1 = \max(x_1). \quad (2.47)$$

Аналогічно для сигналу x_2 визначимо інтервал $[\underline{x}_2; \bar{x}_2]$, а для вихідного сигналу y – інтервал $[\underline{y}; \bar{y}]$.

Кожен визначений таким чином інтервал розділимо на N відрізків,

$$N_i = \frac{\bar{x}_i - \underline{x}_i}{R_i}, \quad (2.48)$$

де $R_i = \max(x_i) - \min(x_i)$ – розмах контрольованого параметру;

$\max(x_i)$, $\min(x_i)$ – найбільше і найменше значення показника x_i за декілька вимірів.

Значення N_i для кожного сигналу підбирають індивідуально.

Наприклад, за даними Прикарпатського УБР, згідно з геолого-технічним нарядом на буріння експлуатаційної свердловини № 346Д на глибині 1150÷1165,7 м діапазон зміни параметрів режиму буріння передбачений таким:

$$x_1 - [160, 180 \text{ кН}], x_2 - [85, 130 \text{ кВт}].$$

Враховуючи середні значення розмахів:

$$R_1 = 24 \text{ кН}, R_2 = 40 \text{ кВт},$$

які були визначені експериментально, а також нормальний закон розподілу флуктуацій контрольованих параметрів у межах їх розмахів, вибрали функції належності трикутної форми.

Тоді кількість термів, що потрібна для фазифікації технологічних параметрів буріння в межах допуску, може бути визначена за формулою [128, 130]

$$m_i = 2 \left(\frac{\bar{x}_i - x_i}{R_i} \right) + 1. \quad (2.49)$$

Результати розрахунків наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Кількість термів, що потрібна для фазифікації технологічних параметрів процесу буріння електробурами в межах допуску

Назва контрольованого параметра	Потрібна кількість термів
Осьове навантаження на долото	3
Потужність, яку споживає двигун електробура	3

На рис. 2.11 наведено розбиття простору вхідного сигналу F на зони і відповідні їм функції належності.

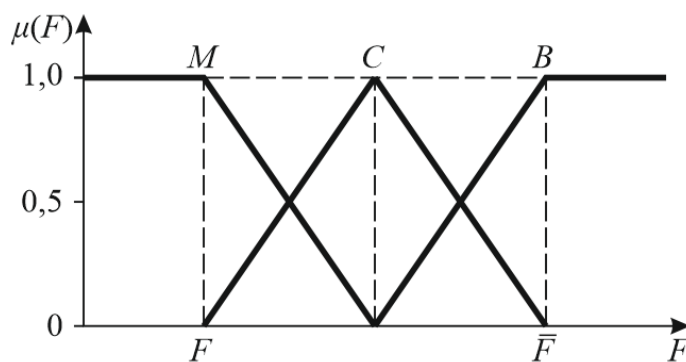


Рис. 2.11. Розбиття простору вхідного сигналу F на зони і відповідні їм функції належності

На рис. 2.12 наведено аналогічну сукупність функцій належності для потужності, яку споживає двигун електробура.

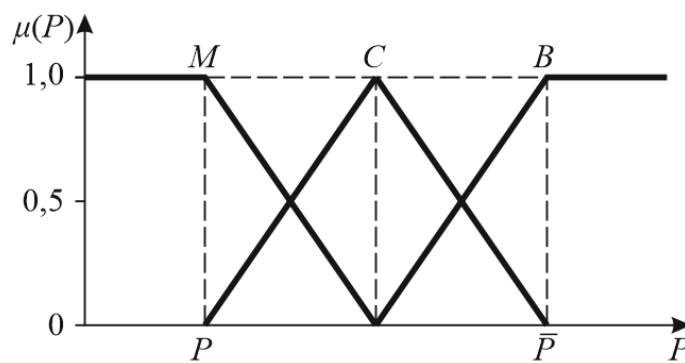


Рис. 2.12. Сукупність функцій належності для потужності P , яку споживає двигун електробура

Зони визначення сигналів F , P розбиті на три підзони. Окремі зони позначені так: М (мала), С (середня), В (велика). Отримана кількість термів та аналітичні вирази функцій належності закладені в оболонку експертної системи для виконання завдань підтримки процесів прийняття рішень щодо зміни структури адаптивної системи керування, за допомогою блока адаптації [176].

Для вертикальних свердловин розробимо базу правил Мамдані-типу.

2.4.3 Розроблення бази правил Мамдані-типу та алгоритму функціонування і структури блоку адаптації на засадах алгебри логіки

Результати розроблення бази правил Мамдані-типу та їх реалізація в програмі MatLab подані в табл. 2.6 та рис. 2.13÷2.17.

Таблиця 2.6

База правил Мамдані-типу (вертикальні свердловини)

Z		F		
		М	С	В
P	М	М	М	С
	С	М	С	В
	В	С	В	В

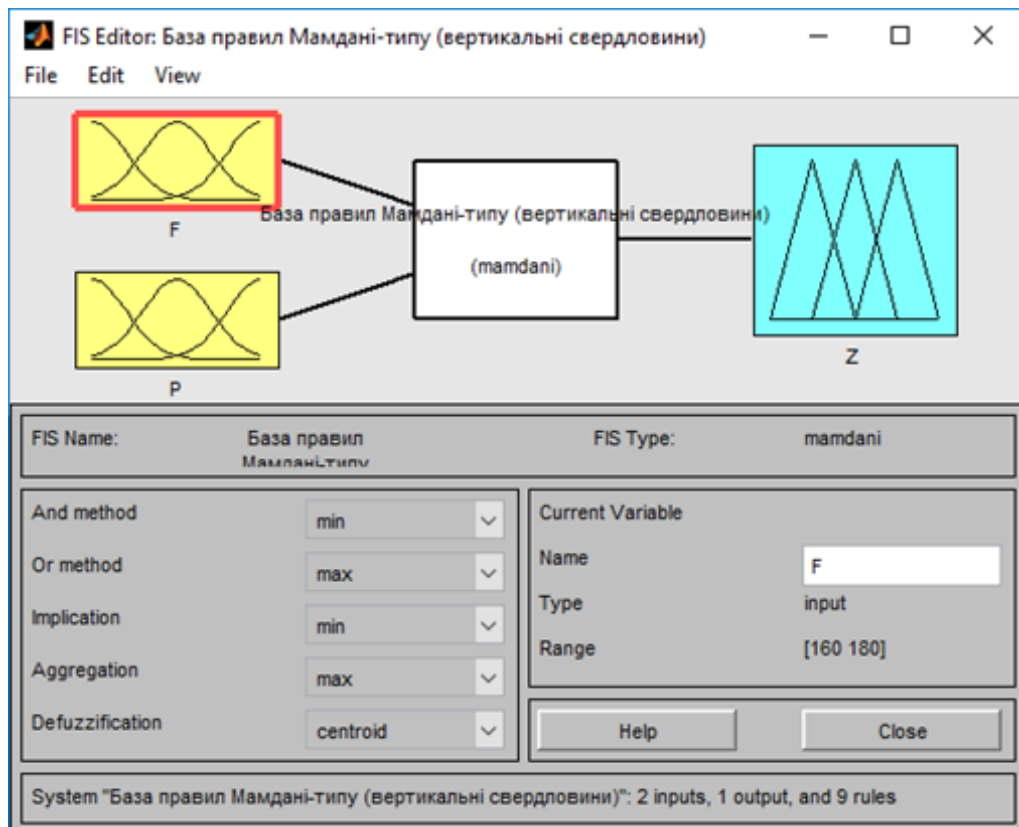


Рис. 2.13. FIS Editor у програмі MatLab

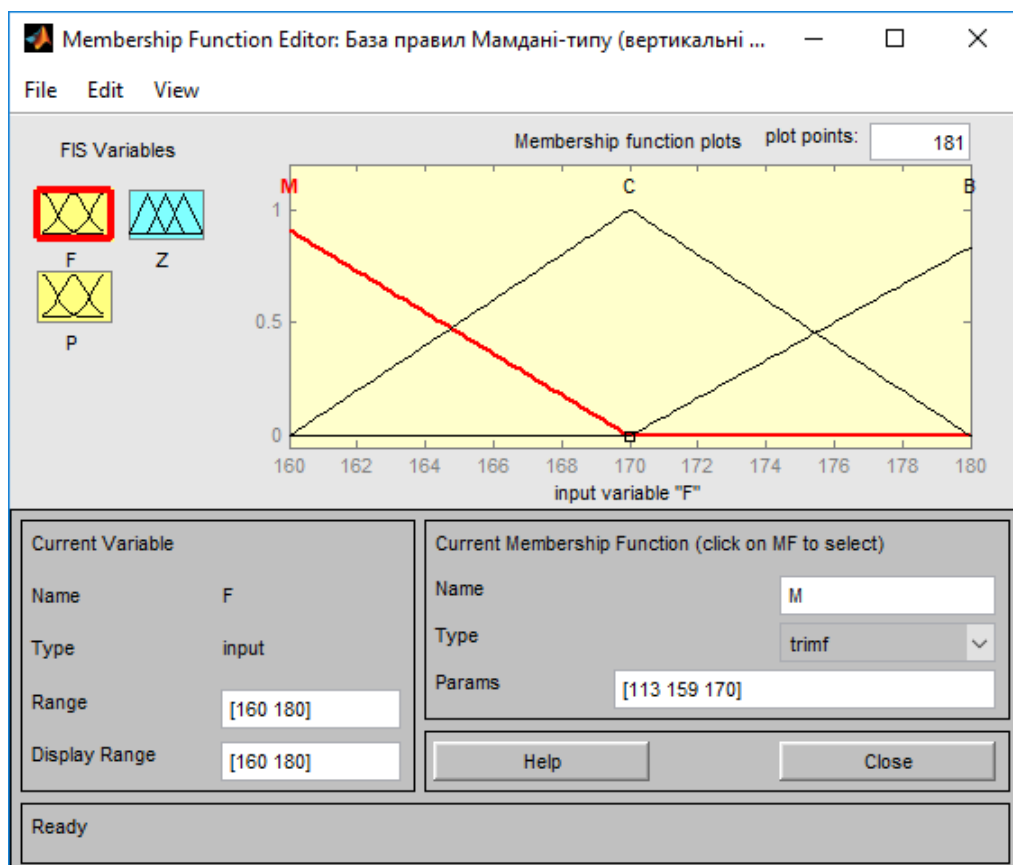


Рис. 2.14. Membership Function Editor у програмі MatLab

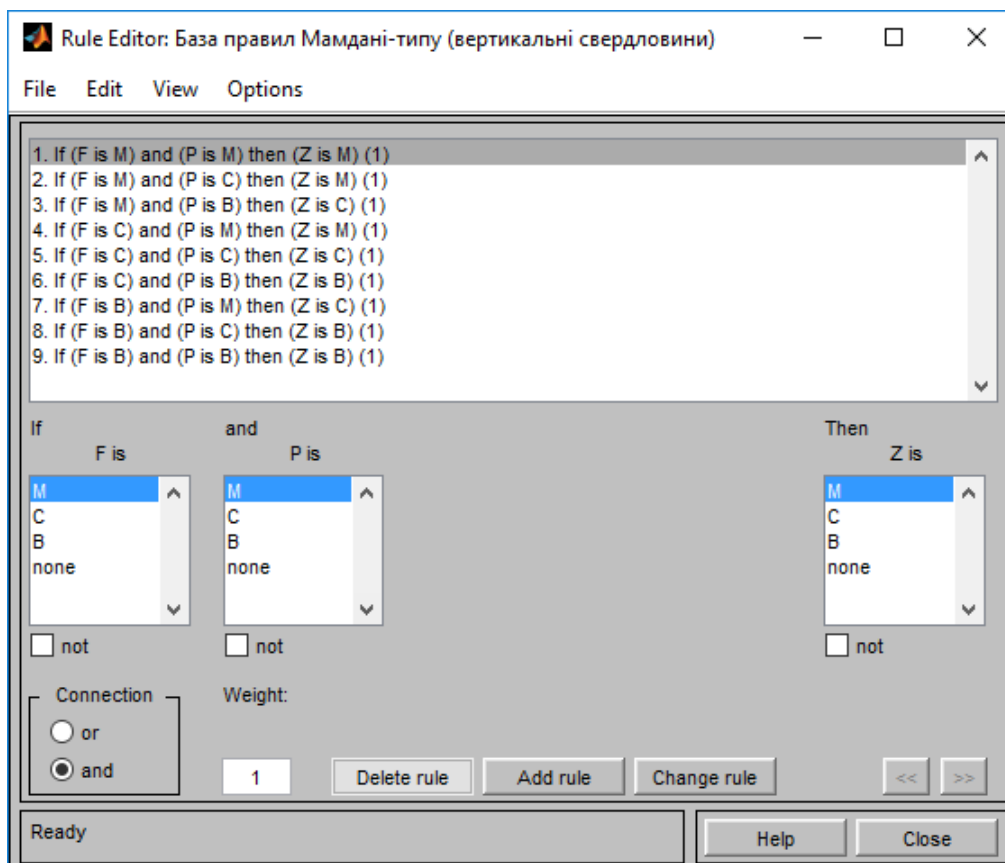


Рис. 2.15. Rule Editor у програмі MatLab

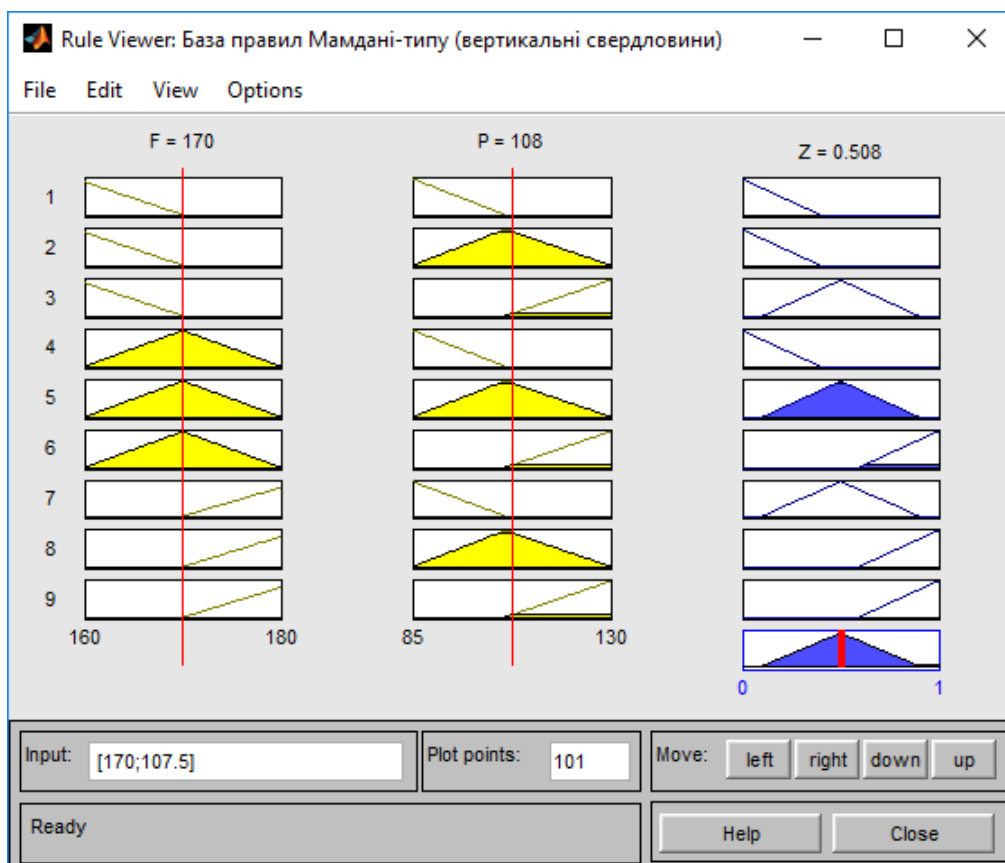


Рис. 2.16. Rule Viewer у програмі MatLab

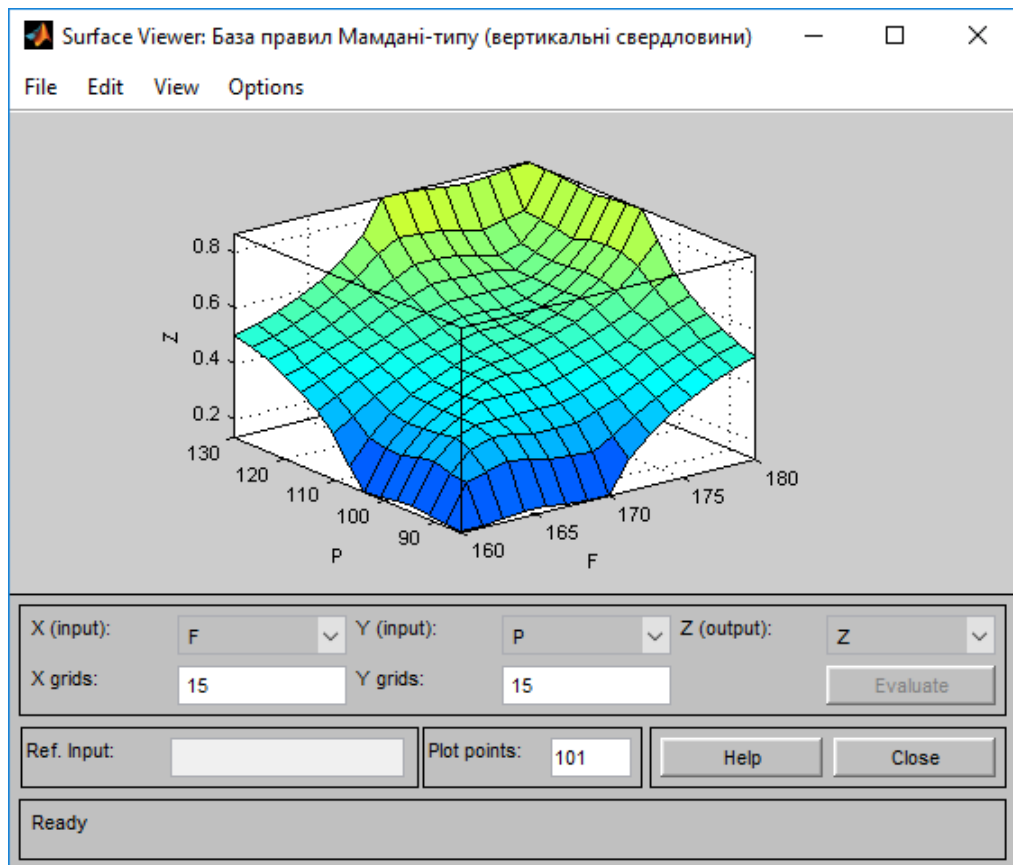


Рис. 2.17. Surface Viewer у програмі MatLab

Синтез структури блока адаптації, призначеного для використання в адаптивній системі керування бурінням похило-скерованих свердловин електробурами, здійснюємо використовуючи один із методів синтезу цифрових логічних пристроїв [132, 133], а саме діаграму Вейча.

Аналіз показників процесу буріння свердловин електробурами [90] дозволив вибрати п'ять параметрів, що найбільш повно характеризують процес переходу електробура на таку ділянку похило-скерованої свердловини, коли покази давача ваги бурильного інструменту не дозволяють контролювати осьове навантаження на долото. Вони створюють такий тезаурус

$$\langle P_{\text{дол}}, v_m = \frac{\Delta h}{\Delta t}, F, A, H_\alpha \rangle, \quad (2.50)$$

де A – азимут;

H_α – кут нахилу свердловини.

Усі ці параметри мають брати участь у формуванні керувальної дії в адаптивній системі керування або самостійно, або разом з іншими параметрами.

Використовуючи тезаурус (2.50), побудуємо структуру блока адаптації у вигляді логічного цифрового пристрою. Синтез такої одноктактної системи керування зводиться до складання структурної формули, що описує логічні функції, які має виконувати блок адаптації.

Отже, необхідно задати деякі логічні функції, комбінація яких дасть змогу отримати логічну функцію для блока адаптивного керування бурінням свердловин електробурами

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5),$$

де $x_1 = v_m = \frac{\Delta h}{\Delta t}$; $x_2 = F$; $x_3 = A$; $x_4 = H_\alpha$; $x_5 = P$.

Сама логічна функція $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ та її аргументи можуть набувати лише двох значень: 0 або 1.

Такі способи задання функцій алгебри логіки як словесний спосіб, матричний, графічний, алгебраїчний, координатний, числовий, графовий [132] не завжди зручні для повного представлення усіх зв'язків між логічною функцією і аргументами. Тому для синтезу логічної функції застосуємо метод діаграм Вейча, що ґрунтується на графічному представленні комбінацій аргументів і є практично придатним для зображення булових функцій до п'яти-семи змінних [132, 133].

Процес синтезу логічної функції методом діаграм Вейча складається з таких етапів [132]:

- формулювання умов роботи пристрою;
- вибір вхідних і вихідних логічних змінних;
- складання діаграми Вейча, що відображає зв'язки між вхідними x_i і вихідною y змінною, де i – кількість вхідних змінних;
- отримання аналітичного виразу функції $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$;
- побудова логічної схеми пристрою (блока);
- побудова принципової електричної схеми пристрою (блока).

Для розв'язання задачі синтезу керувального пристрою блока адаптивного керування скористаємося тезаурусом (2.50) інформативних параметрів.

Оскільки кількість аргументів $n = 5$, то існує $N = 2^n$ комбінацій аргументів або наборів, які матимуть номери від 0 до $2^n - 1$. Отже, існує $N = 2^n = 32$ наборів, номери яких будуть 0,1,2,...,31.

Умови роботи пристрою сформуємо так: спрацювання блока адаптації має відбуватись у тому випадку, коли сигнал 1 з'являється одночасно більше ніж на одному із 5 входів x_i . Стан виконавчого елемента Y залежить лише від поточних значень вхідних сигналів x_i .

Введемо такі вхідні змінні:

$$v_m = \frac{\Delta h}{\Delta t} \rightarrow x_1 \begin{cases} 1 - \text{сигнал від давача механічної швидкості буріння} \\ \quad \text{нижчий від порогового значення;} \\ 0 - \text{сигнал від давача механічної швидкості буріння} \\ \quad \text{вищий від порогового значення.} \end{cases}$$

$$F \rightarrow x_2 \begin{cases} 1 - \text{сигнал від давача осьового навантаження на долото} \\ \quad \text{нижчий від порогового значення;} \\ 0 - \text{сигнал від давача осьового навантаження на долото} \\ \quad \text{вищий від порогового значення.} \end{cases}$$

$$A \rightarrow x_3 \begin{cases} 1 - \text{сигнал від давача азимуту вищий від порогового значення;} \\ 0 - \text{сигнал від давача азимуту нижчий від порогового значення.} \end{cases}$$

$$H \rightarrow x_4 \begin{cases} 1 - \text{сигнал від давача кута нахилу вищий від порогового значення;} \\ 0 - \text{сигнал від давача кута нахилу нижчий від порогового значення.} \end{cases}$$

$$P \rightarrow x_5 \begin{cases} 1 - \text{сигнал від давача активної потужності нижчий від порогового значення;} \\ 0 - \text{сигнал від давача активної потужності вищий від порогового значення.} \end{cases}$$

$$Y = \begin{cases} 1 - \text{керувальний пристрій блока адаптивного керування увімкнений;} \\ 0 - \text{керувальний пристрій блока адаптивного керування вимкнений.} \end{cases}$$

Діаграму Вейча для логічної функції $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, що відповідає сформульованим умовам, наведено на рис. 2.18.

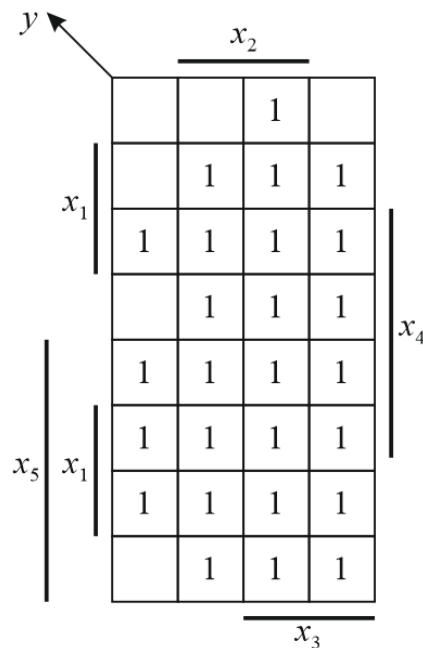


Рис. 2.18. Діаграма Вейча логічної функції п'ятьох змінних, що відповідає умовам сформульованої задачі для блока адаптації

У комірках діаграми Вейча як координатної карти станів, які потрапляють на площі одиничних значень двох, трьох, чотирьох та п'яти змінних x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , записані одиниці. Комірка залишається незаповненою, якщо значення функції при цьому наборі дорівнює нулю. Оскільки діаграму Вейча складено за умов спрацювання блока адаптації, то логічна функція має бути записана у мінімальній диз'юнктивній формі:

$$\begin{aligned}
 Y = & (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5) \vee \\
 & \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge \neg x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee \\
 & \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee \\
 & \vee (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee (\neg x_1 \wedge \neg x_2 \wedge \neg x_3 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee \\
 & \vee (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee (\neg x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee \\
 & \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge \neg x_3 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee \\
 & \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge \neg x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5) \vee \\
 & \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5) \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5) \vee (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5) \vee \\
 & \vee (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5) \vee (\neg x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5)
 \end{aligned}$$

де \vee – логічне АБО;

\wedge – логічне І;

\neg – логічне НІ.

Отже, на основі сформованої логічної функції можна сформулювати правило *R* типу ЯКЩО ... ТО ...:

$$R : \text{ЯКЩО } (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5) \vee \\ \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5) \vee \dots \vee \\ \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge \neg x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee (\neg x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5) \vee (\neg x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge x_5) \text{ТО}$$

«Керувальний блок адаптації має змінити структуру системи керування шляхом переходу від контуру автоматичної стабілізації осьового навантаження на долото до контуру автоматичної стабілізації потужності на долоті».

Наступним кроком є побудова логічної схеми блока адаптації відповідно до аналітичного виразу логічної функції $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$.

Структурна схема блока адаптації на елементах базису І, АБО, НІ наведена на рис. 2.19.

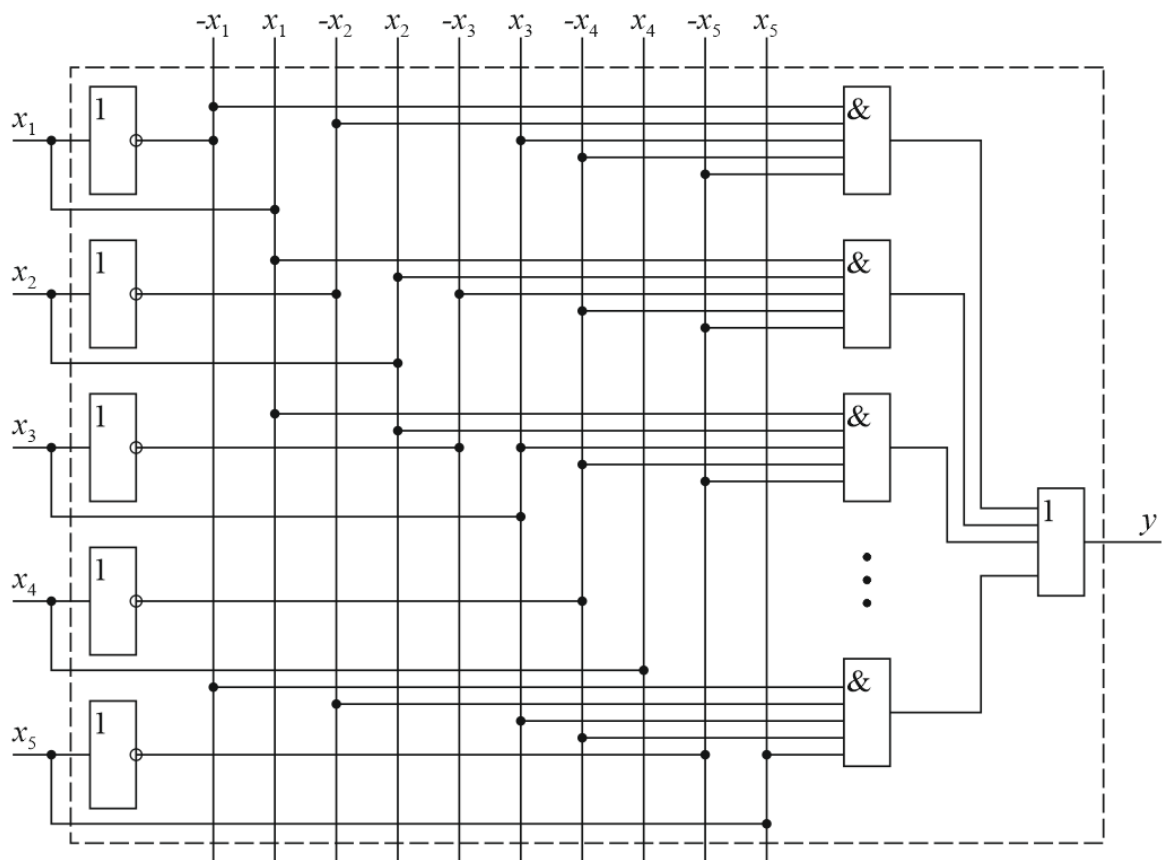


Рис. 2.19. Структурна схема блока адаптації на елементах базису І, АБО, НІ:

 – інвертор НІ;
  – кон'юнктор І;
  – диз'юнктор АБО.

Розроблені алгоритми функціонування і структури блоків адаптації для вертикальних і похило-скерованих свердловин дозволяють перейти до синтезу структури адаптивної системи керування процесом буріння свердловини електробурами.

2.5 Синтез функціональної структури адаптивної системи керування процесом буріння свердловин електробурами

Аналіз отриманих результатів свідчить, що для ефективного використання потужності занурного електродвигуна під час буріння вертикальних, похило-скерованих і розгалужено-горизонтальних свердловин доцільно стабілізувати потужність на долоті [174]. Цю складну задачу можна розв'язати за допомогою введення в структуру системи автоматичного регулювання додаткових зворотних зв'язків. Рівні коригувальних сигналів зворотних зв'язків оцінюють за рівнянням балансу потужності для виміряного на поверхні значення активної потужності:

$$P = P_{\text{дол}} + P_{\text{сн}} + M_o \omega + \alpha F \omega, \quad (2.51)$$

де $P_{\text{дол}}$ – потужність на долоті;

$P_{\text{сн}} = \sum I^2 r_{\text{сн}} = r_{\text{к}} l (I_A^2 + I_B^2) + r_m I_C^2$ – втрати потужності в несиметричному струмопідводі;

$r_{\text{к}}, r_m$ – питомий опір кабеля і труби;

l – довжина струмопідводу;

I_A, I_B, I_C – струми в фазах А, В, С, що залежать від глибини свердловини і осьового навантаження на долото;

M_o – момент опору, обумовлений силами тертя в шпинделі, в підшипниках, ущільненнях і оливі, якою заповнений двигун, за відсутності осьового навантаження на долото;

ω – швидкість вала двигуна електробура;

αF – сумарний момент опору, обумовлений силами тертя, пропорційний осьовому навантаженню F на долото.

Перейдемо до відхилень і запишемо рівняння (2.51) у такому вигляді

$$\Delta P = \Delta P_{\text{дол}} + \Delta P_{\text{сн}} + M_{\text{он}} \Delta \omega + \alpha (\omega \Delta F + F \Delta \omega). \quad (2.52)$$

Врахуємо, що потужність на долоті пов'язана з моментом і частотою обертання нелінійною залежністю

$$P_{\text{дол}} = M_{\text{дол}} \omega. \quad (2.53)$$

де $M_{\text{дол}}$ – момент статичного опору на долоті.

З урахуванням нестабільності частоти обертання ω двигуна електробура це рівняння є нелінійним, оскільки містить у собі добуток змінних ω і $M_{\text{дол}}$. Виконавши лінеаризацію цієї нелінійності в точці рівноваги $M_{\text{дол}_0}$, ω_0 розкладанням в ряд Тейлора, отримаємо наступне лінійне рівняння для приростів змінних

$$\Delta P_{\text{дол}} = \left(\frac{\partial P_{\text{дол}}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega + \left(\frac{\partial P_{\text{дол}}}{\partial M_{\text{дол}}} \right)_0 \Delta M_{\text{дол}} = M_{\text{дол}} \Delta \omega + \omega \Delta M_{\text{дол}}, \quad (2.54)$$

де $\Delta \omega$ – величина примусової зміни частоти обертання.

Замінивши в (2.54)

$$M_{\text{дол}_0} = \alpha_1 F_0 \text{ і } \Delta M_{\text{дол}_0} = \alpha_1 \Delta F_1,$$

отримаємо

$$\Delta P_{\text{дол}} = \alpha_1 (F_0 \Delta \omega_1 + \omega_0 \Delta F_1), \quad (2.55)$$

де α_1 – коефіцієнт пропорційності між моментом на долоті $M_{\text{дол}}$ і осьовим зусиллям F на долото;

$$\Delta \omega = \omega - \omega_0;$$

$$\Delta F = F - F_0;$$

$$\Delta M_{\text{дол}} = M_{\text{дол}} - M_{\text{дол}_0};$$

$$\Delta P_{\text{дол}} = P_{\text{дол}} - P_{\text{дол}_0}.$$

Якщо $P_{\text{дол}} = \text{const}$, то $\Delta P_{\text{дол}} = 0$ і рівняння (2.55) набуває такого вигляду

$$\alpha_1 (F_0 \Delta \omega_1 + \omega_0 \Delta F_1) = 0, \quad (2.56)$$

Із (2.56) маємо

$$\Delta\omega_1 = -\frac{\omega_0\Delta F_1}{F_0}, \quad (2.57)$$

Цей вираз показує, що при $P_{\text{дол}} = \text{const}$ і $\Delta P_{\text{дол}} = 0$ будь яка примусова зміна осьового навантаження на долото на величину ΔF_1 супроводжується оберненням за знаком приростом частоти обертання. Це означає, що система стабілізації потужності на долоті, яке підтримує задане значення цієї величини за рахунок зміни зусилля подачі, забезпечує підтримання заданих рівнів режимних параметрів.

Отже, з урахуванням рівняння (2.52) отримаємо

$$\Delta P = P_{cn} + M_{on}\Delta\omega. \quad (2.58)$$

Рівняння (2.58) визначає рівні коригувальних сигналів додатних зворотних зв'язків за частотою обертання долота і глибиною свердловини, які необхідно ввести в систему автоматичного регулювання потужності двигуна електробура. Вони мають забезпечити виконання закону регулювання $P = \text{const}$.

Величини коефіцієнтів зворотних зв'язків можна визначити на основі вимірювань, які необхідно провести на початку рейсу долота.

Функціональна структура адаптивної системи керування, побудованої на основі припущень [88, 175÷177], покладених в основу її побудови, наведена на рис. 2.20.

Корекція завдання регулятора подачі долота РПД за глибиною свердловини h може вводитися або з пульта бурильника, або автоматично.

Зворотний зв'язок за частотою обертання долота при глибині свердловини до 3000 м може бути створений за допомогою тахогенератора, пов'язаного з валом двигуна, сигнали з якого передаються через лінію зв'язку на наземний вимірювальний пристрій [121]. Проте такий пристрій має додаткову похибку внаслідок сильного угасання сигналу, що збільшується з глибиною. Для вимірювання частоти обертання двигуна електробура за будь-якої глибини свердловини запропоновано використати непрямий метод, що ґрунтується на

наземній інформації щодо зміни параметрів потоку енергії, яка надходить до двигуна електробура – потужності і моменту [80].

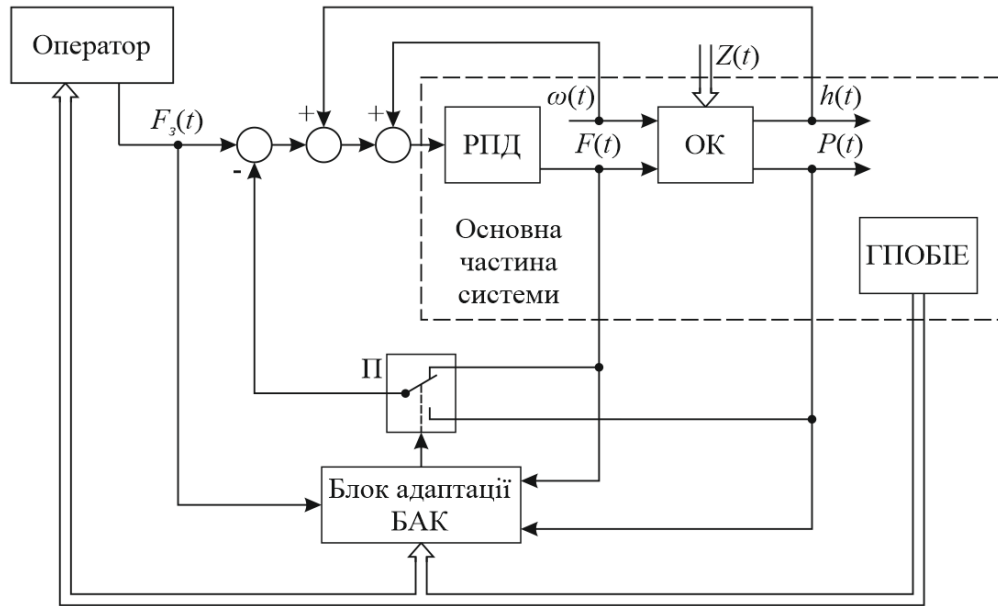


Рис. 2.20. Структура адаптивної системи керування процесом буріння свердловин електробурами:

БАК – блок адаптивного керування; П – перемикач каналів керування;
РПД – регулятор подачі долота; ГПОБІЕ – геофізичний пристрій орієнтування бурового інструменту

Справді, в робочій частині механічної характеристики двигуна електробура потужність на валу пов'язана з ковзанням S залежністю

$$S = \alpha P_e, \quad (2.59)$$

де α – коефіцієнт пропорційності між потужністю і ковзанням двигуна.

Оскільки $\omega = \omega_0(1 - S)$, то підставивши значення S із (2.57), отримаємо

$$\omega = \omega_0 - \alpha_S P_e, \quad (2.60)$$

де $\alpha_S = \omega_0 d$,

ω_0 – частота обертання двигуна електробура за відсутності навантаження на його валі.

Реалізація алгоритму (2.60) здійснена на пристрої для контролю частоти обертання двигуна електробура (рис. 2.21).

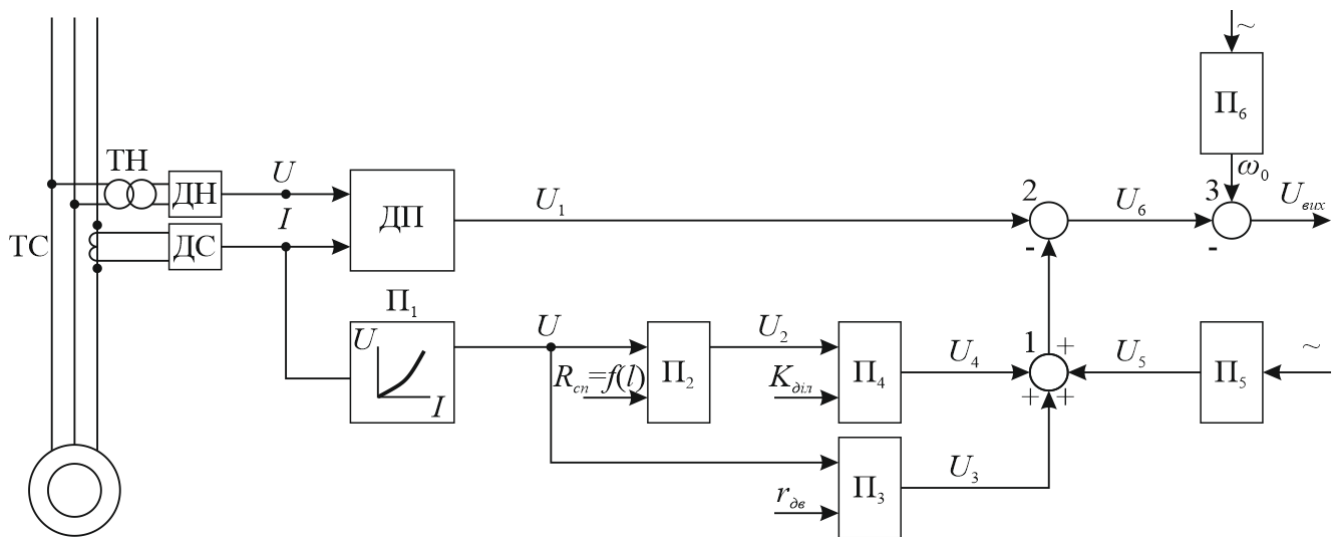


Рис. 2.21. Структура пристрою для контролю частоти обертання двигуна електробура непрямым методом:

ДП – давач активної потужності; П₁ – квадратор; П₂÷П₄ – пристрої множення; П₅ – компенсатор; ДС – давач струму; З – задавач синхронної частоти обертання; ДН – давач напруги; ТС, ТН – трансформатори струму і напруги

До складу пристрою входять: давач активної потужності ДП, квадратор П₁, пристрої (елементи) множення П₂, П₃, суматори, компенсатор П₄, задавач синхронної частоти обертання П₅.

Напруга U_1 на виході давача активної потужності ДП, що підключена до мережі живлення двигуна електробура, пропорційна потужності, вимірюваній на поверхні. Сигнал, пропорційний фазовому струму, подається на квадратор П₁ на виході якого $U \equiv I^2$. У пристроях П₂ відбувається множення напруги U на величину опору струмопідвода $R_{cn} = f(l)$. Параметри схеми П₂ обирають з урахуванням зміни опору струмопідвода внаслідок збільшення температури при поглибленні свердловини. Отже, на виході П₂ отримується сигнал, пропорційний втратам струмопідводу з максимальним питомим опором

$$U_2 = K_2 I^2 R_{cn_{\max}}, \quad (2.61)$$

а на виході П₃ – пропорційний втратам в електродвигуні

$$U_3 = K_3 I^2 r_{\partial e}, \quad (2.62)$$

де K_2, K_3 – коефіцієнти пропорційності.

Оскільки втрати потужності в струмопідводі залежать і від перерізу кабеля, сигнал з виходу П₂ надходить на вхід П₄, де напруга U_2 ділиться на коефіцієнт K_{dil} , який враховує питомий опір струмопіводу при різних перерізах

$$U_4 = \frac{K_2 I^2 R_{cn_{max}}}{K_{dil}} \equiv P_{cn}. \quad (2.63)$$

Сигнали U_3 і U_4 додаються в суматорі 1. Для компенсації напруги, що пропорційна потужності неробочого ходу двигуна електробура служить компенсатор П₅, сигнал від якого додається до U_3 і U_4 . Отже, в основному суматорі 2 із сигналу пропорційної вимірної на поверхні споживаної потужності віднімаються сигнали, що пропорційні потужності неробочого ходу електробура, втратам потужності в струмопідводі і в двигуні. Вихідна напруга основного суматора 2 пропорційна потужності на валі P_e двигуна електробура

$$U_6 = U_1 - U_3 - U_4 - U_5 = K_1 P_e, \quad (2.64)$$

Вона подається на вхід додаткового суматора 3, на вхід якого подається також сигнал, пропорційний синхронній частоті обертання ω_e двигуна електробура, від задавального пристрою П₆, вхід якого з'єднаний з джерелом живлення двигуна електробура.

Оскільки в робочій зоні механічної характеристики двигуна електробура ковзання двигуна пропорційне потужності на його валі,

$$P_e = CS, \quad (2.65)$$

де C – коефіцієнт пропорційності між потужністю і ковзанням двигуна

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega},$$

то можна записати, що

$$\omega = \omega_0 - \omega_0 S = \omega_0 (1 - S), \quad (2.66)$$

або з урахування (2.55)

$$\omega = \omega_0 - KP_e, \quad (2.67)$$

де $K = \frac{\omega_0}{C}$ – коефіцієнт пропорційності.

У додатковому суматорі 3 із сигнала, пропорційного синхронній частоті ω_0 віднімається сигнал U_6 , пропорційний потужності на валі. Вихідна напруга суматора 3 пропорційна частоті обертання ω електробура

$$U_{вих} = K_2 \omega, \quad (2.68)$$

де K_2 – коефіцієнт пропорційності.

Висновки до розділу 2

У ході проведених теоретичних досліджень щодо обґрунтування адаптивного методу керування процесом буріння свердловин електробурами отримано такі результати:

1. За результатами аналізу сформульовано загальну постановку задачі адаптивного керування процесом буріння свердловин електробурами із змінною структурою системи, яка, на відміну від відомих, формалізована, виходячи із специфіки задачі автоматизації процесів керування, з урахуванням апріорної та поточної невизначеності об'єкта керування щодо його параметрів і структури. Це дало змогу запропонувати узагальнену функціональну структуру системи автоматизованого керування бурінням свердловин електробурами, сформулювати математичну модель об'єкта керування та визначити сумісні механічні характеристики електробура разом з механічними характеристиками долота і двигуна.

2. За результатами аналізу алгоритмічної структури системи автоматичного регулювання активної складової струму статора двигуна електробура, з'ясовано причини нестабільності роботи електробурів, що дало змогу виявити причини зміни їх параметрів, з'ясувати які еквівалентні параметри системи змінюються і що змінюється в об'єкті керування.

3. На основі аналізу класифікації задач оптимального керування і методів адаптивного та робастного керування вибрано спосіб адаптації системи керування процесом буріння свердловин електробурами, що ґрунтується на зміні структури

системи за допомогою додаткового блока адаптації, який дозволяє змінювати керовану величину залежно від умов буріння.

4. На засадах методів Fuzzy Logic і діаграм Вейча розроблено правила зміни структури блока адаптації, за яких система керування набуває властивості пристосовуватися до мінливості параметрів та характеристик електробура і навколишнього середовища, що дозволило отримати характеристичне поле та синтезувати структурні схеми блока адаптації на елементах базису І, АБО, НІ.

5. Отримано рівняння, що визначає рівні коригувальних сигналів додатних зворотних зв'язків за частотою обертання долота і глибиною свердловини, які повинні бути введені в систему автоматичного регулювання потужності двигуна електробура. Це дало змогу синтезувати структури адаптивної системи керування процесом буріння свердловин електробурами з урахуванням інформації про орієнтування бурового інструменту.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

3.1 Розроблення методу передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів для визначення рівнів персистентності показників процесу буріння свердловин електробурами

3.1.1 Постановка задачі передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів

Як було зазначено в розділах 1 і 2, процес буріння нафтових і газових свердловин електробурами є невідтворюваним нестационарним стохастично-хаотичним об'єктом, що розвивається в часі. Такий процес описують нелінійними рівняннями з невідомими параметрами і функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності під впливом недосяжних для вимірювань збурень. Основним завданням системи управління бурінням є забезпечення будівництва свердловини в найкоротший термін з найменшими втратами.

Прогнозувати витрати енергії на буріння на один-два дні або на наступні декілька годин, а також передаварійних ситуацій і ускладнень необхідно без припинення роботи бурового обладнання в режимі реального часу [138].

Процес прогнозування в даному випадку можна розглядати [148, 156] як певну послідовність діагностичних перевірок, ефективність яких залежить від стратегії пошуку діагнозу в множині можливих причин на основі аналізу часових рядів.

Різноманітні дані про процес буріння надходять у вигляді ансамблю часових рядів $x(t) = \{x_j(t)\}$, $j=1,2,\dots,n$; $t \in T$; T – час спостереження.

Оскільки їхні основні характеристики змінюються в часі, вони, як правило, є нестационарними. Прогнозування таких часових рядів пов'язане з певними труднощами.

Сьогодні існує величезна кількість методів, способів і методик прогнозування, що ґрунтуються на двох підходах: евристичному або математичному [160].

Евристичні методи є суб'єктивними, досить складними і трудомісткими, у зв'язку з необхідністю об'єднання прогнозів, отриманих від різних експертів. Математичні методи вимагають наявності чітко сформульованої математичної моделі, що правильно описує поведінку прогнозованого об'єкта. Тільки у цьому випадку можна очікувати прийнятних результатів прогнозування.

Тому проаналізуємо методи передпрогнозного фрактального аналізу хаотичних інформаційних потоків у системі управління процесом буріння нафтових і газових свердловин у реальному часі з метою визначення рівнів їх персистентності.

Наукову проблему визначення рівнів персистентності хаотичних часових рядів для задач прогнозування на основі фрактального аналізу досліджено у працях великої кількості науковців [136, 138, 139]. Відзначимо, що метод фрактального аналізу часових рядів [138], як складова частина методів дискретної нелінійної динаміки, призначений для дослідження нелінійностей у динаміці часових рядів. Основною задачею фрактального аналізу є визначення фрактальної розмірності Хаусдорфа D та показника Херста H [139÷141] для дискретної часової послідовності $y(1), y(2), \dots, y(i), \dots, y(k)$, де k – дискретний поточний час.

Згідно з принципами фрактального аналізу [140] часові ряди мають фрактальну розмірність $1 < D < 2$ і наділені властивостями масштабної самоподібності та пам'яттю про свої початкові умови.

Пряма лінія має фрактальну розмірність $D = 1$. Якщо $D = 1$, то розподілом фрактального часового ряду є гаусіана. В практичних розрахунках іноді замінюють фрактальну розмірність D показником Херста H на основі реалізації процедури послідовного R/S -аналізу, де $R(t)$ – розмах послідовностей накопичених відхилень, $S(k)$ – середньоквадратичне відхилення [141]. Отже, показник Херста H – це число $H \in [0; 1]$, яке характеризує відношення складової

функції тренда до білого шуму і може використовуватись як міра персистентності – тобто схильності процесів до трендів.

На основі когнітивного моделювання технологічних процесів розробляють [142, 143] сценарії керування матеріальними потоками, здійснюється ідентифікація математичні моделі, для вирішення даної проблеми оптимізують технологічні процеси в умовах невизначеності. Проте недостатньо обґрунтовано застосовність фрактального аналізу часових рядів.

Існуючі проблеми детально розглянуто в автоматизації буріння свердловин [144]. Зроблено висновки про доцільність розроблення спеціалізованих засобів автоматизації [145], які повинні виконувати обчислення нелінійних залежностей в реальному часі [146], проте такі засоби ще не розроблені.

Загалом увагу науковців зосереджено переважно на аналізі часових рядів на основі стохастичних фрактальних моделей [147, 148], а також на методах передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів [149, 150, 159]. Найбільше уваги приділено визначенню показника Херста H за допомогою фрактальної розмірності, обчисленої тільки клітинковим методом на прикладі коротких часових рядів [151, 161]. Розглянуто також питання розроблення алгоритму ідентифікації хаотичних послідовностей процесу буріння свердловини [152] без урахування можливостей поточного аналізу часових рядів.

Однак не досліджено особливості реалізації передпрогнозного аналізу для визначення типів персистентності часових рядів такого складного технологічного процесу як буріння нафтових і газових свердловин електробурами.

Тому необхідно вирішити такі основні завдання:

- об'єднати сукупність методів передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів в єдину методологію;
- проаналізувати фрактальну розмірність і показник Херста на основі реалізації процедури послідовного R/S -аналізу;
- оцінити автокореляційний вплив попередніх значень динамічних рядів на наступні значення та визначити майбутні тенденції;

- визначити просторові розмірності досягнутих динамічних процесів.

Методологічним апаратом вирішення поставлених завдань є енерго-інформаційний підхід та теорія випадкових процесів, на основі яких визначено рівні персистентності хаотичних інформаційних потоків у системі управління процесом буріння свердловин електробурами.

Для дослідження інформаційних потоків використано: метод Мандельброта-Хадсона – для фрактального аналізу часових рядів; автокореляційний аналіз – для з'ясування ступеня статистичної залежності між різними значеннями випадкової послідовності, яку створює поле вибірки даних; програмний продукт MatLab R2014a – для обробки даних досліджуваних часових рядів; графічний метод – для наочного подання отриманого теоретичного матеріалу.

3.1.2 Практичне застосування сукупності методів визначення рівнів персистентності параметрів і показників процесу буріння свердловин електробурами

Були досліджені трендові характеристики часових рядів $F(t)$, $I(t)$, $P(t)$, $V(t)$, $E(t)$, $w(t)$, де $F(t)$ – осьове навантаження на долото, $I(t)$ – струм навантаження двигуна електробура, $P(t)$ – потужність, яку споживає електробур, $V(t)$ – механічна швидкість буріння, $E(t)$ – час, що витрачається на буріння 1 м свердловини, $w(t)$ – питомі витрати енергії.

Вихідні дані отримані під час буріння експлуатаційної свердловини в умовах Прикарпаття. Буріння здійснено установкою Уралмаш-6Е-61 з використанням електробура ЕП240-8-В5 (додаток А), долота типу 295,3С-ГВ, інтервал буріння 1317–1327 м.

Реалізації досліджуваних часових рядів $F(t)$, $I(t)$, $P(t)$, $V(t)$, $E(t)$, $w(t)$ графічно представлені на рис. 3.1.

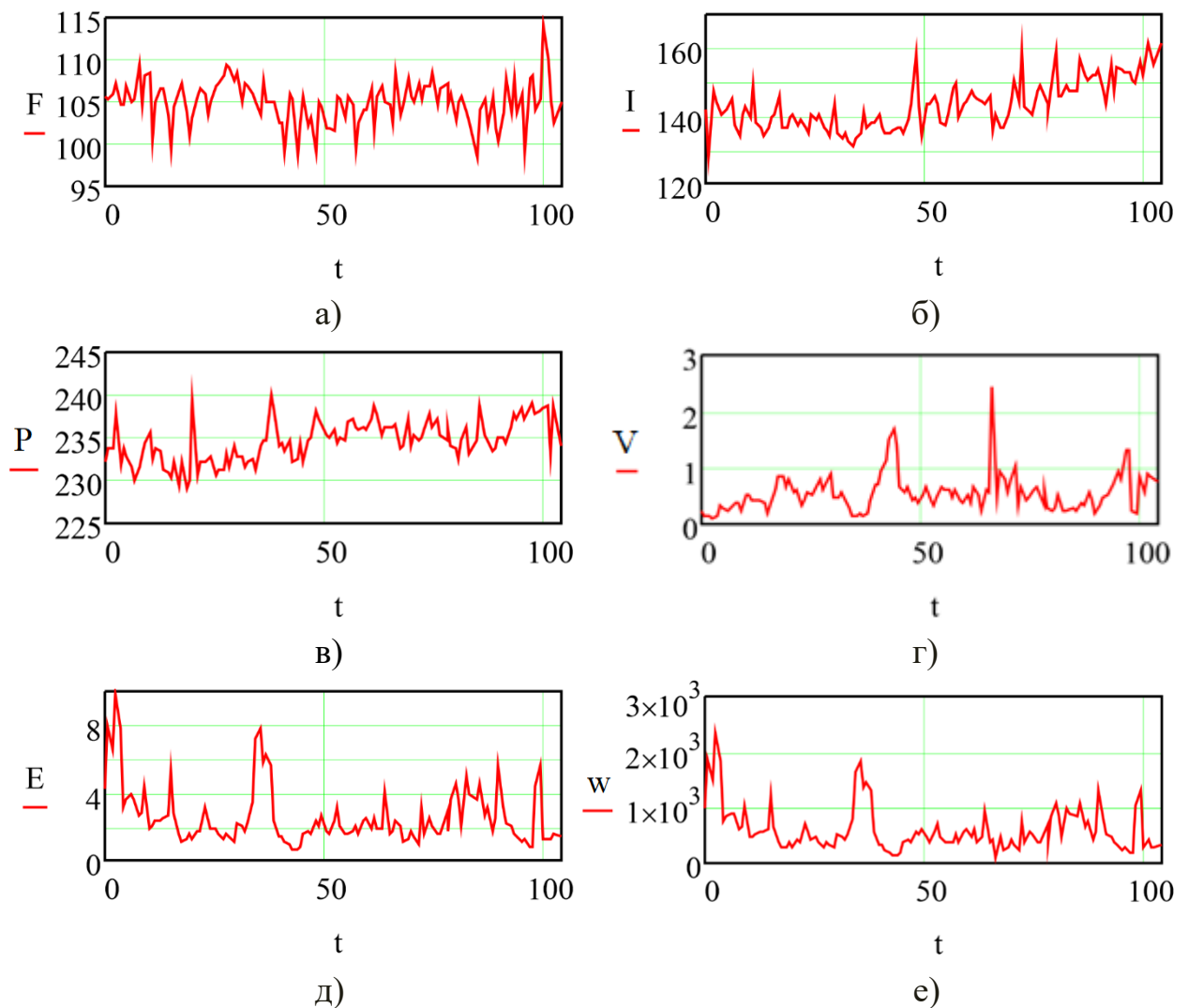


Рис. 3.1. Графіки досліджуваних часових рядів:

а – $F(t)$; б – $I(t)$; в – $P(t)$; г – $V(t)$; д – $E(t)$; е – $w(t)$

Дискретизацію часових рядів проведено з кроком дискретизації $\Delta t = 0,84$ с, який визначено на основі теореми Шеннона-Котельникова.

Для обробки отриманих масивів скористалися програмами, розробленими в середовищі програмного продукту MatLab. Для пошуку математичного сподівання, дисперсії, середньоквадратичного відхилення скористалися стандартними функціями MatLab у вигляді:

$M = \text{mean}(T)$ – математичне сподівання;

$S = \text{std}(T)$ – середньоквадратичне відхилення;

$Ds = (S)^2$ – дисперсія.

Отримано результати наведені в табл 3.1:

Таблиця 3.1

Результати отримані при обробці масивів досліджуваних часових рядів

Досліджуваний часовий ряд	Математичне сподівання	Дисперсія	Середньоквадратичне відхилення
$F(t)$	104,912	6,665	2,582
$I(t)$	143,031	52,405	7,228
$P(t)$	234,601	5,919	2,423
$V(t)$	0,547	0,114	0,338
$E(t)$	2,590	2,889	1,699
$w(t)$	602,25	159097,27	398,89

За допомогою розробленої програми для досліджуваних часових рядів знайдено значення показника Херста H . Для визначення фрактальної розмірності D , просторової розмірності n даного динамічного процесу, а також міри кореляції C скористаємось формулами [151] $D = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\log N(d)}{\log\left(\frac{1}{d}\right)}$; $N(d) \approx \frac{1}{d^D}$, коли

$d \rightarrow 0: N \cdot d^D = 1$, та $C = 2^{2H-1} - 1$ і рис. 3.1.

Результати розрахунків наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Результати розрахунків показників хаотичності часових рядів

Досліджуваний часовий ряд	Показник Херста H	Фрактальна розмірність D	Просторова розмірність n	Міра кореляції C
$F(t)$	0,646	1,354	2	0,224
$I(t)$	0,868	1,132	2	0,666
$P(t)$	0,757	1,243	2	0,428
$V(t)$	0,742	1,258	2	0,399
$E(t)$	0,825	1,175	2	0,569
$w(t)$	0,827	1,173	2	0,574

Як бачимо з табл. 3.2, показник Херста H для усіх сигналів є більшим ніж 0,5. Отже, часові ряди мають певну хаотичність, але динаміка даних сигналів не зміниться і буде розвиватися в тому ж напрямі, що й в минулому. Це дає змогу з урахуванням особливостей процесу буріння розв'язувати задачі прогнозування і

раннього виявлення можливих змін умов буріння (розладнання) за допомогою обчислення показника Херста H в реальному часі.

Про хаотичність процесу буріння свідчить і той факт, що фрактальна розмірність D для усіх досліджуваних параметрів не є цілим числом. Проте, оскільки $D \in [1,0; 2,0]$ і $D < 1,55$, то такий хаос є керованим.

Значення просторової розмірності $n = 2$ вказує на кількість факторів, що беруть участь у даному динамічному процесі.

Перевагою отриманих результатів дослідження рівнів персистентності параметрів і показників процесу буріння свердловини електробурами є те, що це дозволило визначити фрактальну та просторову розмірність кожного часового ряду. Показник Херста дозволяє визначити таку важливу властивість для процесу поглиблення свердловини як трендовість. Цей показник універсальний і застосовний для будь-яких часових рядів, навіть з невідомими розподілами.

На основі факторно-цільового аналізу об'єднано сукупність методів передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів для визначення рівнів персистентності, що дозволяє реалізувати прогнозування передаварійних ситуацій та ускладнень в умовах невизначеності і зміни структури системи керування.

Результати дослідження можуть бути використані в автоматизованих системах управління процесом буріння свердловин електробурами для:

- моделювання трендових характеристик гаусових рядів;
- розпізнавання порушень динаміки процесу буріння;
- підвищення надійності прогнозування;
- раннього виявлення відхилень від нормальних режимів роботи.

3.2 Аналіз мультиколінеарності (МК) показників процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами

Аналіз МК показників процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами є актуальною науково-прикладною задачею [158, 165, 166, 181].

Найповніше дослідити наявності мультиколінеарності між змінними можна за допомогою алгоритму Фаррара-Глобера [163, 167]. Для виявлення МК взято масив експериментальних даних, отриманих під час буріння свердловини № 814 Прикарпатського УБР (долото ЗУ 295 СЗГ, інтервал буріння 2080-2089 м). Масив містить такі параметри: осьове зусилля F на долото, струм I , який споживає двигун електробура Е240-8, та потужність P . Дані наведені в додатку Б.

Перевіримо наявність мультиколінеарності між струмом I , який споживає двигун електробура, та потужністю P . Всі розрахунки проводимо за допомогою програми MSExcel, замінивши позначення $I \rightarrow X_1$, $P \rightarrow X_2$.

Проміжні розрахунки та результати наведені в додатку Б.

Нормалізуємо змінні X_1 та X_2 за допомогою функції «STANDARDIZE» в MSExcel. Транспонуємо матрицю X^* в матрицю X^{*1} за допомогою функції «TRANSPOSE».

Перемножимо матриці X^{*1} та X^* за допомогою функції «MMULT» та отримаємо:

$$X^{*1}X^* = \begin{matrix} 116,0000 & 0,4803 \\ 0,4803 & 116,0000 \end{matrix}$$

Знаходимо кореляційну матрицю r . Для цього потрібно кожний елемент матриці $X^{*1}X^*$ помножити на $\frac{1}{116} \left(\frac{1}{n-1} = \frac{1}{117-1} = \frac{1}{116} \right)$.

$$r = \begin{matrix} 1,0000 & 0,4803 \\ 0,4803 & 1,0000 \end{matrix}$$

Визначник кореляційної матриці r отримуємо за допомогою функції «MDETERM»:

$$\det r = 0,7694.$$

Визначаємо розрахункове значення критерію Пірсона χ^2 за формулою [180]:

$$\chi^2 = - \left\{ n - 1 - \frac{1}{6}(2m + 5) \right\} \ln(\det r), \quad (3.1)$$

де n – кількість спостережень;

m – кількість пояснювальних змінних.

$$\ln(\det r) = -0,2622 .$$

$$\text{Отже, } \chi^2 = -\left\{117 - 1 - \frac{1}{6}(2 \cdot 2 + 5)\right\} \cdot (-0,222) = 30,0222 .$$

Порівнюємо отримане значення критерію Пірсона χ^2 з табличним значенням.

При ступені вільності $k = \frac{1}{2}m(m-1) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (2-1) = 1$ та рівні значущості $\alpha = 0,05$ критерій $\chi_{табл}^2 = 3,8$. Оскільки $\chi^2 > \chi_{табл}^2$ ($30,0222 > 3,8$), робимо висновок, що у масиві досліджуваних змінних існує МК.

Наступним знаходимо критерій Фішера (F -критерій) за формулою [180]:

$$F = (C_{kk} - 1) \left(\frac{n-m}{m-1} \right), \quad (3.2)$$

де C_{kk} – діагональні елементи матриці C .

За допомогою функції «MINVERSE» визначаємо матрицю C , обернену до кореляційної матриці

$$C = \begin{array}{cc} 1,2998 & -0,6242 \\ -0,6242 & 1,2998 \end{array} .$$

Використовуючи діагональні елементи матриці C , розраховуємо F -критерій:

$$F = (1,2998 - 1) \left(\frac{117 - 2}{2 - 1} \right) = 34,4759 .$$

Для рівня значущості $\alpha = 0,05$ ступенів вільності $k_1 = m - 1 = 2 - 1 = 1$ і $k_2 = n - m = 117 - 2 = 115$ за статистичними таблицями F -розподілу знаходимо критичне значення критерію Фішера $F_{табл} = 3,9$. Табличне значення $F_{табл}$ порівнюємо з розрахунковим значенням. Оскільки $F > F_{табл}$ ($34,4759 > 3,9$), то це означає, що змінні X_1 та X_2 мультиколінеарні між собою.

Визначимо останній критерій з алгоритму Фаррара-Глобера – t -критерій Стьюдента, за формулою [180]:

$$t_{12} = \frac{r_{12} \sqrt{n-m}}{\sqrt{1-r_{12}^2}} . \quad (3.3)$$

Використовуючи матрицю C , обчислюємо частинний коефіцієнт кореляції за формулою [180]:

$$r_{12} = \frac{-c_{12}}{\sqrt{c_{11}c_{22}}}, \quad (3.4)$$

$$r_{12} = \frac{-(-0,6242)}{\sqrt{1,2998 \cdot 1,2998}} = 0,4803.$$

На основі знайденого частинного коефіцієнта кореляції знаходимо розрахункове значення t -критерію Стьюдента:

$$t_{12} = \frac{0,4803 \cdot \sqrt{117-2}}{\sqrt{1-0,4803^2}} = 5,8716 \quad t_{12} = \frac{0,4803 \cdot \sqrt{117-2}}{\sqrt{1-0,4803^2}} = 5,8716.$$

Обчислений t -критерій порівнюємо з табличним значенням ($t_{табл} = 1,66$), якщо рівень значущості $\alpha = 0,05$ та ступінь вільності $k = n - m = 117 - 2 = 115$. Оскільки $t_{12} > t_{табл}$ ($5,8716 > 1,66$), то можна стверджувати, що між змінними X_1 та X_2 існує МК.

Отже, за алгоритмом Фаррара-Глобера встановлено, що між струмом I , що споживає двигун електробура, та потужністю P існує МК [162].

Далі встановимо зв'язок між параметрами процесу буріння свердловин електробурами в різні моменти часу. Здійснимо це за допомогою автокореляційної функції та функції спектральної щільності [86].

Для отримання автокореляційних функцій для параметрів осьового зусилля F , струму I та потужності P скористаємось програмою Mathcad. У результаті отримаємо графіки, наведені на рис. 3.2÷3.4.

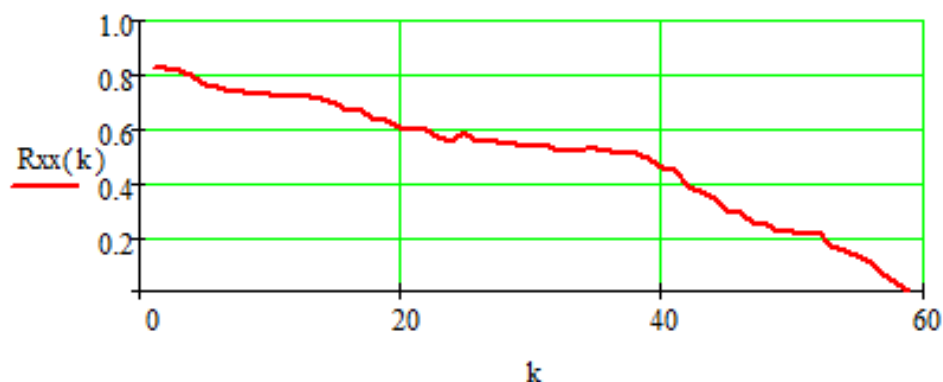


Рис. 3.2. Графік нормованої автокореляційної функції для осьового зусилля F

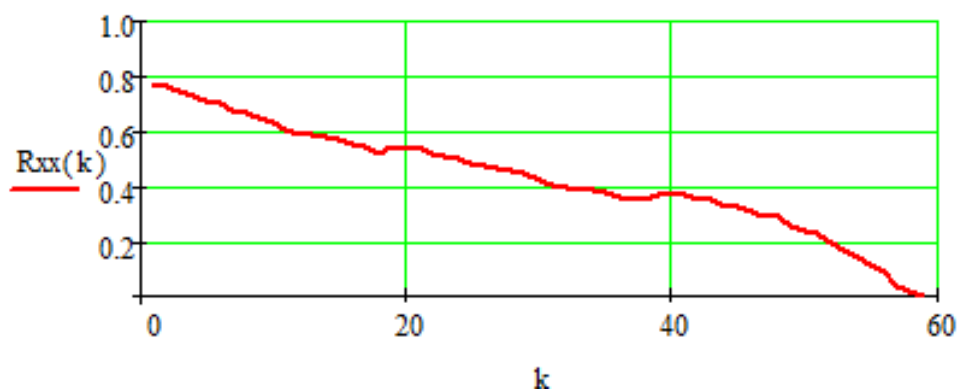


Рис. 3.3. Графік нормованої автокореляційної функції для струму I

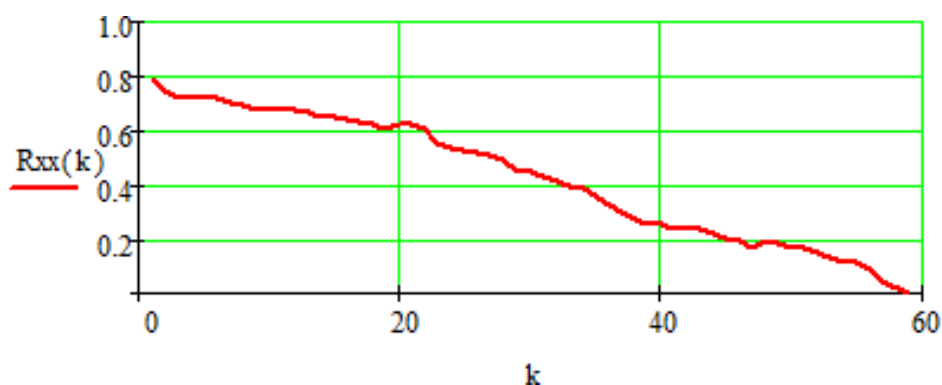


Рис. 3.4. Графік нормованої автокореляційної функції для потужності P

Отримані графіки автокореляційних функцій підтверджують, що досліджуваний процес є стаціонарним та ергодичним.

За допомогою програми Mathcad визначимо спектральні щільності для досліджуваних параметрів. Зробимо пряме перетворення Фур'є отриманих автокореляційних функцій. У результаті отримали графіки спектральних щільностей для параметрів F , I та P , що подані на рис. 3.5÷3.7.

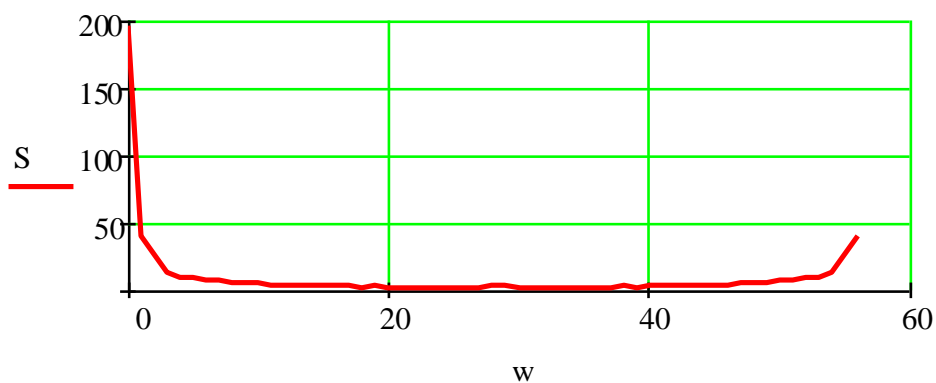


Рис. 3.5. Графік спектральної щільності для осьового зусилля F

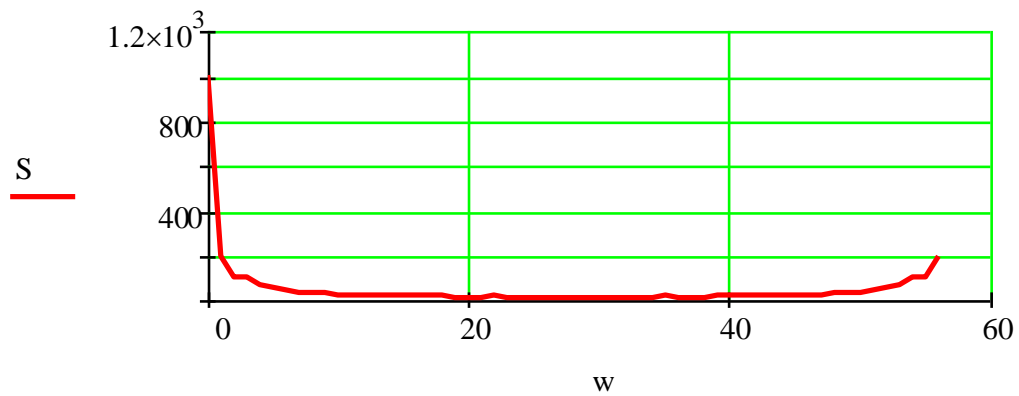


Рис. 3.6. Графік спектральної щільності для струму I

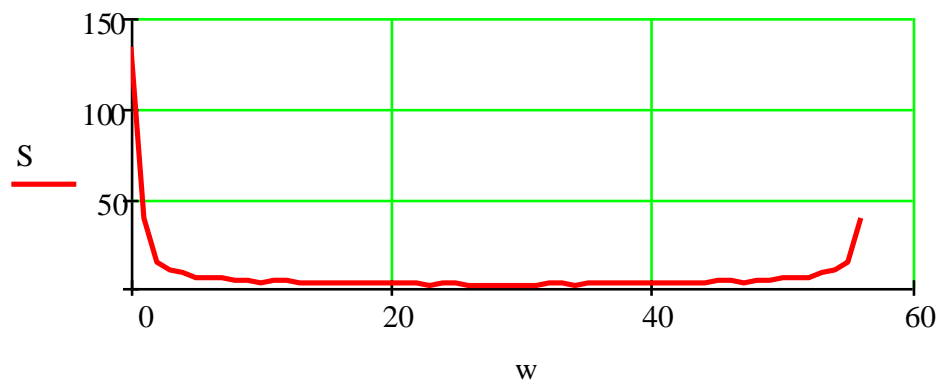


Рис. 3.7. Графік спектральної щільності для потужності P

Для спектральних щільностей знайдемо їхні рівняння, скориставшись функцією `linfit` у програмі `Mathcad`.

Знаходимо для осьового зусилля F на долото рівняння, записавши наступне в `Mathcad`, і одержимо:

$$vx := w; \quad vy := S; \quad FF(x) := \begin{pmatrix} x^0 \\ x^2 \\ x^4 \end{pmatrix}; \quad KF := \text{linfit}(vx, vy, FF); \quad KF(x) = \begin{pmatrix} 22,436 \\ -0,034 \\ 1,167 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Отримаємо рівняння функції спектральної щільності для осьового зусилля F :

$$S_F(\omega) = 1,167 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^4 - 0,034 \cdot \omega^2 + 22,436.$$

Аналогічно робимо для струму I , що споживає двигун електробура:

$$vx := w; \quad vy := S; \quad FI(x) := \begin{pmatrix} x^0 \\ x^2 \end{pmatrix}; \quad KI := \text{linfit}(vx, vy, FI); \quad KI(x) := \begin{pmatrix} 66,122 \\ -0,012 \end{pmatrix}.$$

Дістаємо рівняння функції спектральної щільності для струму I :

$$S_I(\omega) = -0,012 \cdot \omega^2 + 66,122.$$

Також знаходимо рівняння для потужності P електробура:

$$v_x := w; v_y := S; FP(x) := \begin{pmatrix} x^0 \\ x^2 \end{pmatrix}; KP := \text{linfit}(v_x, v_y, FP); KP(x) := \begin{pmatrix} 8,983 \\ -1,375 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}.$$

Отримаємо рівняння функції спектральної щільності для потужності P :

$$S_P(\omega) = -1,375 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 + 8,983.$$

У результаті даних розрахунків дістаємо такі вирази:

$$|W_{FI}(j\omega)|^2 = \frac{-0,012 \cdot \omega^2 + 66,122}{1,167 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^4 - 0,034 \cdot \omega^2 + 22,436},$$

$$|W_{FP}(j\omega)|^2 = \frac{-1,375 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 + 8,983}{1,167 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^4 - 0,034 \cdot \omega^2 + 22,436}.$$

Отримаємо функції передачі у програмі MatLab, які наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Визначення функцій передачі для одержаних виразів

Вираз	$ W_{FI}(j\omega) ^2$	$ W_{FP}(j\omega) ^2$
Текст програми в MatLab	<pre>>> S=tf([-0.012 0 66.122], [1.167e-5 0 -0.034 0 22.436]) Transfer function: -0.012 s^2 + 66.12 ----- 1.167e-005 s^4 - 0.034 s^2 + 22.44 >> [W,W_]=fact(S) Transfer function: 0.1095 s + 8.132 ----- 0.003416 s^2 + 0.2576 s + 4.737 Transfer function: 0.1095 s - 8.132 ----- 0.003416 s^2 - 0.2576 s + 4.737</pre>	<pre>>> S=tf([-1.375e-3 0 8.983], [1.167e-5 0 -0.034 0 22.436]) Transfer function: -0.001375 s^2 + 8.983 ----- 1.167e-005 s^4 - 0.034 s^2 + 22.44 >> [W,W_]=fact(S) Transfer function: 0.03708 s + 2.997 ----- 0.003416 s^2 + 0.2576 s + 4.737 Transfer function: 0.03708 s - 2.997 ----- 0.003416 s^2 - 0.2576 s + 4.737</pre>
Функція передачі	$W_{FI}(s) = \frac{0,1095s + 8,132}{0,003416s^2 + 0,2576s + 4,737}$	$W_{FP}(s) = \frac{0,03708s + 2,997}{0,003416s^2 + 0,2576s + 4,737}$

3.3 Метод трансформації автоматизованої системи управління процесом буріння свердловин як стохастично-хаотичним об'єктом, що розвивається в часі

Запропоновано механізм трансформації системи управлінням, згідно з яким бурильник ставить за мету частину параметрів (осьове навантаження F на долото, або струм навантаження I двигуна електробура, або потужність P , що споживає електробур) цього процесу втримати в потрібній йому визначеній геолого-технологічним нарядом області допустимих значень. Відповідно до цього він видокремлює з системи буріння свердловини конкретну систему, яка реалізує потрібний йому процес і може реалізувати сукупність доцільних впливів на процес буріння. Отже, бурильник реалізує управління процесом буріння як сукупність впливів і алгоритмів та їх застосування в функції глибини свердловини.

Така технологія управління в поточних умовах дозволяє досягти поставленої мети: $F = const \cup I = const \cup P = const$.

Під час буріння свердловин електробурами розв'язують задачі стабілізації, формування мети яких містить обмеження на допустимі відхилення F , I , P . Оскільки мету слід визначити до початку розв'язування задачі в процесі поглиблення свердловин, то необхідно знати функціональні залежності вихідних параметрів хоча б від частини вхідних параметрів і збурень.

Враховуючи те, що при бурінні похило-скерованих свердловин глибиною 4500 м і більше можливостей керувальних впливів на існуючий процес у даних і прогнозованих умовах недостатньо [153÷157] для досягнення мети управління $F = const$, яка формується не як функція фазних координат, а як функція глибини, тоді виникає необхідність зміни керованої величини. Це можливо лише за умов трансформації системи управління і переходу на реалізацію мети управління $I = const \cup P = const$ (рис. 3.8).

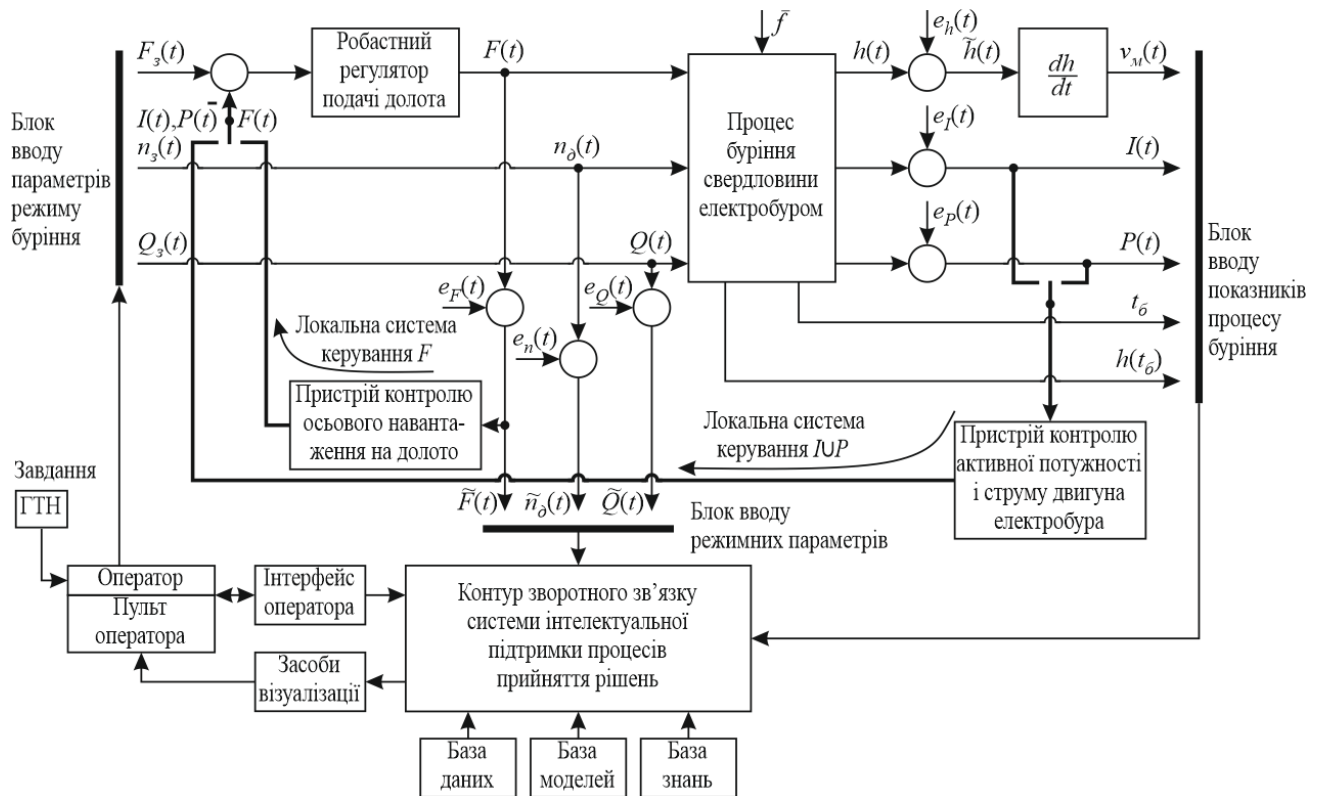


Рис. 3.8. Функціональна схема адаптивної системи управління процесом буріння свердловин електробурами з трансформацією структури та з інтелектуальною підтримкою процесів прийняття рішень:

P – активна потужність електробура; n – швидкість обертання долота; F – осьове навантаження на долото; Q – витрата бурового розчину; h – проходка долота; f – збурення; $e_F, e_n, e_Q, e_h, e_I, e_P$ – адитивні шуми у відповідних вимірjuвальних каналах

Але така ситуація є невизначеною, тому що перш ніж планувати і управляти переходом до нової структури системи, потрібно сформулювати мету, наприклад, у вигляді обмежень, які задають область допустимих розв'язків у просторі суттєвих параметрів. У такому випадку для управління необхідно самонавчання з прогнозом-екстраполяцією і повний цикл прийняття рішень [168], який реалізує редукцію різноманітності можливих змін. Розв'язок задачі адаптації системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами до непрогнозовано виникаючих змін середовища можливий, якщо представити її як елементарний крок у процесі її розвитку. Проте такі зміни загалом є випадковою послідовністю пристосувань до спонтанних змін умов буріння.

Механізм трансформації системи можна представити у вигляді такої логічної структурної моделі $M_{mp} = \{F = const \cup I = const \cup P = const\}$ [178, 179].

Алгоритм застосування цього механізму ґрунтується на базі правил Мамдані-типу.

Для визначення оптимального режиму буріння запропоновано використати питомі витрати енергії w як критерій оптимізації

$$w(x) \xrightarrow{x \in S} \min; \quad P = P_{don},$$

де $S = \{(F_i, \omega_i, Q_i)_{i=1,2,\dots,M}; F = \{F_{\min}, F_{\max}\}; \omega = \{\omega_{\min}, \omega_{\max}\}; Q = \{Q_{\min}, Q_{\max}\}\};$

M – кількість рівнів глибини свердловини, H ;

$H = const$ – проектна глибина свердловини $H = \sum_{i=1}^M h_i$;

h_j – проходка на долото в i -рейсі;

P – потужність, що витрачається на руйнування породи;

F – осьове зусилля на долото;

ω – частота обертання долота;

Q – витрата промивальної рідини.

Структуру існуючої системи підтримки процесів прийняття рішень запропоновано доповнити адаптувальною фазі-моделлю, що дає змогу компенсувати нелінійність та вдосконалити оцінювання системи витрат енергії у режимі on-line. Нечітка ситуація в процесі буріння свердловин ідентифікована і використана для прогнозування характеру зміни питомих витрат енергії за допомогою бази правил Мамдані-типу (табл. 3.4). База правил ґрунтується на знаннях і досвіді експертів.

Таблиця 3.4

Повна база правил Мамдані-типу

w		F				
		VS	S	M	B	VB
ω	VS	VB	B	M	B	VB
	S	B	M	S	M	B
	M	VB	S	VS	S	B
	B	B	M	S	M	B
	VB	B	B	M	B	VB

Кількість термів, за допомогою яких експерти оцінювали питомі витрати енергії, прийнято рівною п'яти: дуже мала VS, менше норми S, норма M, більше норми B, дуже велика VB. Форма функцій належності – трикутна. Осьове навантаження на долото обмежене певними значеннями $50 \leq F \leq 400$ кН; частота обертання долота змінюється в межах $0,25 \leq \omega \leq 5$ об/с; питомі витрати енергії – $400 \leq w \leq 1200$ (кВт·год)/м. Графік залежності $w(F, \omega)$ наведено на рис. 3.9.

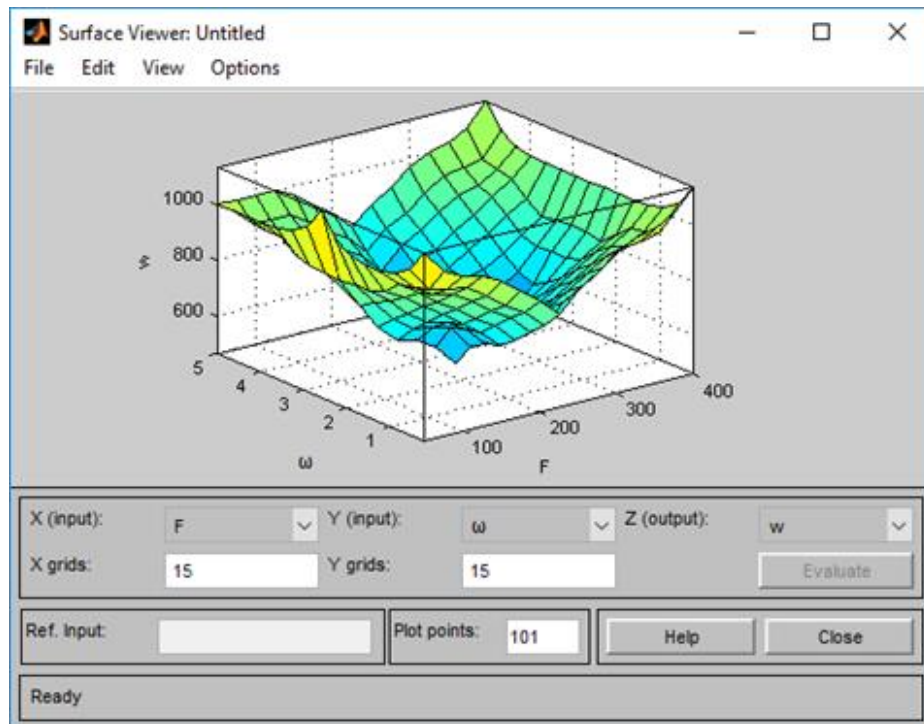


Рис. 3.9. Графік залежності $w(F, \omega)$

Використання запропонованої фазі-моделі питомих витрат енергії на буріння свердловин дозволить значно покращити ефективність функціонування системи підтримки процесів прийняття рішень щодо оптимізації управління даним технологічним процесом.

3.4 Автоматична система зі змінною структурою для керування процесом буріння свердловин електробурами

Автоматизована система управління процесом буріння електробурами, яку розглядаємо, передбачає використання однієї керувальної дії – осьового зусилля

на долото F або струму статора двигуна електробура. Оскільки більш повною характеристикою навантаження двигуна електробура є активна потужність, то у запропонованій системі керування давач струму замінено на давач активної потужності і введено додатний зворотний зв'язок по частоті обертання. Що стосується додатного зворотного зв'язку по й проходці, та в зв'язку з тим, що проходка долота змінюється в часі не так швидко, як частота обертання цей зв'язок здійснюється в системі підтримки процесів прийняття рішень.

Враховуючи особливості роботи двигуна електробура при бурінні похило-скерованих свердловин, важливим є підтримання номінального значення потужності незалежно від глибини свердловини. Режим буріння, при якому осьове зусилля на долото підвищується із збільшенням глибини свердловини, обумовлює практично постійну потужність на долоті. Ця задача вирішується додатним зворотним зв'язком по глибині свердловини, який враховує втрати потужності в струмопідводі

$$P_{cn} = r_{\kappa} l (I_A^2 + I_B^2) + r_{mp} I_C^2, \quad (3.5)$$

де I_A, I_B, I_C – струм фаз А, В, С;

r_{κ} – питомий опір кабелю, при температурі 20°C, Ом/км;

r_{mp} – питомий опір труб, при температурі 20°C, Ом/км;

l – довжина струмопідводу, км.

Наприклад, для струмопідводу 4 км з перерізом 50 мм², $r_{\kappa} = 0,38$ Ом/км.

Отже $R_{\kappa} = 0,38 \cdot 4 = 1,52$ Ом.

Активний опір одного кілометра труби Н140 при величині струму $I = 131$ А, який є номінальним для електробура ЕП-215-8-В5 ($P = 175$ кВт, $U = 1550$ В, $\omega = 680$ об/хв), $r_{mp} = 0,34$ Ом/км [25].

Тоді труба довжиною $l = 4$ км має опір $R_{mp} = 0,34 \cdot 4 = 1,36$ Ом.

Отже, втрати потужності в струмопідводі довжиною $l = 4$ км при бурінні електробуром ЕП-215-8-В5 дорівнюють

$$P_{cn} = 75508,4 \text{ Вт.}$$

Що дорівнює 43 % від номінальної потужності електробура.

Якщо вважати, що допустимою втратою потужності в струмопідводі є $\approx 5\%$ від номінальної потужності електробура, то тоді корекцію навантаження на долото слід здійснювати через кожні 500 м на $5,3\%$:

$$\frac{P_{cn} \cdot 0,5}{lP} = 0,053.$$

Алгоритмічну структуру такої системи автоматичного керування зображено на рис. 3.10.

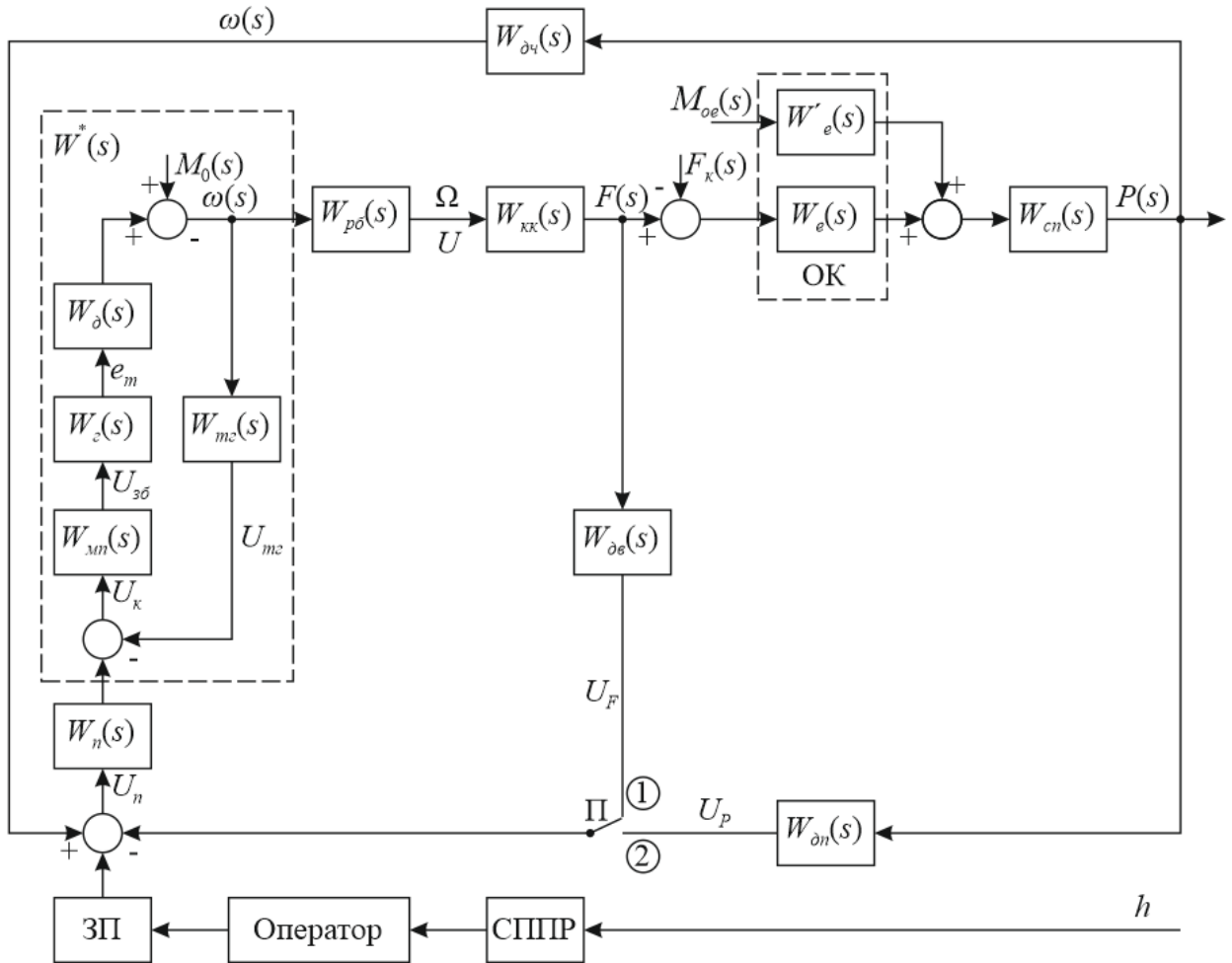


Рис. 3.10. Алгоритмічна структура системи автоматичного керування із змінною структурою:

СППР – система підтримки процесів прийняття рішень

Для побудови алгоритмічної структури системи автоматичного керування за потужністю занурного електродвигуна більш детально досліджено функцію передачі електробура як одного із елементів комплексної динамічної системи, що складається з колони бурильних труб довжиною 2500 м, струмопідводу

електробура і вибою свердловини, а також – передавальні функції окремих ланок системи автоматичного керування. Для цього частково використано формули другого розділу: для струмопідводу (2.28); двигуна електробура (2.27); системи «колона бурильних труб-канат» (2.39); редуктора з барабаном лебідки (2.35); електричного двигуна системи Г-Д (2.33); електричного генератора системи Г-Д (2.32); магнітного підсилювача (2.31); напівпровідникового підсилювача з формувальною ланкою (2.30); давача потужності двигуна електробура $W_{on}(s) = \frac{K_{on}}{T_{on}s + 1}$; давача ваги (маси) інструменту $W_{os}(s) = K_{os}$; тахогенератора (2.23).

У результаті детального аналізу структури системи автоматичного керування отримали таку алгоритмічну структуру робастної системи, подану на рис. 3.11.

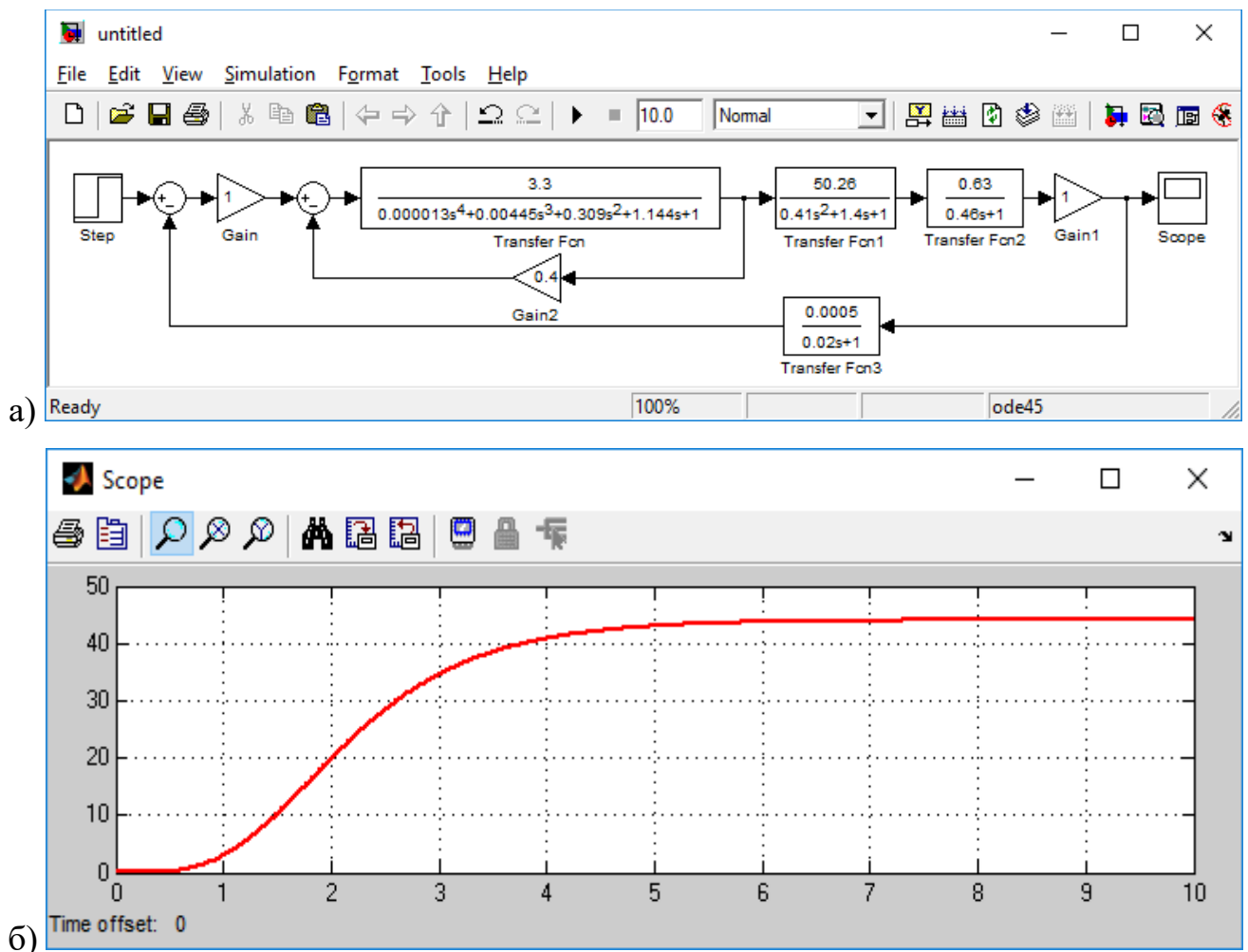


Рис. 3.11. Алгоритмічна структура робастної системи автоматичного керування (а) (перемикач П у положенні 2) і її перехідна характеристика (б)

На рис. 3.12 наведено алгоритмічну структуру робастної системи з коригуванням та перехідну характеристику.

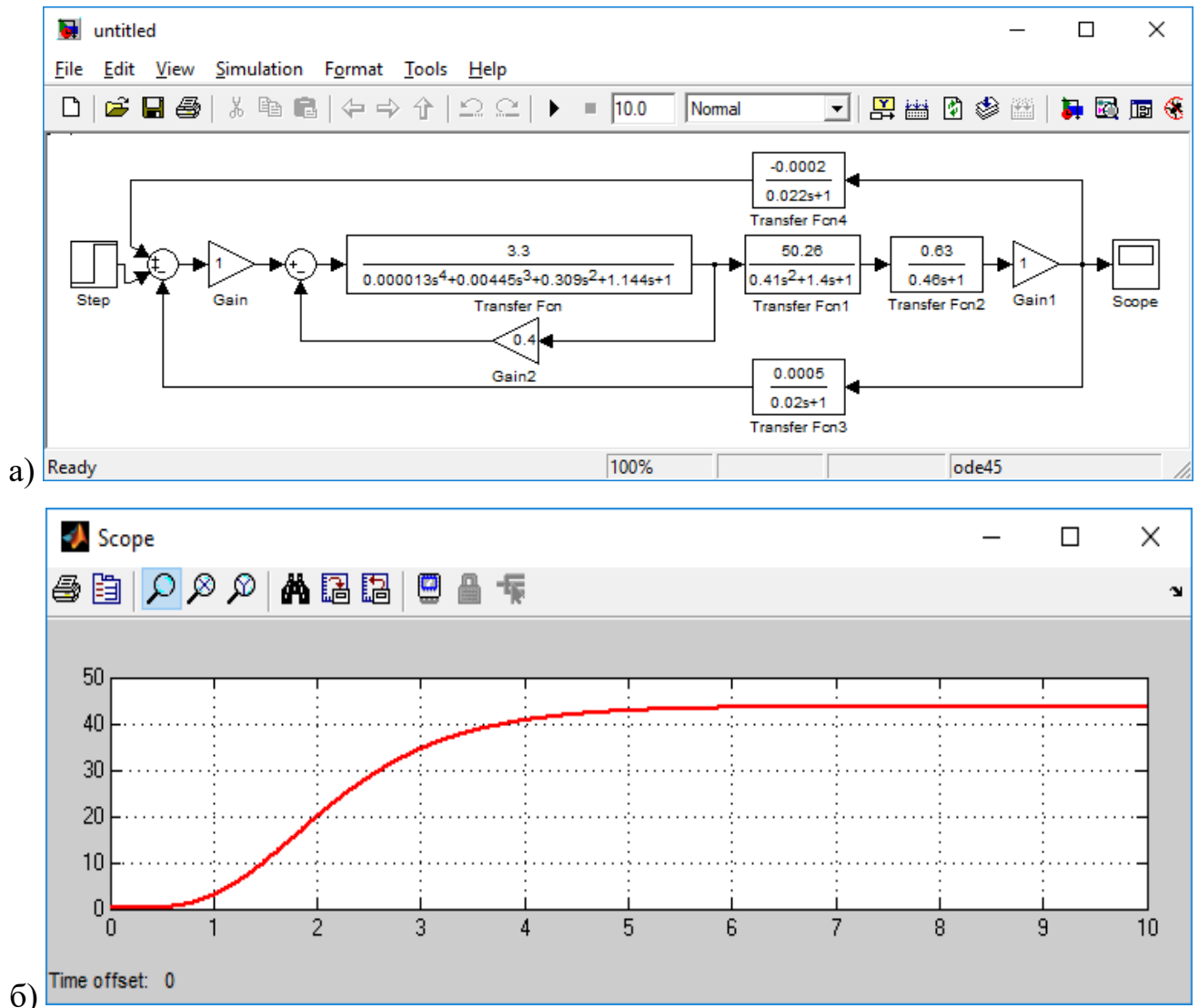


Рис. 3.12. Алгоритмічна структура робастної системи автоматичного керування з коригуванням (а) (перемикач П у положенні 2) і її перехідна характеристика (б)

Із наведених перехідних характеристиках, які на рис. 3.11 та 3.12, можна зробити висновок, що дані системи стійкі з часом регулювання 6 с (рис. 3.11) та 5,5 с (рис. 3.12)

В додатку Ж наведені перехідні характеристики для систем при різних умовах.

3.5 Показники якості автоматичних систем регулювання режимів буріння нафтових і газових свердловин електробурами

Розглянуто системи автоматичного регулювання з регулятором подачі долота, призначеним для роботи під час буріння свердловин електробурами, що забезпечує підтримку заданого значення потужності на валі занурного двигуна електробура з обмеженням навантаження на долото або підтримку заданого значення осьового навантаження на долото (сили ваги на гаку).

У режимі буріння за потужністю на валі двигуна й осьовим навантаженням на долото можна встановлювати задані значення уставки – потужності на валі двигуна електробура або осьове навантаження на долото. При цьому можна підтримувати тільки один із параметрів, близький до заданого: в енергоємних породах це потужність на валі двигуна, а в неенергоємних – осьове навантаження на долото. Тобто система керування має змінну структуру (рис. 3.13).

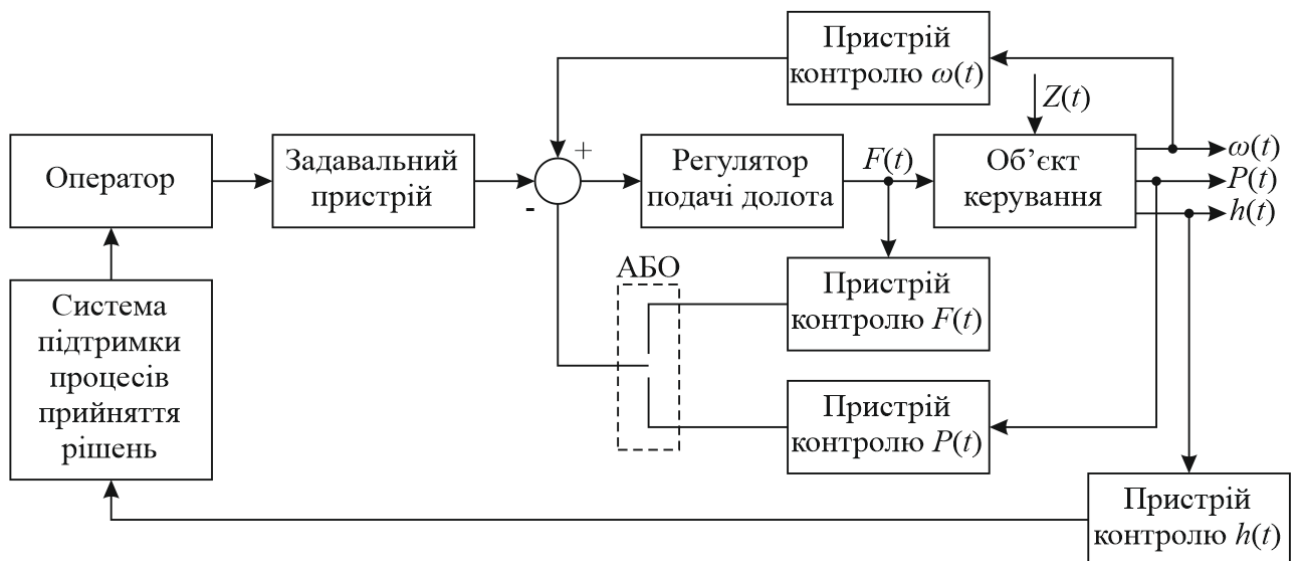


Рис. 3.13. Функціональна схема системи із змінною структурою для керування процесом буріння свердловин електробурами:

$F(t)$ – осьове навантаження на долото; $P(t)$ – потужність на валі двигуна електробура; $\omega(t)$ – частота обертання долота; $h(t)$ – проходка долота;

$Z(t)$ – збурення

Принцип змінної структури дозволяє використовувати позитивні властивості кожної структури і отримати ефекти, не властиві жодній із систем, що мають постійну структуру.

У досліджуваній системі використано регулятор подачі долота АМС-2, давач осьового навантаження на долото типу ДВР-2б зі стежною системою на основі безконтактних сельсинів типу БД404А, система телеконтролю потужності на валі двигуна електробура на основі серійного давача активної потужності серії Е.

На першому етапі досліджено систему автоматичного регулювання осьового навантаження на долото, алгоритмічна структура якої наведена на рис. 3.14.

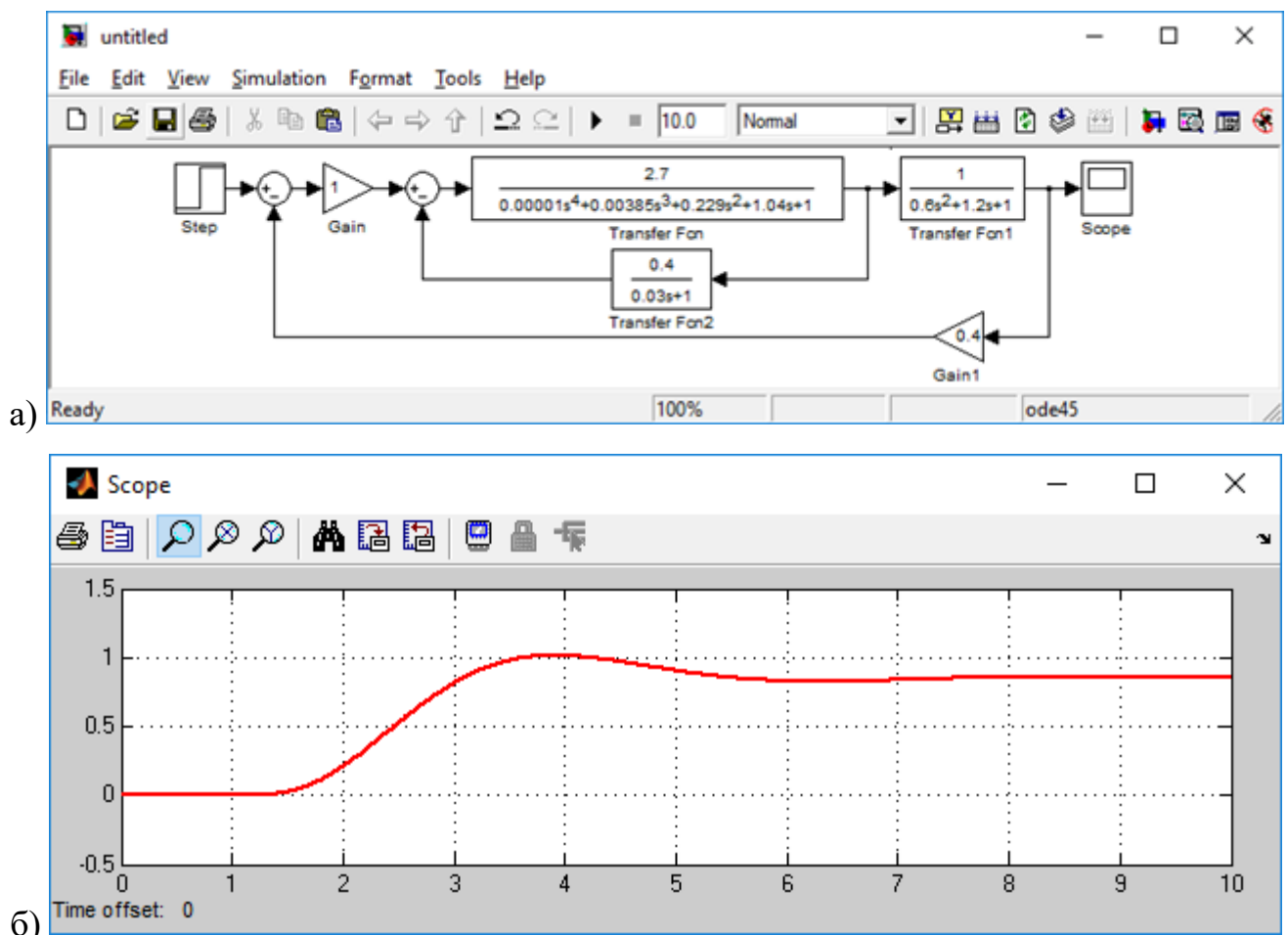


Рис. 3.14. Алгоритмічна структура системи автоматичного регулювання осьового навантаження на долото (а) та її перехідна характеристика (б)

З рис. 3.14 бачимо, що якщо коефіцієнт передачі ланки «редуктор з барабаном лебідки – колона бурильних труб – канат» $K = 1$, то тривалість перехідного процесу складає 6,5 с, перерегулювання 7,5 % і кількість періодів

коливань $n=1$. Зі збільшенням глибини свердловини, що супроводжується зростанням коефіцієнта передачі, показники якості системи погіршуються (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Показники якості системи автоматичного регулювання осьового навантаження на долото залежно від коефіцієнта передачі ланки «редуктор з барабаном лебідки – колона бурильних труб – канат»

№	Коефіцієнт передачі ланки «редуктор з барабаном лебідки – колона бурильних труб – канат» (рб–кк)	Тривалість перехідного процесу, с	Перерегулювання, σ , %	Кількість періодів коливань n
1	1	6,5	7,5	1
2	2,2	10	37	2
3	2,8	14	47	3
4	3,4	17	50	4
5	4,4	30	71	7
6	4,8	35	77	8
7	5	45	85	13

Графіки залежностей тривалості перехідного процесу t_n , кількості періодів коливань n і перерегулювання σ від величини коефіцієнта передачі ланки «редуктор з барабаном лебідки – колона бурильних труб – канат» наведено на рис. 3.15.

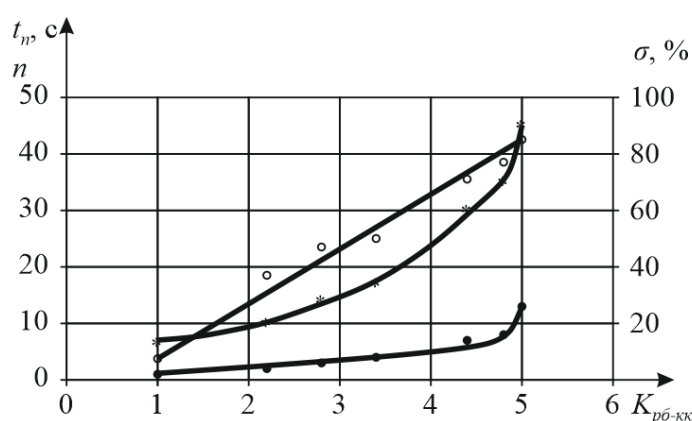


Рис. 3.15. Графіки залежностей тривалості перехідного процесу t_n , кількості періодів коливань n і перерегулювання σ від коефіцієнта передачі ланки «редуктор з барабаном лебідки – колона бурильних труб – канат»:

* – тривалість перехідного процесу; • – кількість періодів коливань;

◦ – перерегулювання

Бачимо, що при $K \rightarrow 5$ показники системи регулювання осьового навантаження на долото різко погіршуються. Тому доцільно змінити структуру системи регулювання і перейти до автоматичного регулювання потужності на валі двигуна електробура.

На другому етапі досліджено і порівняно показники якості перехідних процесів алгоритмічної структури системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна електробура E215-8М (рис. 3.16), яка відрізняється від системи, що зображена на рис. 3.14 лише зміною керованої величини. При цьому додатково в структуру введено функції передачі двигуна електробура

$$W_1(s) = \frac{12,5}{0,86s + 1}, \text{ і давача активної потужності } W_2(s) = \frac{0,0005}{0,02s + 1}.$$

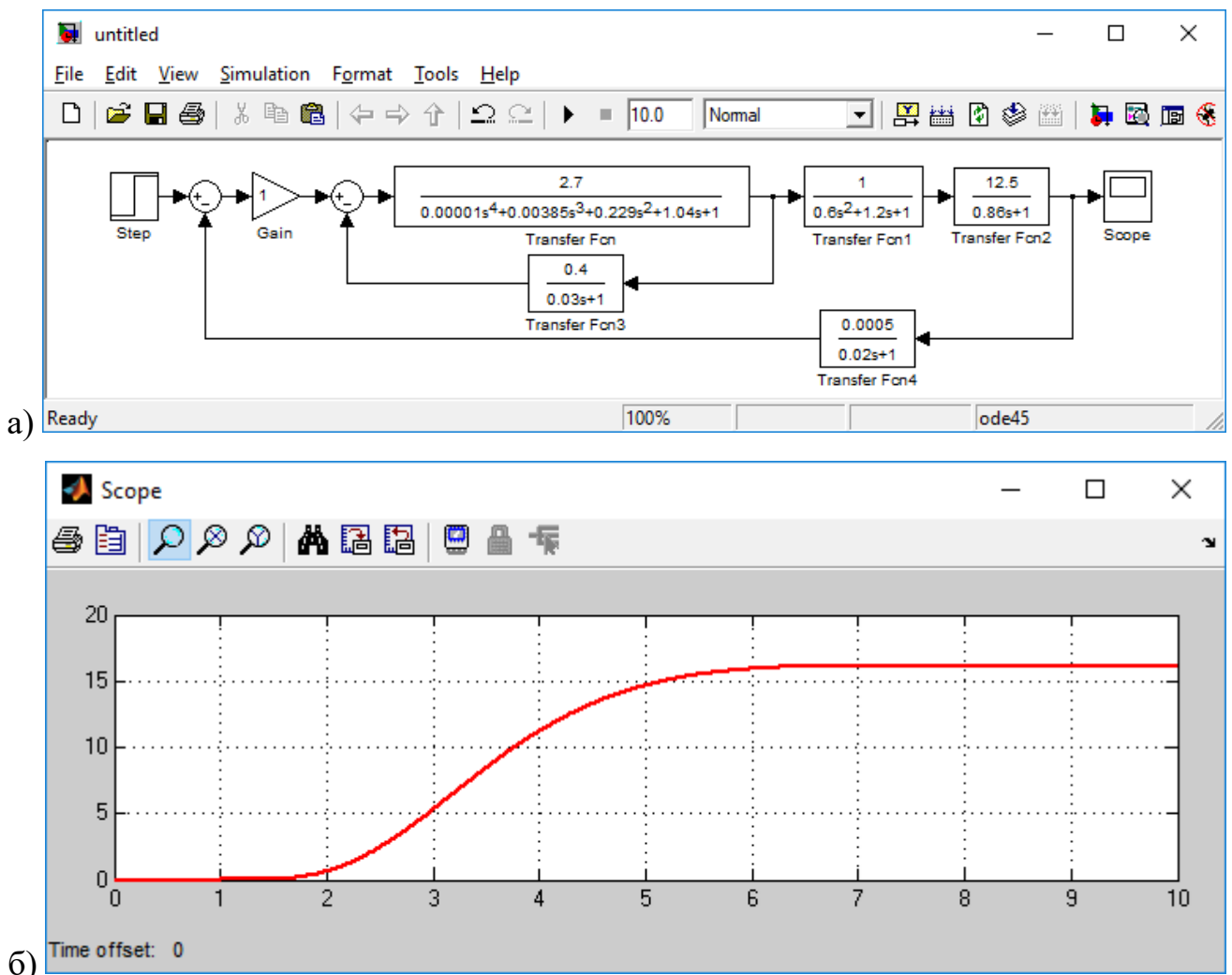


Рис. 3.16. Алгоритмічна структура системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна електробура E215-8М (а) та її перехідна характеристика (б) ($K_{рб-кк}=1$; $K_e=12,5$)

Бачимо, що показники якості у цьому випадку значно покращилися. Вони зберігаються і за більш високих значень коефіцієнта передачі механічної ланки «редуктор з барабаном лебідки – колона бурильних труб – канат» (рис. 3.17, рис. 3.18).

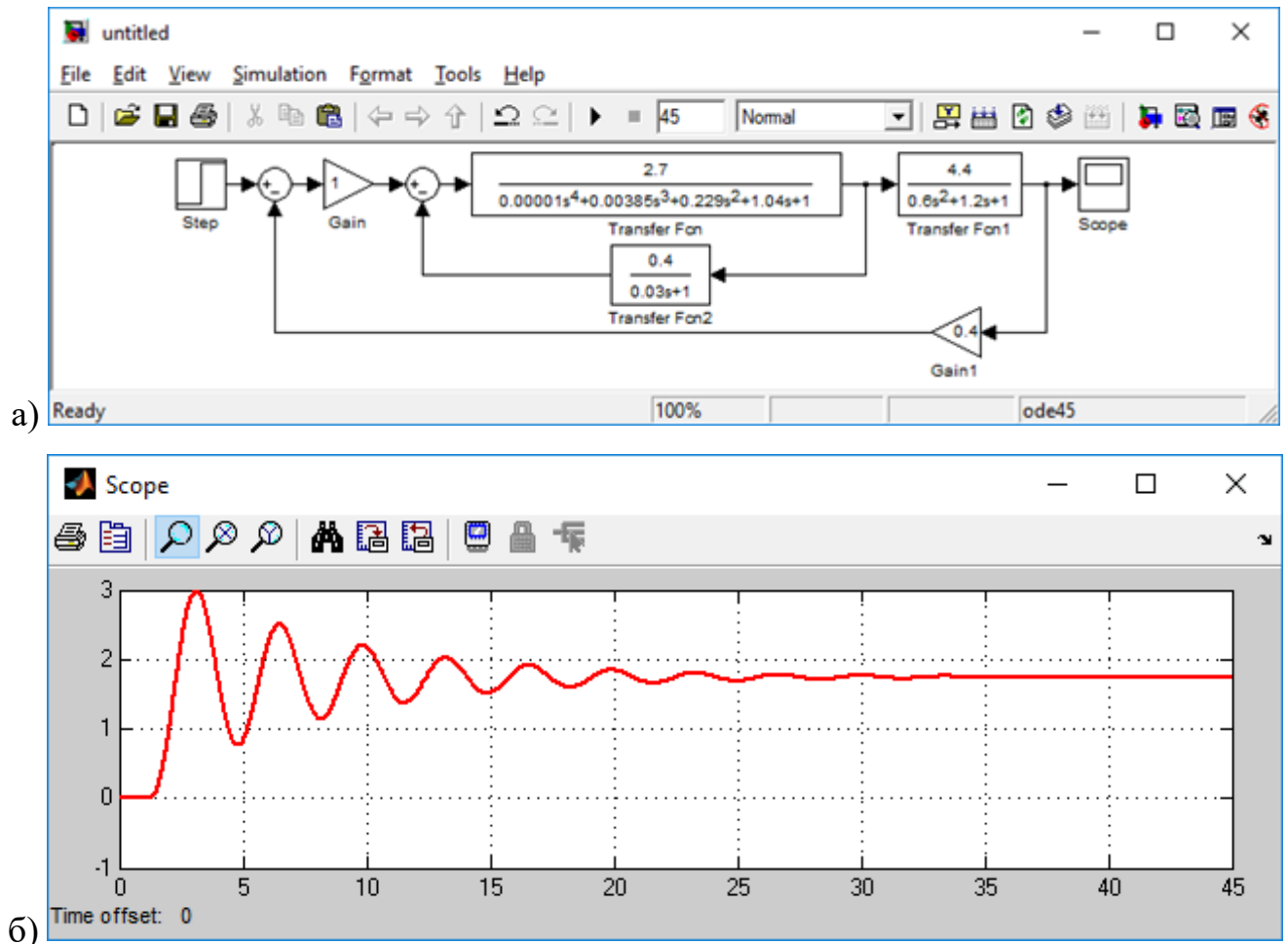
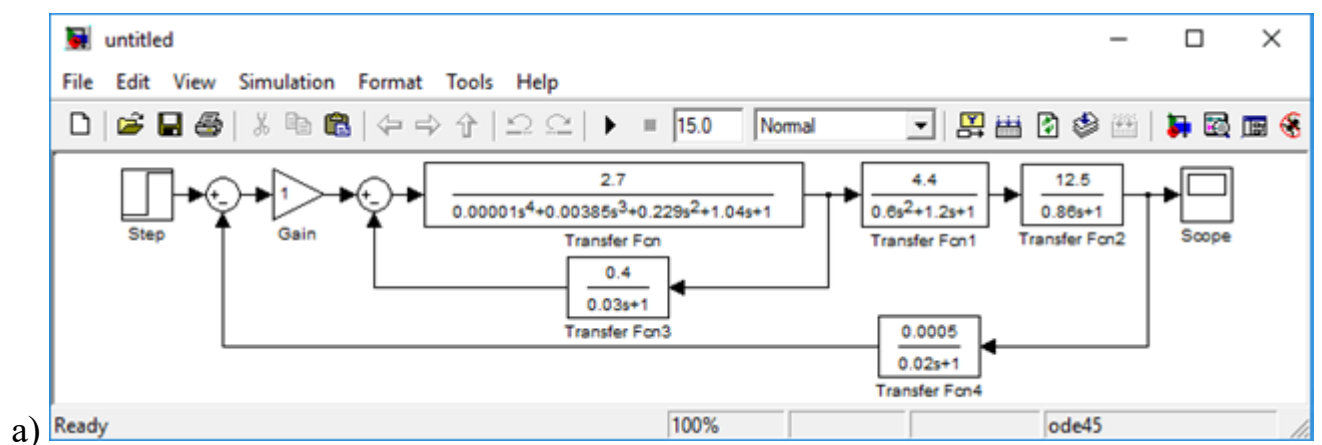


Рис. 3.17. Алгоритмічна структура системи автоматичного регулювання осьового навантаження на долото (а) та її перехідна характеристика (б)

$$(K_{рб-кк}=4,4)$$



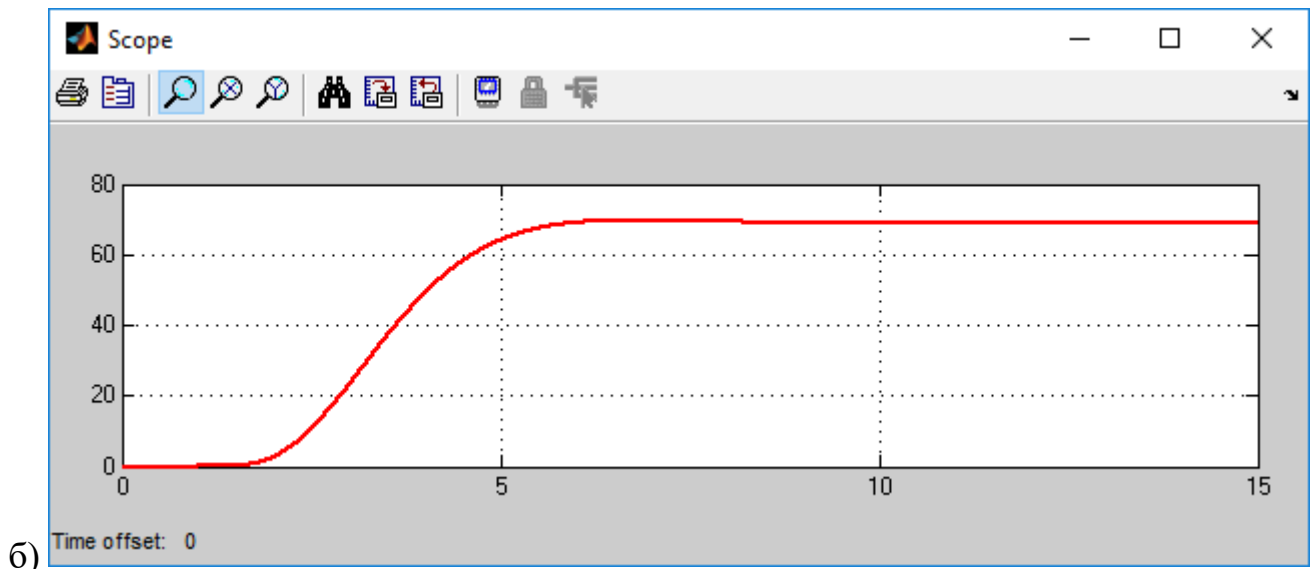


Рис. 3.18. Алгоритмічна структура системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна електробура E215-8M (а) та її перехідна характеристика (б) ($K_{p\delta-kk}=4,4$; $K_e=12,5$)

Отже, зі збільшенням глибини свердловини, коли коефіцієнт передачі $K_{p\delta-kk}$ наближається до 5, доцільно змінити структуру системи автоматичного регулювання і перейти на автоматичне регулювання потужності на валі двигуна електробура.

Висновки до розділу 3

1. На основі реалізації процедури передпрогнозного фрактального R/S -аналізу часових рядів проаналізовано фрактальні розмірності і показники Херста для таких параметрів і показників процесу буріння свердловини:

- осьового навантаження на долото $D = 1,354$; $H = 0,646$;
- струму навантаження двигуна електробура $D = 1,132$; $H = 0,868$;
- потужності, яку споживає двигун електробура $D = 1,243$; $H = 0,757$;
- механічної швидкості буріння $D = 1,258$; $H = 1,742$;
- часу, витраченого на буріння 1 м свердловини $D = 1,175$; $H = 0,825$;
- питомих витрат енергії $D = 1,173$; $H = 0,827$.

Найбільшу силу тенденції мають питомі витрати енергії, струм і час, що витрачений на буріння 1 м свердловини. Оскільки $0,5 < H < 1$; $1 < D < 1,5$, то це дозволило зробити висновок, що досліджувані часові ряди є персистентними і процесу буріння властива трендовість. Це явище запропоновано використати для вирішення завдання прогнозування і раннього виявлення відхилень технологічного процесу від норми в реальному часі. Оцінено автокореляційні впливи попередніх значень досліджуваних часових рядів на їхні наступні значення. Показано, що кореляційні співвідношення знаходяться в межах $0 < C < 1$, що підтверджує трендостійкість даних рядів. Така тенденція буде продовжена у майбутньому протягом певного відрізка часу. Це сприяє вирішенню завдань прогнозування в системі підтримки процесів прийняття рішень щодо управління процесом буріння свердловин електробурами. Для виявлення можливостей управління на основі фрактальної розмірності D запропоновано визначати просторову розмірність n . Отримане значення $n = 2$ просторової розмірності вказує на кількість факторів, за допомогою яких можна здійснювати керування технологічним процесом буріння свердловин.

2. Встановлено за допомогою алгоритму Фаррара-Глобера зв'язок між досліджуваними параметрами процесу буріння в різні моменти часу за допомогою автокореляційної функції та функції спектральної щільності. Отримані автокореляційні функції підтвердили, що досліджуваний процес є стаціонарним та ергодичним. Визначено рівняння спектральних щільностей та отримано функції передачі $W_{FI}(s)$ та $W_{FP}(s)$. Оскільки щільний зв'язок між досліджуваними параметрами, то запропоновано використовувати для автоматичного керування процесом буріння електробурами один із досліджуваних параметрів – струм навантаження двигуна електробура або потужність, яку споживає електробур.

3. Запропоновано метод трансформації автоматизованої системи управління процесом буріння свердловин у вигляді логічної структурної моделі $M_{mp} = \{F = const \cup I = const \cup P = const\}$ і алгоритм його реалізації, який побудований на засадах бази правил Мамдані-типу, що дозволить значно

покращити ефективність функціонування системи підтримки процесів прийняття рішень щодо оптимізації управління даним процесом.

4. На основі аналізу стійкості і показників якості системи автоматичного регулювання процесом буріння глибоких свердловин електробурами, яка має змінну структуру, доведено, що найбільш раціональною є структура, яка забезпечує автоматичну стабілізацію активної потужності двигуна електробура. У цьому випадку система є робастною за показниками запасу стійкості і коливальності.

5. Виходячи із специфіки задач автоматичного регулювання режимів буріння нафтових і газових свердловин з урахуванням стохастично-хаотичних властивостей процесу, що розвивається у часі, досліджено показники якості системи автоматичного регулювання осьового навантаження на долото і потужності на валі двигуна електробура. Це дало змогу зробити висновок про доцільність із збільшенням глибини свердловини переходу на автоматичне регулювання потужності на валі двигуна електробура, що підвищує ефективність буріння.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

4.1 Синтез структури FL-блока адаптації для визначення необхідності керувальних дій на основі бази знань користувача про параметри процесу буріння

Для синтезу структури FL-блока адаптації скористуємося методами Fuzzy Logic (FL), призначеними для розв'язування складних нелінійних задач, що перевищують можливості загально відомих алгоритмічних методів. В основу синтезу структури FL-блока адаптації покладемо міжнародний стандарт ІЕС 1131-7 «структура і функціональні елементи нечіткої логіки» (рис. 4.1) [137].

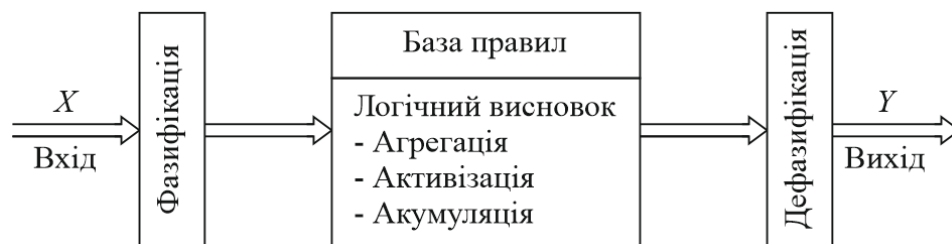


Рис. 4.1. Стандарт ІЕС 1131-7

Програмування на основі Fuzzy Logic визначає FL-компоненти, а також взаємодію FL-модулів з іншими стандартними мовами програмування. Як вхідні дані використано контрольовані технологічні параметри, розрахункові величини і контрольні значення.

Вихідними даними є реальні параметри в формі коригувальних величин.

FL-блок адаптації призначений для визначення величин необхідних керувальних дій на основі бази знань користувача про показники процесу буріння свердловин електробурами. Оскільки в досліджуваній адаптивній системі, яку можна назвати хаосною системою або системою з непередбачуваною поведінкою (emergent systems), основну увагу приділено поведінковим, а не параметричним

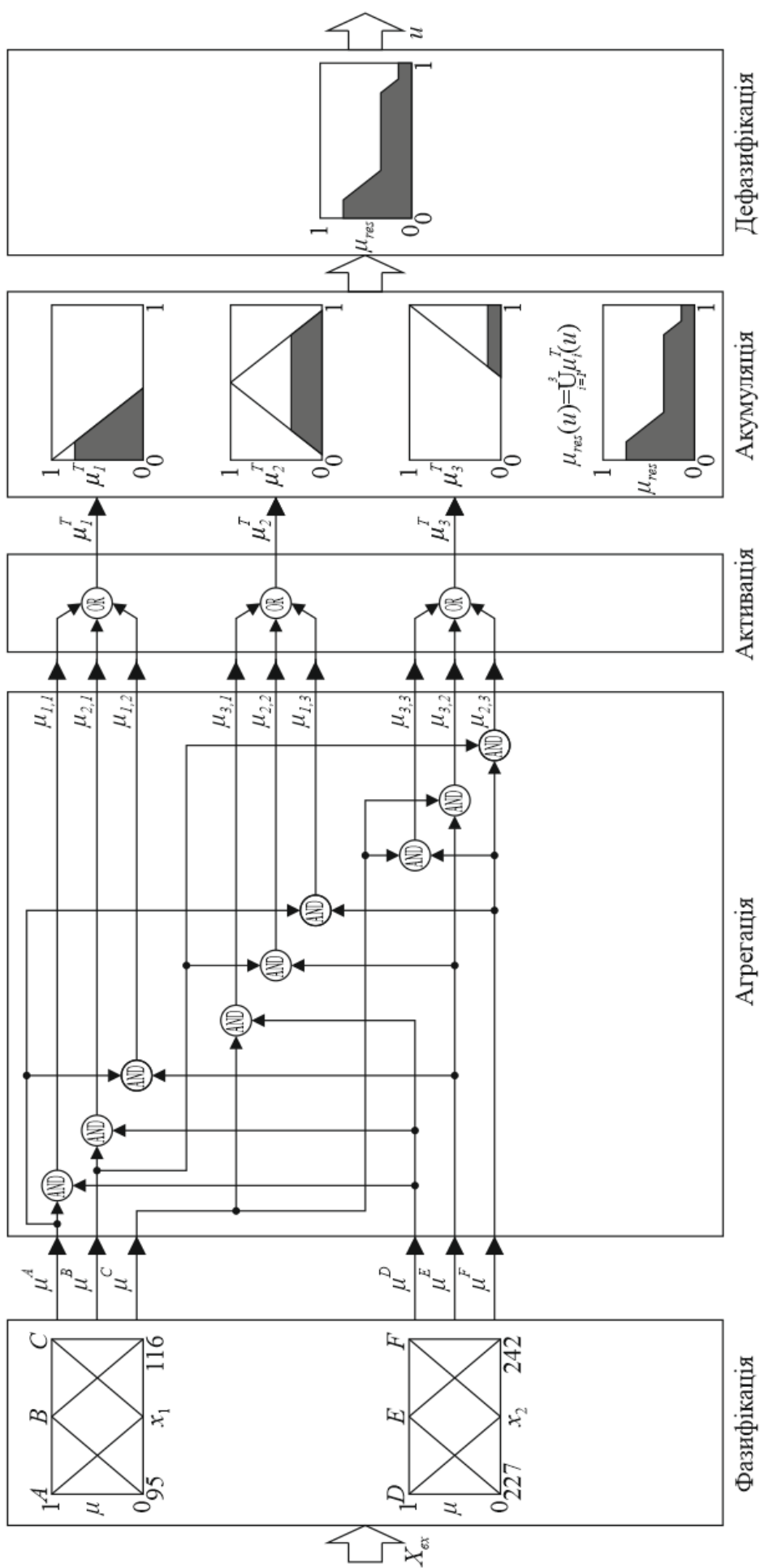


Рис. 4.2. Процеси обробки та перетворення нечіткої інформації FL-блоком адаптації для використання при бурінні вертикальних свердловин

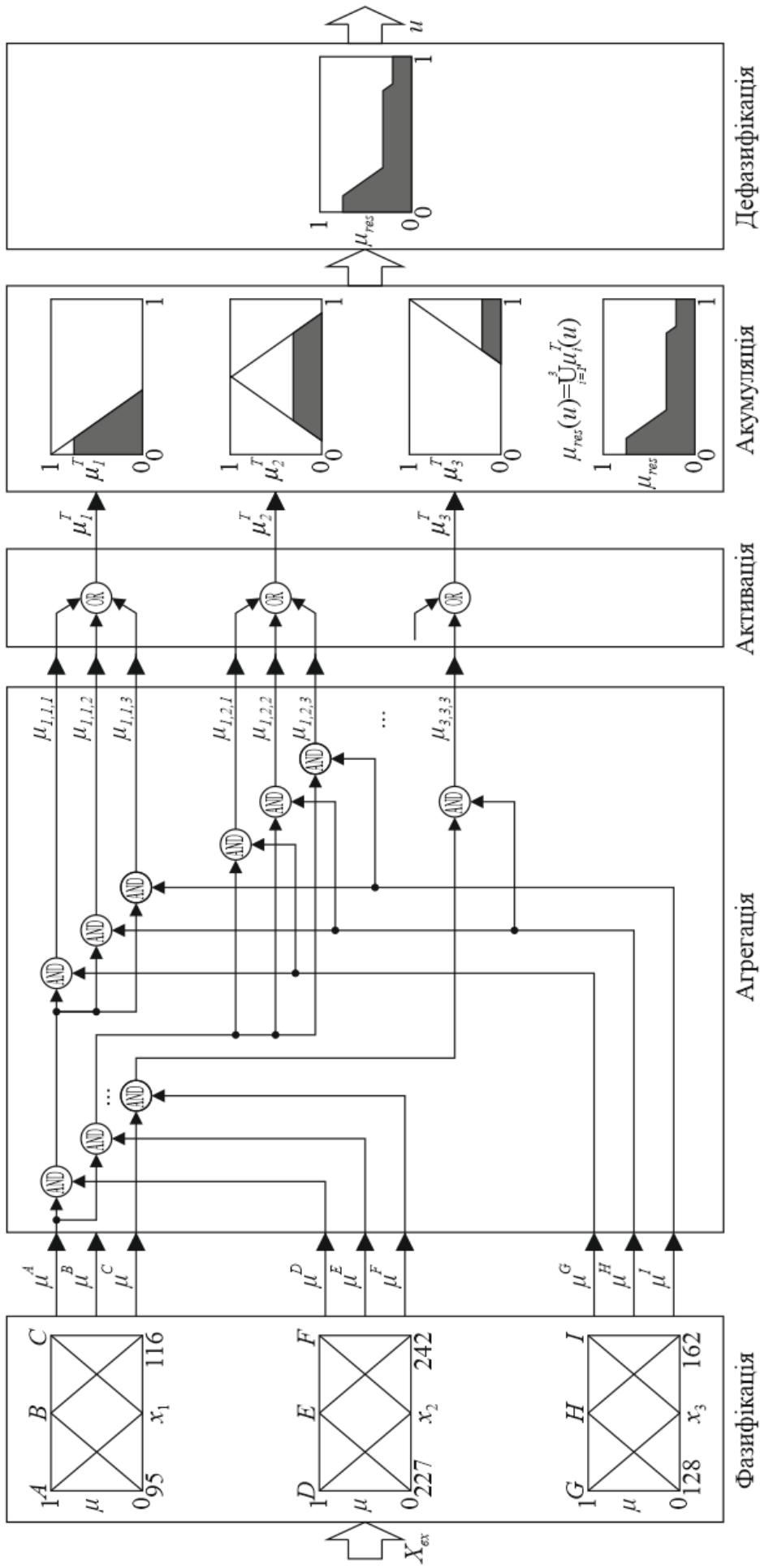


Рис. 4.3. Процеси обробки та перетворення нечіткої інформації FL-блоком адаптації для використання при бурінні похило-скерованих свердловин

аспектам об'єкта керування, та опису для отримання системного рішення підлягають лише окремі складові об'єкта, а не поведінка усєї системи. Тобто все це є підходом «знизу-догори», що починається з електробура і дозволяє системі управління процесом буріння вільно розвиватися. Загальна поведінка системи формується із сполучень поведінок окремих її елементів.

Метою використання технології Fuzzy Logic є суттєве зниження витрат на розроблення програмного забезпечення для вирішення проблеми надзвичайно високого ступеня складності.

Структура FL-блока адаптації побудована на основі використання програмного забезпечення Fuzzy Logic Toolbox для бази правил Мамдані-типу (див. табл. 2.6). Отримані результати наведені на рис. 4.2 та в додатку Г рис. Г.1-Г.5 – при бурінні вертикальних свердловин і на рис. 4.3 та в додатку Г рис. Г.6-Г.10 – при при бурінні похило-скерованих свердловин.

Використання FL-блока адаптації дозволяє вдвічі скоротити час адаптації процесу буріння до змін умов буріння порівняно з операціями, що виконує бурильник.

4.2 Розроблення функціональних схем, алгоритмів і приладів контролю енергетичних показників ефективності процесу буріння свердловин електробурами

З урахуванням особливостей процесу буріння свердловин електробурами, заслуговують на увагу розробки електробурового комплексу, в якому двигун електробура є одночасно і доступним джерелом інформації про вибійний буровий процес. Відомо [119], що занурний двигун електробура може одночасно використовуватись в інформаційній системі, де інформація про роботу долота, отримується через електричний канал, і дає перші відомості про розбурювану породу, про енергетичні параметри та ефективність застосованого режиму буріння.

Можливість оперативного отримання даних з вибою свердловини під час буріння про параметри режиму буріння дає змогу ставити їх у відповідність з зафіксованим у базах даних інформаційної системи, та відповідно до цього коригувати план робіт на свердловині. Відзначимо, що накопичення такої інформації з родовища загалом та по регіонах зокрема створює підґрунтя для підвищення якості нових технічних проектів на буріння свердловин й інтелектуальних систем управління процесом буріння.

За інформацією про електричні параметри приводного електродвигуна встановлено [118] три методи контролю моменту на валу виробничих механізмів:

- з використанням закону Ампера шляхом прямого або непрямого вимірювання індукції;
- з використанням еквівалентних схем двигуна і кабеля з урівноваженням еквівалентної схеми за модулем струму або за модулем і фазою струму;
- з використанням енергетичних діаграм привода до струму, який споживає двигун: за значенням добутку активної потужності двигуна на ККД, за потужністю, яку споживає двигун.

Останній метод є найбільш поширеним і ґрунтується на використанні різних алгоритмів функціонування пристроїв контролю [118].

Проте ці алгоритми не враховують чинники, характерні для процесу буріння свердловин електробурами: втрати потужності на тертя в шпинделі (2-4 кВт); втрати потужності в несиметричному струмопідводі (два проводи – труба); втрати потужності в оливонаповненому двигуні електробура, а також вплив ковзання двигуна, яке може відхиляється від номінального значення на 5÷10 % і більше. Невирішеною є проблема створення пристроїв для контролю потужності, крутного моменту на валі занурного двигуна електробура та швидкості його обертання.

Тому розглянемо питання подальшого розвитку методів та пристроїв контролю потужності, крутного моменту двигуна електробура і швидкості його обертання, призначених для функціонування в складі адаптивних систем керування процесом буріння похило-скерованих глибоких нафтових і газових

свердловин електробуром в умовах нестационарності та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта керування, та ефективної роботи долота.

Дослідженнями [7] доведено, що параметрами, які достатньо повно характеризують занурний двигун електробура, є номінальна потужність $P_{ном}$, номінальний $M_{ном}$ і максимальний M_{max} моменти, що віднесені до одиниці площі $S_{виб}$ вибою свердловини: $P_{ном}/S_{виб}$; $M_{ном}/S_{виб}$; $M_{max}/S_{виб}$.

Відношення $P_{ном}/S_{виб}$ характеризує рівень питомої потужності, яка витрачається на буріння і значною мірою визначає механічну швидкість буріння v . Окрім цього, величина $P_{ном}$ визначає ступінь нагрівання електродвигуна в реальних умовах охолодження. Відношення $M_{ном}/S_{виб}$ визначає величину тривало допустимого осьового навантаження F на долото. Відношення $M_{max}/S_{виб}$ визначає перевантажувальну здатність двигуна, яка має особливе значення під час буріння в породах, що обумовлюють імпульсний характер зміни моменту опору на долоті і, по суті, визначає граничне значення осьового навантаження, з яким можна вести буріння.

Для з'ясування фізичної сутності взаємозв'язків зазначених вище енергетичних параметрів від площі вибою свердловини скористаємося підходом, викладеним у роботі [7], і розглянемо роботу лопатевого долота за певного питомого тиску σ на гірничу породу, який створює осьове навантаження на долото. Для цього момент M , що потрібний для обертання долота, вважатимемо пропорційним діаметру долота d і осьовому навантаженню F , тобто

$$M = cdF, \quad (4.1)$$

де c – коефіцієнт, який характеризує взаємодію долота з вибоєм свердловини.

Оскільки осьове навантаження F можна записати як

$$F = b\sigma d, \quad (4.2)$$

де b – ширина леза долота,

то крутний момент при $\sigma = const$ дорівнюватиме

$$M = cb\sigma d^2, \quad (4.3)$$

З метою підвищення зручності енергетичної оцінки процесу буріння перетворимо вираз (4.3), ввівши в нього π . Тоді маємо

$$M = c_1 b \sigma \pi d^2, \quad (4.4)$$

де $c_1 = c/\pi$.

З урахуванням виразу (4.4) запишемо формули для визначення потужності, необхідної для обертання долота:

$$P = Mn = c_1 b \sigma \pi d^2 n, \quad (4.5)$$

де n – швидкість обертання долота;

енергії, що витрачається за час роботи долота t :

$$W = c_1 b \sigma \pi d^2 n t, \quad (4.6)$$

та питомих витрат енергії

$$W_{num} = \frac{4W}{h\pi d^2} = \frac{4c_1 b \sigma n t}{h}, \quad (4.7)$$

де h – проходка долота.

Якщо залежність проходки h від механічної швидкості буріння v при $F = const$ і $n = const$ визначається як $h = vt$, тоді

$$W_{num} = \frac{4W}{vt\pi d^2} = \frac{4P}{v\pi d^2}, \quad (4.8)$$

або

$$P = \frac{4W}{h\pi d^2} = \frac{W_{num} v \pi d^2}{4}, \quad (4.9)$$

з рівняння (4.9) механічна швидкість буріння дорівнює

$$v = \frac{4P}{W_{num} \pi d^2}. \quad (4.10)$$

Отже, механічна швидкість буріння електробуром прямо-пропорційна потужності, що підведена до долота, і обернено-пропорційна площі вибою свердловини та питомій витраті енергії на одиницю вибуреної породи [118].

Проте вираз (4.10) є справедливим лише якщо $n = const$, $h = vt$. Із зміною потужності P , що обумовлено зміною швидкості n , зміняться питомі витрати

енергії W_{num} , тобто якщо $P = const$ і $n = var$, то механічна швидкість буріння буде різною для різних значень швидкості обертання n .

Такий енергетичний підхід до оцінювання процесу буріння свердловин електробурами підтверджено [119] також для буріння тришарошковими долотами і електробурами різних типорозмірів. Досвід буріння довів, що при $(M_{max}/M_{ном}) \geq 2,2$ забезпечується режим буріння в різних геологічних умовах різними долотами за будь-яких допустимих осьових навантажень на долото. Слід відзначити, що для алмазних доліт доцільна швидкість обертання для більшості гірських порід складає 700 об/хв і більше, а для шарошкових у межах $70 \div 300$ об/хв.

Важливим питанням при експлуатації електробурів є безперервний контроль потужності і крутного моменту на валу електробура, а також швидкості обертання долота. Виходитимемо з того, що існує взаємозв'язок між енергетичними та інформаційними аспектами контролю процесу буріння свердловин електробурами. Тому в основу запропонованого методу контролю енергетичних показників процесу буріння покладена гіпотеза про наявність деякої відповідності між спектральною структурою сигналу і ймовірнісним уявленням спостерігача про цей сигнал. Справді, спектру потужності стаціонарного сигналу, що є об'єктивною характеристикою його енергетичної структури, можна поставити у відповідність апостеріорний розподіл ймовірностей деякої гіпотези про властивості або зміст цього сигналу. Ця відповідність виявляє двоїстість спектральних характеристик часових процесів: з одного боку вони відображають об'єктивні закони розподілу енергії за частотами, а з іншого – ймовірнісне уявлення деякого ідеального «спостерігача» про властивості спостережуваного сигналу.

Відзначимо, що відомі пристрої для вимірювання крутного моменту містять давач активної потужності, суматор і компенсатор сигналу, пропорційного потужності неробочого ходу електродвигуна. Проте, вони не дозволяють вимірювати момент з урахуванням втрат потужності в струмопідводі великої довжини та в оливнонаповненому двигуні.

Тому доцільним є зменшення похибки вимірювання від активних втрат в струмовідводі і в електродвигуні. Це досягається тим, що запропонований пристрій забезпечено коригуючим ланцюгом, який містить послідовно з'єднаний квадратор, елемент множення, подільвач і суматор, а також другий елемент множення, який підключено паралельно до першого елемента множення і подільнику між квадратором і суматором. Вхід квадратора керуючої ланки приєднаний до струмового входу давача активної потужності, а вихід суматора цього ланцюжка – до основного суматора (рис. 4.4) [118].

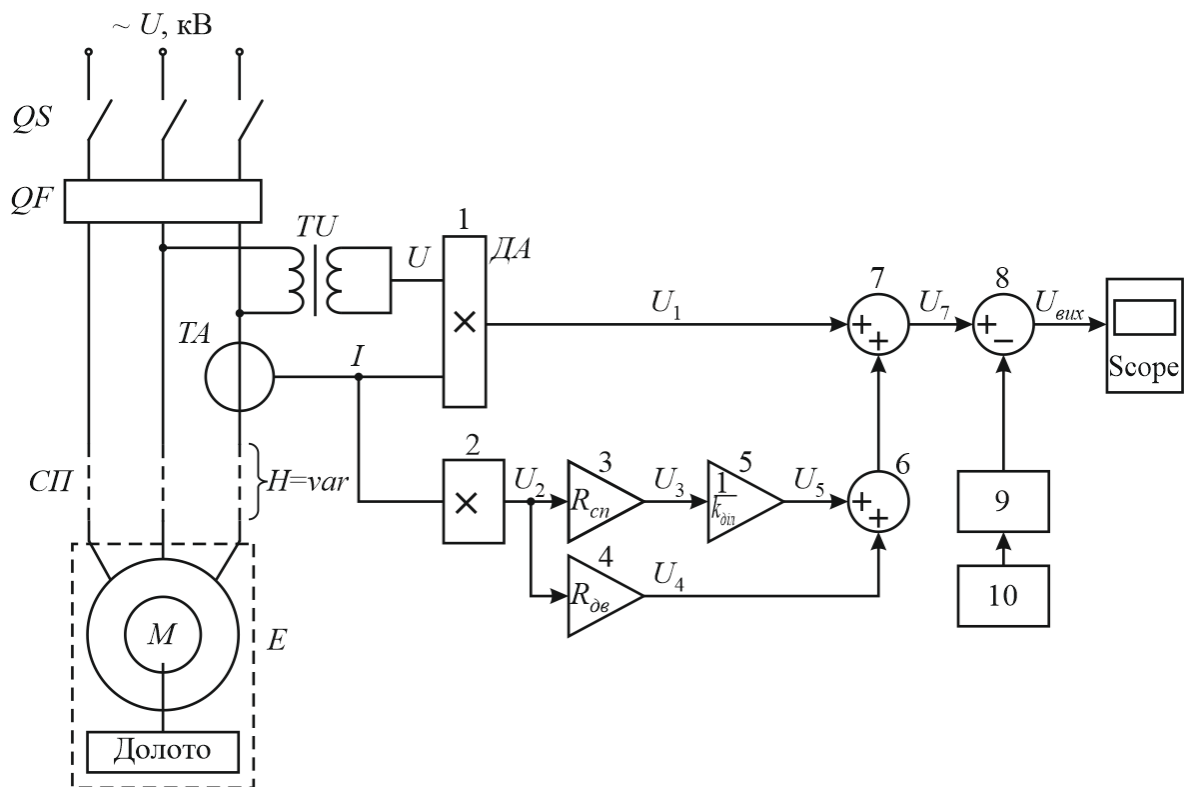


Рис. 4.4. Блок-схема пристрою для вимірювання крутного моменту на валі двигуна електробура:

- 1 – давач активної потужності ДА; 2 – квадратор; 3, 4 – схеми множення;
 5 – дільник; 6, 7 – суматори; 8 – компенсатор напруги, яка відповідає потужності неробочого ходу електродвигуна, що сформульована в елементі 9;
 10 – джерело живлення

Напруга U_1 на виході давача активної потужності, який під'єднаний до ланцюга живлення електродвигуна, пропорційна вимірюваній потужності $P_{вим}$

$$U_1 = k_1 UI \cos \phi \equiv P_{\text{вим}}, \quad (4.11)$$

де U_1 – фазова напруга;

I – фазовий струм;

$\cos \phi$ – коефіцієнт потужності;

k_1 – коефіцієнт пропорційності.

Сигнал, пропорційний фазовому струму, подається також на квадратор, напруга на виході якого U_2 пропорційна квадрату вхідного сигналу

$$U_2 = k_2 I^2 \equiv I^2 U_2 = k_2 I^2 \equiv I^2, \quad (4.12)$$

де k_2 – коефіцієнт пропорційності.

В елементах множення 3 та 4 напруга з виходу квадратора помножується на величини, що пропорційні відповідно опору струмопідводу занурного електродвигуна R_{cn} і активного опору обмоток електродвигуна $R_{\text{об}}$. Параметри схеми 3 вибирають з урахуванням зміни опору струмопідводу внаслідок підвищення температури в залежності від глибини свердловини.

Отже, на виході елемента множення 3 сигнал є пропорційним втратам в струмовідводі з максимальним питомим опором

$$U_3 = k_3 I^2 R_{cn_{\text{max}}}, \quad (4.13)$$

а на виході елемента 4 – пропорційний втратам у двигуні

$$U_4 = k_4 I^2 R_{\text{об}}, \quad (4.14)$$

де k_3 і k_4 – коефіцієнти пропорційності.

Оскільки втрати в струмовідводі залежать від площі перерізу кабелю, то сигнал з виходу елемента множення подається на вхід подільвача 5, у якому напруга ділиться пропорційно питомому опору струмовідводу, тобто

$$U_5 = \frac{k_3 I^2 R_{cn_{\text{max}}}}{k_{\text{діл}}} = k_5 I^2 R_{cn} \equiv P_{cn}, \quad (4.15)$$

де $k_{\text{діл}}$ – коефіцієнт, який враховує питомий опір струмовідводу при різних площах перерізу;

$k_5 = k_3 / k_{\text{діл}}$ – коефіцієнт пропорційності.

У суматорі 6 напруги U_4 і U_5 додаються, а у суматорі 7 ця сума віднімається із напруги, яка пропорційна вимірній потужності на поверхні свердловини

$$U_7 = U_1 - (U_4 + U_5) = k_7 [P_{вим} - (P_{сп} + P_{дв})] = k_7 P_{дв}, \quad (4.16)$$

де $P_{дв}$ – потужність на валі занурного двигуна електробура.

Із виразу (4.16) бачимо, що на виході суматора 7 напруга пропорційна потужності на валі занурного двигуна з урахування втрат в струмовідводі і в електродвигуні. Тоді момент на валу двигуна можна визначити з виразу:

$$M = \frac{974 \cdot P_{дв}}{n} = k_6 P_{дв}, \quad (4.17)$$

де $k_6 = 974/n$.

У режимі неробочого ходу момент на валу електродвигуна дорівнює нулю, хоча він і споживає деяку потужність із мережі. Для компенсації напруги, що відповідає потужності неробочого ходу електродвигуна, служить компенсатор.

Під час навантаження на вал двигуна вхідна напруга компенсатора $U_{вх}$ дорівнює

$$U_{вх} = K [P_{вим.н} - (P_{сп.н} + P_{дв.н})], \quad (4.18)$$

тобто пропорційна поточному значенню потужності.

Для визначення моменту на валі електродвигуна необхідно з напруги, що пропорційна поточному значенню потужності, відняти напругу, пропорційну потужності неробочого ходу двигуна. При цьому момент на валі двигуна пропорційний цій різниці за постійної швидкості занурного двигуна

$$M = \gamma (P_{вим.н} - P_{вим.нх}) - [(P_{сп.н} + P_{дв.нх}) - (P_{сп.нх} + P_{дв.нх})] = \gamma P_{вим}, \quad (4.19)$$

де γ – коефіцієнт пропорційності.

Оскільки розроблений пристрій має автоматичну компенсацію втрат у струмовідводі і в електродвигуні, напруга на виході компенсатора, пропорційна приросту вимірної потужності $\Delta P_{вим}$, що дорівнює потужності на валу двигуна, пропорційна крутному моменту занурного електродвигуна.

У зв'язку з тим, що існуючі пристрої (давачі) частоти обертання занурного двигуна [80, 81], що використовують особливо під час буріння глибоких

свердловин (більше 3000 м), запропоновано пристрій, що має підвищену надійність, яка забезпечується шляхом вимірювання цього показника за допомогою наземних перетворювачів потужності і крутного моменту, без тахогенератора і пристроїв введення. Ці перетворювачі під'єднані до системи електроспоживання занурного електродвигуна. Блок-схема цього пристрою подана на рис. 4.5.

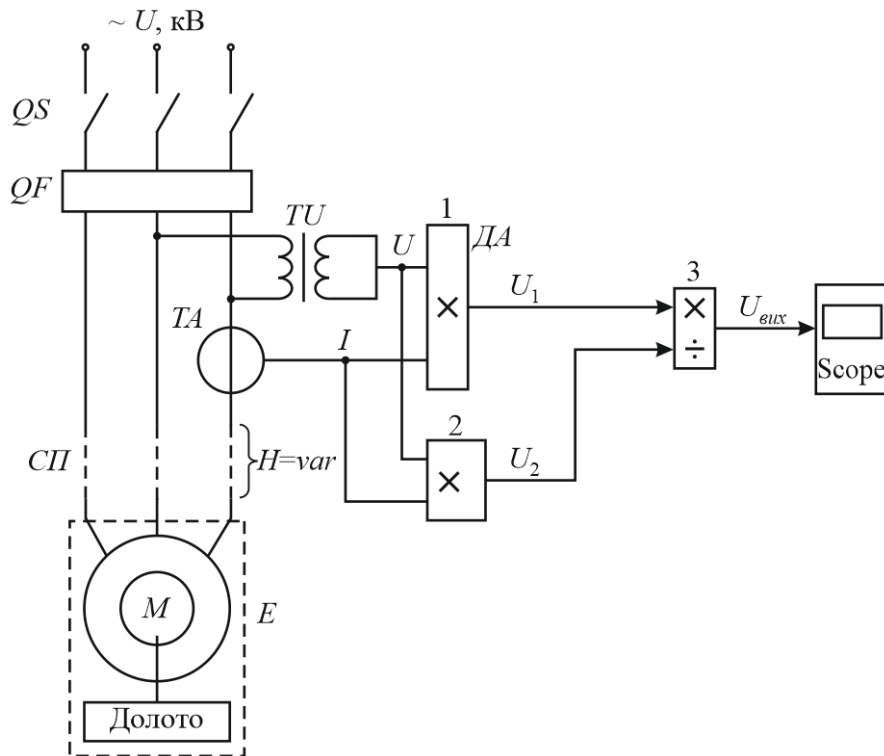


Рис. 4.5. Блок-схема пристрою для вимірювання частоти обертання валу двигуна електробура

Пристрій містить перетворювач 1 активної потужності, перетворювач 2 моменту, подільвач 3 і вимірювальний пристрій 4. Напруга U_1 на виході перетворювача 1 активної потужності пропорційна вимірній потужності $P_{вим}$ $U_1 = k_1 UI \cos \phi$, тобто $U_1 = k_1 P$. Напруга U_2 на виході перетворювача 2 пропорційна крутному моменту на валі занурного електродвигуна

$$U_2 = K_2 M, \quad (4.20)$$

де K_2 – коефіцієнт пропорційності.

З виходів перетворювачів 1 і 2 сигнали надходять на входи подільвача 3, в якому напруга U_1 ділиться на напругу U_2 . Оскільки потужність двигуна пов'язана

з моментом на валі виразом (4.17), то на виході подільовача 3 отримана напруга $U_{вих}$, що пропорційна швидкості обертання n занурного електродвигуна

$$U_{вих} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{K_1 P}{K_2 M} = K_3 n. \quad (4.21)$$

Напруга надходить $U_{вих}$ на вхід наземного реєструвального вимірювального пристрою 4. Розроблений пристрій може бути використаний не тільки для вимірювання частоти обертання занурних двигунів електробурів, але й для вимірювання цього показника електронасосів у нафтогазовидобувній галузі промисловості. Запропонований пристрій (рис. 4.5) дозволяє також підвищити точність вимірювання крутного моменту на валі занурного електродвигуна.

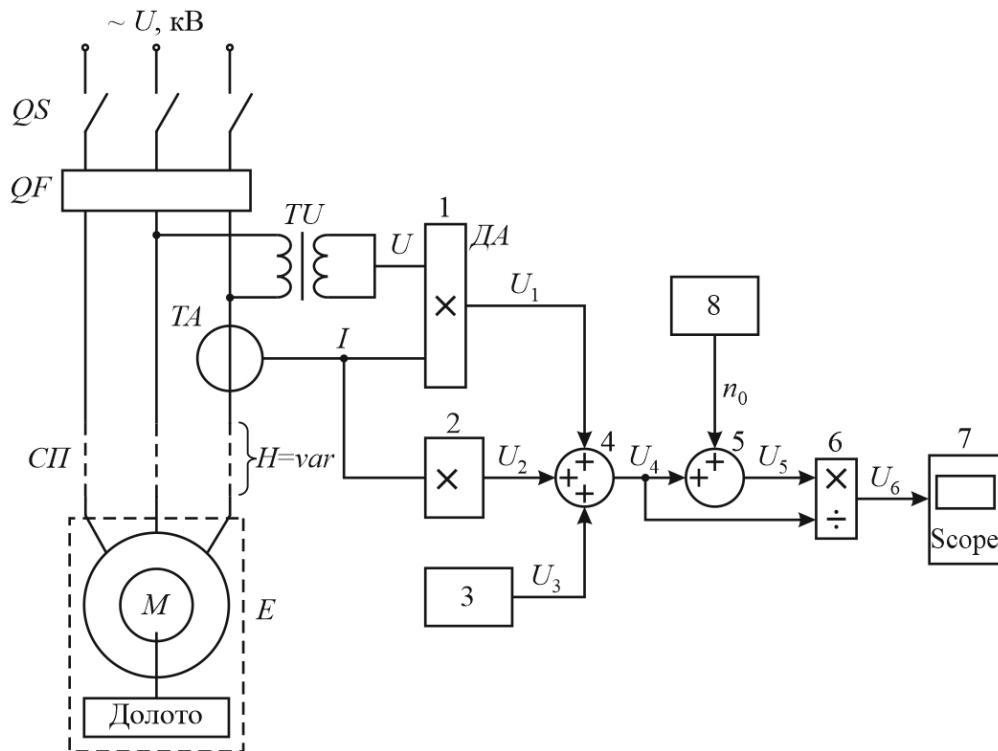


Рис. 4.6. Блок-схема пристрою для вимірювання крутного моменту на валі електробура

На рис. 4.6 наведено блок-схему вдосконаленого пристрою для вимірювання крутного моменту. Він містить давач 1 активної потужності, корегувальний ланцюжок 2, компенсатор 3, суматори 4 і 5, подільовач 6, реєструвальний пристрій 7 і задавач 8 синхронної частоти обертання двигуна. Напруга U_1 на виході давача 1 активної потужності, підключеного до системи електроживлення (на рис. не

показана) занурного електродвигуна, пропорційна потужності, що вимірюється на поверхні $U_1 \equiv P_{вим}$. Сигнал, пропорційний значенню фазового струму, подається на коригувальний ланцюжок 2, вихідне значення напруги U_2 якого пропорційне втратам потужності в струмовідводі ΔP_{cn} і в двигуні $\Delta P_{де}$

$$U_2 \equiv \Delta P_{cn} + \Delta P_{де}. \quad (4.22)$$

В основному суматорі 4 із напруги U_1 віднімається U_2 . У режимі неробочого ходу крутний момент занурного електродвигуна дорівнює нулю, хоча він і споживає певну потужність із мережі. Для компенсації сигналу, що відповідає потужності неробочого ходу електродвигуна, слугує компенсатор 3, вхід якого з'єднаний з джерелом електроживлення, а вихід – з основним суматором 4.

Отже, в основному суматорі 4 від сигналу, пропорційного виміряній на поверхні споживаної потужності віднімаються сигнали, пропорційні потужності неробочого ходу занурного електродвигуна (U_3), втратам потужності в струмовідводі і в двигуні. Вихідна напруга основного суматора 4, що пропорційна потужності на валі електродвигуна

$$U_4 = U_1 - U_2 - U_3 = K_1 P_e \equiv P_e, \quad (4.23)$$

подається на вхід суматора 5, на вхід якого подається також сигнал, пропорційний синхронній частоті обертання електродвигуна n_0 від задавача 8, вхід якого з'єднаний з джерелом живлення занурного електродвигуна.

Оскільки у робочій частині механічної характеристики двигуна електробура ковзання S пропорційне потужності на його валу

$$P_e = CS, \quad (4.24)$$

де C – коефіцієнт пропорційності між потужністю і ковзанням двигуна $S = (n_0 - n)/n_0$,

то можна записати, що

$$n = n_0 - n_0 S, \quad (4.25)$$

або

$$n = n_0 - k P_e, \quad (4.26)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

У додатковому суматорі 5 із сигналу, пропорційного синхронній частоті обертання двигуна, віднімається сигнал, пропорційний потужності на валу, тобто реалізується алгоритмом (4.26). Вихідна напруга додаткового суматора 5, що пропорційна поточному значенню частоти обертання n двигуна електробура

$$U_5 = k_2 n, \quad (4.27)$$

подається на вхід подільвача 6. На його другий вхід подається сигнал від основного суматора 4, який пропорційний потужності на валі двигуна. У подільвачі 6 здійснюється операція ділення сигналу, пропорційного потужності на валі U_4 , на сигнал, пропорційний частоті обертання занурного електродвигуна. Вихідна напруга U_6 цього пристрою [80], пропорційна крутному моменту на валі двигуна, що передається долоту з урахуванням похибки, викликані зміною ковзання, подається на вхід реєструвального пристрою 7

$$U_6 = \frac{U_4}{U_5} = \frac{K_1 P_e}{K_2 m} = K_3 M_\partial. \quad (4.28)$$

Використання цього пристрою дозволяє підвищити точність вимірювання крутного моменту на валі двигуна електробура.

Для визначення відносної похибки вимірювання M_e знайдемо потужність $P_1(t)$, яку споживає електробуром від мережі. вона перетворюється в потужність на валі $P_e(t)$ зі значними втратами, тобто [7]:

$$P_e(t) = P_1(t) - \sum \Delta P(t), \quad (4.29)$$

де $\sum \Delta P(t) = \Delta P_{cm}(t) + \Delta P_c(t) + \Delta P_p(t) + \Delta P_{\partial e}(t) + \Delta P_{um}(t) + \Delta P_{cn}(t)$;

$\Delta P_{cm}(t)$ – втрати потужності в обмотці статора електродвигуна;

$\Delta P_c(t)$ – втрати потужності в сталі електродвигуна, викликані гістерезисом і вихровими струмами;

$\Delta P_p(t)$ – втрати потужності в обмотці ротора електродвигуна;

$\Delta P_{\partial e}(t)$ – додаткові втрати потужності в електродвигуні;

$\Delta P_{um}(t)$ – втрати потужності на тертя в підшипниках, шпинделі та ін.;

$\Delta P_{cn}(t)$ – втрати потужності в струмопідвідному кабелі.

Підставляючи значення $P_g(t)$ із (4.29) в рівняння потужності на валі двигуна [7]:

$$P_g(t) = \omega_g(t) \left[M_c(t) + I \frac{d\omega_g}{dt} + \frac{\omega_g^2}{2} \frac{dI}{d\alpha} \right], \quad (4.30)$$

де $\omega_g(t)$ – кутова швидкість валу електродвигуна,

$M_c(t)$ – момент статичного опору на долоті,

I – сумарний момент інерції долота, приведений до валу електродвигуна,

α – кут повороту валу двигуна,

отримаємо вираз для моменту на валі двигуна електробура, тобто на долоті

$$M_{\text{дол}}(t) = \omega_g(t) [P_1(t) - \sum \Delta P(t)]. \quad (4.31)$$

Вираз (4.31) запропоновано використовувати як алгоритм функціонування пристрою для одержання сигналу, пропорційного моменту на долоті, шляхом оброблення потоку енергії, що надходить з електричної мережі до двигуна електробура.

Тоді відносна похибка вимірювання моменту на валі двигуна електробура дорівнюватиме

$$\gamma = \left[\frac{(P - P_0)(1 - S)}{P_0} - 1 \right] \cdot 100 \%, \quad (4.32)$$

де P – потужність, що споживається двигуном;

$P_0 = P_1^* + P^*$ – потужність, виміряна при неробочому ході двигуна;

P_1^* – втрати потужності у струмопідвідному кабелі при холостому ході двигуна;

P^* – потужність, яку споживає двигун за відсутності осьової сили на долото;

S – ковзання двигуна.

За допомогою запропонованого алгоритму і пристрою (рис. 4.6) для вимірювання крутного моменту отримано бази даних про зміни моменту на долоті під час буріння свердловини № 803Д електробуром Е170-8 № 774 долотом 2К190ТЗ № 337 в інтервалі 1858-1863 м в однорідних піщаниках верхньомінілітової підсвіти з постійним осьовим навантаженням на долото 85 кН.

Для знаходження оцінок математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення досліджуваного параметра скористалися програмою MathCad, замінивши M_{dol} на K .

$$\text{Математичне сподівання: } \text{mean}(K) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i = 397,914; \quad m := \text{mean}(K).$$

Дисперсія

$$\text{- зміщена оцінка: } \text{var}(K) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - m)^2 = 2,206 \cdot 10^4;$$

$$\text{- незміщена оцінка: } \text{Var}(K) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - m)^2 = 2,252 \cdot 10^4.$$

Середньоквадратичне відхилення

$$\text{- зміщена оцінка: } \text{stdev}(K) = \sqrt{\text{var}(K)} = 148,516;$$

$$\text{- незміщена оцінка: } \text{Stdev}(K) = \sqrt{\text{Var}(K)} = 150,055.$$

Ці характеристики для кожного конкретного моменту є середніми з множини й визначаються одномірним законом розподілу. Для визначення автокореляційної функції використали програму MathCad. Отримали графік нормованої автокореляційної функції $R_{xx}(m)$ (рис. 4.7).

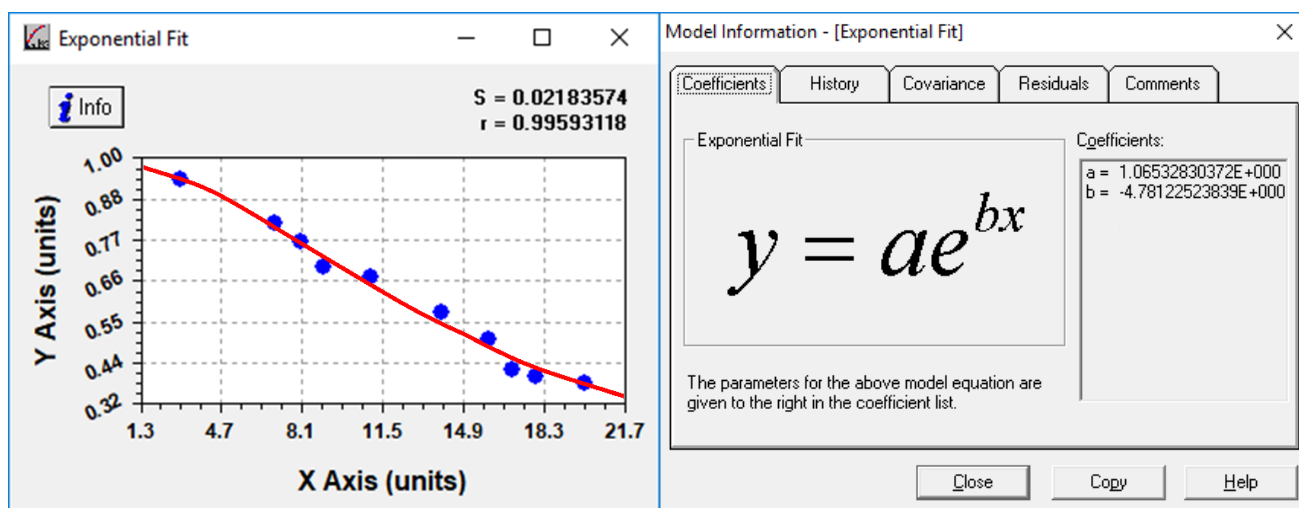


Рис. 4.7. Графік нормованої автокореляційної функції для моменту на долоті при бурінні електробуром

Графік автокореляційної функції підтверджує, що досліджуваний стохастичний процес $M(t)$ є стаціонарним і ергодичним. Відтворили автокореляційну функцію в програмі Curve Expert для підтвердження, що дана функція є найкращою для нашого випадку. Проаналізувавши три рівняння, вибираємо експоненціальне рівняння:

$$R_{xx}(m) = De^{\alpha m}, \quad (4.33)$$

де $D = 1,065$; $\alpha = -4,781$.

Як бачимо, графік повністю відтворює наведену вище автокореляційну функцію з коефіцієнтом кореляції $r = 0,996$ і стандартною похибкою $S = 0,021$.

Відзначимо, що при статистичному аналізі стаціонарних випадкових функцій зручно користуватись спектральною густиною випадкової функції, яка є додатною функцією у всьому діапазоні частот від 0 до ∞ та не містить відомостей про фази окремих гармонійних складових.

Застосовуючи до кореляційної функції $R(\tau) = De^{-\alpha(\tau)}$ перетворення, визначили спектральну щільність за формулою [83]:

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} De^{-\alpha(\tau)} \cos \omega \tau d\tau = \frac{2D\alpha}{\alpha^2 + \omega^2}, \quad (4.34)$$

або

$$S(\omega) = \frac{10,195}{22,87 + \omega^2}.$$

За отриманими даними побудували залежність S від ω , використовуючи програму MathCad.

$$\begin{aligned} rxx_{k-1} &:= Rxx(k) \\ z &:= cfft(rxx) \\ i &:= 0.lenght(z) - 1 \\ S_i &:= |z_i| \\ w_i &:= i \end{aligned}$$

Для рівняння (4.28) графік спектральної щільності зображений на рис. 4.8.

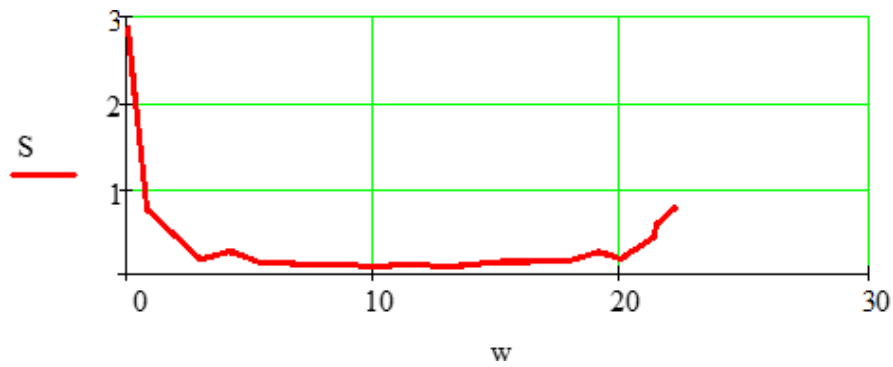


Рис. 4.8. Графік спектральної щільності для моменту на долоті

Отримані результати дають змогу визначити властивості формувального фільтра.

Справді, частотна передавальна функція $W_\phi(j\omega)$ фільтра зв'язана з спектральною густиною $S(\omega)$ формувального сигналу наступним співвідношенням [3]:

$$\{W_\phi(j\omega)\}^2 = S(\omega). \quad (4.35)$$

Для пошуку функції $W_\phi(j\omega)$ необхідно розкласти спектральну густину $S(\omega)$ на спряжені множники $W_\phi(j\omega)$ і $W_\phi(-j\omega)$. З цих двох множників фізично реалізуємо у вигляді фільтра лише перший множник, в якому нулі і полюси (корені чисельника і знаменника) розміщені у верхній півплощині.

Для сигналу з експоненціальною кореляційною функцією (4.33) маємо [83]:

$$S(\omega) = \frac{2D\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} = \frac{\sqrt{2D\alpha}}{\alpha + j\omega} \cdot \frac{\sqrt{2D\alpha}}{\alpha - j\omega}. \quad (4.36)$$

Звідси частотна функція фізично реалізованого фільтра:

$$W_\phi(j\omega) = \frac{\sqrt{2D\alpha}}{\alpha - j\omega}. \quad (4.37)$$

Виведемо графіки для АФХ формувального фільтра за допомогою програми Mathcad.

$$P(w) = \frac{15.269}{22.866 + w^2}; \quad Q(w) := \frac{3.193w}{22.866 + w^2}; \quad w := 0, 0.002..500$$

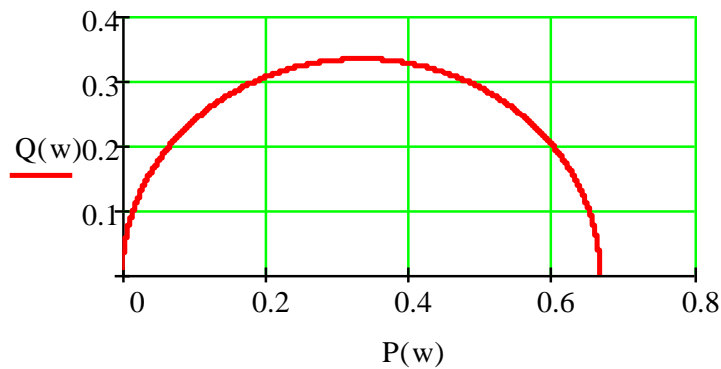


Рис. 4.9. Графік АФХ формувального фільтра для вимірювання величини моменту на долоті

4.3 Удосконалена структура системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами

Розроблено функціональну структуру системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами, яка представлена на рис. 4.10. Вона передбачає статичну оптимізацію процесу поглиблення свердловини на основі поточної інформації даних геолого-технічного наряду, що закладені в локальну базу даних та архівних даних, що містяться в базі даних. При керуванні процесом буріння запропоновано підтримувати такі параметри як осьова сила на долото або активна потужність двигуна електробура. Зміну керованої величини з осьової сили на активну потужність двигуна електробура необхідно здійснювати при переході долота на горизонтальні ділянки свердловини за командою від блока адаптації.

Система обробляє подану поточну інформацію з пульта управління із бази даних та від датчиків ваги колони бурильних труб й активної потужності електробура. Алгоритм керування забезпечує статичну оптимізацію процесу буріння шляхом пошуку оптимальних значень керованих дій згідно з критерієм оптимізації – мінімумом собівартості метра проходки.

Ефективність системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин електробурами забезпечується шляхом пошуку оптимального режиму

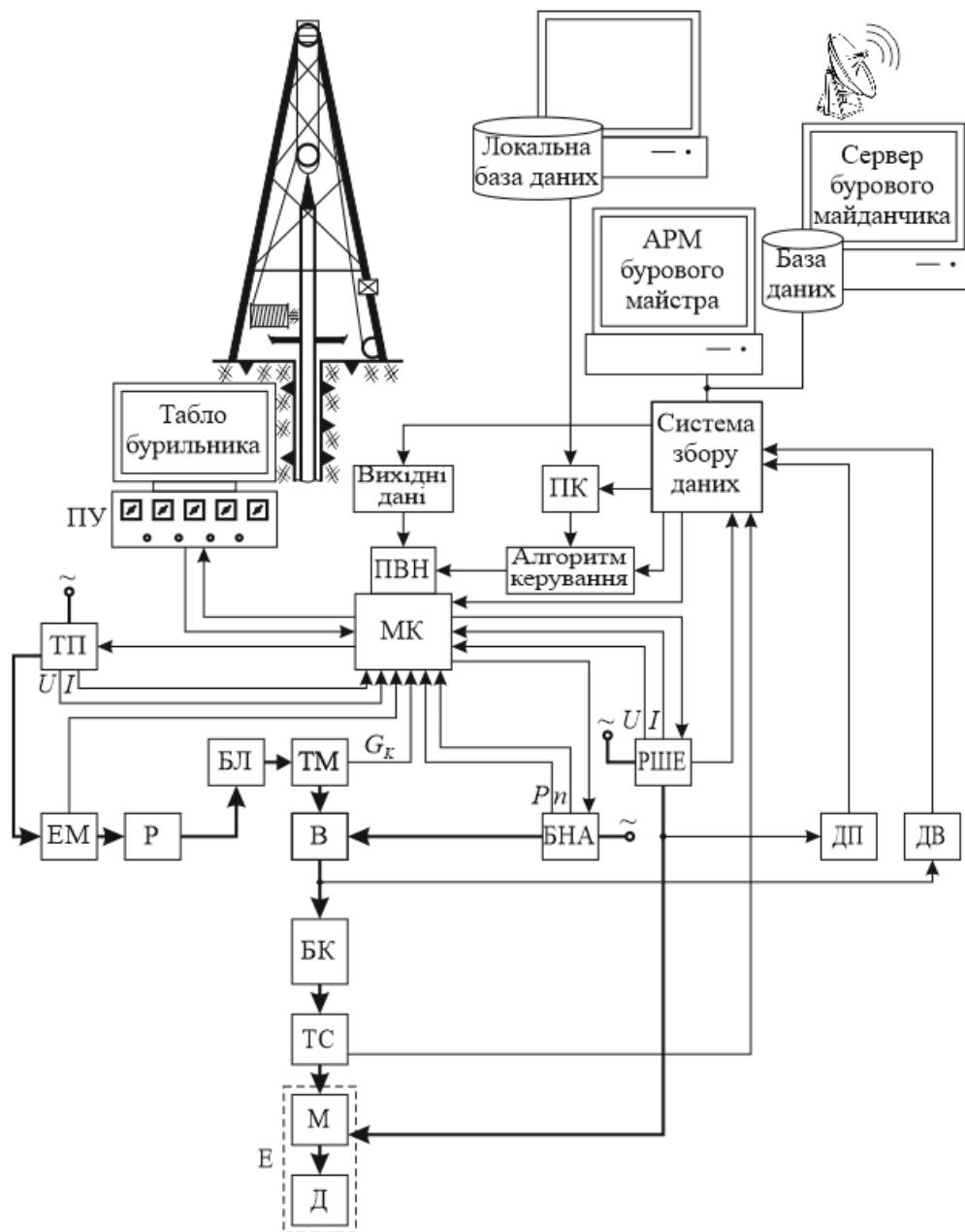


Рис. 4.10. Функціональна структурна система автоматизованого керування процесом буріння свердловин електробурами:

ПУ – пульт управління; МК – мікроконтролер; ПВН – пристрій введення і налаштування; ПК – переносний комп’ютер; ТП – тиристорний перетворювач; Р – редуктор; БЛ – барабан лебідки; ТМ – талевий механізм; В – вертлюг; БК – бурильна колона; ТС – телесистема; М – занурний двигун; Е – електробур; Д – долото; БНА – буровий насосний агрегат; РШЕ – регулятор швидкості електробура; ДВ – давач ваги колони бурильних труб; ДП – давач активної потужності електробура; \rightarrow – енергетичні канали; G_k – вага колони бурильних труб

буріння, а також швидкою перебудовою з одного режиму на інший у зв'язку зі зміненими умовами. З підвищенням якості процесу керування знижуються витрати на буріння свердловини.

Блок-схема оперативних перемикачів для увімкнення електробура з автоматом подачі долота наведена в додатку Д.

Висновки до розділу 4

1. Синтезовано структуру FL-блока адаптації для визначення необхідних керувальних дій на основі бази знань користувача про показники процесу буріння свердловин електробурами. Використання FL-блока адаптації в автоматизованій системі управління процесом буріння дозволяє скоротити час адаптації процесу до змін умов буріння порівняно з тривалістю операцій, що виконує бурильник.

2. Удосконалено пристрої для вимірювання активної потужності занурного двигуна електробура, моменту на його валі, а також моменту на долоті і частоти його обертання, які можуть бути використані для вимірювання крутного моменту і частоти обертання не тільки електробурів, але й занурних електронасосів. У сукупності з давачем механічної швидкості буріння може бути отримана інформація про міцність розбурюваних порід, про зношення опор і озброєння долота, зони з аномальними пластовими тисками та інша інформація.

3. Запропоновано удосконалену структуру системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами, яку можна використовувати для буріння нафтових і газових свердловин, а також на сланцевий газ. Розроблено функціональну структурну систему для керування процесом буріння свердловини, за допомогою якої оптимізується вибір режиму буріння та покращується процес керування бурінням.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведені теоретичне узагальнення і нове вирішення важливої наукової практичної задачі в галузі автоматизації процесів керування, яка полягає у розробленні способу і системи із змінною структурою для адаптивного управління процесом буріння свердловин електробурами.

На основі проведених досліджень сформульовано та обґрунтовано такі наукові висновки:

1. За результатами аналізу сформульовано загальну постановку задачі адаптивного управління процесом буріння свердловин електробурами із змінною структурою системи, яка, на відміну від відомих, формалізована, виходячи із специфіки задач автоматизації процесів керування з урахуванням апріорної та поточної невизначеності об'єкта керування щодо його параметрів і структури. Це дало змогу запропонувати узагальнену функціональну структуру системи автоматизованого керування бурінням свердловин електробурами, сформулювати математичну модель об'єкта керування та визначити сумісні механічні характеристики електробура разом з механічними характеристиками долота і двигуна.

2. На основі реалізації процедури послідовного *R/S*-аналізу проаналізовано фрактальні розмірності і показники Херста для таких параметрів та показників процесу буріння свердловини як: осьове навантаження на долото; струм навантаження двигуна електробура; потужність, яку споживає двигун електробура; механічна швидкість буріння; час, витрачений на буріння 1 м свердловини; питомі витрати енергії. Це дозволило зробити висновок, що досліджувані часові ряди є персистентними і процесу буріння властива трендовість. Це явище запропоновано використати для вирішення завдань прогнозування і раннього виявлення відхилень технологічного процесу від норми в реальному часі та вирішення питань автоматизованого управління.

3. За допомогою алгоритму Фаррара-Глобера встановлено зв'язок між досліджуваними параметрами процесу буріння в різні моменти часу, що

дозволило запропоновувати використовувати для автоматичного керування процесом буріння електробурами один із досліджуваних параметрів – струм навантаження двигуна електробура або потужність, яку споживає електробур. Оскільки між досліджуваними змінними існує високий ступінь мультиколінеарності, то усунути її можна шляхом відкидання однієї змінної з високою кореляцією і виключення її із математичної моделі. Для цього достатньо порівняти отримані функції передачі $W_{FI}(s)$ та $W_{FP}(s)$ і вибрати оптимальну.

4. На засадах методів Fuzzy Logic і діаграм Вейча розроблено правила зміни структури блока адаптації, за яких автоматизована система управління набуває властивості пристосовуватися до мінливості параметрів та характеристик електробура і навколишнього середовища, що дозволило отримати характеристичне поле та синтезувати структурні схеми блока адаптації на елементах базису I, АБО, НІ.

5. Отримано рівняння, що визначає рівні коригувальних сигналів додатних зворотних зв'язків за частотою обертання долота і глибиною свердловини, яке необхідно ввести в систему автоматичного регулювання потужності, яку споживає двигун електробура. Це дало змогу синтезувати структуру адаптивної системи керування процесом буріння свердловин електробурами з урахуванням інформації про орієнтування бурового інструменту.

6. На основі аналізу стійкості і показників якості системи автоматичного регулювання процесом буріння глибоких свердловин електробурами, яка має змінну структуру, доведено, що найбільш раціональною є структура, яка забезпечує автоматичну стабілізацію активної потужності двигуна електробура. Система у цьому випадку є робастною за показниками запасу стійкості і коливальності. Виходячи із специфіки задач автоматичного регулювання режимів буріння нафтових і газових свердловин з урахуванням стохастично-хаотичних властивостей процесу, що розвивається у часі, досліджено показники якості системи автоматичного регулювання осьового навантаження на долото і потужності на валі двигуна електробура. Це дало змогу зробити висновок про доцільність із збільшенням глибини свердловини переходу на автоматичне

регулювання потужності на валі двигуна електробура, замість регулювання осьового навантаження на долото та забезпечити надійний підбір оптимального сполучення параметрів режиму буріння навіть в умовах, коли змінюється геосередовище. Запропоновано удосконалену структуру системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами і синтезовано структуру FL-блока адаптації для визначення необхідних керувальних дій на основі бази знань користувача про параметри процесу буріння, що дозволяє скоротити час адаптації процесу до змін умов буріння порівняно з тривалістю операцій, які виконує бурильник, а також і надійність виконання проектного профілю похило-скерованих свердловин.

Отримані результати прийняті до впровадження Стрийським ВБР, Прикарпатським УБР, на підприємствах ТзОВ «МІКРОЛ» та ТзОВ СКБЗА, а також застосовані у навчальному процесі кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, що підтверджено відповідними актами впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80/para6#n6>.
2. Холявко М. П. Нафтогазовий комплекс України. Напрями реалізації основних положень енергетичної стратегії до 2030 року. *Хімічна промисловість України*. 2007. № 2. С. 3-10.
3. Бунчак З. Дудар О., Кекот О., Турянський О. Електробур. Парадокси і реальність. *Електроінформ*. 2003. № 4. С. 8-11.
4. Dr. William C. Maurer. Electro drilling, Joint Stock Company «Plant Potencial». Kharkov, Ukraine, 2017. URL: <http://www.maurerengineering.com/wp-content/uploads/2015/12/ELECTRODRILLING-COILED-TUBING-Rev12102015.pdf>.
5. Діхтяренко К. В., Червінський В. П. Перспектива відродження електробуріння. *Нафта і газ України* : матеріали 9-ої Міжнар. наук.-практ. конф., Яремча, 4-6 вересня 2013 р. Львів : Центр Європи, 2013. С. 59-60.
6. Семенцов Г. Н., Когуч Я. Р., Куровець Я. В., Дранчук М. М. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій та газовій промисловості : навч. посібник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. 300 с.
7. Фоменко Ф. Н. Бурение скважин электробуром. Москва : Недра, 1974. 272 с.
8. Эфендизаде А. А. Частотное управление электробуром. Баку : Азернешр, 1969. 261 с.
9. ДСТУ 3258-95. Електробури. Загальні технічні умови. Київ : Держстандарт України, 1997. 25 с.
10. Семенцова А. О. Энергетические показатели и повышение эффективности использования погружного электропривода при бурении скважин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.09.03. Свердловск, 1984. 19 с.

11. Балденко Ф. Д., Шмидт А. П. Автоматизированные системы управления режимом бурения скважин забойными двигателями. *Бурение и нефть*. 2003. № 4. С. 14-17.

12. Шмидт А. П., Балденко Ф. Д., Шмидт Н. А. Перспективы применения автоматизированной системы управления режимом бурения в установках с непрерывной колонной гибких труб (coiled tubing). *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2003. № 12. С. 7-8.

13. Reinsvold Ch. H. Portable computer programs help drilling optimization. *Drilling*. 1984. Vol. 45, No 6. P. 64-65.

14. Holster I. L., Kipp R. I. Effect of bit hydraulic horsepower on the drilling rate of a polycrystalline diamond compact bit. *Petroleum Technology*. 1984. Vol. 36, No 13. P. 2110-2118.

15. Семенцова А. О. Особливості статичних характеристик сучасних електробурів. *Нафтогазова енергетика*. 2013. № 2. С. 109-116.

16. Электробуры. Руководство по эксплуатации. А03П.610106.001РЭ. Харьков : ОАО завод «Потенциал», 2002. 70 с.

17. Чернов О. С., Ожоган В. А., Семенцова А. О. Автоматизований електропривід в нафтогазовій промисловості : навч. посіб. Івано-Франківськ : Факел, 1998. 148 с.

18. Gaddy Dean E. Russia shares technical know-how with U.S. *Oil & Gas Journal*, 1999 March 8. 1999. Vol. 97, No 10.

19. Семенцов Г. Н., Кукурудз С. Ф., Турянський Я. Р. Телемеханізація видобутку нафти. Ужгород : Карпати, 1979. 60 с.

20. Семенцов Г. Н., Гутак О. В., Головата Ю. Б., Копистинський Л. О. Новітній підхід до побудови систем керування нового покоління з принципово іншими показниками якості. *Нафта і газ України* : 9-а Міжн. наук.-практ. конф. Яремче, 2013. С. 116-117.

21. Горбійчук М. І., Семенцов Г. Н. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин. Івано-Франківськ : Факел, 2003. 493 с.

22. Семенцов Г. Н. Оптимальное управление процессом бурения нефтяных и газовых скважин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.13.07. Москва : Московский институт нефти и газа им. И. М. Губкина, 1990. 44 с.
23. Pirovolou D. Drilling Automation: An Automatic Trajectory-Control System. *JPT*. December 2011. P. 84-87. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/1211-0084-JPT>.
24. Elmgerbi A., Thonhauser G., Prohaska M., Nascimento A., Roohi A. Application of Computer Programming to Estimate Volumetric Change of an Active Drilling Fluid System Cause by Elastic Deformation of an Open Borehole Section Wall. *Global Journal of Computer Science and Technology*. Vol. 16, Issue 3, Version 1. 2016. P. 15–30. URL: <http://www.researchgate.net/publication/310604690>.
25. Инструкция по технологии бурения электробурами нефтяных и газовых скважин. Москва : ВНИИБТ, 1974. 100 с.
26. Айзуппе Э. А. Аппаратура для косвенных методов контроля момента и мощности механизмов при бурении и добыче. Москва : ОНТИ ВНИИОЭНГ, 1976. 52 с.
27. Айзуппе Э. А., Бражников В. А. Устройство УКМ-3 для контроля крутящего момента электробура. *Сер. Машины и нефтяное оборудование*. Москва : РНТС. ВНИИОЭНГ, 1975. № 9. С. 7-11.
28. Любарский А. П. Аппаратура контроля крутящего момента механизмов в бурении. Обзоры зарубежной литературы. Москва: ВНИИОЭНГ. 1974. 54 с.
29. Вольгемут Э. А., Кепке И. П., Эскин М. Г. Результаты промышленных испытаний автоматического регулятора подачи долота АВТ-2 для электробурения. *Сер. Машины и нефтяное оборудование*. Москва : РНТС, 1974. № 3. С. 18-26.
30. Бестелесный А. Г., Семенцова А. А., Горбийчук М. И. и др. Исследование режимов бурения при автоматической стабилизации мощности, потребляемой двигателем электробура. В кн.: *Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР. Сер. Угольная и горнорудная промышленность, вып. 9*. Киев : Высшая школа, 1975. С. 110-111.

31. Mingxin H., Yu W., Mingshuai G., Liguang W. Development of Downhole Motor Drilling Test Platform. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 73. P. 71-77.
32. Lyons K. D., Honeygan S., Mroz T. NETL Extreme Drilling Laboratory Studies High Pressure High Temperature Drilling Phenomena. *Journal of Energy Resources Technology*. 2008. Vol. 130, Issue 4, No 043102. P. 1-4.
33. Green S. Full-scale Deep Well Drilling Simulation. *Petroleum Drilling Technologies*. 2011. Vol. 39, No 3. P. 1-5.
34. Black D. A., Green S. J., Rogeres L. A. Full-scale Laboratory Drilling Tests on Sandstone and Dolomite. *United States Department of Energy Technical Information Center*. 1977. EY-76-C-02-4098. 170 p.
35. Proehl T., Sabins F. Drilling and Completion Gaps for HPHT Wells in Deep Water. *Deep Star Project CTR 7501*. 2006. 1435-01-04 CT37258. P. 5-8.
36. Lian W. F., Kai L. H. Research on downhole motor drilling test platform. *West China Exploration Engineering*. 1992. Vol. 4, No 4. P. 33-39.
37. Han J. Petroleum Institution. 5000N.M downhole motor drilling test platform. *Petroleum Machine*. 1994. Vol. 22, No 2. P. 32-36.
38. Qinang Z., Ding F., Fa Z. H. Computer system for testing and controlling the performance of downhole drill motors. *CPM*. 1996. Vol. 24, No 10. P. 24-27.
39. Gui L. H., Qiang Z., Ling Z. X., Long T. F. Computers applied in the downhole motor drilling test platform. *Computer Application and Research*. 1998. No 1. P. 10-11.
40. Jun B. L., Min T. G., Hao L. Test stand for screw drill motors. *CPM*. 1999. Vol. 27, No 12. P. 12-13.
41. Zheng P. H., Ting Z. Y., Ping T. J. Test platform design of screw drill motors. *Oil Field Equipment*. 2000. Vol. 29, No 3. P. 37-38.
42. Fang K. G., Dong L. S., Xin R. L. A new self-centering test table for screw drill. *CPM*. 2003. Vol. 31, No 3. P. 4-5.
43. Sen Z., Hua L. Y., Yu J. M. Design of the data acquisition system on downhole motors test table. *Shan Dong Equipment Design and Manufactory*. 2005. No 1. P. 22-24.

44. Qiang Z., Qian L. M., Chun C. Z. Development and application of test bed for large torque screw drill. *CPM*. 2007. Vol. 35, No 7. P. 31-34.
45. Jun G. X., Xin Z. G., Hui C. C. An analysis of test equipment design for the downhole tool. *Oil Field Equipment*. 2007. Vol. 36, No 8. P. 87-90.
46. Yang W. C., Qing H. J., Ming L. T. Research on performance test of screw drill. *Drilling and Production*. 2010. Vol. 33, No 1. P. 73-75.
47. Yun W., Ping Y. N., Guo W. J., Pu W. Development construction of screw drill detection device in coal min. *Coal Mine Machinery*. 2012. Vol. 33, No 10. P. 140-142.
48. Ce Z., Du W. X. M150 simulation wellbore. *Drilling Engineering*. 1993. No 3. P. 16.
49. Zhong C. Z., Qian L. H., Hua Y. X. Study on simulated wellbore for deep drilling. *Drilling Engineering*. 1994. No 5. P. 52-56.
50. De W. S., Lin Z. A. The principle of a full-scale integrated analogue drilling test device and the structural analysis of the mast. *Journal of Da Qing petroleum institute*. 1994. Vol. 18, No 2. P. 53-59.
51. Lu J. W., Dong K. X., Jie D. C., Da H. Y. The multiple simulating test installation of the full-scale well drilling of PC controlled. *Journal of Northeast Heavy Machinery Institute*. 1997. Vol. 21, No 1. P. 35-39.
52. Schütz A. Black gold and extreme motors. *Application note : Instrumentation & Inspection*. January 10, 2012. 3 p. URL: https://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8802982592542/FB_Tiefenbohrungen_en.pdf?mime=application/pdf.
53. Назаренко М. В. Теоретичні засади та принципи побудови моделей динамічних процесів та їх регуляторів : монографія. Кривий Ріг : Діоніс (ФОП Чернявський Д. О), 2010. 204 с.
54. Семенцов Г. Н., Горбійчук М. І. Концепція адаптивного керування процесом буріння глибоких свердловин на нафту і газ. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 1997. № 34 (том 6). С. 3-12.

55. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. Санкт-Петербург : Наука, 2003. 282 с.

56. Беляев Ю. Б., Демченко В. А. Возможности мехатроники. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами* : прогр. і матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 26-27 листопада 2009 р. Київ : НУХТ, 2009. С. 14-15.

57. Фадеева И. Г. Системно-синергичні засади управління розвитком нафтогазових підприємств корпоративної структури : монографія. Івано-Франківськ, 2012. 459 с.

58. Семенцов Г. Н., Горбийчук М. И. Одна задача оптимального управления процессом углубления скважин. *Изв. вузов. Горный журнал*. 1976. № 8. С. 81-87.

59. Sementzov G. N., Gorbyichuk M. I. Optimization Control of the Drillinds Hole Process. *Доклады международной конференции ICA MC-95*. Гливище, Польша, 1995. 2 с.

60. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Москва : Недра, 1988. 320 с.

61. Волосов В. В., Тютюнник Л. И. Разработка и исследование робастных алгоритмов гарантированного эллипсоидного оценивания состояния многомерных динамических систем. *Проблемы управления и информатики*. 1997. № 4, ч. I. С. 31-42. № 6, ч. II. С. 52-65.

62. Семенцов Г. Н., Горбийчук М. И., Тельшева Т. А. Оптимальное управление процессом бурения скважин. *Автоматизация и механизация нефтяной промышленности*. 1961. № 7. С. 6-9.

63. Семенцов Г. Н., Кукурудз С. Ф., Горбийчук М. И. Самонастраивающаяся система регулирования процесса бурения глубоких скважин электробуром. *Энергетика и электрооборудование установок нефтяной и газовой промышленности*. Москва : ВНИИОЭНТ, 1972. С. 47-51.

64. Салихов Я. Р. Информационное обеспечение процесса бурения нефтяных и газовых скважин. *Студенческий научный форум* : IX Международная студ. научн. конф. 2017. URL: <https://www.scienceforum.ru/2017/2469/34139>.

65. Лукьянов Э. Е., Стрельченко В. В. Геолого-технологические исследования в процессе бурения. Москва : Нефть и газ, 1997. 697 с.
66. Заикин И. П., Сарычев Г. И., Горшенин В. И. Актуальность и перспективы использования информационных технологий для контроля и управления процессами строительства скважин в ОАО «НК «Роснефть». *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*. 2006. № 2. С. 15-19.
67. Чекалин Л. М., Моисеенко А. С., Шакиров А. Ф. и др. Геолого-технологические исследования скважин. Москва : Недра, 1993. 240 с.
68. Дамаскин М. М., Нестерова Т. Н. Использование информационной системы «Удаленный мониторинг бурения» в нефтяных компаниях. *Бурение и нефть*. 2004, Июль-август. С. 24-26.
69. Нестерова Т. Н., Ракичинский В. Н. Концепция информационной системы сопровождения строительства скважин для нефтегазодобывающей компании. *Каротажник*. 2005. № 5-6. С. 51-60.
70. Нестерова Т. Н., Кузнецов Ю. А., Макаров А. А. Удаленный управляемый мониторинг бурения как элемент информационной системы «Сопровождение строительства скважин». *Каротажник*. 2005. № 5-6. С. 61-65.
71. Семенцов Г. Н. Адаптивное управление процессом бурения нефтяных и газовых скважин. *Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений*. Львів, 1990. С. 24-28.
72. Семенцов Г. Н., Горбійчук М. І. Оптимальне адаптивне керування процесом буріння свердловин. *Нафтова і газова промисловість*. 2002. № 3. С. 46-49.
73. Горбійчук М. І. Адаптивне керування процесом буріння глибоких свердловин : автореферат дис. на здобут. наук. ступ. док. техн. наук : 05.13.07. Львів, 1999. 29 с.
74. Вольгемут Э. А., Исяченко В. Х., Котляр О. М., Эскин М. Г. Устройства подачи долота для бурения нефтяных и газовых скважин. Москва : Недра, 1969. 204 с.

75. Петров И. П., Семенцов Г. Н. Датчик удельного расхода электроэнергии результаты его испытаний. *Изв. вузов Горный журнал*. 1965. № 3.

76. Семенцов Г. Н., Кукурудз С. Ф., Петров И. П., Ситников М. Б. Автоматизация буровых установок. Ужгород : Карпати, 1973. 70 с.

77. Семенцов Г. Н., Локотош Б. Н., Кукурудз С. Ф., Дитчук В. М., Думин И. И. Автоматизация и средства контроля при бурение скважин. Ужгород : Карпати, 1975. 134 с.

78. Семенцов Г. Н., Дитчук В. М., Бестелесный А. Г. Стабилизация мощности электробура при бурение глубоких скважин. *Машины и нефтяное оборудование*. 1973. № 5. С. 36-40.

79. Семенцов Г. Н., Дитчук В. М., Семенцова А. А., Турянский О. А. Стабилизация мощности двигателя электробура при бурение глубоких скважин. *РНТС Машины и нефтяное оборудование*. Москва : ВНИИОЭНГ, 1973. № 5. С. 30-32.

80. АС 584248. Устройство для измерения скорости вращения погружного электродвигателя. А. О. Семенцова, Г. Н. Семенцов. № 2335198/18-10; заявл. 15.03.76; опубл. 15.12.77, Бюл. № 46. 2 с.

81. Семенцова А. А., Бестелесный А. Г. Частотное регулирование скорости вращения двигателя электробура. *Измерение, контроль, автоматизация нефтяной и газовой промышленности*. Киев : Техника, 1974. С. 109-113.

82. Эскин М. Г. Автоматическое управление забойными двигателями для бурение нефтяных и газовых скважин : автореф. дис. док. техн. наук. Москва, 1972. 51 с.

83. Лукас В. А. Теория автоматического управления : учеб. для ВУЗов. Москва : Недра, 1990. 416 с.

84. Гафиятуллин Р. Х., Дегтярев В. А., Коротный О. Л. Некоторые результаты исследование и использование автомата подачи долота для станков геологоразведочного бурение. *Автоматика и телемеханика*. 1977. № 3. С. 163-171.

85. Семенцов Г. Н., Горбийчук М. И. Алгоритм расчёта оптимального режима процесса углубления скважин и результаты их промысловых испытани. *Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности*. 1981. № 2. С. 3-6.
86. Волгин В. В., Каримов Р. Н. Оценка корреляционных функций в промышленных системах управления. Москва : Энергия, 1979. 80 с.
87. Мокін Б. І. Експоненціальний метод визначення динамічних характеристик технологічних об'єктів. *Автоматика*. 1971. № 2. С. 30-37.
88. Гутак О. В., Головата Ю. Б., Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Сучасний підхід до побудови систем оптимального керування технологічними комплексами у нафтогазовій галузі промисловості. *Нафтогазова енергетика* 2(20). Івано-Франківськ, 2013. С. 117-127. ISSN 1993-9868.
89. Семенцова А. О., Плитус А. В., Копистинський Л. О., Гутак О. В. Результати аналізу статистичних характеристик моменту на долоті при бурінні свердловин електробурами. *Dny vědy – 2013 : Materiály IX Mezinárodní vědecko - praktická konference*. Praha, 2013. С. 61-69.
90. Копистинський Л. О. Управління процесом буріння з інтелектуальною підтримкою процесів прийняття рішень. *Автоматика – 2017 : XXIV Міжнародна конф. з автоматичного управління*, 13-16 вересня 2017. Київ, 2017. С. 155-156.
91. Гутак О. В., Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Адаптація математичної моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами в реальному часі. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2016 : III Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів*, 20-21 квітня 2016. Київ, 2016. С. 36-37.
92. Семенцов Г. Н., Гутак О. В. Моделювання та ідентифікація процесу буріння для задач оптимізації управління : монографія. Одеса : Купрієнко С. В., 2014. 295 с.
93. Семенцов Г. Н., Когуч Я. Р. Автоматизований контроль меж пластів гірських порід в процесі буріння свердловин на нафту і газ. Київ : НАЦ ДК «Укртрансгаз», 1998. 174 с.

94. Lucas I. M., Ronald R. B. Fast Initial Response for Cusum Quality-Control Schemes: Give Your Cusum a Head Start James. *Technometrics*. 1982 Aug. Vol. 24, No 3. P. 199-205.
95. Vaschin E. On the analysis and desing of cusum-shewhart control schemes. *IBM Journal Res Develop*. 1985. Vol. 29, No 4. P. 377-391.
96. Khan R. A. A note on Page's two-sided cumulative sum procedures. *Biometrika*. 1981. Vol. 68. P. 717-719.
97. Клигине Н., Телькснис Л. Методы обнаружения моментов изменения свойств случайных процессов. *Автоматика и телемеханика*. 1983. № 10. С. 5-56.
98. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. Москва : Наука, 1983. 199 с.
99. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств случайных величин (независимые наблюдения, скалярный параметр). *Измерения, контроль, автоматизация*. 1988. № 2(66). С. 21- 30.
100. Kempf R., J. Adamy Regularity and chaos in recurrent fuzzy systems. *Fuzzy Sets and Systems*. 2003. Vol. 140. P. 259-284.
101. Бодянский Е. В., Плисс И. П., Чапланов А. П. Динамическая реконструкция хаотических сигналов на основе нейросетевых технологий. *Радиоэлектроника и информатика*. 2002. № 3(20). С. 62-64.
102. Семенцов Г. Н. Оптимальное управление процессом бурения нефтяных и газовых скважин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.13.07. Москва, 1990. 44 с.
103. Копистинський Л. О. Синтез структури цифрового логічного пристрою для підтримання процесів прийняття рішень у системі адаптивного управління бурінням свердловин електробурами. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. Івано-Франківськ. 2017. № 4(65). С. 55-58. ISSN 1993-9973.
104. Воронов А. А. Теория автоматического управления. Часть II. Москва : Высшая школа, 1986. 504 с.
105. Прихно В. И. Оптимальное и адаптивное управление электроприводами. Л.: ЛПИ, 1988. 92 с.

106. Куропаткин П. В. Оптимальные и адаптивные системы. Москва : Высшая школа. 1980. 287 с.

107. Сейда Ю. П., Уайт Ч. С. Оптимальное управление системами. Москва : Радио и связь, 1982. 392 с.

108. Чураков Е. П. Оптимальные и адаптивные системы. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 256 с.

109. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводам. Ленинград : Энергоиздат, 1982. 392 с.

110. Борцов Ю. А., Поляков Н. Д., Путов В. В. Электро-механические системы с адаптивным и модальным управлением. Ленинград : Энергоатомиздат, 1984. 216 с.

111. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. Москва : Наука, 1981. 448 с.

112. Фадеева І. Г. Комбінована модель спостереження за собівартістю метра проходки свердловин на нафту і газ. *Соціально-економічні дослідження в перехідний період. Проблеми управління інноваційною діяльністю*. Випуск 4 (XXXV)/НАН України Інститут регіональних досліджень. Львів, 2002. С. 166-174.

113. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Показники якості автоматичних систем регулювання режимів буріння нафтових і газових свердловин електробурами. *Naukowa mysl informacyjnej powieki*. Przemysł, 2014. С. 21-28.

114. Копистинський Л. О. Метод трансформації автоматизованої системи управління процесом буріння свердловин як стохастично-хаотичним об'єктом, що розвивається в часі. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : 3-я Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 10-13 жовтня 2017. Івано-Франківськ, 2017. С. 10-13.

115. Демихов В. И., Леонов А. И. Контрольно-измерительные приборы при бурение скважин. Москва : Недра, 1980. 304 с.

116. Абизбаев Б. Й., Байдюк Б. В. Электробур обеспечивает получение достаточной забойной информации для эффективного управления процессом

бурение. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. Москва : ВНИИОЭНГ, 1996. № 10. С. 7-12.

117. Байдюк Б. В., Яремійчук Р. С. Ще раз про перспективи створення в Україні технології буріння свердловин, конкурентоспроможної на світовому ринку. *Нафта і газ України–2000* : збірник наук. праць; матеріали 6-ої міжнар. наук-практич. конф. Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада 2000. Т. 2. С. 11-13.

118. Семенцова А. О., Копистинський Л. О. Методи і прилади контролю енергетичних параметрів ефективності буріння свердловин електробурами. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 2(35). С. 181-188. ISSN 1993-9965.

119. Копистинський Л. О., Кропивницька В. Б. Керування процесом буріння свердловин на засадах енергоінформаційного підходу. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2017* : III Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 19-20 квітня 2017. Київ, 2017. С. 23-24.

120. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Пристрій для контролю потужності на валі двигуна електробура. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: 5-а наук.-практ. конф. студентів і молодих учених*. Івано-Франківськ, 2015. С. 100-102.

121. Козловский Е. А., Борисович В. Т., Комаров М. А. Современные методы и технические средства оптимизации разведочного бурения. *Итоги науки и техники. Техника геологоразведочных работ*. Москва : ВИНТИ, 1975. Т. 9. С. 68-69.

122. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечётная логика и искусственные нейронные сети. Москва : Физматлит, 2001. 380 с.

123. Саати Т. А. Взаимодействие в технических системах. *Техническая кибернетика*. 1979. № 1. С. 18-84.

124. Скофенко А. В. О построении функций принадлежности нечетких множеств, соответствующих количественным экспертным оценкам. *Науковедение и информатика*. Київ : Наукова думка, 1981. Вып. 22. С. 70-79.

125. Щокін В. П., Щокіна О. В. Формалізація функцій приналежності нечіткої нейромережевої моделі ймовірнісної оцінки ефективної реалізації проекту. *Академічний вестник*. 2004. № 4. С. 26-28.

126. Гостев В. И. Синтез нечетных регуляторов систем автоматического управления. Київ : Радіоаматор, 2008. 972 с.

127. Семенцов Г. Н., Фадєєва О. В. Аналіз і вибір форми функцій належності для фазифікації вхідних сигналів систем контролю і управління. *Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки*. 2006. № 1. С. 219–225.

128. Семенцов Г. Н., Фадєєва О. В. Метод вибору кількості термів для нечіткого опису базових змінних в F-перетворенні параметрів і показників процесу буріння свердловин. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2005. Ч. 1. Т. 1. С. 30- 35.

129. Hampel R. Structure Analysis for Fuzzy-Controller. *In Proc. Conference on Fuzzy Logic in Engineering and Natural Sciences*. Zittau, Germany, 1996. P. 83-90.

130. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы : пер. с польск. И. Д. Рудинского. Москва : Горячая линия, Телеком, 2004. 452 с.

131. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Москва: Горячая линия, Телеком, 2007. 288 с.

132. Дурняк Б. В., Стрепко І. Т., Тітов Г. Н., Тимченко О. В. Основи проектування цифрових логічних пристроїв : навч. посіб. Львів : Вид-во УАД, 2006. 273 с.

133. Смирнов И. Н. Синтез систем управления на логических элементах. Ленинград : Изд. Лен. ун-та, 1975. 368 с.

134. Лукас В. А. Оптимальное управление многомерными технологическими объектам. Свердловск : из. СГИ, 1984. 80 с.

135. Фадєєва О. В. Удосконалення механічної характеристики асинхронного двигуна привода роторного стола бурової установки. *Нафтогазова енергетика*. 2009. № 1. С. 28-33.

136. Vilchevskiy N. O., Shevlyakov G. L. Robust Adaptive Approach to Identification of Regression Models Author links open overlay panel. *IFAC Proceedings Volumes*. May 1986. Vol. 19, Issue 5. P. 81-86.

137. CEI/IEC 61131-7: 2000 international standard Part 7 : Fuzzy control programming. P. 113.

138. Racine R. Estimating the Hurst exponent. *MOSAIC Group : Bachelor thesis*, April 14, 2011. Zurich, 2011. P. 1-30.

139. Malhar K., Ferry B. Fractal Analysis of Time Series and Distribution Properties of Hurst Exponent. *Journal of Mathematical Sciences & Mathematics Education*. 2011. Vol. 5, No 1. P. 8-19.

140. Orzeszko W. Wymiar fraktalny szeregów czasowych a ryzyko inwestowania. *Acta Universitatis Nicolai Copernici : Ser. Nauki Humanistyczno-Społeczne. Ekonomia*. 2010. Z. 397. S. 57-70.

141. Pánek D., Kropík P., Předota A. On fractal dimension estimation. *Przegląd Elektrotechniczny* (Electrical Review). 2011. R. 87, № 5. P. 120-122.

142. Ogolo N. A., Onyekonwu M. A., Ajenka J. A. Application of Nanotechnology in the Oil and Gas Industry. *Port Harcourt : Institute of Petroleum Studies*. 2011. P. 15-16.

143. Krishnamoorti R. Extracting the Benefits of Nanotechnology for the Oil Industry. *Journal of Petroleum Technology*. 2006. Vol. 58, No 11. P. 24-26.

144. Azar J. J. Drilling Problems and Solutions. *Drilling Engineering, University of Tulsa*. 2006. P. 433-454.

145. Cayeux E., Daireaux B. Early detection of drilling condition deterioration using real-time calibration of computer models: field example from north sea drilling operations. *Paper SPE 119435 presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Amsterdam, The Netherlands, 17-19 March 2009. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/119435-MS>.

146. John P., Calvin E., Moray L., John D. Systems Architecture and Operations States for Drilling and Completion: The Foundation to Real Performance Measurement

and Drilling Systems Automation. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*, 1-3 March. Fort Worth, Texas, USA, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/178814-MS>.

147. Оганов Г. С., Ширин-Заде С. А., Парамонов А. А. Динамический анализ процесса углубления скважин. *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*. 2009. № 1. С. 40-44.

148. Берзлев О. Ю. Методика передпрогнозного фрактального анализа гаусових рядів. *Управління розвитком складних систем*. 2013. № 16. С. 76-81. ISSN 2219-5300.

149. Даниленко В. А. Альтернативні методики проведення фрактального аналізу. *Економіка промисловості*. 2010. № 2. С. 8-12.

150. Jacobs T. Automated Drilling Technologies Showing Promise. *JPT. Drilling Automation*. June, 2015. P. 50-55.

151. Нич Л. Я., Камінський Р. М. Визначення показника Герста за допомогою фрактальної розмірності, обчисленої клітинковим методом на прикладі коротких гаусових рядів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»* : Інформаційні системи та мережі. 2015. № 814. С. 100-111. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2015_814_12.

152. Заруба Ю. В., Фадеева О. В. Алгоритми ідентифікації хаотичних послідовностей за допомогою показника Херста. *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2007* : Сб. науч. тр. по материалам межд.науч.-практ. конф., 15-25 декабря 2007 года, том 5. Технические науки, физика и математика. Одесса, 2007. С. 16-23.

153. Алимбеков Р. И., Васильев В. И., Нугаев И. Ф., Агзамов В. В., Шулаков А. С. Компьютеризированные технологии управления бурением наклонно направленных скважин. *Нефтяное хозяйство*. 2000. № 12. С. 120-122.

154. Нестерова Т. Н., Чебинов С. Н. Информационное обеспечение снижения рисков и затрат в бурении. *Бурение и нефть*. 2003. № 10. С. 39-41.

155. Закиров Н. Н. Влияние технологических параметров бурения скважин на механическую скорость и проходку на долото. *Бурение и нефть*. 2003. № 6. С. 16-18.

156. Гасанов Р. А., Меджидов Г. Н., Алекперов Р. Б., Керимов К. С., Меджидов Н. А. Разработка автоматизированной системы для прогнозирования показателей бурения на основе нейронных моделей. *Нефтяное хозяйство*. 2001. № 10. С. 40-42.

157. Гибадуллин Н. З., Лугуманов М. Г., Иконников И. И. Особенности геолог-технического контроля проводки скважин на депрессии с применением колтюбинговой технологии. *Каротажник*. 2013. № 102. С. 45–48.

158. Большаков А. А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов. Москва : Горячая линия. Телеком, 2007. 522 с.

159. Трунова О. В., Скитер И. С. Использование фрактального анализа для исследования динамики сложных систем. *Математическое и имитационное моделирование систем* : Восьмая международная науч.-практ. конф., 24-28 июня 2013 г.; тезисы докл. Чернигов : ЧНТУ, 2013. С. 296-299.

160. Бодянский Е. В., Плисс И. П., Чапланов А. П. Динамическая реконструкция хаотических сигналов на основе нейросетевых технологий. *Радиоэлектроника и информатика* 2002. № 3(20). С. 62-64.

161. Тур Г. І., Трунова О. В. Застосування методу фрактального аналізу для визначення трендових характеристик числових рядів. *Вісник ЧНТУ*. 2005. № 125. С. 252-256.

162. Kropyvnytska V., Kopystynskyu L., Sementsov G. Development of a Set of Methods for Preforecasting Fractal Time Series Analysis to Determine the Level of Persistence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 3/4 (87)* : Mathematics and Cybernetics. Applied Aspects. 2017. P. 10-17. ISSN 1729-3774.

163. Мультиколінеарність. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki>.

164. Копистинський Л. О. Сумісні механічні характеристики електробурів і доліт. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2017. № 2(28). С. 95-102. ISSN 1993-9868.

165. Гутак О. В. Аналіз мультиколінеарності критеріїв оптимальності процесу буріння нафтових і газових свердловин долотами типу PDC.

Нафтогазова енергетика. Івано-Франківськ, 2010. № 1(12). С. 98-101. ISSN 1993-9868.

166. Гутак О. В., Семенцов Г. Н. Аналіз зв'язків показників ефективності процесу буріння на засадах системного підходу. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2009. № 2(11). С. 94-99. ISSN 1993-9868.

167. Наконечний С. І., Терещенко Т. О., Романюк Т. П. Економетрія : підручник : Вид. 3-тє, доп. та перероб. Київ : КНЕУ, 2004. 520 с.

168. Шередко Ю. Л. Кібернетика розвитку. *3-rd International Conference on Computational Intelligence (ComInt 2015)*. Cherkasy Kyiv-Ukraine, 12-15 May 2015. С. 149-150.

169. Семенцов Г. Н. , Чигур Л. Я. Інтелектуальна підтримка прийняття рішень при управлінні відпрацюванням алмазних доліт. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2014. № 1(21). С. 75-84. ISSN 1993-9868.

170. Семенцов Г. Н. Теорія автоматичного керування : навч. посібник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 1999. 610 с.

171. Семенцова А. О., Годлевська К. С., Копистинський Л. О. Удосконалення характеристик занурного частотно-регульованого електропривода. *Naukowa Przestrzeń Europy – 2013 : Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 7-15 kwietnia 2013*. Przemysł : Nauka i studia, 2013. Vol. 47. С. 78-84.

172. Kopystynskyy L., Kropyvnytska V., Lagoyda A., Sementsov G. Analysis of Interrelations Between the Criteria Of Optimal Control Over The Process of Drilling the Wells. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2/3 (86) : Control Processes*. 2017. P. 40-50. ISSN 1729-3774.

173. Копистинський Л. О. Огляд каналів зв'язку для передачі інформації з вибою свердловини у процесі буріння. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості : Всеукраїнська наук.-практ. конф. аспірантів, молодих учених і студентів, 8-11 жовтня 2013*. Івано-Франківськ, 2013. С. 22-25.

174. Копистинський Л. О. Fuzzy-підхід до контролю моменту на валу бурових механізмів. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового*

обладнання : 4-а наук.-практ. Конф. студентів і молодих учених. Івано-Франківськ, 2013. С. 82.

175. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О., Гутак О. В. Автоматична система зі змінною структурою для керування процесом буріння свердловин електробурами. *Wykształcenie i nauka bez granic – 2013* : Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 7-15 grudnia 2013. Przemysł : Nauka i studia, 2013. Vol.47. С. 29-36.

176. Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Визначення оптимальних параметрів режиму буріння методом бар'єрних функцій. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2014* : I Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 16-17 квітня 2014. Київ, 2014. С. 7-8.

177. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Система керування із змінною структурою для оптимізації процесу буріння свердловин електробурами. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : Матеріали II всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 6-9 жовтня 2015. Івано-Франківськ, 2015. С. 56-57.

178. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Система автоматизованого керування процесом буріння свердловин електробурами. *Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології* : Збірка доповідей Міжрегіональної наук.-практ. конф. молодих учених, 16-17 листопада 2015. Красноармійськ, 2015. С. 197-199.

179. Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Робастне і адаптивне керування технологічним процесом поглиблення свердловин електробурами. *Автоматизація, контроль та управління* : пошук ідей та рішень АКУ-2016, 23-27 травня 2016. Покровськ, 2016. С. 39-40.

180. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О., Данилів А. Р. Аналіз мультиколінеарності незалежних змінних та її впливу на оцінки параметрів математичних моделей багатовимірних об'єктів. *Наука и инновации в современном мире* : Техника и технологии. Книга 2. Глава 9. Монография. Одесса : Куприенко С. В., 2017. С. 137-149.

ДОДАТКИ

Додаток А

Вихідні дані отримані під час буріння експлуатаційної свердловини в умовах Прикарпаття, яке здійснено буровою установкою Уралмаш-6Е-61 з використанням електробура ЕП240-8-В5 та долота типу 295,3С-ГВ в інтервалі буріння 1317–1327 м (табл. А. 1).

Таблиця А. 1

Характеристики електробура ЕП240-8 В5

№	Характеристика електробура	Значення
1	Діаметр	240 мм
2	Довжина	13690 мм
3	Номінальна потужність	210 кВт
4	Номінальна напруга живлення	1700 В
5	Номінальний струм	144 А
6	Номінальна частота обертання	690 об/хв
7	Номінальний крутний момент	2,8 кНм
8	Максимальний крутний момент	7,0 кНм
9	ККД	75 %
10	$\cos\varphi$	0,66
11	Маса	3650 кг

Додаток Б

Для виявлення МК взято масив експериментальних даних, отриманих під час буріння свердловини № 814 Прикарпатського УБР (електробур Е240-8, долото ЗУ 295 СЗГ, інтервал буріння 2080-2089 м), які наведені в табл. Б. 1.

Таблиця Б. 1

Масив експериментальних значень

№	Осьове зусилля F , кН	Струм I , А	Потужність P , кВт
1	105,600	142,200	232,300
2	105,350	128,000	233,600
3	105,840	147,400	233,700
4	107,160	144,000	237,900
5	104,615	140,600	231,800
6	104,615	141,000	233,900
7	106,820	142,100	232,700
8	104,860	144,800	231,500
9	105,250	137,500	230,100
10	109,510	134,100	231,500
...
114	96,560	150,600	239,100
115	98,240	150,000	237,800
116	99,080	155,600	238,100
117	99,920	151,700	238,400

Проміжні розрахунки та результати наведені в табл. Б. 2 та Б. 3.

Таблиця Б. 2

Проміжні розрахунки

№	X_1	X_2	$(X_{1i}-X_{1cp})^2$	$(X_{2i}-X_{2cp})^2$
1	142,200	232,300	0,1580	5,2019
2	142,100	232,700	213,0851	0,9619
3	139,300	235,700	23,0646	0,7758
4	139,300	230,200	1,9672	11,0173
5	140,700	239,400	3,9898	7,7327
6	139,100	230,700	2,5518	0,4634
7	134,500	232,800	0,2474	3,5373
8	134,600	234,000	4,8513	9,4911
9	136,200	234,300	25,9839	20,0773
10	143,800	234,900	72,2064	9,4911

Продовження табл. Б. 2

№	X_1	X_2	$(X_{1i}-X_{1cp})^2$	$(X_{2i}-X_{2cp})^2$
11	145,900	236,000	3,6003	1,7709
12	149,500	236,300	0,0095	0,0788
...
114	150,600	239,100	64,0410	20,4234
115	150,000	237,800	54,7980	10,3634
116	155,600	238,100	169,0667	12,3850
117	151,700	238,400	82,8567	14,5865
Усього	16683,9	27445,95	5 182,2692	670,0292

Таблиця Б. 3

Проміжні розрахунки (продовження)

Показник	X_1	X_2
Середнє значення	142,5974	234,5808
Стандартне відхилення	6,6839	2,4034

Додаток В

Основні технічні характеристики сучасних електробурів

Електробур – занурний забійний агрегат, призначений для буріння вертикальних, похилих, похило-спрямованих і розгалужено-горизонтальних нафтових і газових свердловин.

Структура умовного позначення типу електробура ЕП190-8М-В5:

ЕП – електробур занурний;

190 – діаметр електробура, мм;

8 – число полюсів;

М – модифікація;

В5 – кліматичне виконання і категорія розміщення.

Діаметри застосовуваних з електробурами доліт, глибини буріння і максимального осьового навантаження на долото залежно від діаметрів електробурів мають відповідати зазначеним у табл. В. 1.

Таблиця В. 1

Діаметр електробура, мм	Діаметр долота, мм	Глибина буріння, м, не більше	Максимальна осьова навантаження, кН, не більше
164	187,3; 190,5	6000	250
190	212,7; 215,9	6000	300
215	244,5	5000	350
240	269,9; 295,3	5000	400
290	від 349,2 до 393,7	5000	450

Таблиця В. 2

Технічні дані електробурів

Тип електробура	Діаметр, мм	Довжина, мм	Потужність номінальна, кВт	Напруга номінальна, В	Струм номінальний, А	Швидкість обертання, об/хв	Момент обертання, кН·м		ККД, %	cosφ	Маса, кг
							номінальний	максимальний			
ЕП164-8-В5	164	11570±15	65	1100	89	675	0,900	1,890	60,0	0,64	1485±10
ЕП164-8М-В5	164	11950±15	65	1100	89	675	0,900	1,890	60,0	0,64	1506±10

Продовження табл. В. 2

Тип електробура	Діаметр, мм	Довжина, мм	Потужність номінальна, кВт	Напруга номінальна, В	Струм номінальний, А	Швидкість обертання, об/хв	Момент обертання, кН·м		ККД, %	cosφ	Маса, кг
							номіна- льний	макси- мальний			
ЕП190-8-В5	190	12882±15	125	1300	125	675	1,700	3,570	67,5	0,66	2190±15
ЕП190-8М-В5	190	12840±15	125	1300	125	675	1,700	3,570	67,5	0,66	2175±15
ЕП215-8-В5	215	13794±15	175	1550	131	680	2,400	5,040	72,0	0,69	3020±25
ЕП215-8М-В5	215	13466±15	175	1550	131	680	2,400	5,040	72,0	0,69	2980±25
ЕП240-8-В5	240	13689±15	210	1700	144	690	2,800	7,000	75,0	0,66	3630±30
ЕП240-8М-В5	240	13546±15	210	1700	144	690	2,800	7,000	75,0	0,66	3583±30
ЕП290-12-В5	290	12766±15	180	1750	123	455	3,780	7,938	71,0	0,68	4650±40

Таблиця В. 3

Швидкість обертання і моменти на долоті при роботі електробурів з редукторами

Тип електробура	Передавальне число редуктора					
	$u = 3$			$u = 10$		
	Швидкість обертання, об/хв	Момент номіналь- ний, кН·м	Момент максима- льний, кН·м	Швидкість обертання, об/хв.	Момент номіналь- ний, кН·м	Момент максима- льний, кН·м
ЕП164-8-В5	225	2,340	4,000			
ЕП164-8М-В5	225	2,340	4,000			
ЕП190-8-В5	225	4,610	7,000	67	5,400	8,000
ЕП190-8М-В5	225	4,610	7,000	67	5,400	8,000
ЕП215-8-В5	226	6,000	9,000			
ЕП215-8М-В5	226	6,000	9,000			
ЕП240-8-В5	230	7,730	14,000			
ЕП240-8М-В5	230	7,730	14,000			
ЕП290-12-В5	153	9,750	20,000			

Додаток Г

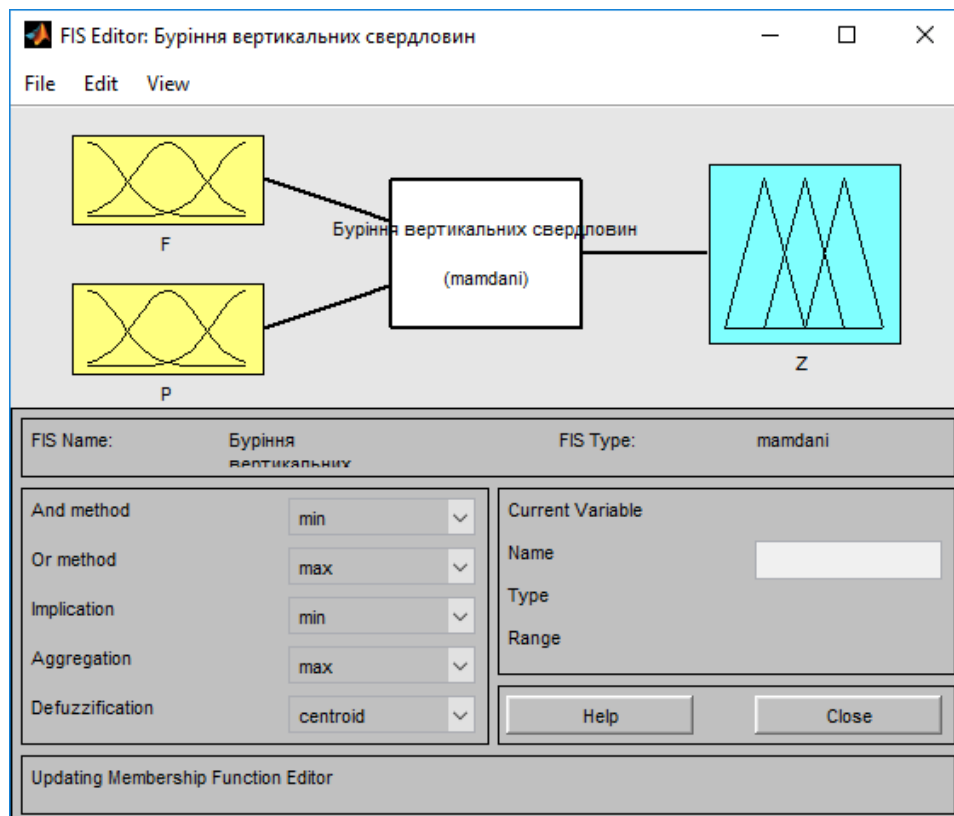


Рис. Г.1. FIS Editor у програмі MatLab

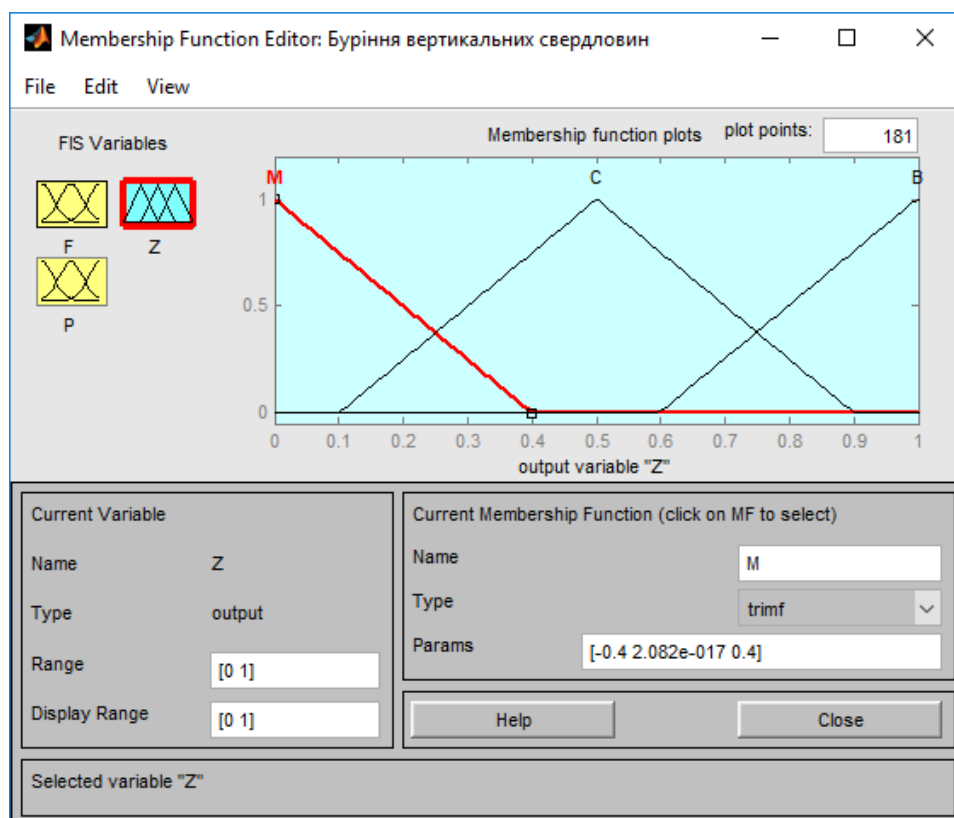


Рис. Г.2. Membership Function Editor у програмі MatLab

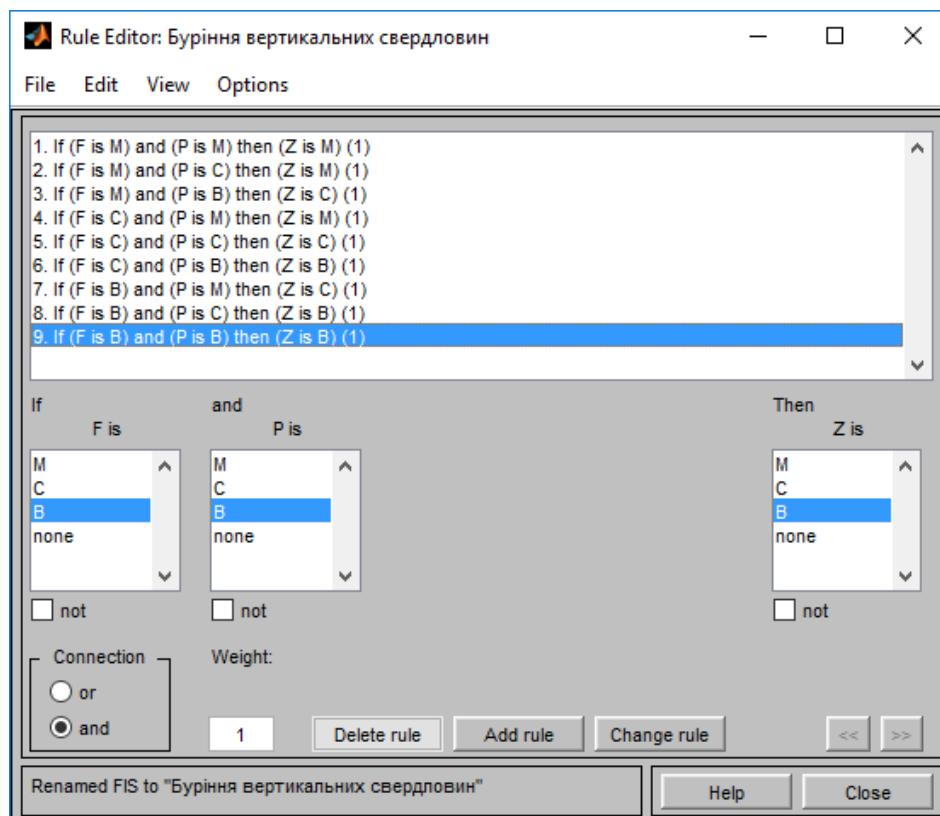


Рис. Г.3. Rule Editor у програмі MatLab

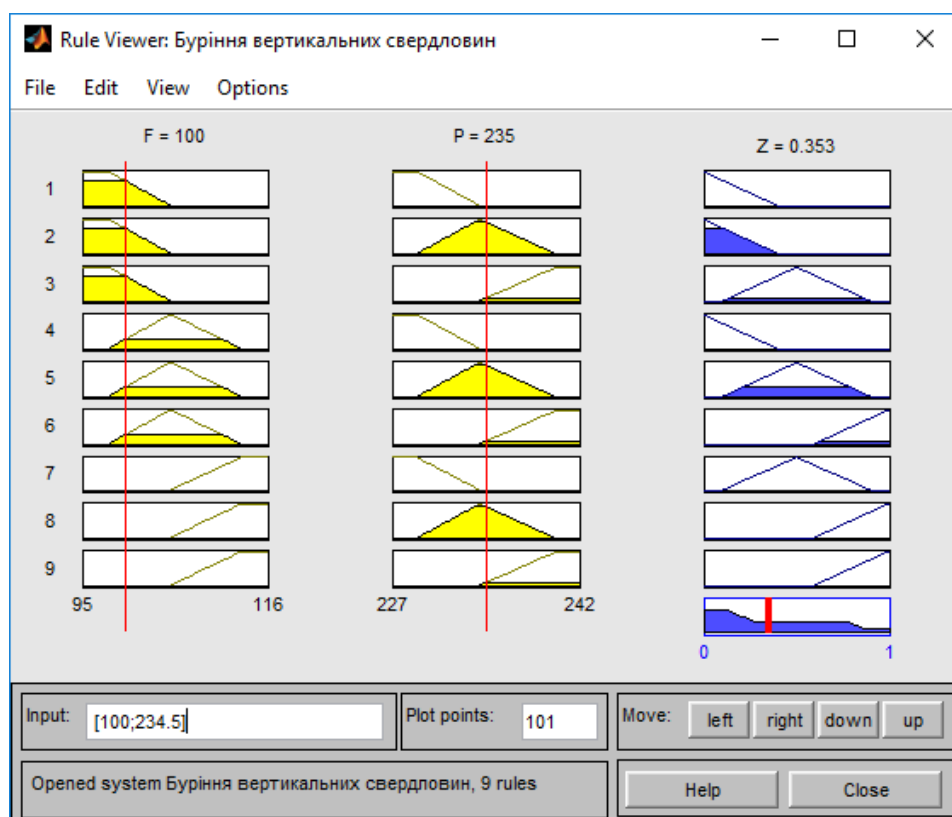


Рис. Г.4. Rule Viewer у програмі MatLab

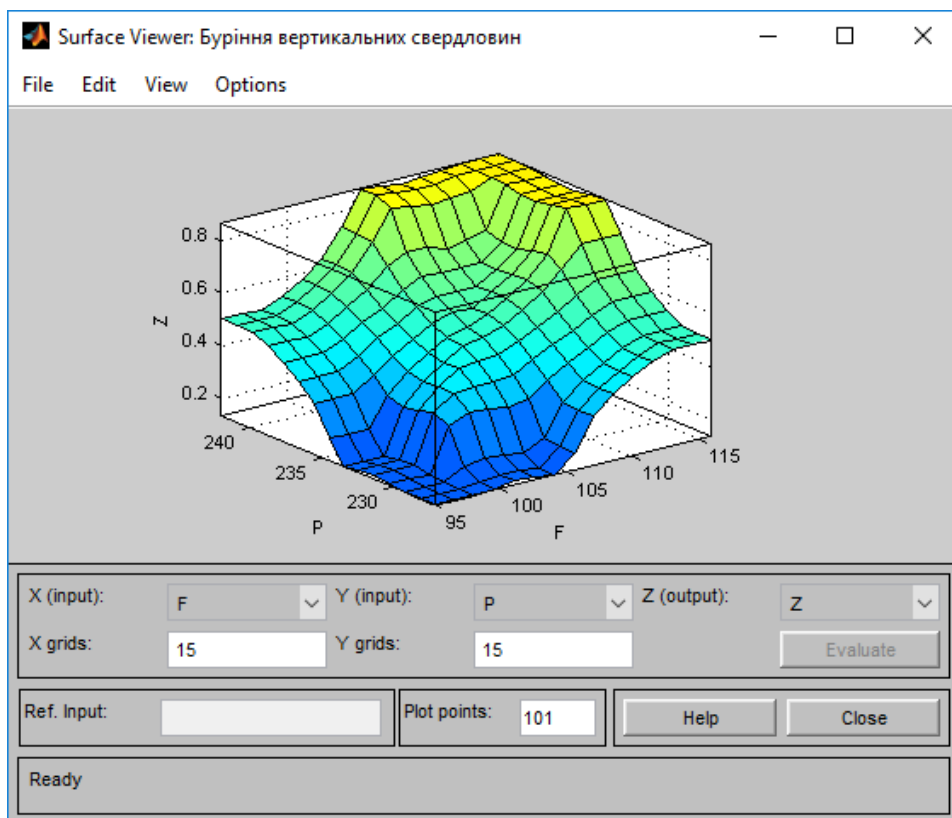


Рис. Г.5. Surface Viewer у програмі MatLab

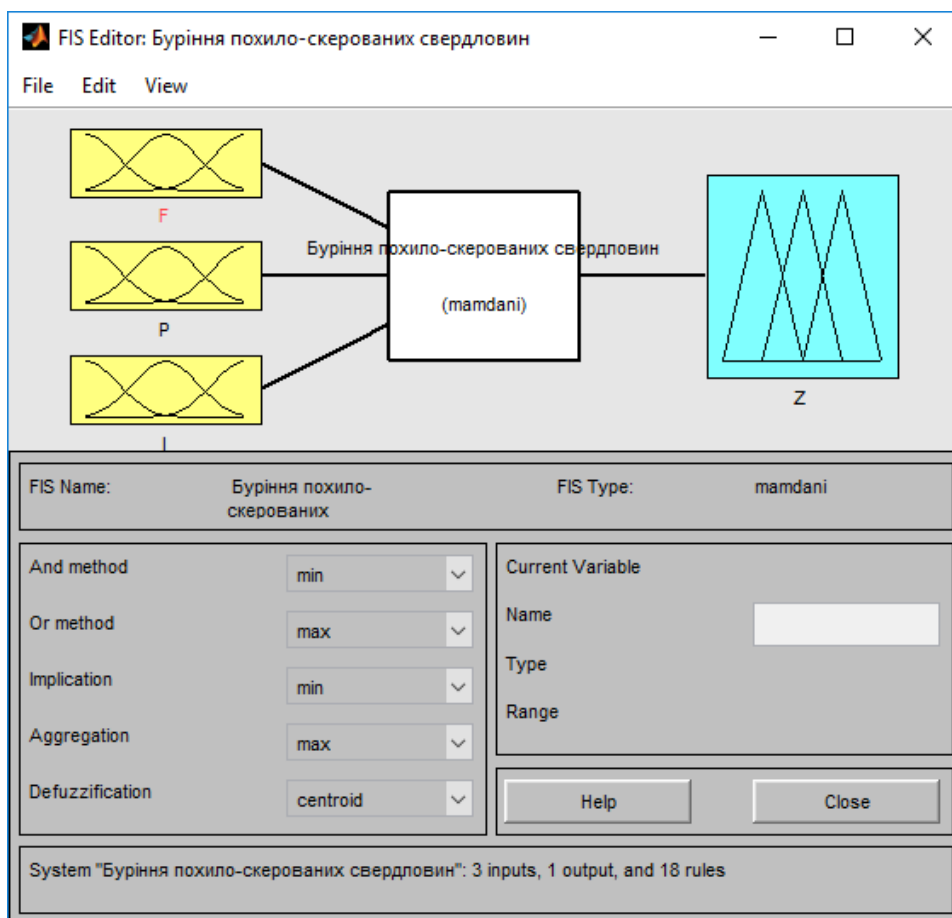


Рис. Г.6. FIS Editor у програмі MatLab

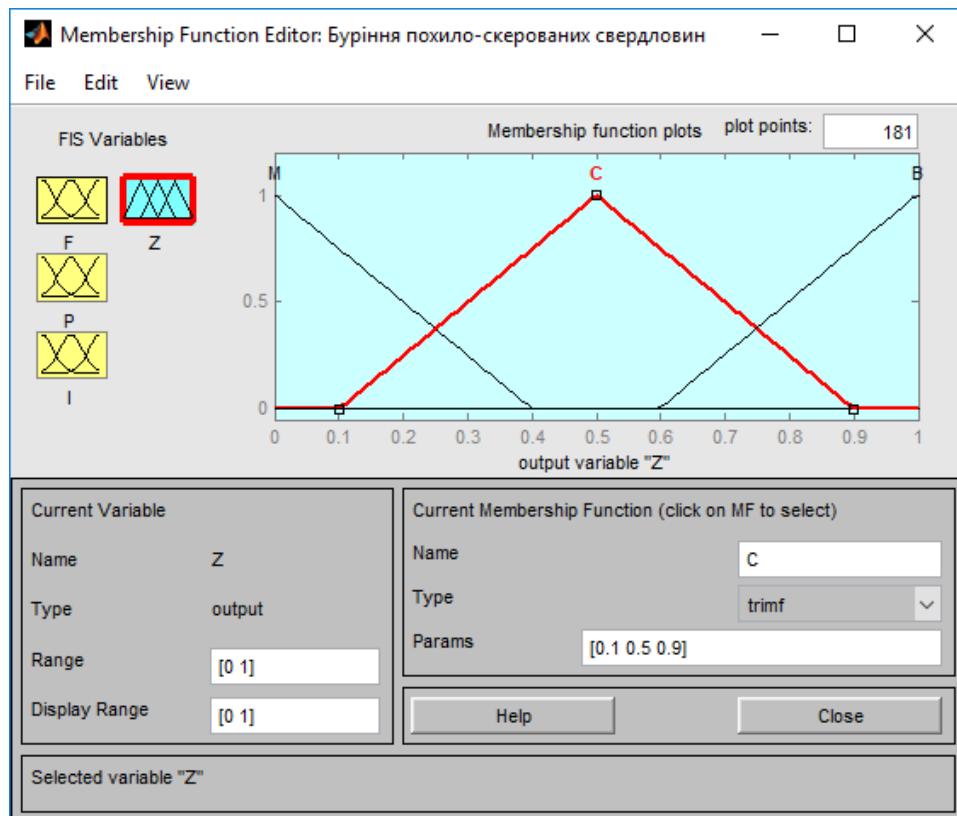


Рис. Г.7. Membership Function Editor у програмі MatLab

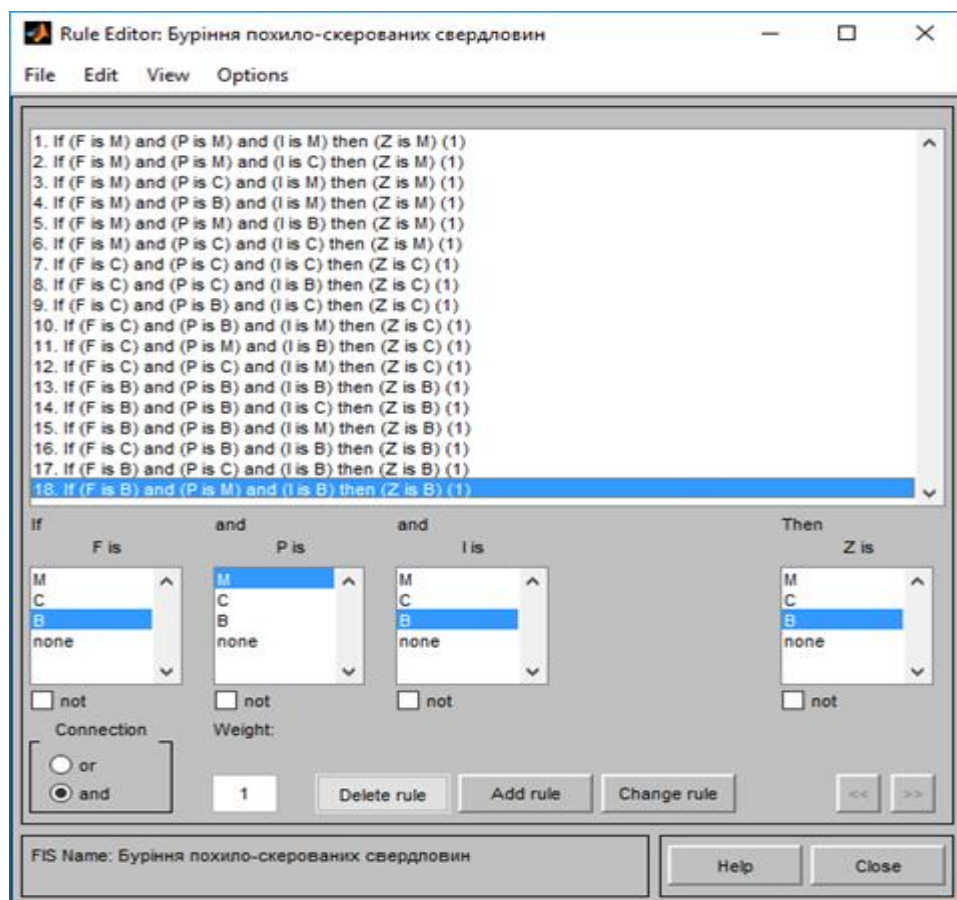


Рис. Г.8. Rule Editor у програмі MatLab

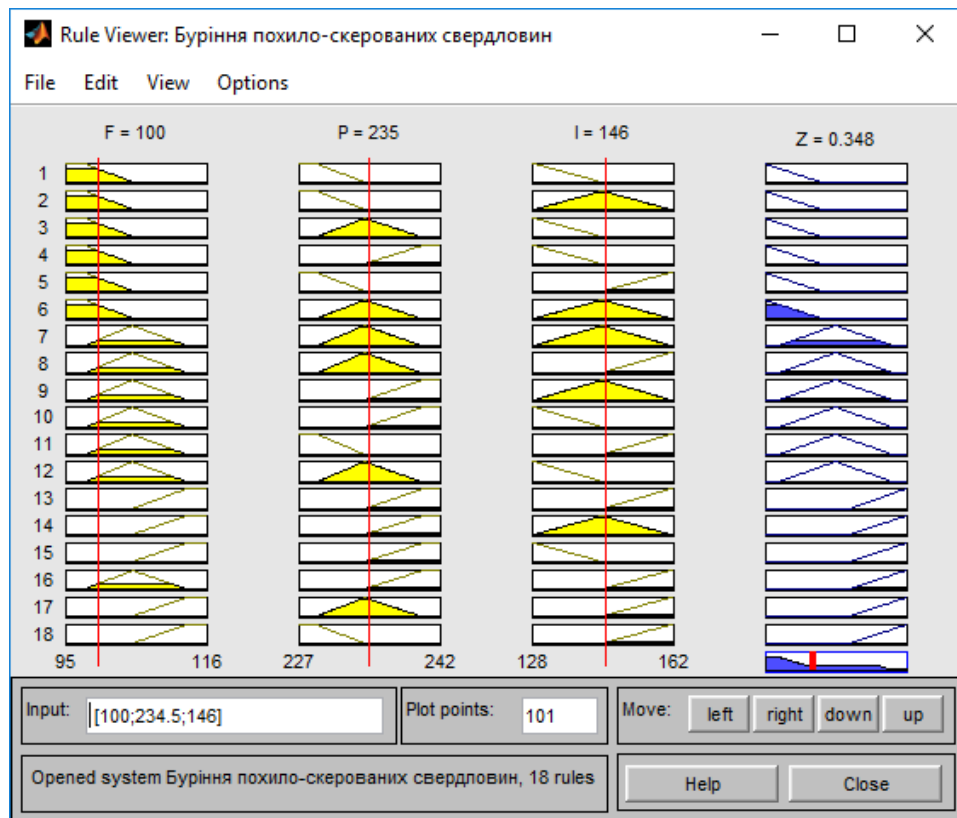


Рис. Г.9. Rule Viewer у програмі MatLab

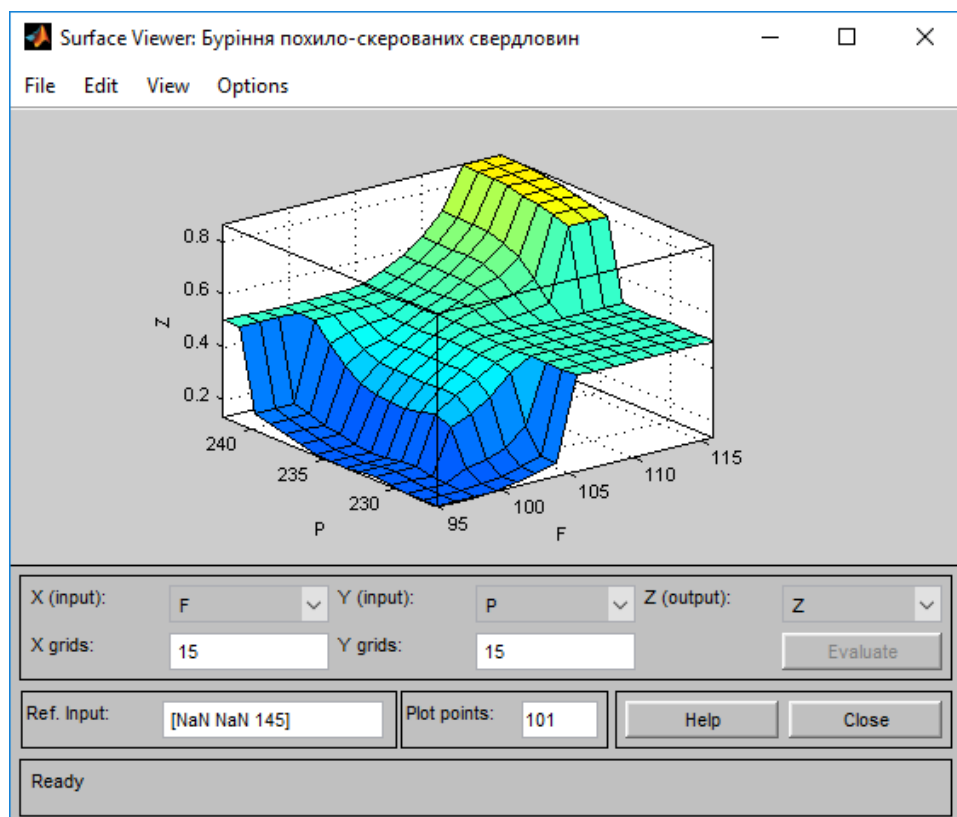


Рис. Г.10. Surface Viewer у програмі MatLab

Додаток Д

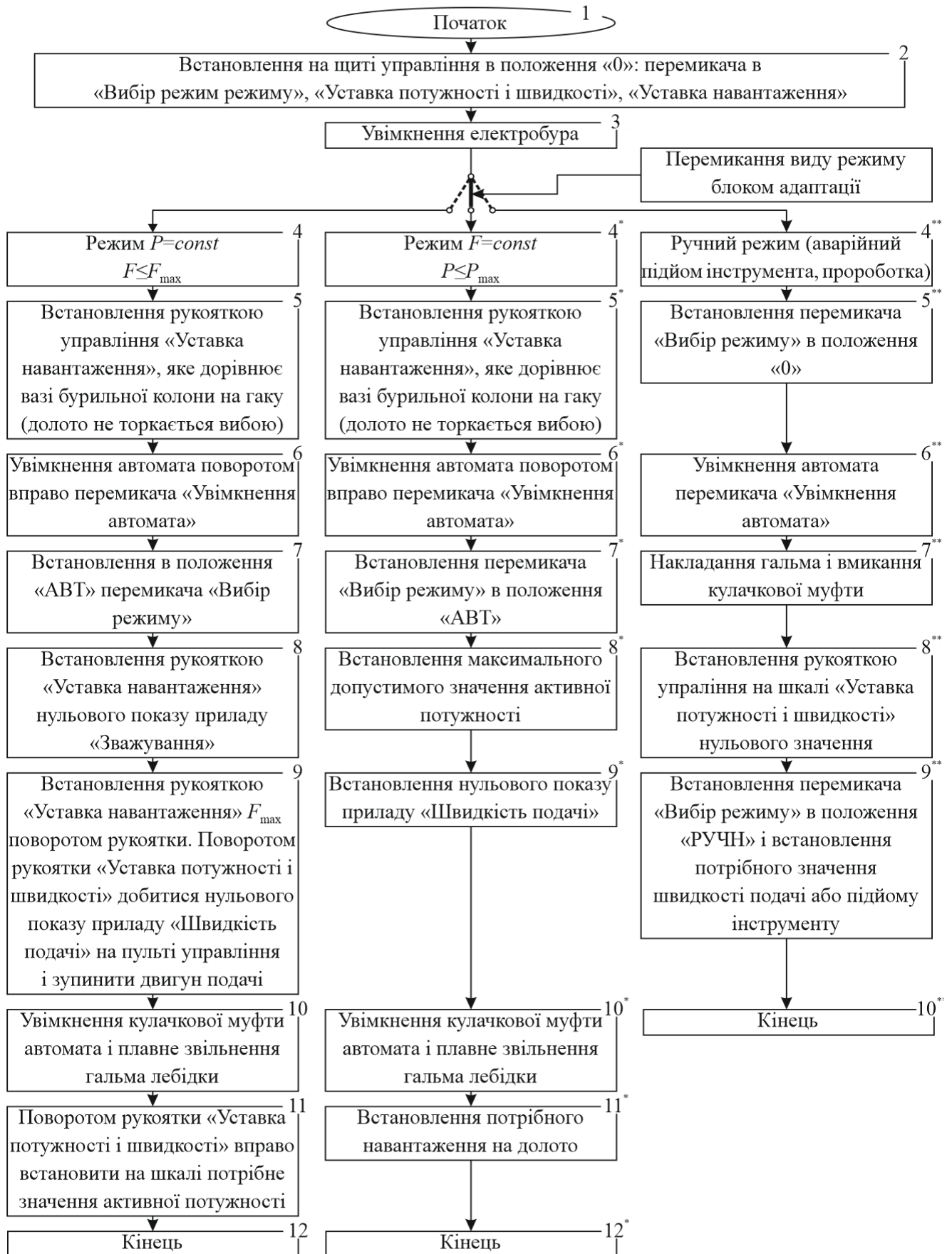


Рис. Д.1. Блок-схема оперативних перемикачів для увімкнення електробура з автоматом подачі долота

Додаток Е.1



Затверджую

Заступник нач. ПУБР з
виробництва – нач. ЦІТС

В.М. Рудик

«19» 09 2017 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи «Автоматизація процесу керування навантаженням електробурів з використанням методу корегування структури системи» аспіранта ІФНТУНГ Копистинського Л.О.

Прикарпатським УБР прийняті до впровадження практичні рекомендації щодо зміни структури системи автоматичного управління процесом буріння свердловин електробурами.

Застосування цього методу, що ґрунтується на поточній інформації про завантаження двигуна електробура, дозволить забезпечити надійний підбір оптимального сполучення параметрів режиму буріння, контролювати осьове навантаження на долото в похило-скерованих свердловинах не за показами індикатора ваги, а за величиною потужності, яку споживає двигун електробура, та здійснювати повний контроль і управління процесом буріння та траєкторію ствола свердловини завдяки наявності провідного каналу зв'язку з вибоєм для передачі інформації.

Від Прикарпатського УБР
Заступник нач. ПУБР з виробництва –
нач. ЦІТС

/Рудик В.М./

Від ІФНТУНГ

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
докт. техн. наук., професор

/Семенцов Г.Н./

Аспірант

/Копистинський Л.О./

Додаток Е.2

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Ректор Івано-Франківського
національного технічного
університету нафти і газу
д.т.н. проф.

Є.І. Крижанівський
9.10 2017 року.



АКТ

про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи аспіранта
Копистинського Л.О.

«АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ЕЛЕКТРОБУРІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КОРЕГУВАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ»

У результаті виконання аспірантом очної форми навчання Копистинським Л.О. дисертаційної роботи на тему «Автоматизація процесу керування навантаженням електробурів з використанням методу корегування структури системи» одержані наукові та прикладні результати, які активно використовуються на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, зокрема

– при читання лекційних курсів:

«Автоматизація технологічних процесів і виробництв»;

«Основи комп'ютерно-інтегрованих технологій»;

«Нечіткі системи контролю»

студентам спеціальності 6.050202 – Автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології;

– при проведенні лабораторних і практичних занять з даних курсів;

– при виконанні магістерських робіт студентами спеціальності 151 – Автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології.

Директор ін.-ту ІТ,
к.т.н., доцент

І.І. Чигур

Завідувач кафедри АКІТ
д.т.н., професор

Г.Н. Семенцов

Додаток Е.3

Затверджую
Головний інженер *Скрипченко В.В.*

Миронов А.В.

«05» 10 2017 р.



АКТ

**впровадження результатів досліджень аспіранта Копистинського Л.О.
за темою дисертаційної роботи «Автоматизація процесу керування
навантаженням електробурів з використанням методу корегування
структури системи»**

Підприємством прийняті до впровадження розроблені Копистинським Л.О. методи інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень і практичні рекомендації щодо адаптивного управління шляхом зміни структури системи управління процесом буріння свердловин електробурами, з урахуванням поточної інформації та обмежень на технологічний процес, передбаченим геолого-технологічним нарядом. Теоретичні засади оперативного оцінювання умов буріння, які включають базу правил Мамдані-типу і фазі-модель оперативного оцінювання умов буріння, використані для оцінювання ситуації при прийнятті рішень щодо управління технологічним процесом буріння свердловин. Оскільки електробур виконує ще функції давача, що миттєво реагує на відхилення показників буріння, то це дозволяє оперативно здійснювати процес управління і створює передумови для вирішення задач адаптивного управління в умовах невизначеності.

Від
Головний інженер

Миронов А.В.

Від ІФНТУНГ

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
докт. техн. наук., професор

Семенцов Г.Н.

Аспірант

Копистинський Л.О.

Додаток Е.4

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Директор ТзОВ «Мікрол»

Б.С. Демчина

2017 року.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Копистинського Лева Олександровича «АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ЕЛЕКТРОБУРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КОРИГУВАННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ»

Ми, що нижче підписалися, директор Івано-Франківського ТзОВ «Мікрол». Демчина Б..С. з однієї сторони та д.т.н., проф., завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ІФНТУНГ Семенцов Г.Н., аспірант денної форми навчання Копистинський Л.О. з другої сторони склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи аспіранта Копистинського Л.М. «Автоматизація процесу керування навантаженням електробурів з використанням методу коригування структури системи» у вигляді бази правил, побудованої на засадах Fuzzy Logic, що призначена для зміни структури блоку адаптації системи автоматичного керування процесом буріння свердловин електробурами, прийняті до впровадження на підприємстві «Мікрол». За даних правил автоматизована система управління бурінням набуває властивості пристосовуватися до мінливих параметрів та характеристик електробурів і навколишнього середовища, що дозволяє отримати характеристичне поле та синтезувати структурну схему блоку адаптації системи на засадах Fuzzy Logic або елементах базису I, АБО, НІ.

Від ТзОВ «МІКРОЛ»:

Головний інженер ТзОВ «МІКРОЛ»

/Слободян Р.Й./

Заступник директора ТзОВ «МІКРОЛ»

/Лопух В. В./



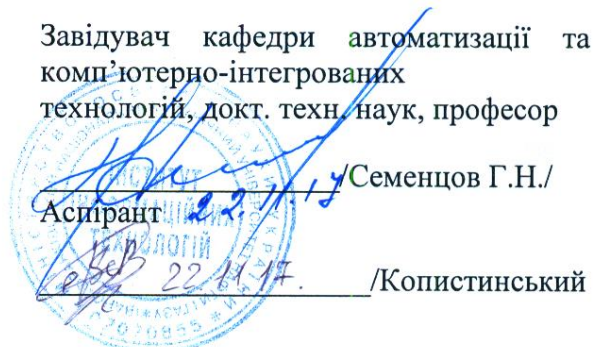
Від ІФНТУНГ:

Завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, докт. техн. наук, професор

/Семенцов Г.Н./

Аспірант

/Копистинський



Додаток Е.5

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Директор ТзОВ СКБЗА

В.С.Вощинський
20.11.2017 року.

АКТ

передачі-прийому нової бази правил типу Мамдані, призначеної для адаптації системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами

Ми, що нижче підписалися, директор Івано-Франківського ТзОВ СКБЗА, к.т.н. Вощинський В.С. з однієї сторони та д.т.н., проф., завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ІФНТУНГ Семенцов Г.Н., аспірант денної форми навчання Копистинський Л.О. з другої сторони склали цей акт у тому, що ТзОВ СКБЗА прийняло до впровадження нову базу правил типу Мамдані, що побудована на засадах методів Fuzzy Logic і призначена для блоку адаптації системи автоматизованого управління процесом буріння свердловин електробурами. Нова база правил типу Мамдані, що розроблена аспірантом денної форми навчання Копистинським Л.О., буде інтегрована в математичне і програмне забезпечення системи контролю процесом буріння .

Директор Івано-Франківського
ТзОВ СКБЗА, к.т.н.

В.С. Вощинський

Завідувач кафедри АКІТ
д.т.н., професор



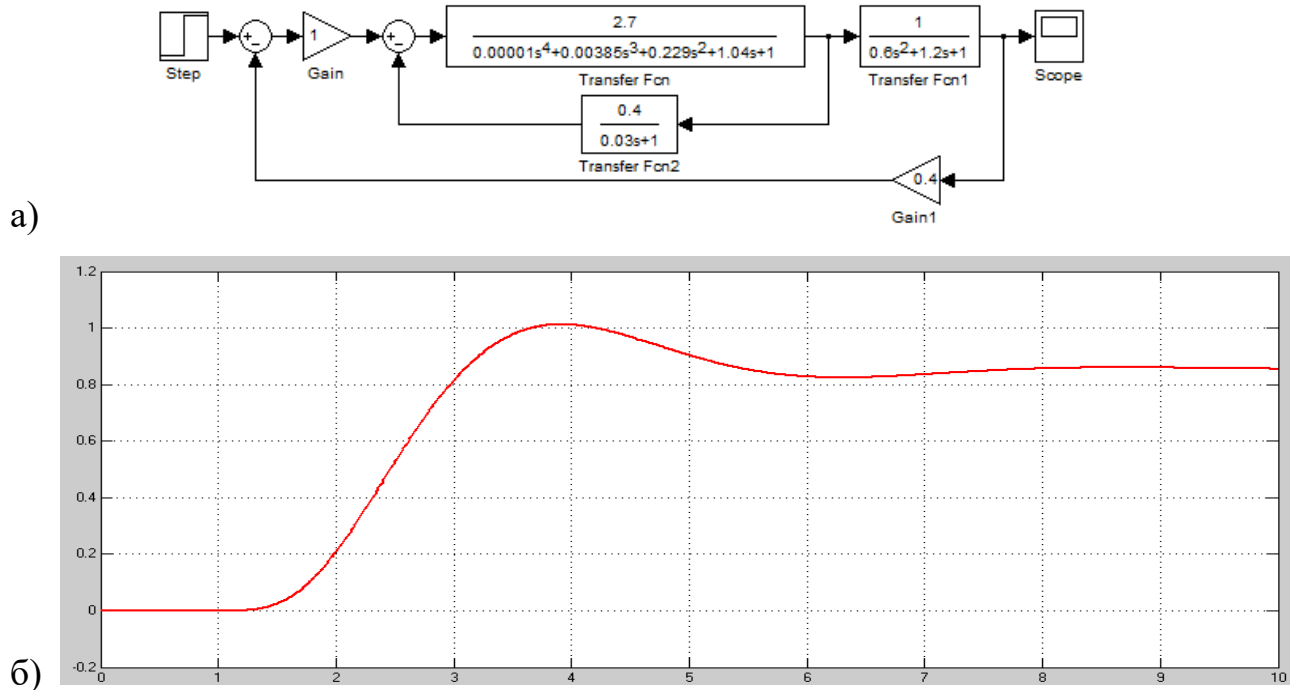
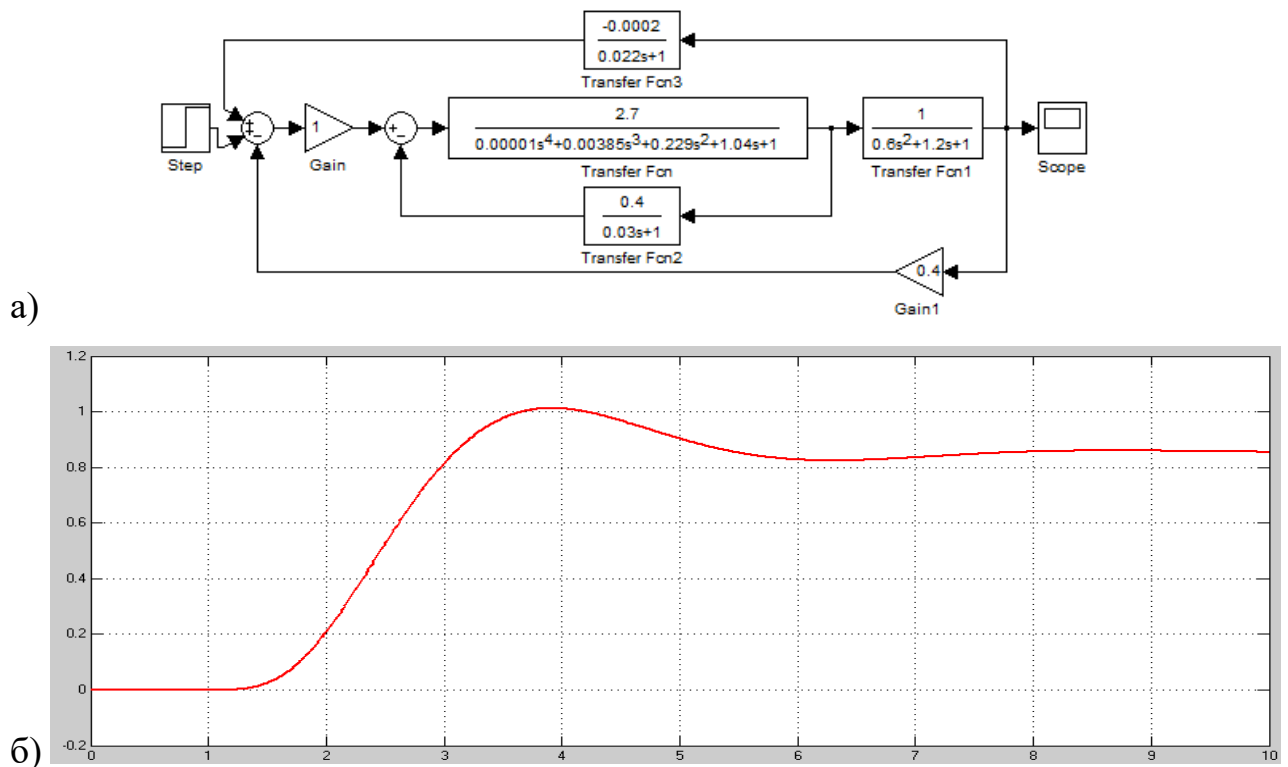
Г.Н. Семенцов

Аспірант

Л.О. Копистинський

Додаток Ж

Алгоритмічні структури систем автоматичного регулювання осьового навантаження на долото (а) та її перехідні характеристики (б) при різних умовах наведені на рис. Ж. 1-21.

Рис. Ж.1. $K_{рб-кк}=1$ Рис. Ж.2. $K_{рб-кк}=1$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

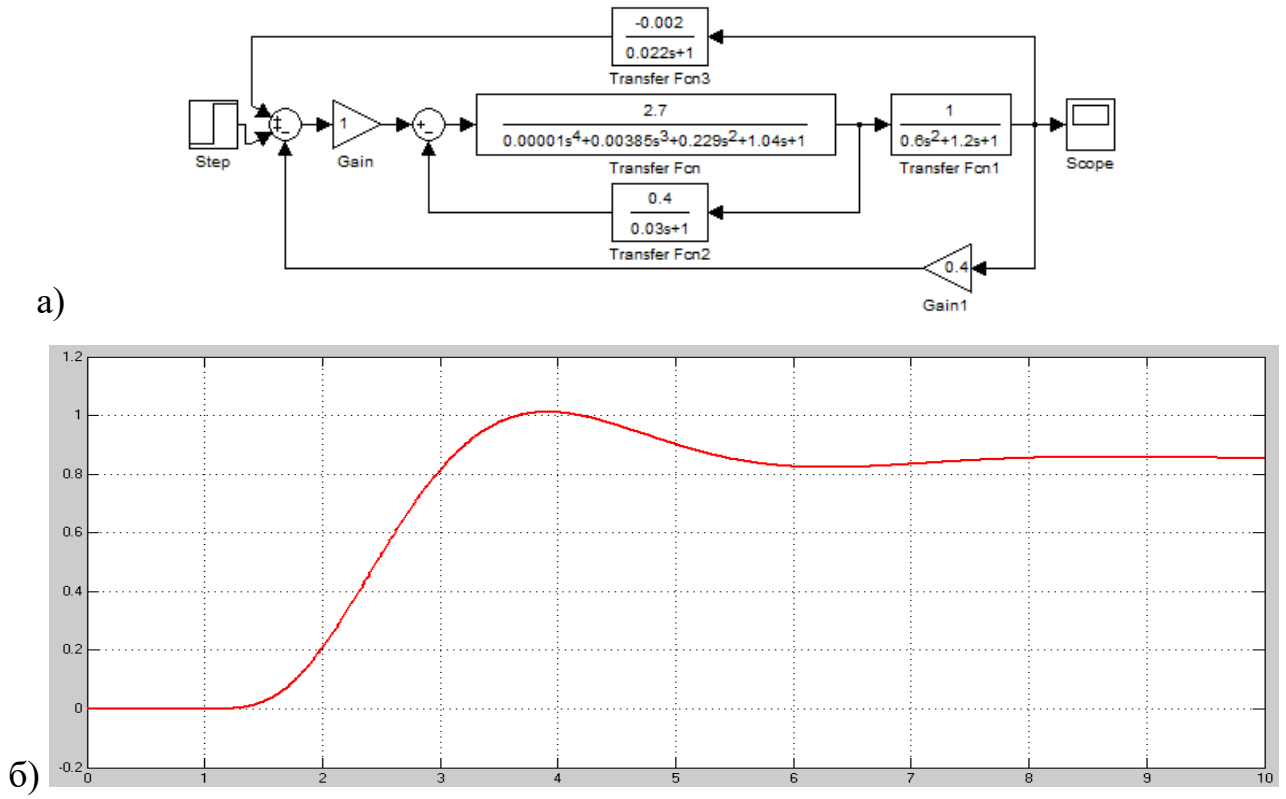


Рис. Ж.3. $K_{p\delta-кк}=1$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002, T=0,022$)

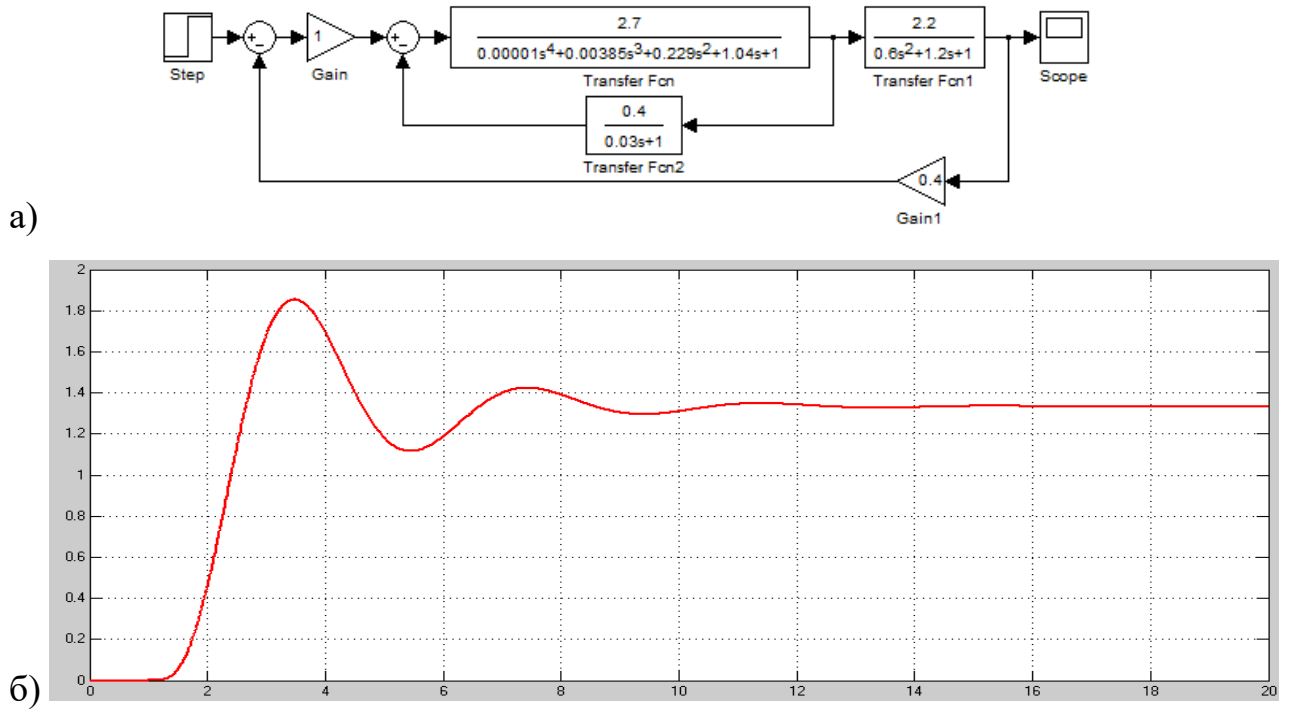


Рис. Ж.4. $K_{p\delta-кк}=2,2$

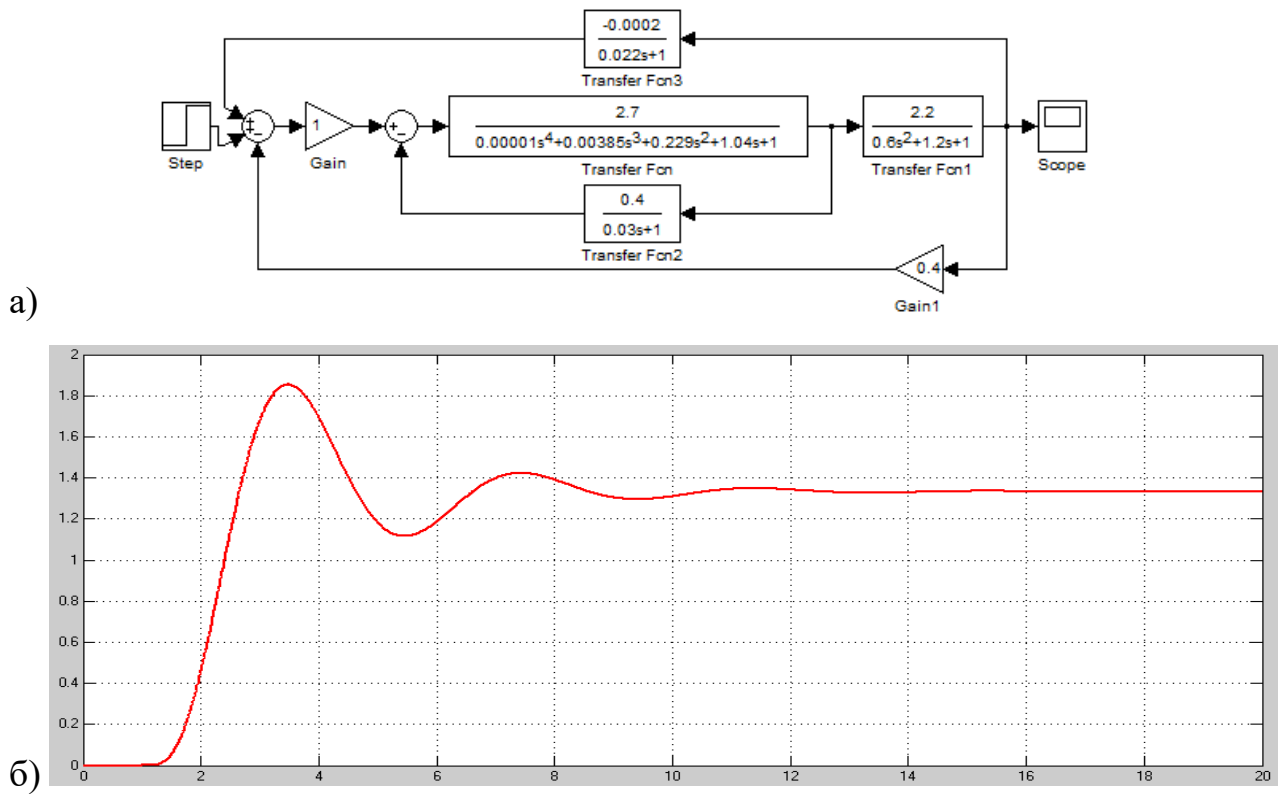


Рис. Ж.5. $K_{рб-кк}=2,2$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

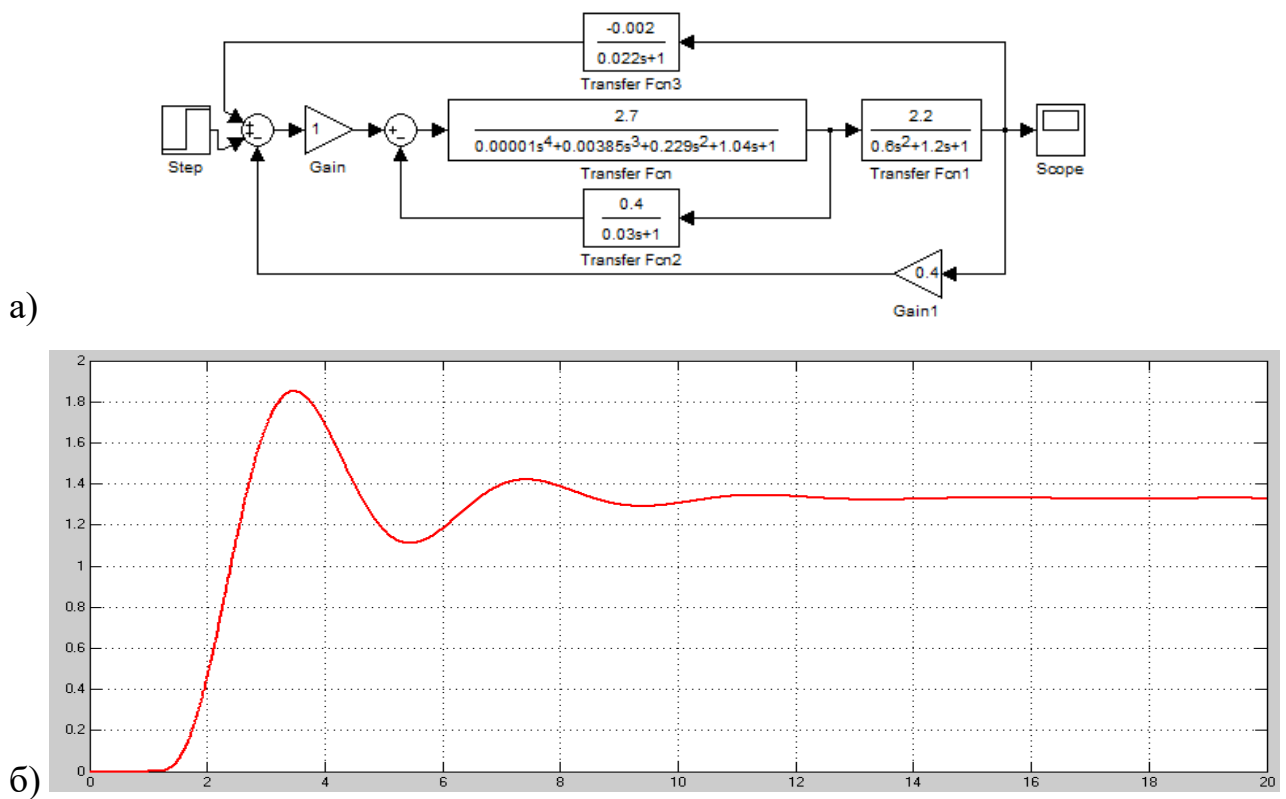


Рис. Ж.6. $K_{рб-кк}=2,2$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

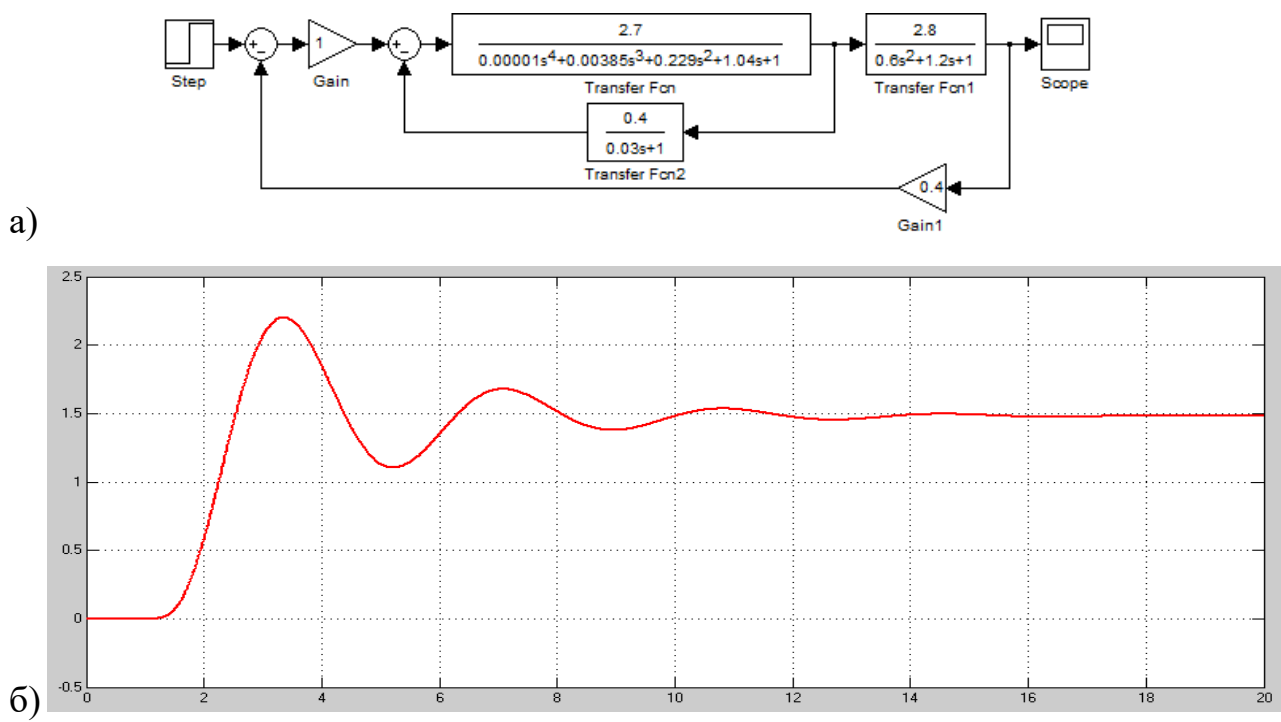


Рис. Ж.7. $K_{рб-кк}=2,8$

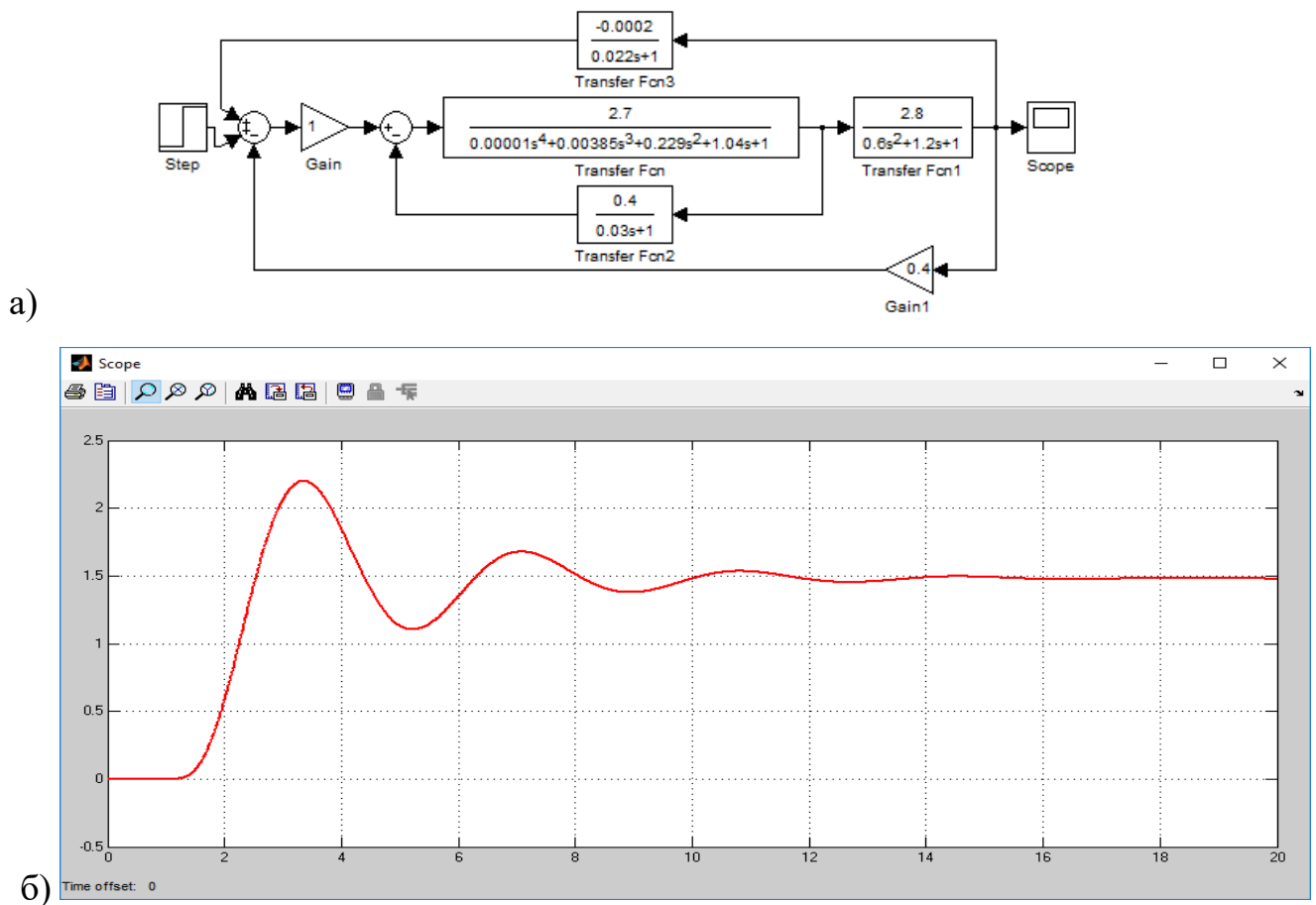


Рис. Ж.8. $K_{рб-кк}=2,8$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

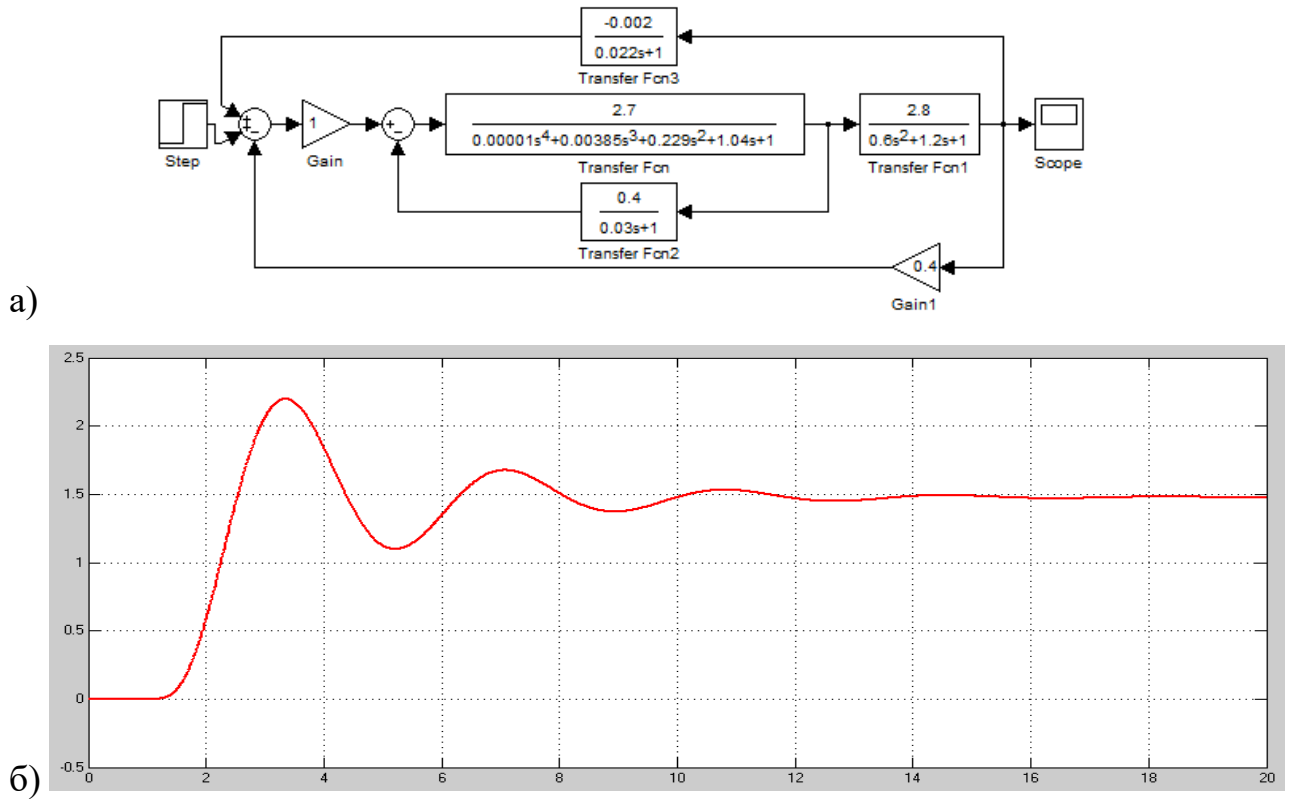


Рис. Ж.9. $K_{рб-кк}=2,8$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

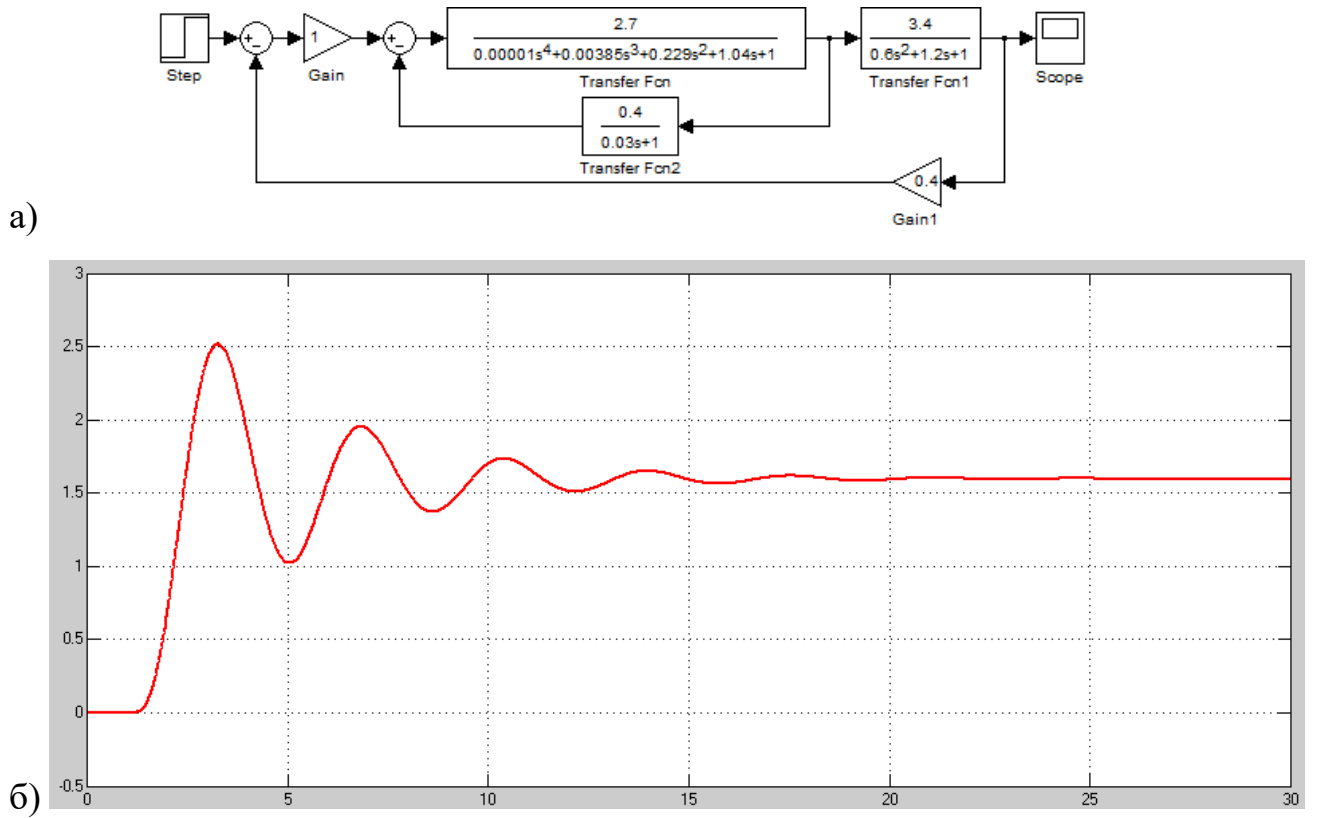


Рис. Ж.10. $K_{рб-кк}=3,4$

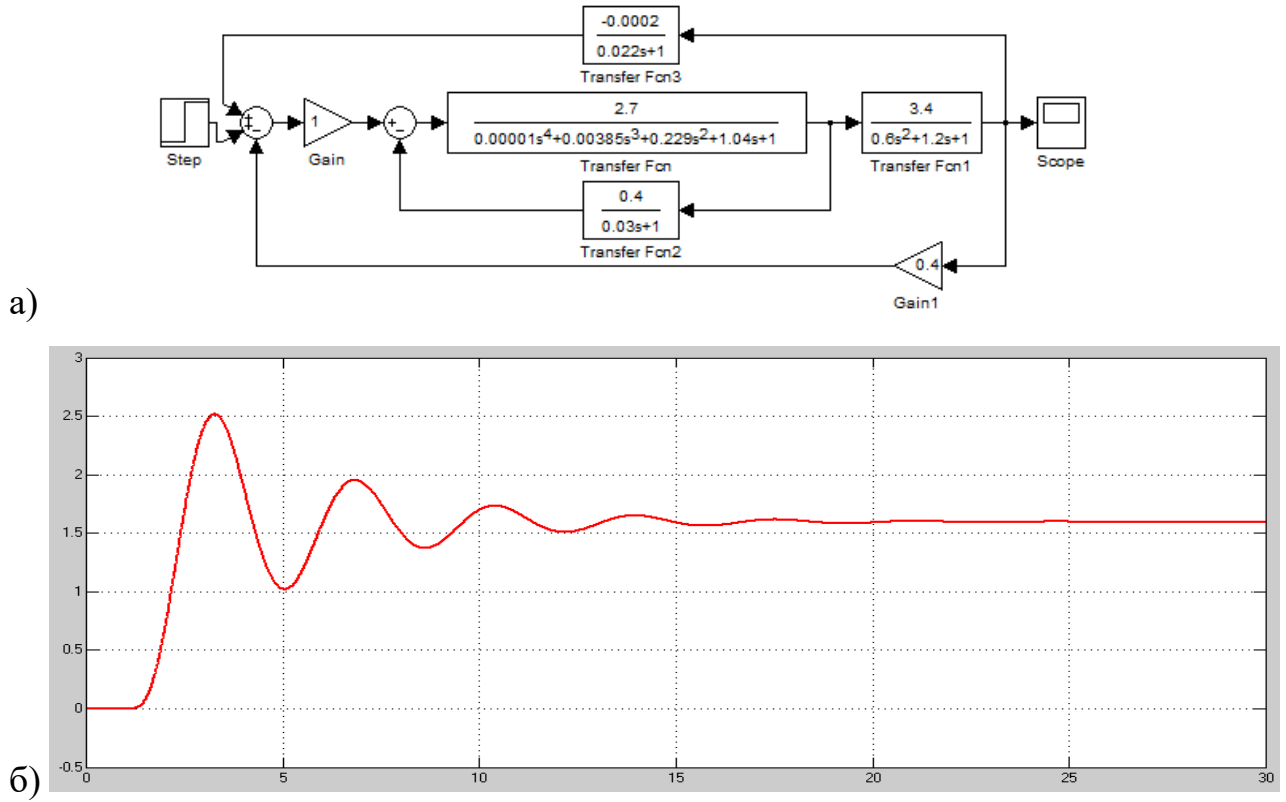


Рис. Ж.11. $K_{рб-кк}=3,4$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

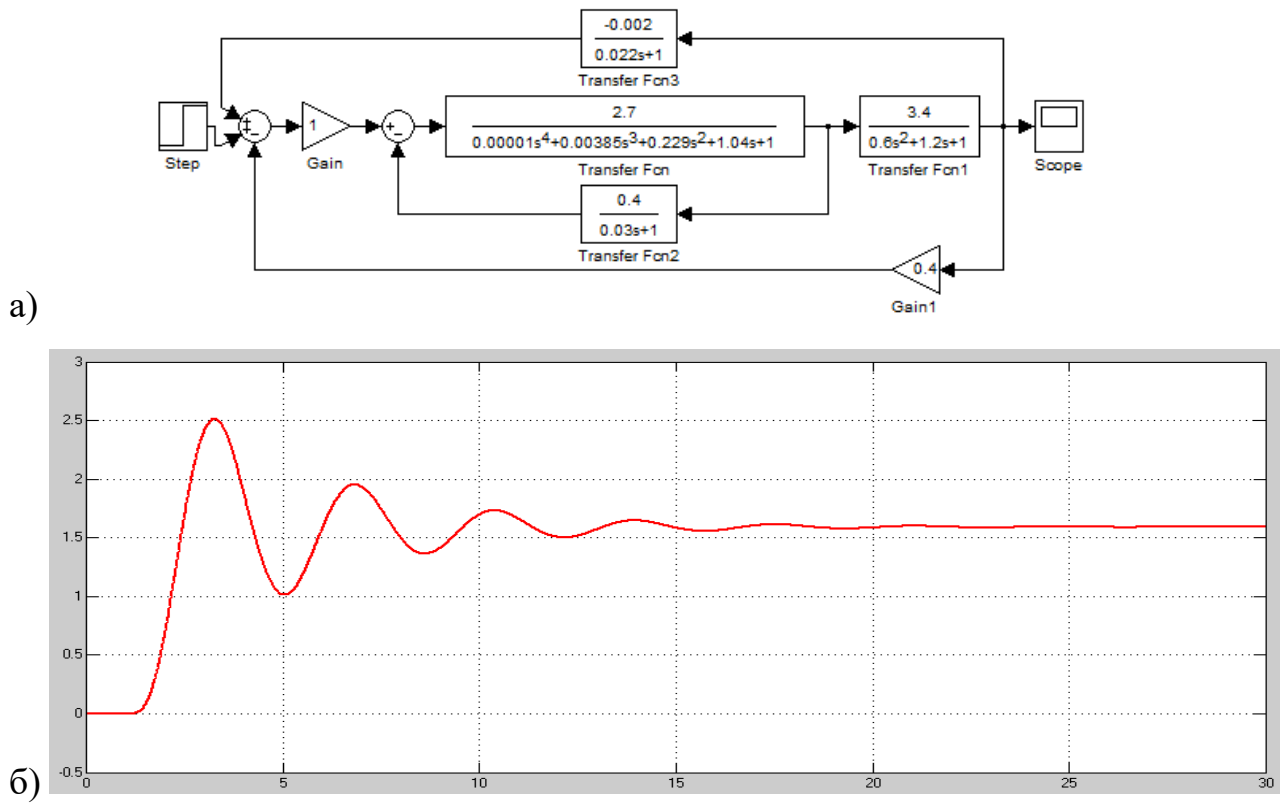


Рис. Ж.12. $K_{рб-кк}=3,4$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

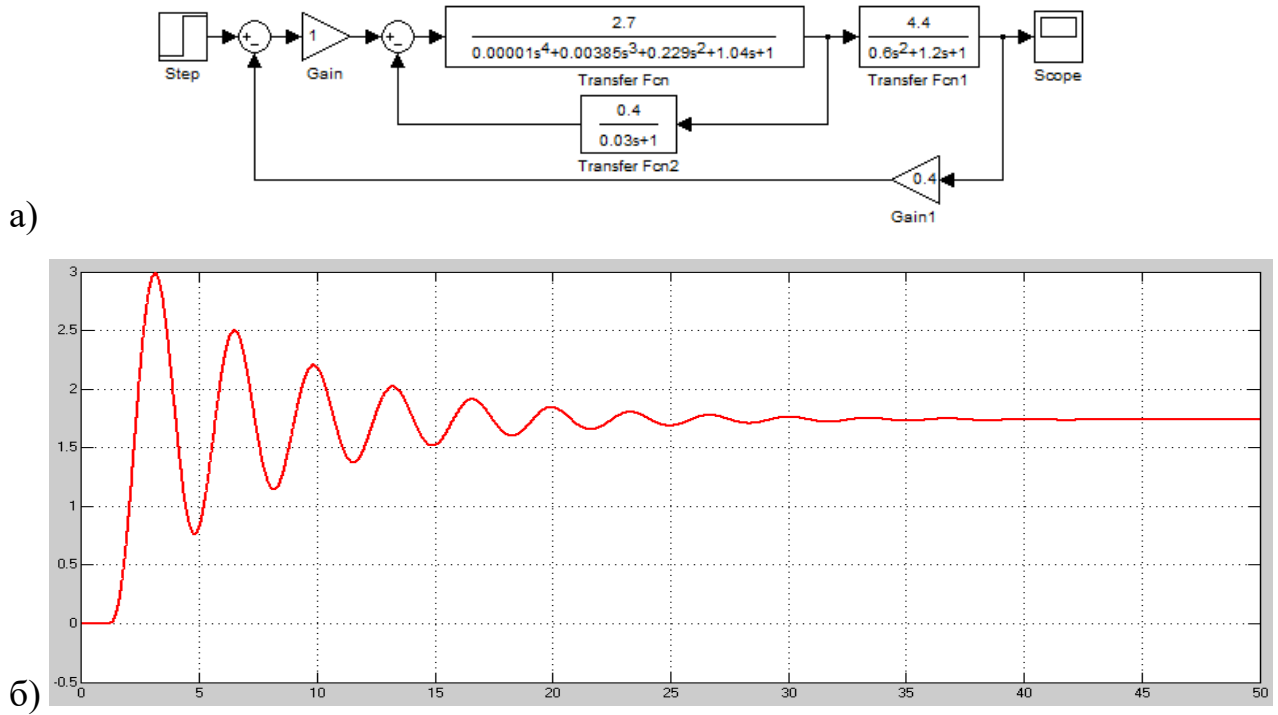


Рис. Ж.13. $K_{рб-кк}=4,4$

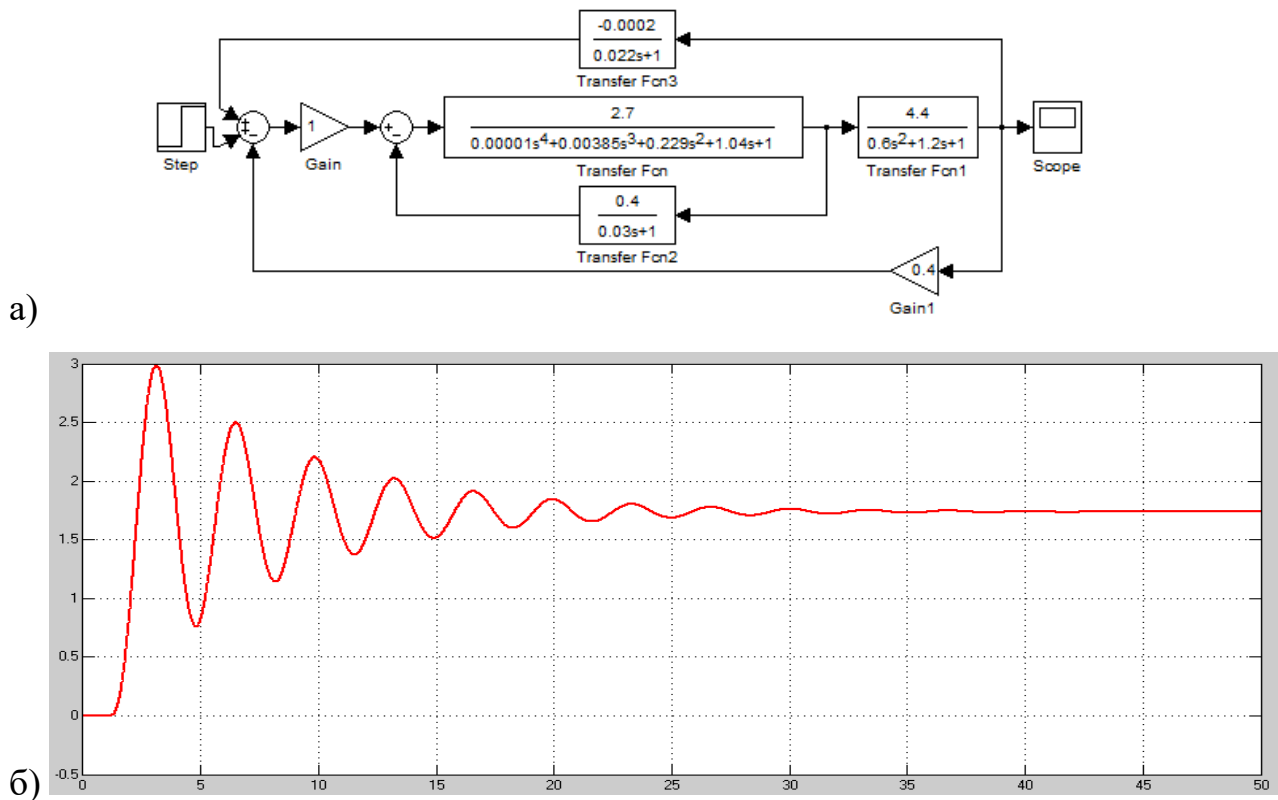


Рис. Ж.14. $K_{рб-кк}=4,4$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

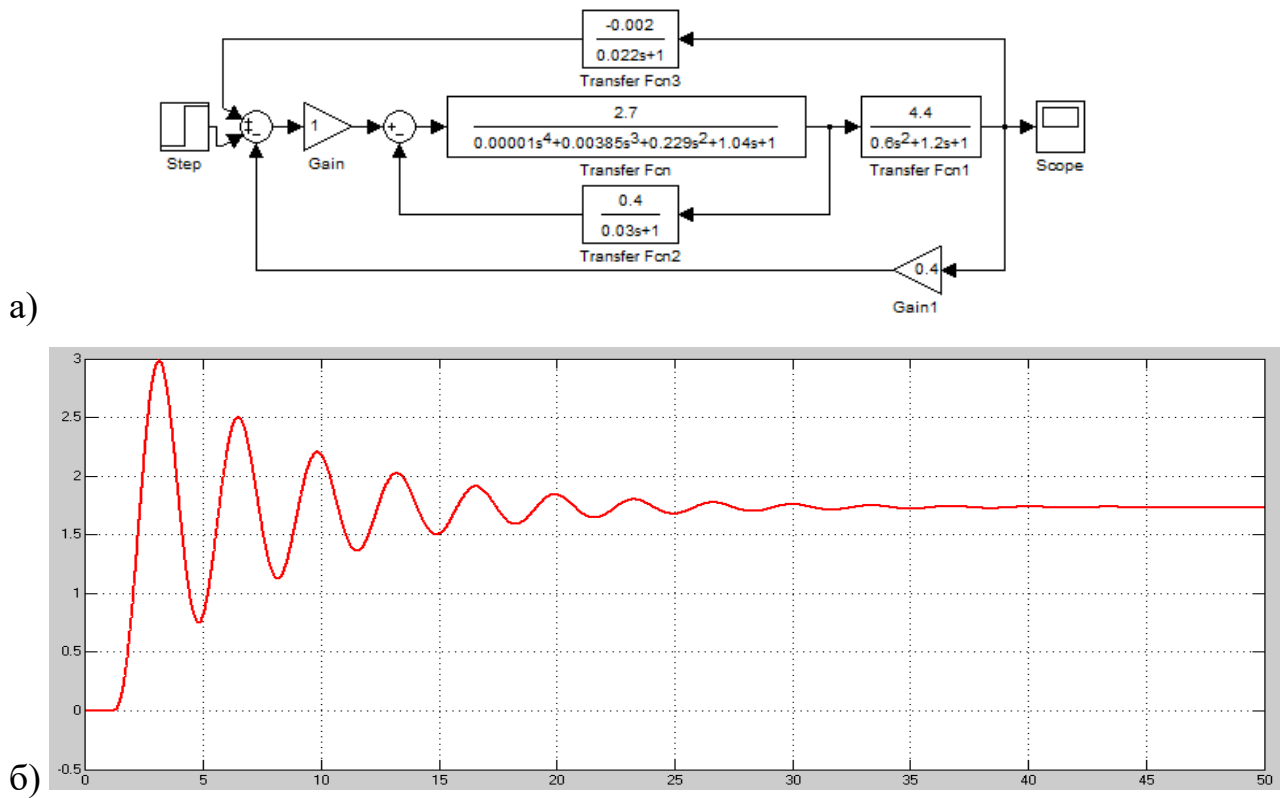


Рис. Ж.15. $K_{рб-кк}=4,4$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

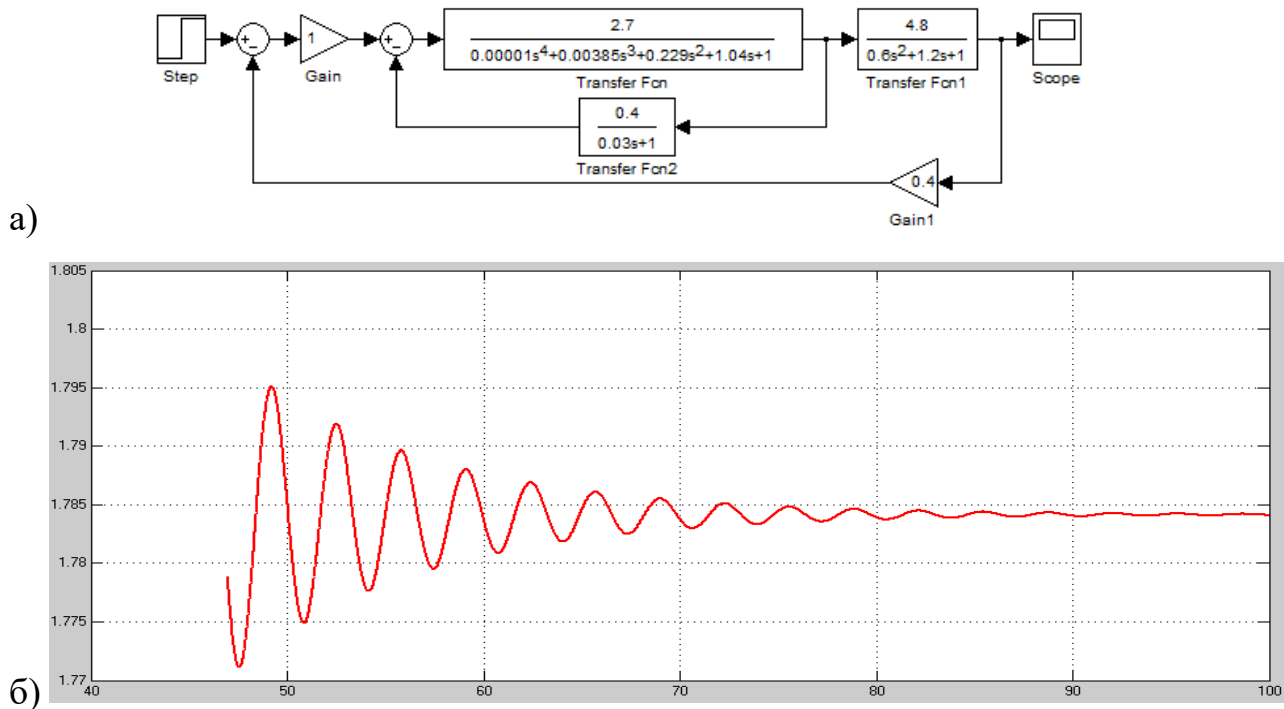


Рис. Ж.16. $K_{рб-кк}=4,8$

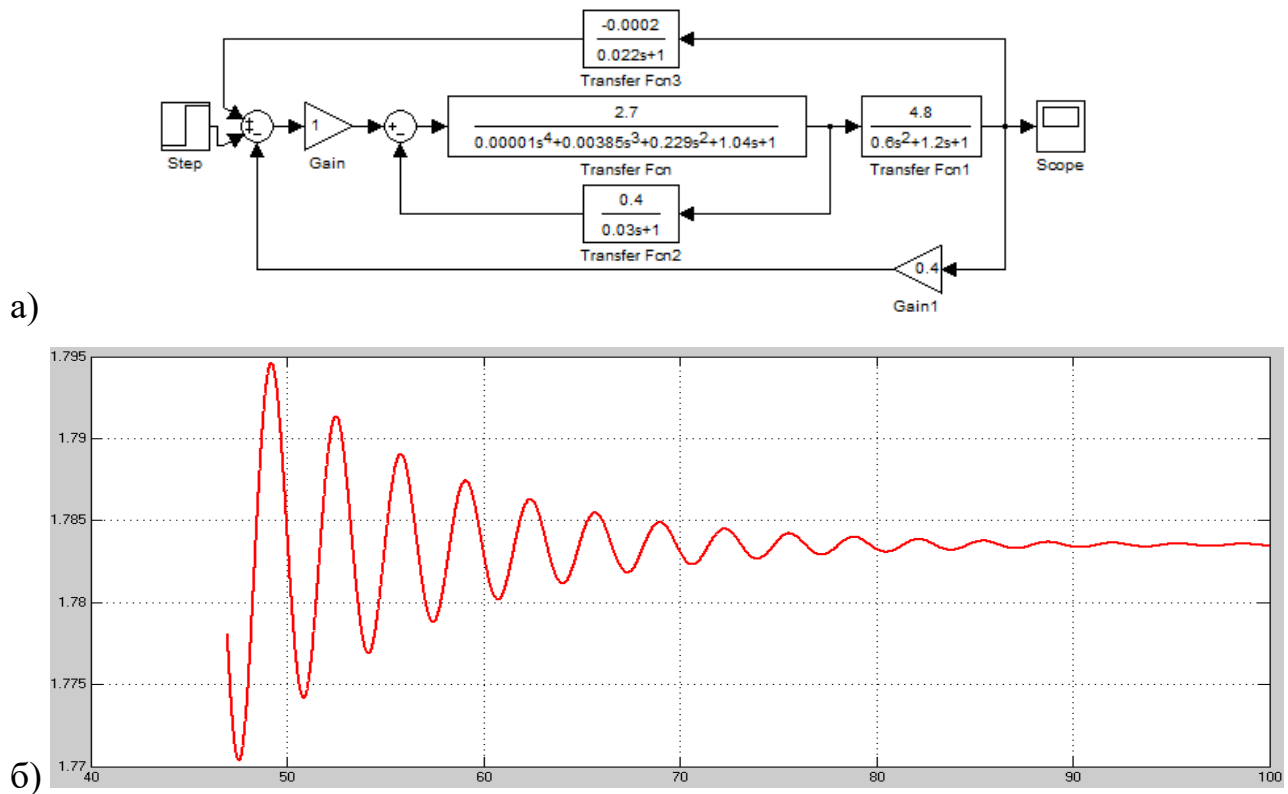


Рис. Ж.17. $K_{p\delta-kk}=4,8$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

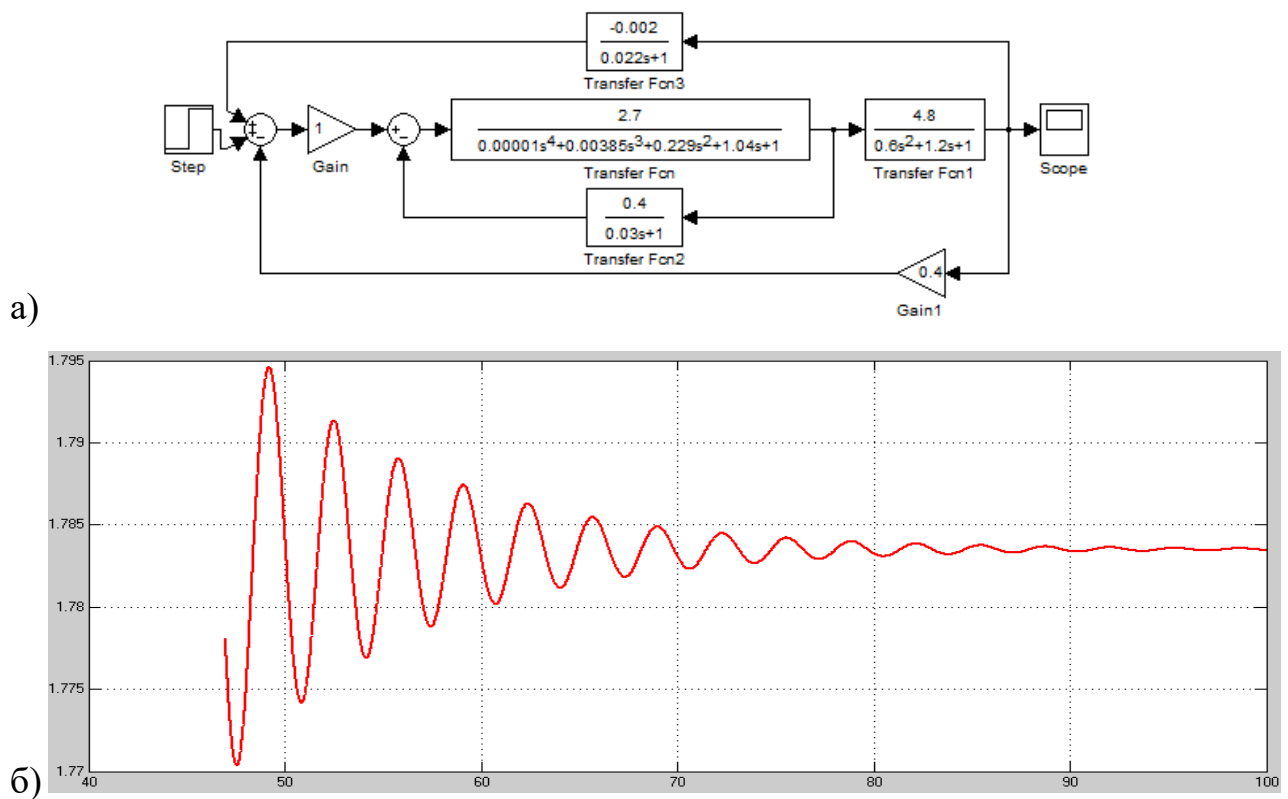


Рис. Ж.18. $K_{p\delta-kk}=4,8$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

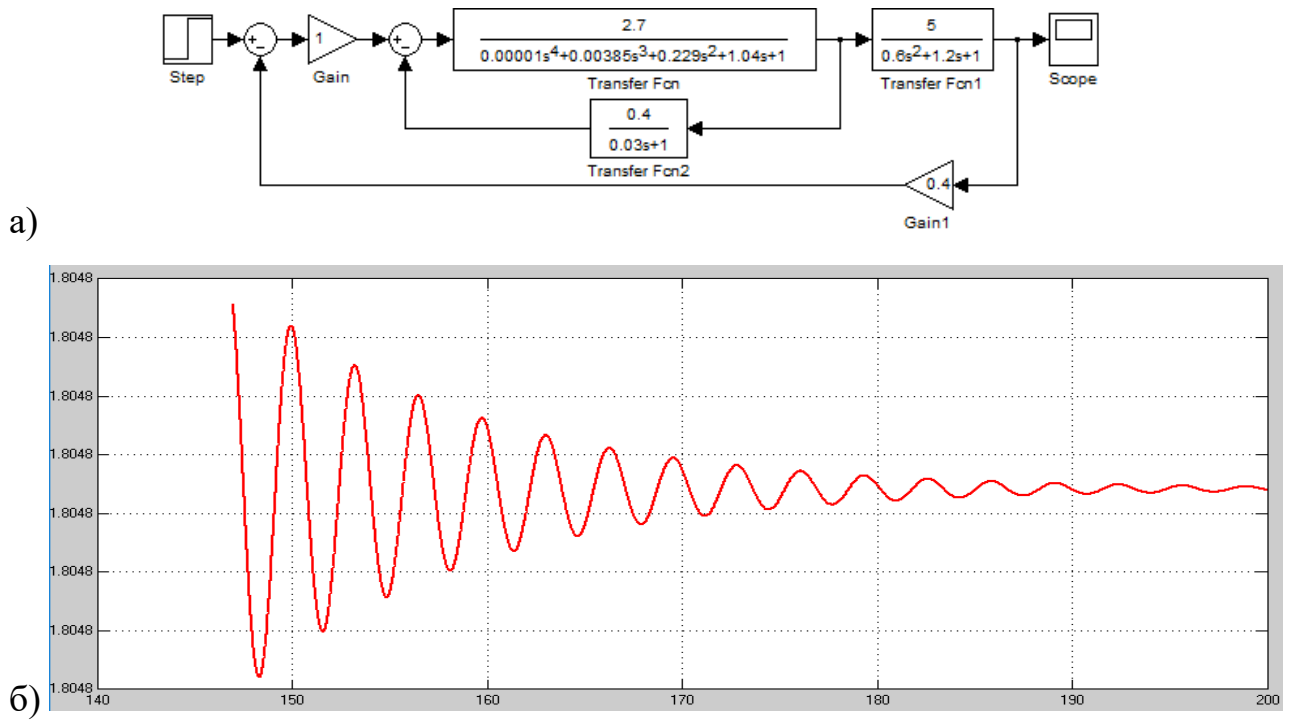


Рис. Ж.19. $K_{рб-кк}=5$

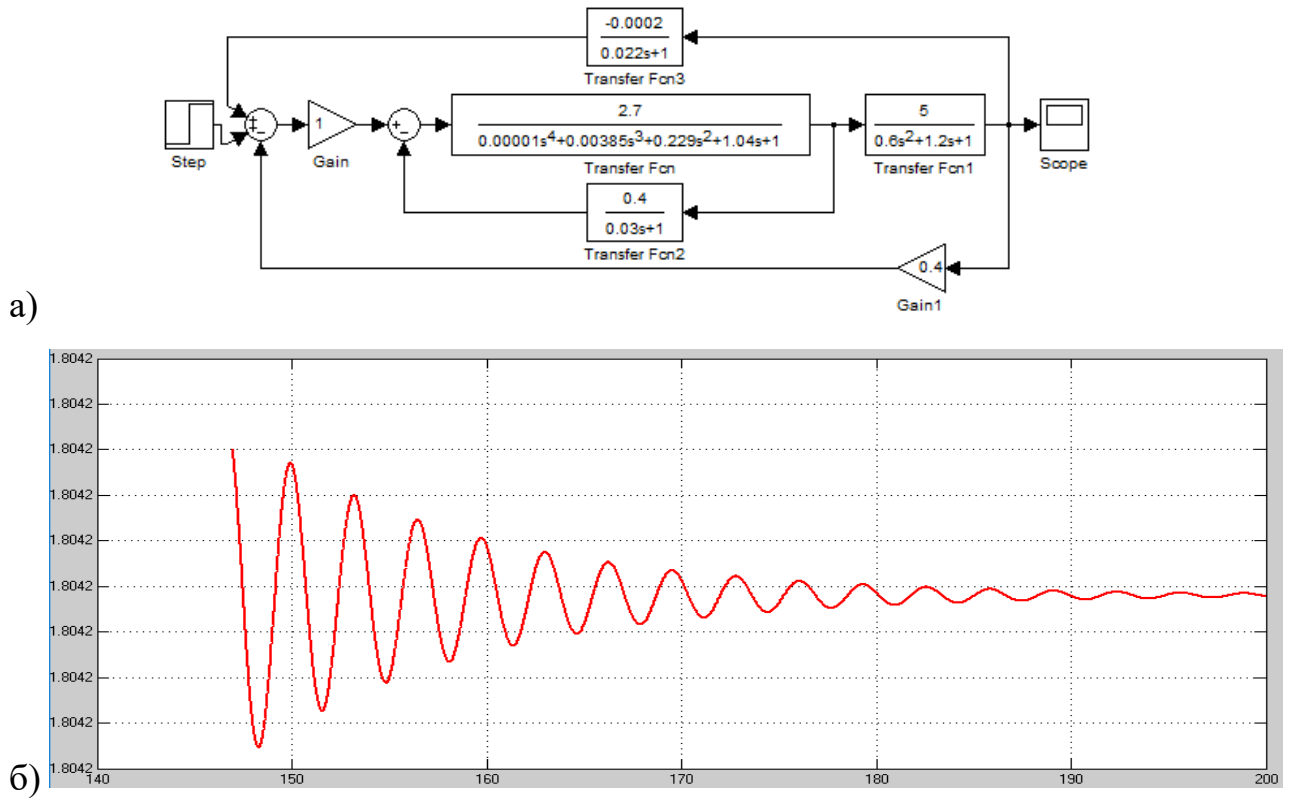


Рис. Ж.20. $K_{рб-кк}=5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002, T=0,022$)

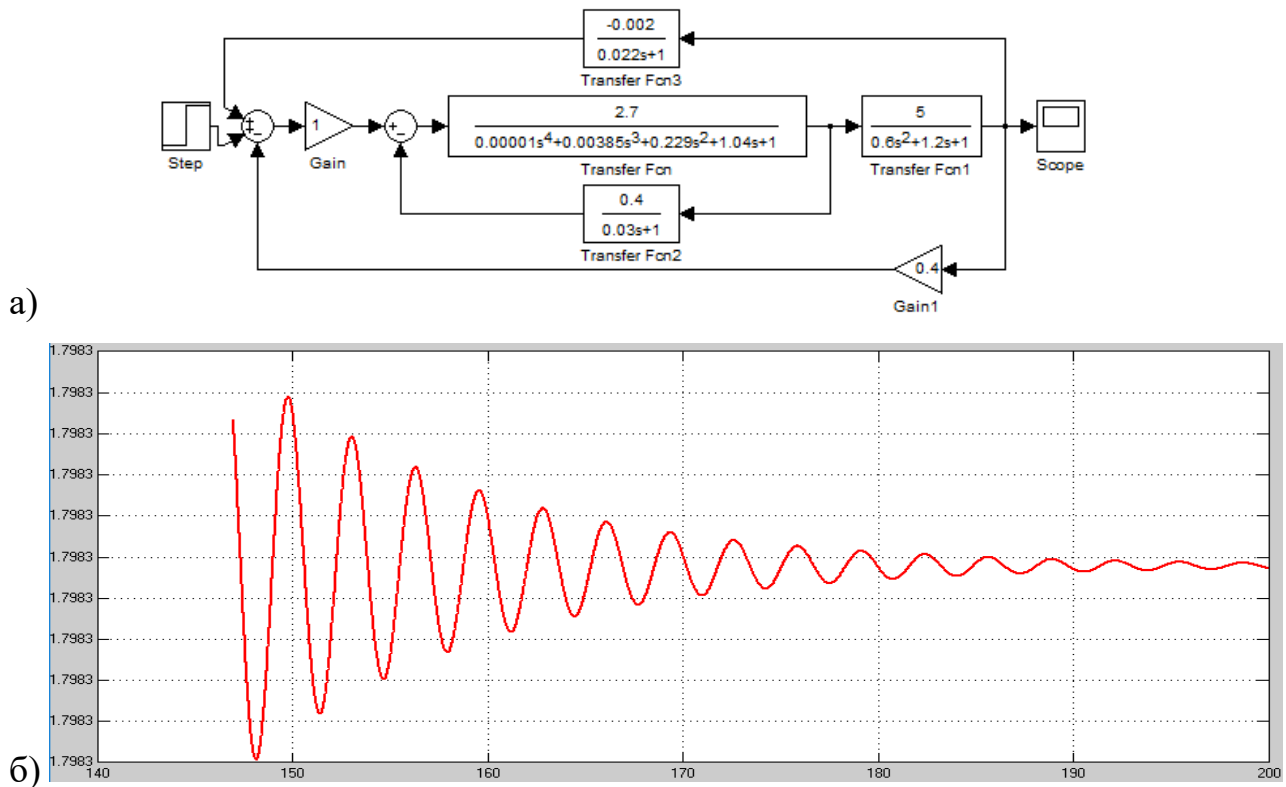


Рис. Ж.21. $K_{р\delta-кк}=5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

Алгоритмічні структурні системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна електробура (а) та її перехідні характеристики (б) при різних умовах наведені на рис. Ж. 22-42.

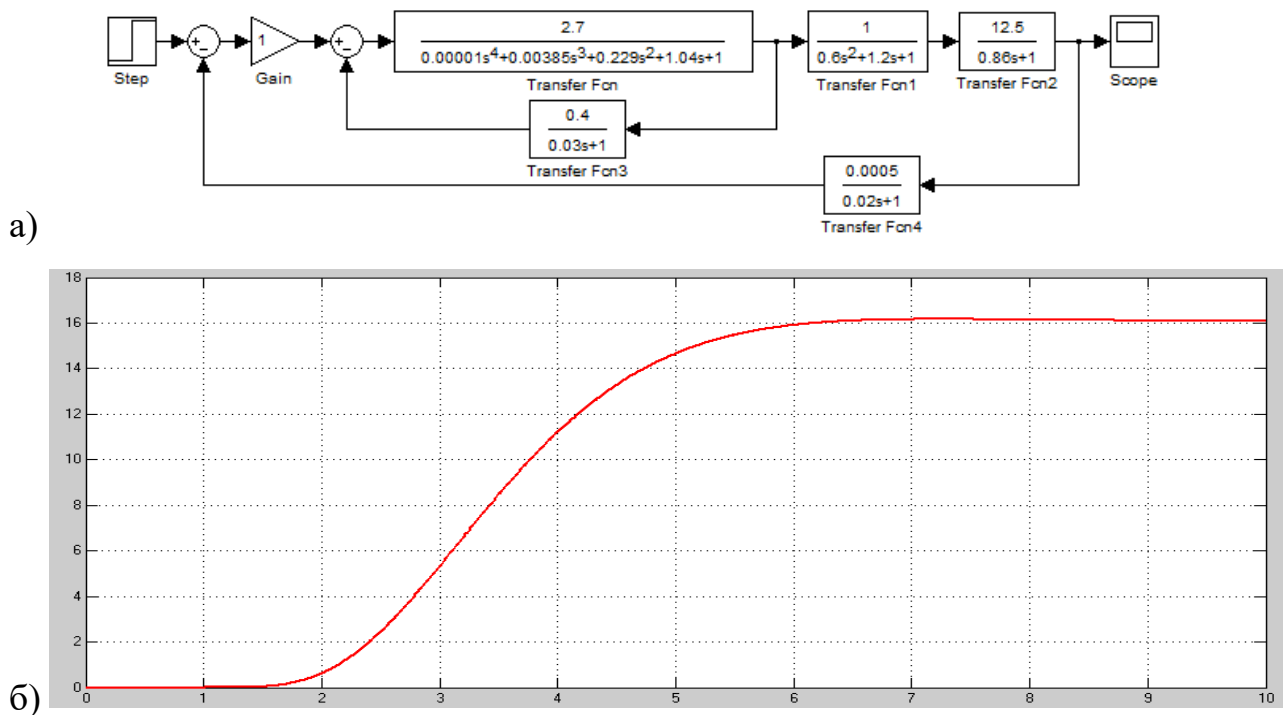


Рис. Ж.22. $K_{р\delta-кк}=1$, $K_e=12,5$

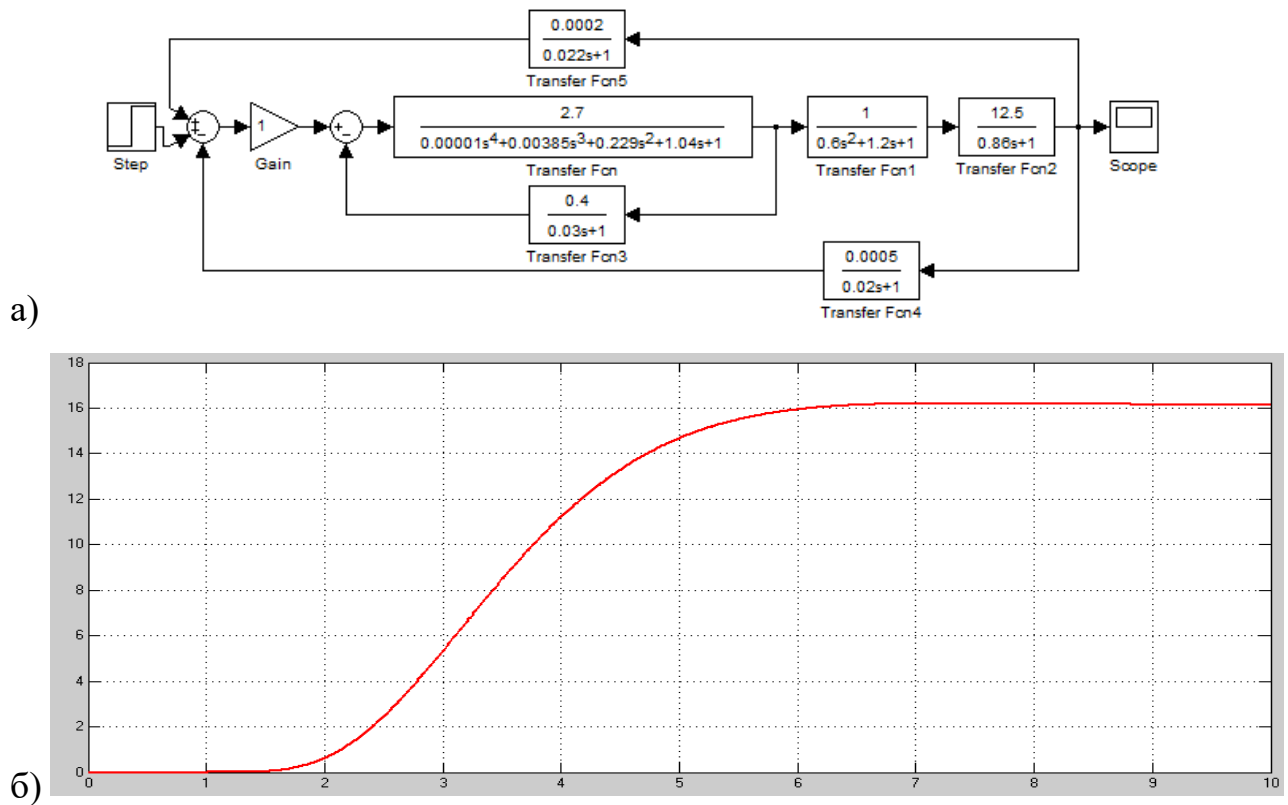


Рис. Ж.23. $K_{рб-кк}=1$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

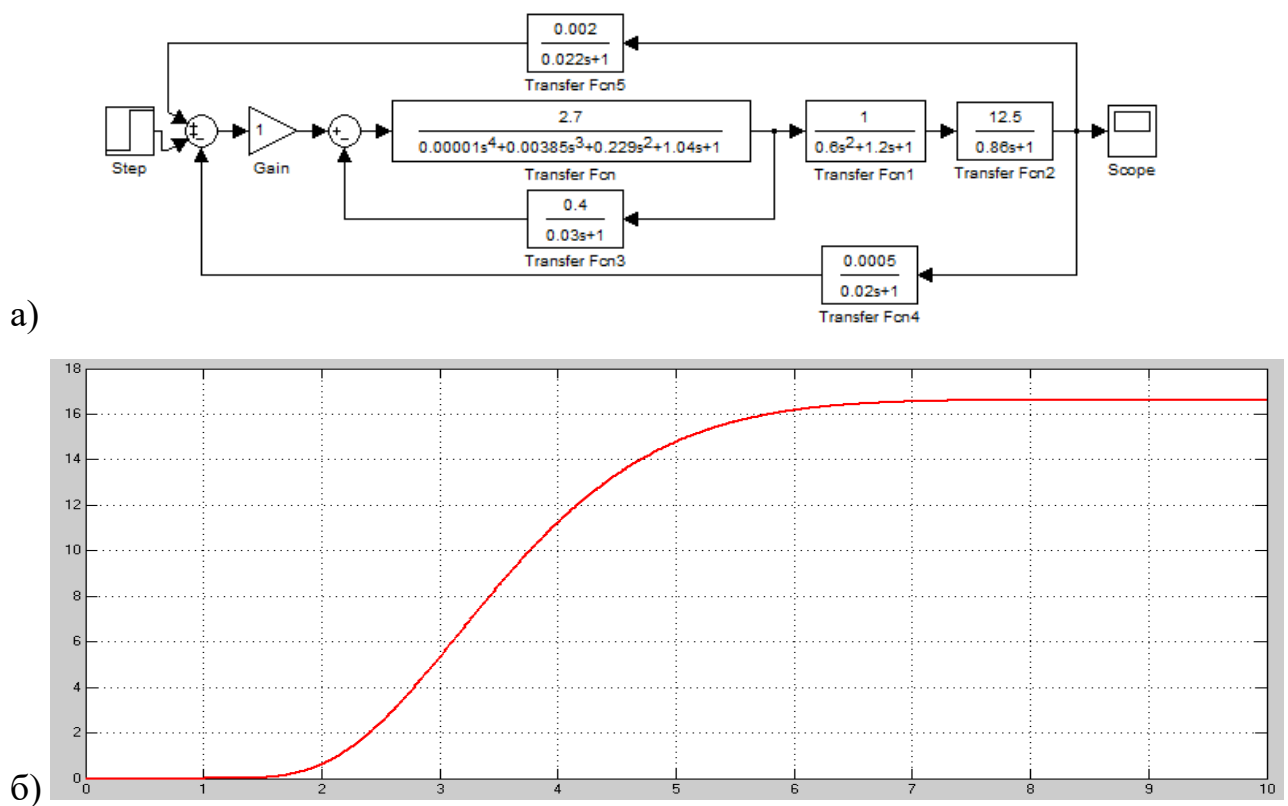


Рис. Ж.24. $K_{рб-кк}=1$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

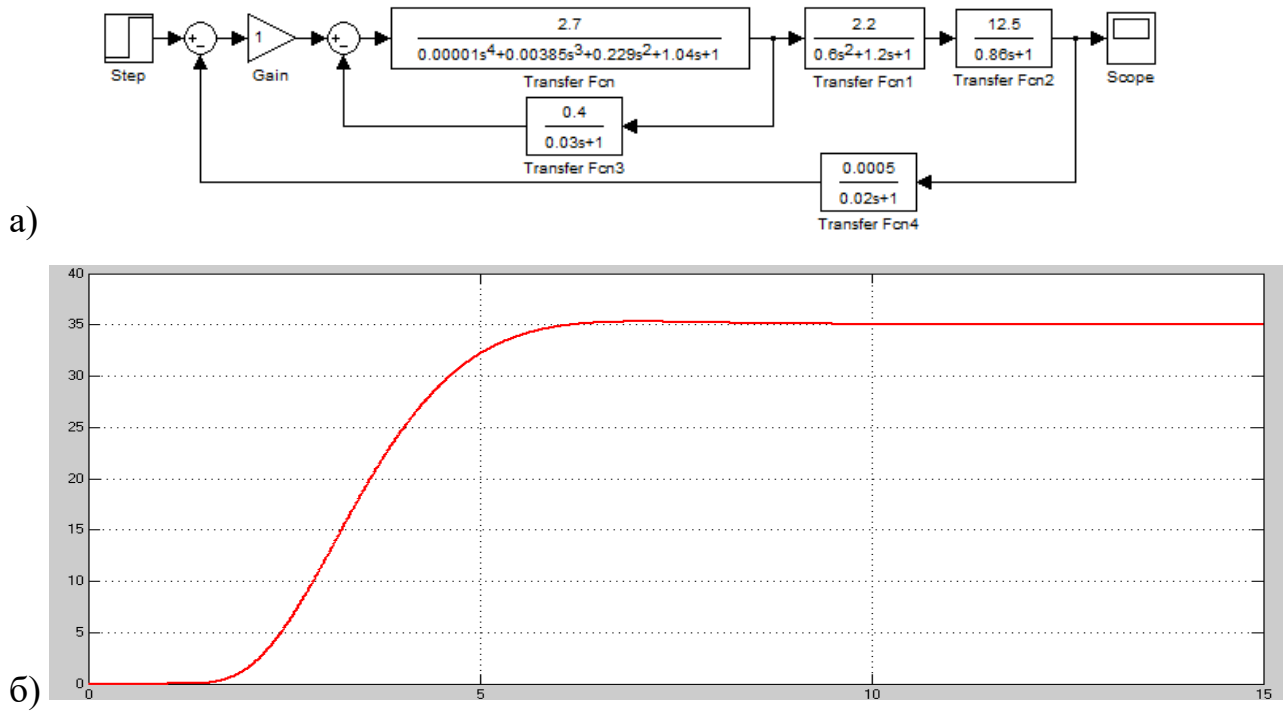


Рис. Ж.25. $K_{рб-кк}=2,2$, $K_e=12,5$

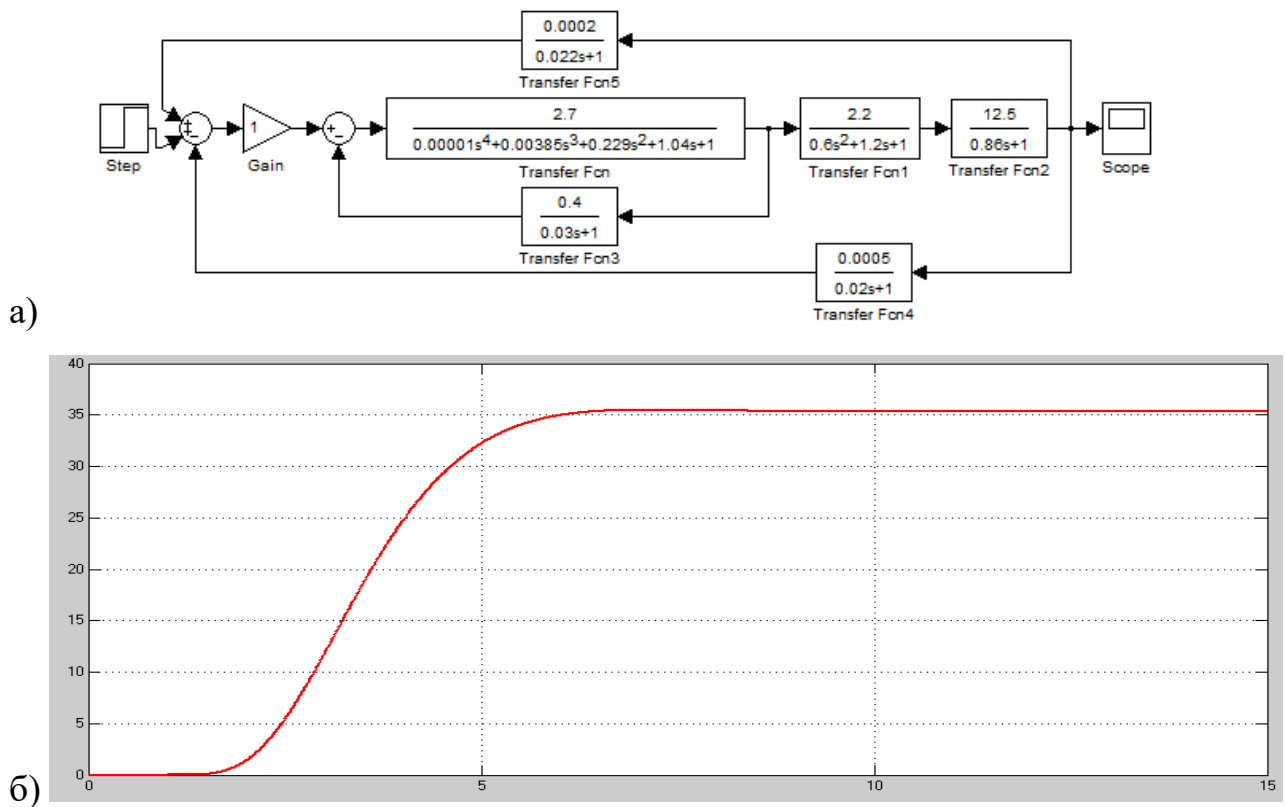


Рис. Ж.26. $K_{рб-кк}=2,2$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

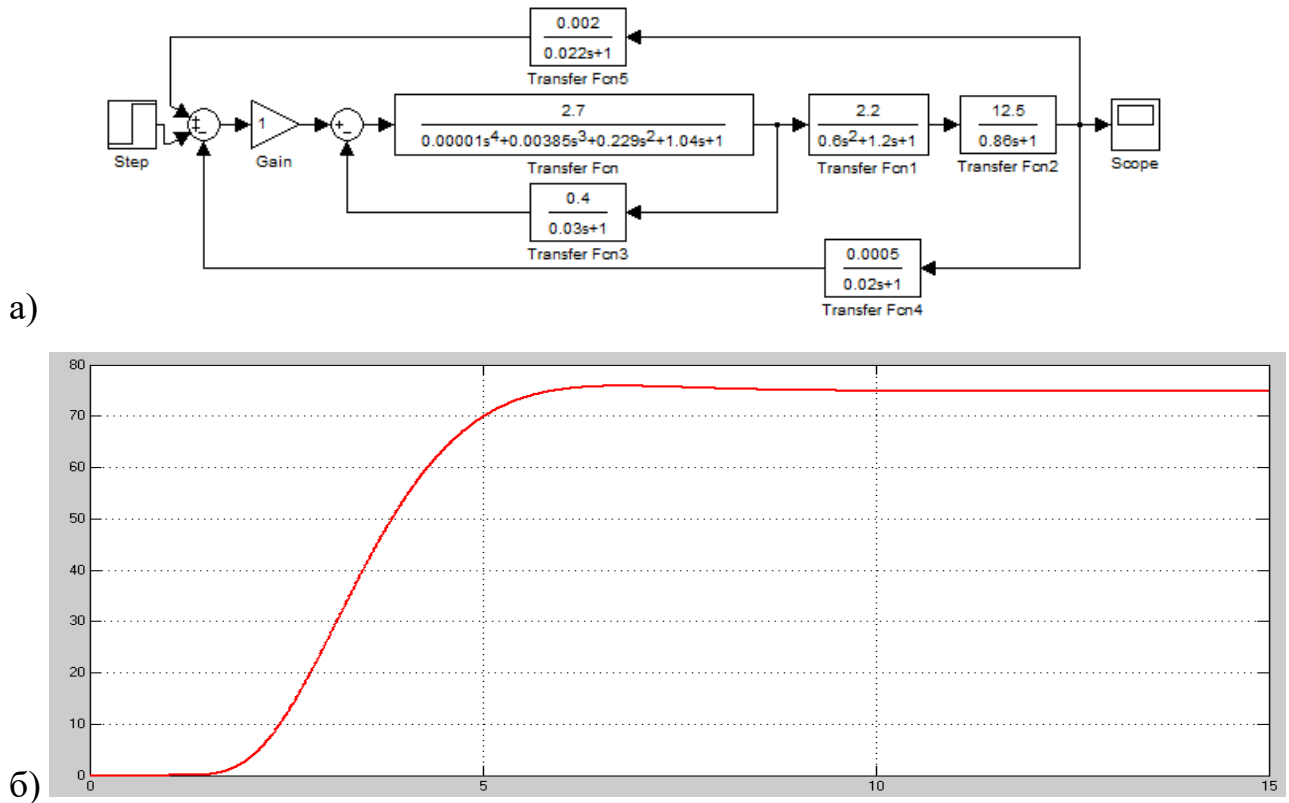


Рис. Ж.27. $K_{p\delta-KK}=2,2$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

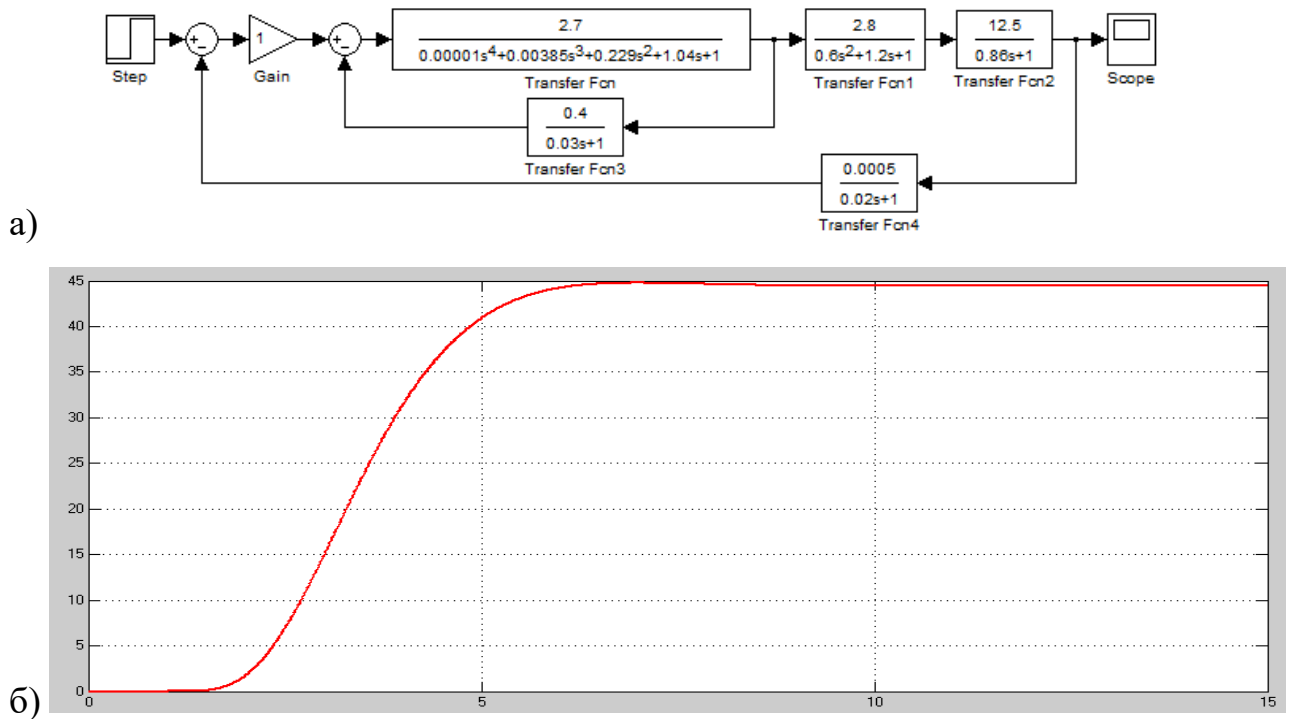


Рис. Ж.28. $K_{p\delta-KK}=2,8$, $K_e=12,5$

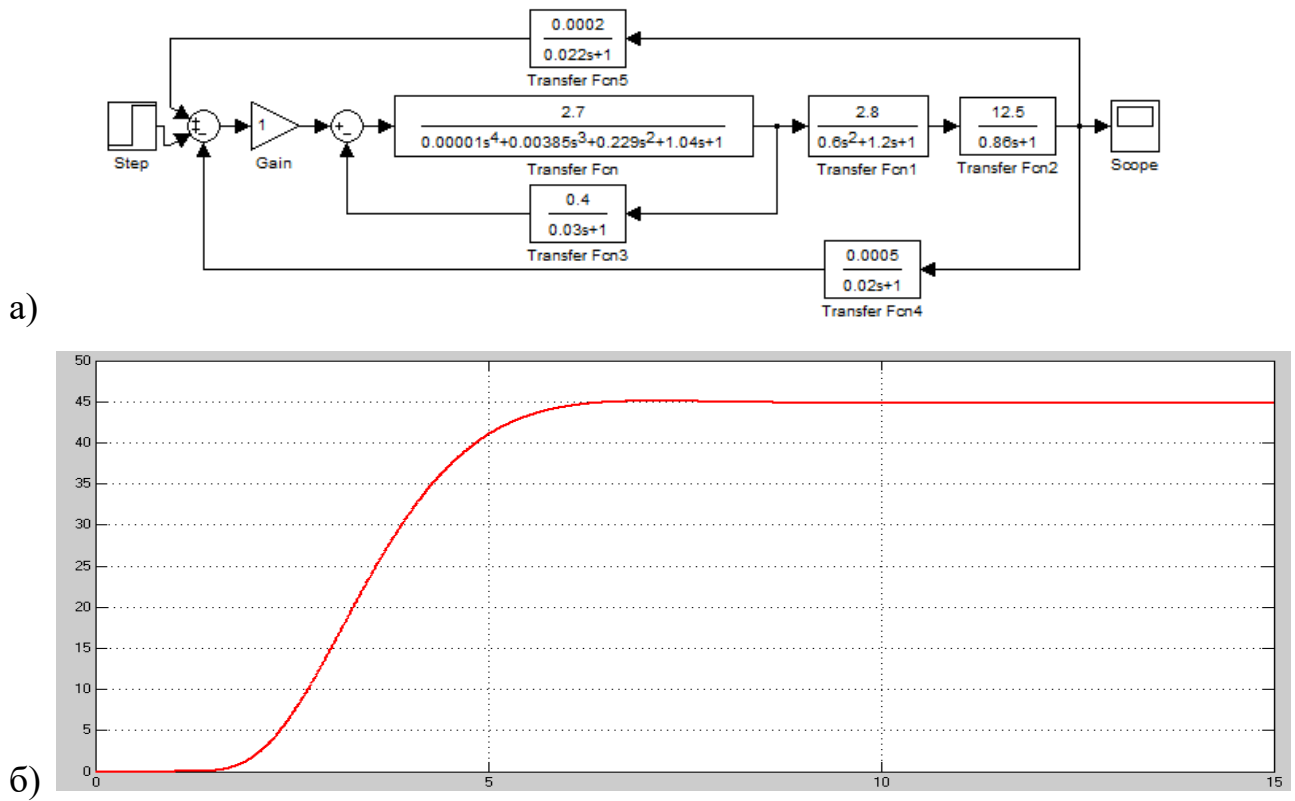


Рис. Ж.29. $K_{рб-кк}=2,8$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

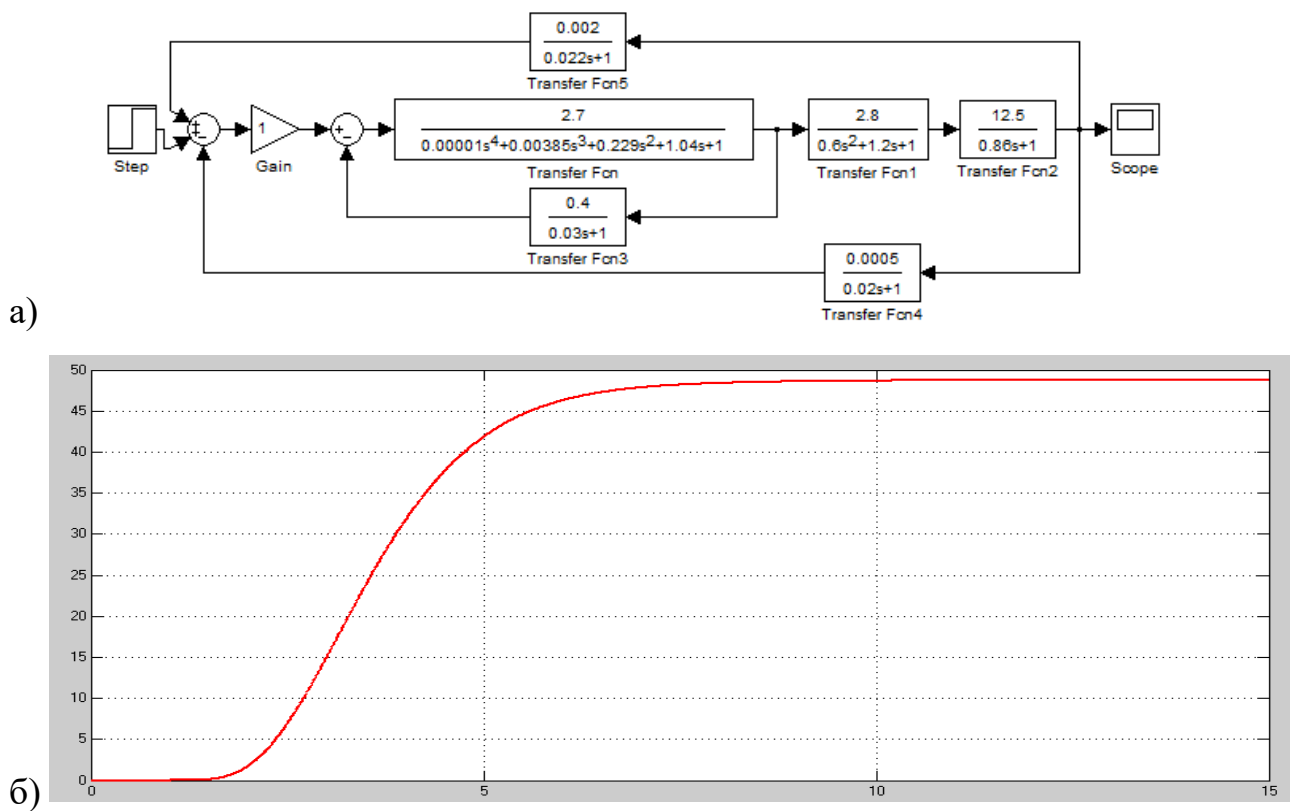


Рис. Ж.30. $K_{рб-кк}=2,8$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

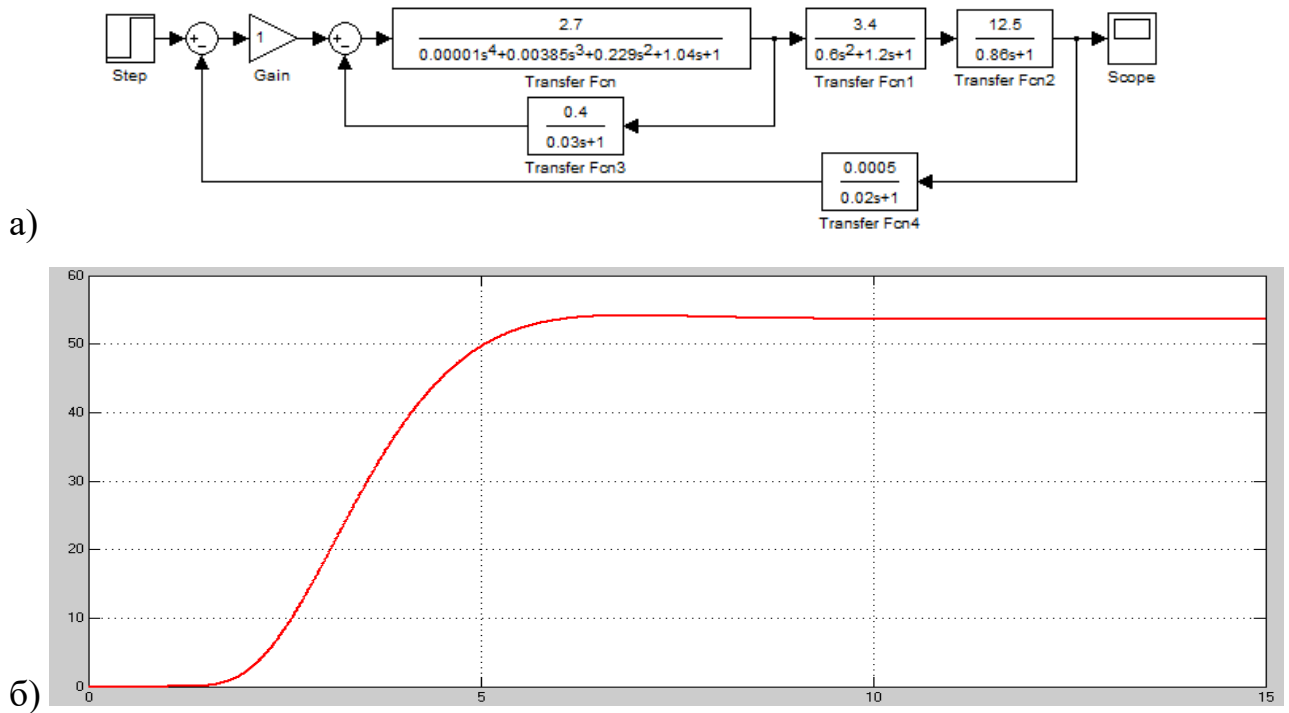


Рис. Ж.31. $K_{p\delta-KK}=3,4, K_e=12,5$

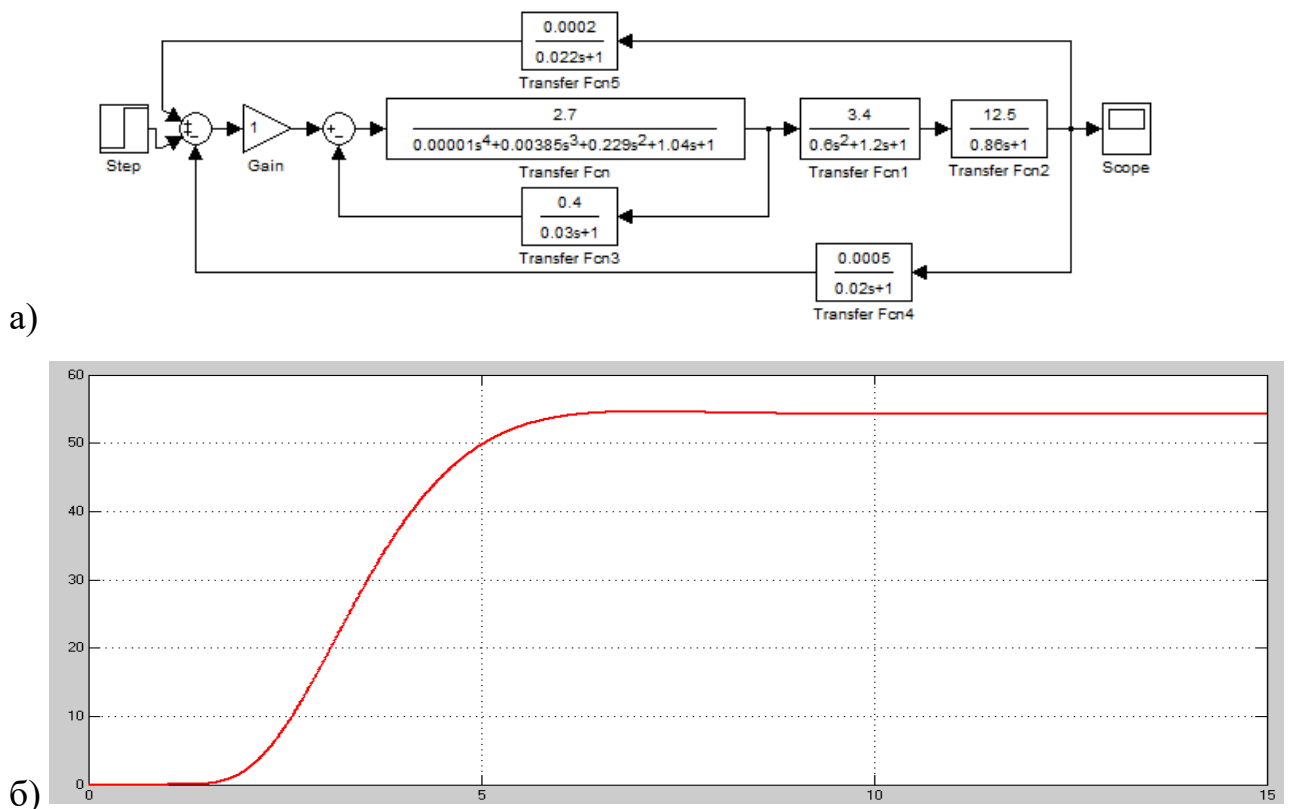
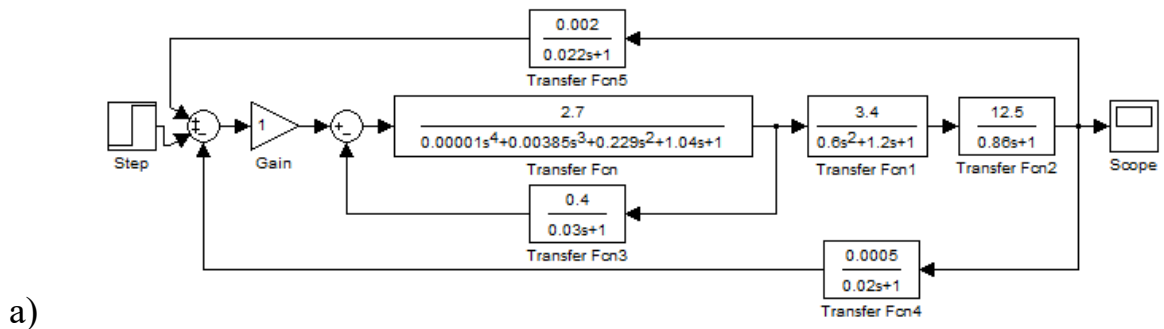
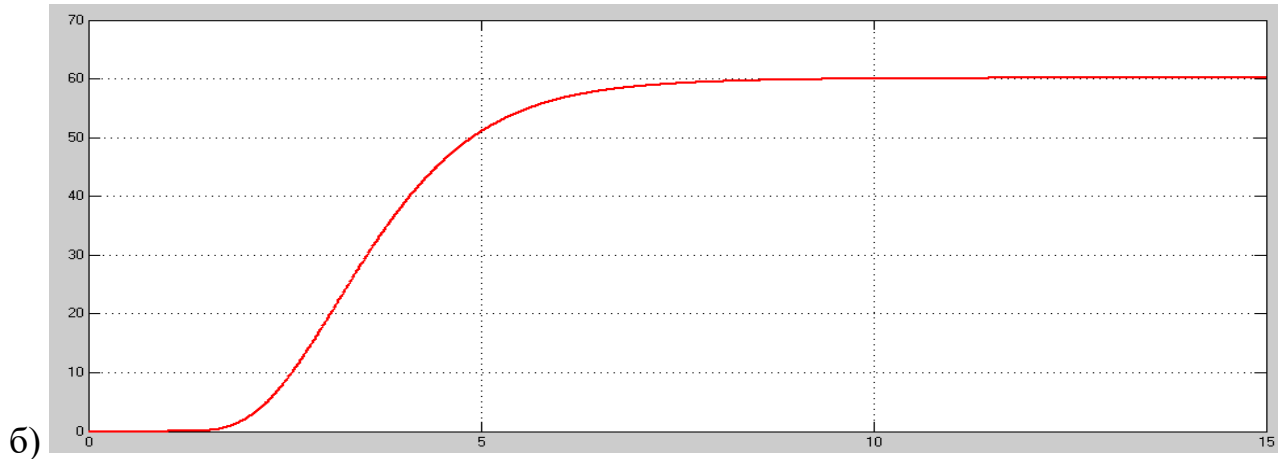


Рис. Ж.32. $K_{p\delta-KK}=3,4, K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002, T=0,022$)

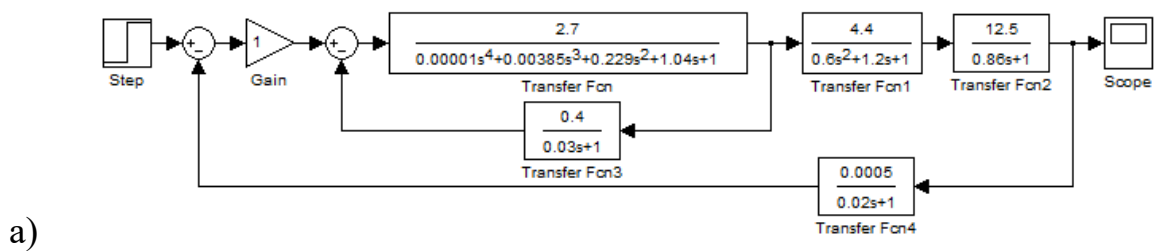


a)

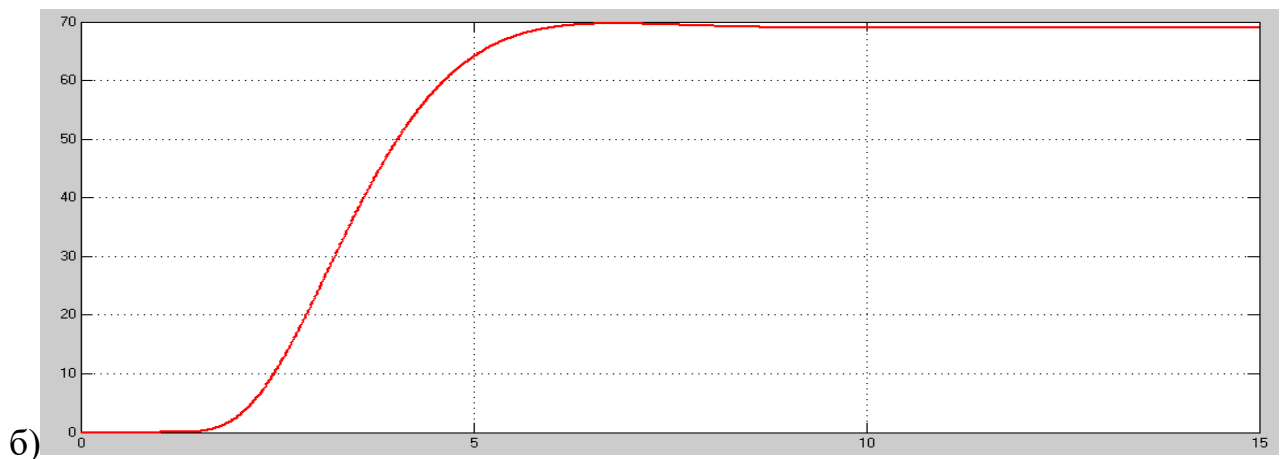


б)

Рис. Ж.33. $K_{p\delta-KK}=3,4$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)



a)



б)

Рис. Ж.34. $K_{p\delta-KK}=4,4$, $K_e=12,5$

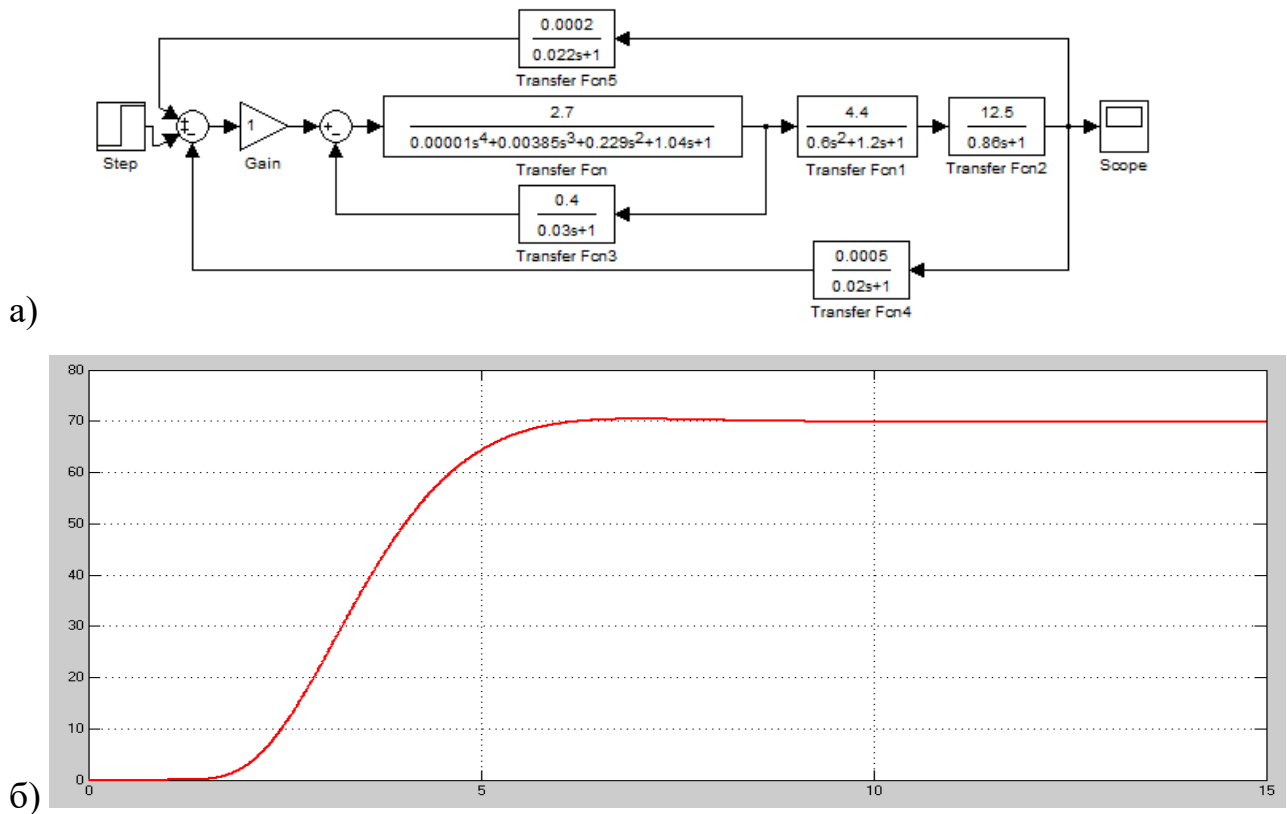


Рис. Ж.35. $K_{рб-кк}=4,4$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,0002$, $T=0,022$)

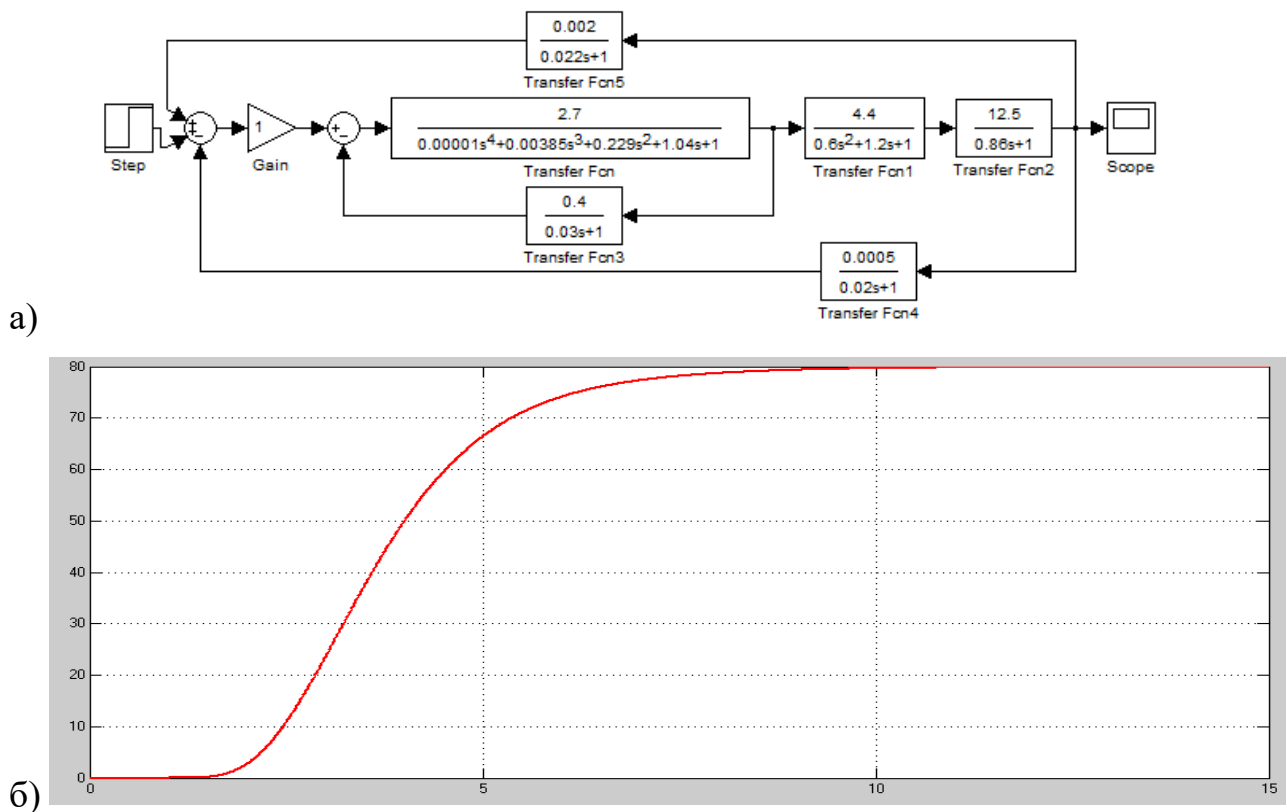


Рис. Ж.36. $K_{рб-кк}=4,4$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

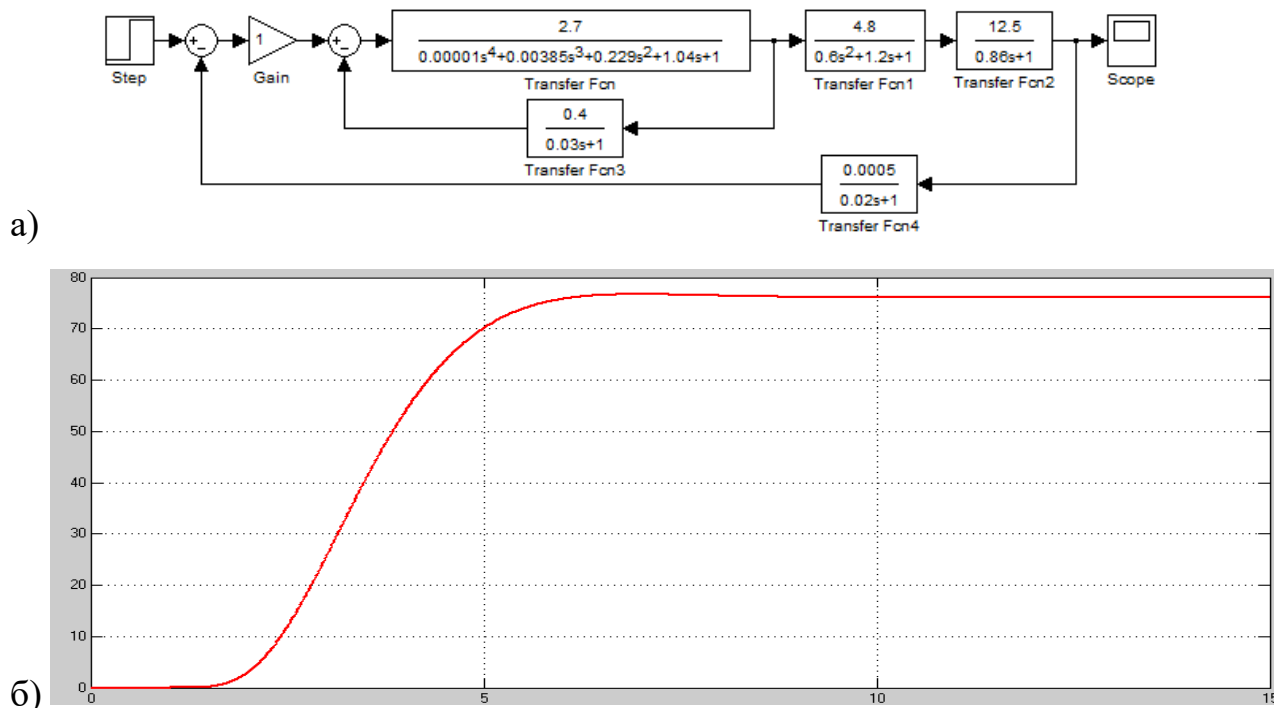


Рис. Ж.38. $K_{p\delta-KK}=4,8$, $K_e=12,5$

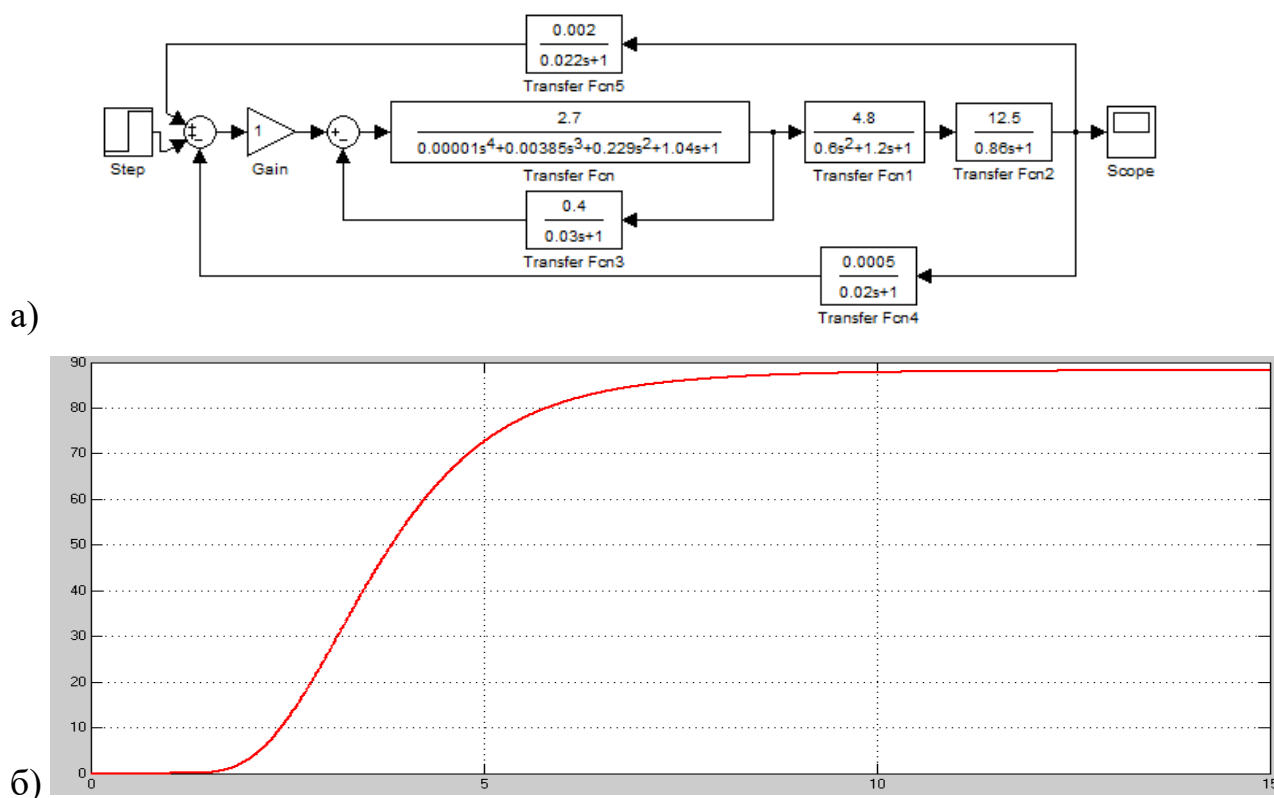
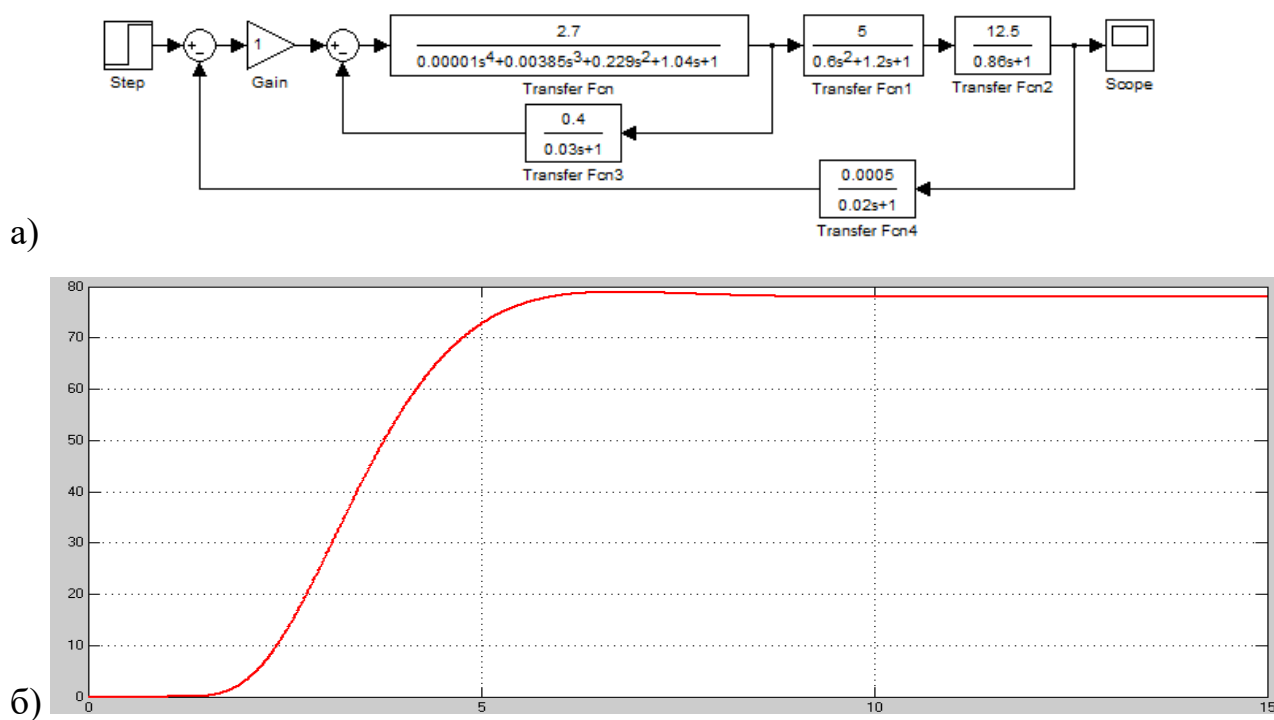
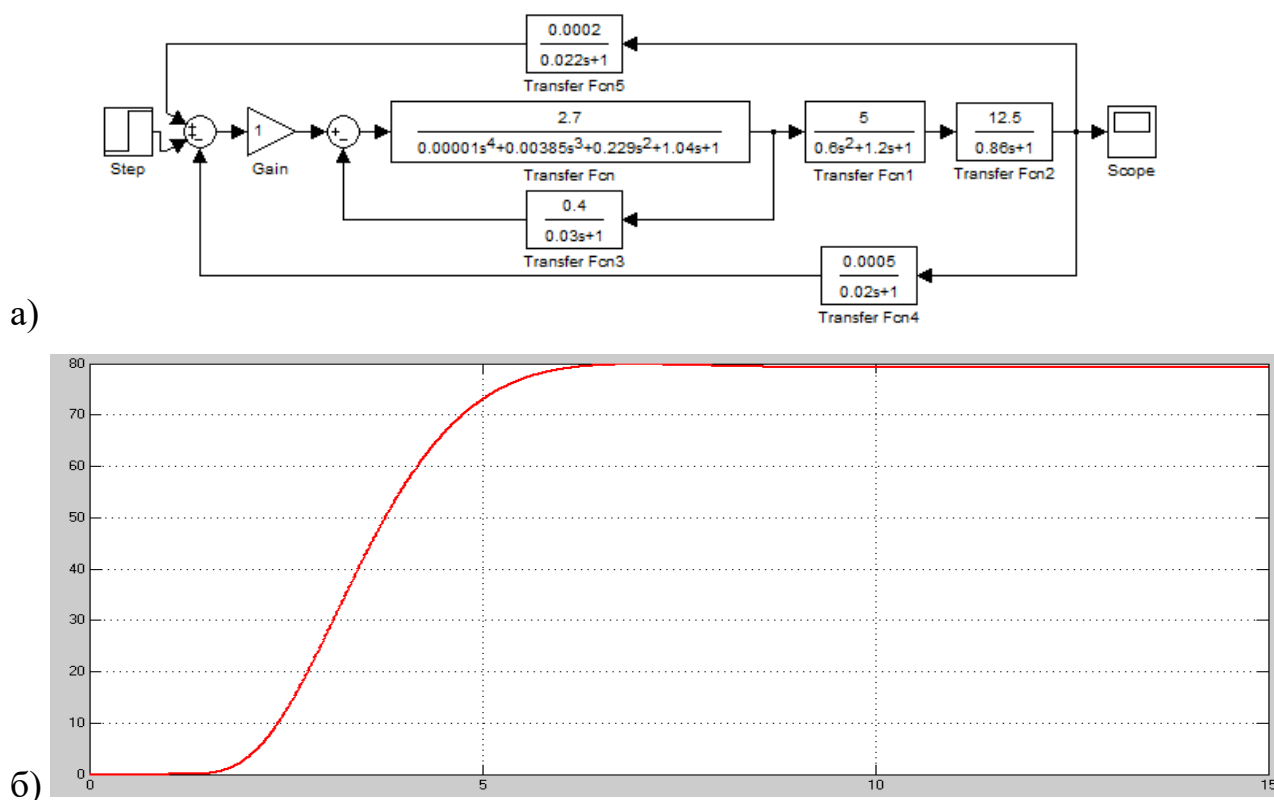


Рис. Ж.39. $K_{p\delta-KK}=4,8$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

Рис. Ж.40. $K_{p\delta-KK}=5$, $K_e=12,5$ Рис. Ж.41. $K_{p\delta-KK}=5$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

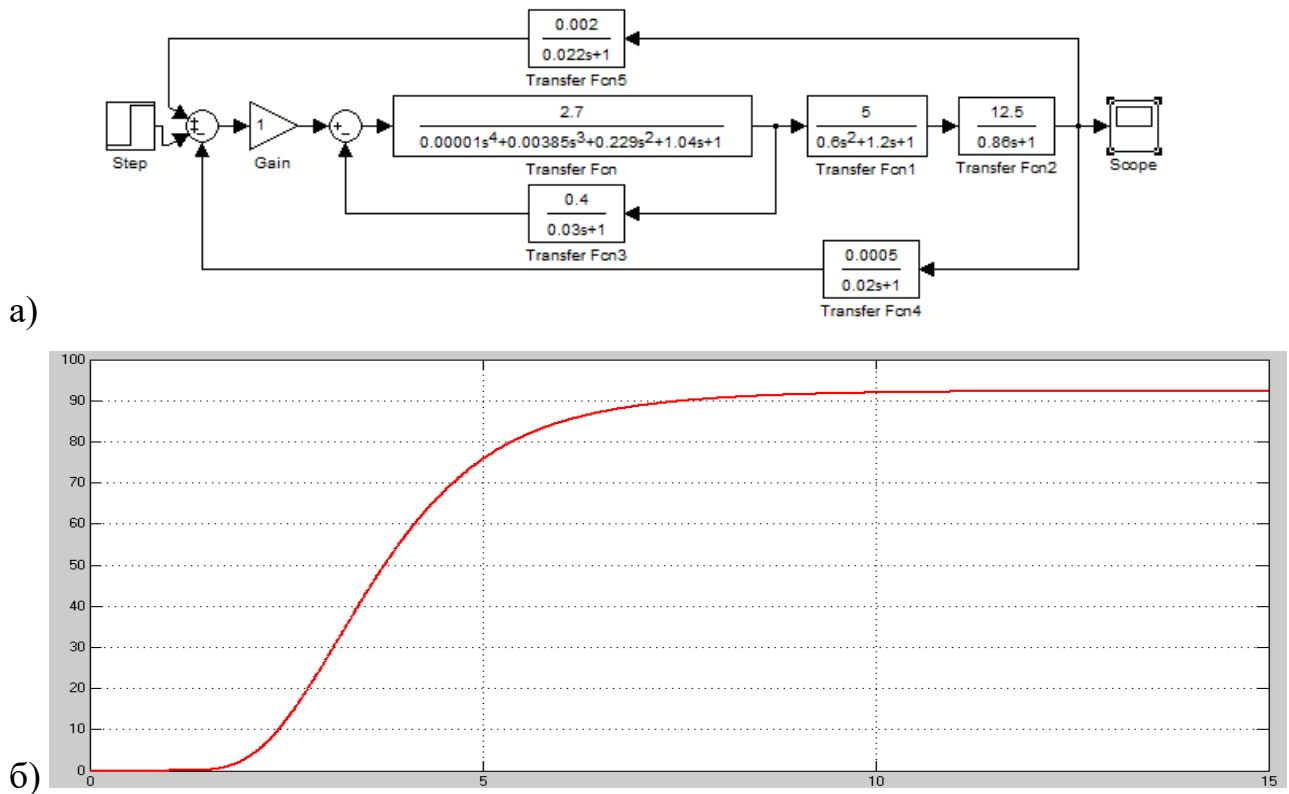


Рис. Ж.42. $K_{р\delta-кк}=5$, $K_e=12,5$ та із зворотнім зв'язком ($K=0,002$, $T=0,022$)

Додаток 3

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Kopystynskyy L., Kropyvnytska V., Lagoyda A., Sementsov G. Analysis of Interrelations Between the Criteria Of Optimal Control Over The Process of Drilling the Wells. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2/3 (86) : Control Processes. 2017. P. 40-50. ISSN 1729-3774 (індексується та реферується наукометричними базами Scopus, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus та ін.).

Досліджено взаємозв'язки критеріїв оптимального управління процесом буріння свердловин.

2. Kropyvnytska V. Kopystynskyy L., Sementsov G. Development of a Set of Methods for Preforecasting Fractal Time Series Analysis to Determine the Level of Persistence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3/4 (87) : Mathematics and Cybernetics. Applied Aspects. 2017. P. 10-17. ISSN 1729-3774 (індексується та реферується наукометричними базами Scopus, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus та ін.).

Здійснено передпрогнозний фрактальний аналіз часових рядів для визначення рівнів персистентності інформаційних потоків у системі управління бурінням свердловин.

3. Копистинський Л. О. Сумісні механічні характеристики електробурів і доліт. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ. 2017. № 2(28). С. 95-102. ISSN 1993-9868.

Розроблено сумісні механічні характеристики двигуна електробура і шарошкового долота, та наведено причини нестабільності роботи електробурів.

4. Копистинський Л. О. Синтез структури цифрового логічного пристрою для підтримання процесів прийняття рішень у системі адаптивного управління бурінням свердловин електробурами. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. Івано-Франківськ. 2017. № 4(65). С. 55-58. ISSN 1993-9973.

Розроблено правила зміни структури блока адаптації на засадах методів алгебри логіки і діаграм Вейча.

5. Гутак О. В., Головата Ю. Б., Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Сучасний підхід до побудови систем оптимального керування технологічними комплексами у нафтогазовій галузі промисловості. *Нафтогазова енергетика* 2(20). Івано-Франківськ, 2013. С. 117-127. ISSN 1993-9868.

Обґрунтовано новітній підхід до побудови системи оптимального керування технологічним процесом буріння свердловин.

6. Семенцова А. О., Копистинський Л. О. Методи і прилади контролю енергетичних параметрів ефективності буріння свердловин електробурами. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 2(35). С. 181-188. ISSN 1993-9965.

Проаналізовано пристрої контролю енергетичних параметрів під час буріння електробурами.

7. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О., Данилів А. Р. Аналіз мультиколінеарності незалежних змінних та її впливу на оцінки параметрів математичних моделей багатовимірних об'єктів. *Наука и инновации в современном мире : Техника и технологии. Книга 2. Глава 9. Монография. Одесса : Куприенко С. В., 2017. С. 137-149.*

Запропоновано використання одного із параметрів – струму навантаження двигуна електробура або його активної потужності для автоматичного керування процесом буріння електробурами.

8. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Показники якості автоматичних систем регулювання режимів буріння нафтових і газових свердловин електробурами. *Naukowa mysl informacyjnej rowieki. Przemysł*, 2014. С. 21-28.

Досліджено показники якості системи регулювання режимів буріння свердловин електробурами в Simulink.

9. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О., Гутак О. В. Автоматична система зі змінною структурою для керування процесом буріння свердловин електробурами. *Wykształcenie i nauka bez granic – 2013 : Materiały IX Międzynarodowej naukow-*

практичної конференції, 7-15 грудня 2013. *Przemysł : Nauka i studia*, 2013. Vol.47. С. 29-36.

Досліджено алгоритмічну структуру системи автоматичного керування електробурами в Matlab та Simulink.

10. Семенцова А. О., Годлевська К. С., Копистинський Л. О. Удосконалення характеристик занурного частотно-регульованого електропривода. *Naukowa Przestrzeń Europy – 2013 : Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji*, 7-15 kwietnia 2013. *Przemysł : Nauka i studia*, 2013. Vol. 47. С. 78-84.

Визначено передавальну функцію та перехідні характеристики зануреного електропривода.

11. Семенцова А. О., Плитус А. В., Копистинський Л. О., Гутак О. В. Результати аналізу статистичних характеристик моменту на долоті при бурінні свердловин електробурами. *Dny vědy – 2013 : Materiály IX Mezinárodní vědecko - praktická konference*. Praha, 2013. С. 61-69.

Проаналізовано статистичні характеристики моменту на долоті при електробурінні.

Праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Копистинський Л. О. Метод трансформації автоматизованої системи управління процесом буріння свердловин як стохастично-хаотичним об'єктом, що розвивається в часі. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості : 3-я Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених і студентів*, 10-13 жовтня 2017. Івано-Франківськ, 2017. С. 10-13.

Запропоновано механізм і алгоритм трансформації автоматизованої системи управління бурінням свердловин електробурами.

13. Копистинський Л. О. Управління процесом буріння з інтелектуальною підтримкою процесів прийняття рішень. *Автоматика – 2017 : XXIV Міжнародна конф. з автоматичного управління*, 13-16 вересня 2017. Київ, 2017. С. 155-156.

Розроблено функціональну структуру системи управління процесом буріння із інтелектуальною підтримкою процесів прийняття рішень при бурінні свердловин.

14. Копистинський Л. О., Кропивницька В. Б. Керування процесом буріння свердловин на засадах енергоінформаційного підходу. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2017* : III Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 19-20 квітня 2017. Київ, 2017. С. 23-24.

Розроблено фазі-модель Мамдані-типу питомих витрат енергії на буріння свердловин.

15. Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Робастне і адаптивне керування технологічним процесом поглиблення свердловин електробурами. *Автоматизація, контроль та управління* : пошук ідей та рішень АКУ-2016, 23-27 травня 2016. Покровськ, 2016. С. 39-40.

Обґрунтовано доцільність адаптивного керування процесом буріння свердловин електробурами.

16. Гутак О. В., Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Адаптація математичної моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами в реальному часі. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2016* : III Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 20-21 квітня 2016. Київ, 2016. С. 36-37.

Розроблено структуру системи керування процесом буріння свердловин електробурами з адаптацією моделі об'єкта в реальному часі.

17. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Пристрій для контролю потужності на валі двигуна електробура. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання*: 5-а наук.-практ. конф. студентів і молодих учених. Івано-Франківськ, 2015. С. 100-102.

Розроблено блок-схему контролю потужності на валі двигуна електробура.

18. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Система автоматизованого керування процесом буріння свердловин електробурами. *Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології* : Збірка доповідей

Міжрегіональної наук.-практ. конф. молодих учених, 16-17 листопада 2015. Красноармійськ, 2015. С. 197-199.

Запропоновано функціональну структурну систему автоматизованого керування процесом буріння свердловин електробурами.

19. Семенцов Г. Н., Копистинський Л. О. Система керування із змінною структурою для оптимізації процесу буріння свердловин електробурами. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : Матеріали II всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 6-9 жовтня 2015. Івано-Франківськ, 2015. С. 56-57.

Розроблено систему автоматичного керування із змінною структурою для буріння свердловин електробурами.

20. Копистинський Л. О., Семенцов Г. Н. Визначення оптимальних параметрів режиму буріння методом бар'єрних функцій. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2014* : I Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 16-17 квітня 2014. Київ, 2014. С. 7-8.

Визначено оптимальний режим керування електробуром.

21. Копистинський Л. О. Fuzzy-підхід до контролю моменту на валу бурових механізмів. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання* : 4-а наук.-практ. Конф. студентів і молодих учених. Івано-Франківськ, 2013. С. 82.

Визначено закон розподілу, автокореляційну функцію, рівняння, яким описується автокореляційна функція, та частоту дискретного контролю моменту на долоті.

22. Копистинський Л. О. Огляд каналів зв'язку для передачі інформації з вибою свердловини у процесі буріння. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : Всеукраїнська наук.-практ. конф. аспірантів, молодих учених і студентів, 8-11 жовтня 2013. Івано-Франківськ, 2013. С. 22-25.

Виявлено, що при використанні глибинних вимірювальних пристроїв покращуються показники ефективності процесу буріння електробурами.

23. Семенцов Г. Н., Гутак О. В., Головата Ю. Б., Копистинський Л. О. Новітній підхід до побудови систем керування нового покоління з принципово

іншими показниками якості. *Нафта і газ України* : 9-а Міжн. наук.-практ. конф. Яремче, 2013. С. 116-117.

Побудовано структуру системи керування на основі синергетики.