

УДК 681.5:519.91

DOI: 10.31471/1993-9981-2018-2(41)-69-76

ПРОЦЕС БУРІННЯ СВЕРДЛОВИНИ ЯК СКЛАДНА СИСТЕМА З БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИМИ ОЦІНКАМИ ПРОЦЕСІВ

*В. Б. Кропивницька**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; тел.(03422)50-45-21; e-mail: vitalia.krop@gmail.com

Анотація. Процес буріння нафтових і газових свердловин розглядається як складна система зі складеною структурою, різномірними підсистемами і елементами, з багатокритеріальними оцінками процесів, що протікають в ній. Показано, що цільові функції окремих підсистем, тобто локальні цільові функції не співпадають з глобальною цільовою функцією системи. Тому дослідження системи «буріння свердловини», як об'єкта автоматизації має ряд певних особливостей, внаслідок неповної інформації про загальні закономірності процесу буріння. Запропоновано при формалізації такої складної системи використовувати лінгвістичну модель, в яких якісна інформація подається у вигляді словесного опису.

Ключові слова: процес буріння, складна система, багатокритеріальність, об'єкт керування, підсистема, цільова функція.

Аннотация. Процесс бурения нефтяных и газовых скважин рассматривается как сложная система с составленной структурой, разнородными подсистемами и элементами, с многокритериальными оценками процессов, которые протекают в ней. Показано, что целевые функции отдельных подсистем, то есть локальные целевые функции не совпадают с глобальной целевой функцией системы. Поэтому исследование системы "бурение скважины", как объекта автоматизации имеет ряд определенных особенностей, в результате неполной информации об общих закономерностях процесса бурения. Предложено при формализации такой сложной системы использовать лингвистическую модель, в которых качественная информация подается в виде словесного описания.

Ключевые слова: процесс бурения, сложная система, багатокритеріальність, объект управления, подсистема, целевая функция.

Annotation. The process of drilling oil and gas mining holes is examined as a difficult system with the made structure, heterogeneous subsystems and elements with the multicriterion estimations of processes that flow in her. It is shown that objective functions of separate subsystems, id est local objective functions do not coincide with the global objective function of the system. Therefore research of the system "well-boring", as an object of automation has a row of certain features, as a result of incomplete information about general conformities to law of process of the drilling. It offers during formalization of such difficult system to use a linguistic model, in that quality information is given as verbal description.

Keywords: process of the drilling, difficult system, multicriteria, management object, subsystem, objective function.

Вступ. В умовах сучасної політичної ситуації питання енергонезалежності України, зокрема забезпеченість природним газом і нафтою, стоїть як ніколи гостро. Тому найбільш важливим завданням держави є збільшення власного видобутку вуглеводнів на основі розвитку нафтової та газової промисловості та суттєвого зростанням обсягів пошуково-розвідувального буріння свердловин, як це передбачено «Енергетичною стратегією України на період до 2035 р.» [1]. Крім цього, однією з пріоритетних цілей енергетичної стратегії України є суттєве зниження питомих витрат у

виробництво енергоносіїв та зменшення техногенного навантаження на довкілля у сфері об'єктів паливно-енергетичного комплексу. Так як процес буріння свердловин є одним з об'єктів паливно-енергетичного комплексу, то для виконання даного завдання доцільним є розробка та застосування сучасних, ефективних методів оцінювання витрат на буріння, прогнозування технічного стану обладнання і оптимального управління процесом буріння свердловин на засадах енергоінформаційного підходу.

В межах України буріння на нафту і газ ведеться в трьох нафтогазоносних регіонах, які включають в себе дев'ять областей:

- Східний – Дніпровсько-Донецька газонафтоносна область;
- Західний – Передкарпатська, Складчасті Карпати, Закарпатська і Волино-Подільська області;
- Південний – Передобруджинська, Причорноморсько-Кримська, Індоло-Кубанська, Азово-Березанська області.

Головними особливостями буріння свердловини у цих регіонах є значні глибини і складні гірничо-геологічні умови.

За умов, коли необхідно збільшувати обсяги буріння свердловин при обмежених фінансових ресурсах, важливого значення набуває проблема створення автоматизованих інтелектуальних систем управління процесом буріння на засадах енергоінформаційного підходу. Новітні тенденції розвитку автоматизації комп'ютерно-інтегрованих технологій, як комплексів концептуального, функціонального, математичного, алгоритмічного, лінгвістичного, інформаційного, програмного, технічного, оптимізаційного, енергомічного, правового, методичного забезпечення, призначених для автоматизації задач керування технологічним процесом буріння свердловин, полягають у створенні комплексних інтелектуальних систем, які не тільки забезпечують автоматизоване управління технологічними процесами, але й інтелектуальну підтримку процесів прийняття рішень. Особливого значення це набуває за умов апріорної та поточної невизначеності процесу буріння щодо його параметрів і структури, а також неповної та слабо структурованої інформації про процес буріння.

При розробці родовищ вуглеводнів основним технологічним процесом є буріння свердловин. Від того, як швидко, якісно і дешево ведеться буріння свердловин залежить рентабельність видобутку вуглеводнів.

Аналіз основних досліджень і публікацій.

В Україні при бурінні свердловин на нафту і газ застосовують три способи буріння: роторне буріння, буріння турбобуром та електробуром [2]. При роторному способі буріння привидний двигун (електричний або дизельний) знаходиться на поверхні і за допомогою

бурильної колони обертає долото. При турбінному бурінні і електробурінні двигун розташовується на вибої свердловини. Його корпус об'єднується з бурильною колоною, а долото через редуктор – з валом турбобура або електробура. У роторному способі буріння крутний момент, що прикладається до верхнього кінця бурильних труб, складається з опору породи обертанню долота, тертя бурильних труб об стінки свердловини і промивальну рідину. У турбінному бурінні і бурінні електробурами крутний момент обумовлюється тільки опором породи обертанню долота [2].

Дослідивши кожний спосіб буріння, можна виділити чотири основні послідовні операції, які притаманні кожному з них:

- спуск колони бурильних труб (КБТ) з долотом у свердловину до вибою;
- руйнування породи долотом;
- підйом КБТ із свердловини для заміни зношеного долота;
- спуск обсадної колони.

Крім вказаних вище основних операцій виконують такі додаткові процедури як: періодичні вимірювання напрямку ствола свердловини (азимут і зенітний кут); геофізичні вимірювання; відбір зразків порід для досліджень; відбір проб промивальної рідини, шлаку та інші.

Тому процес буріння свердловини розглядають як складний технологічний комплекс, що включає в себе декілька взаємно зв'язаних між собою підсистем. [2, 3]. Параметрична схема технологічного процесу буріння свердловин роторним способом на рис. 1.

До вимірюваних параметрів відносяться: глибина свердловини, швидкість бурової колони, температура та об'ємність шламу і технічний стан обладнання. Основними вхідними керованими параметрами є: осьове навантаження на долото, частота обертання долота, витрата та склад промивальної рідини.

Характерною особливістю бурового процесу є те, що на теперішній час відсутні серійні прилади для вимірювання режимних параметрів безпосередньо на вибої свердловини (що значною мірою і зумовлює унікальність процесу проходки свердловин) [4]. Це призводить до необхідності використовувати

природні канали зв'язку (колона бурильних труб, стовп промивальної рідини) і оцінювати режимні параметри за показами наземних приладів. Отже, величинами, які можна виміряти є: проходка на долото, навантаження на гак, частота обертання ротора, струм та потужність двигуна, тиск бурового розчину на вході та його витрата і т.д. А обчислювальні чинники це величини, які можна отримати з відомих залежностей між ними та вимірюваними величинами, до них відносяться: механічна швидкість буріння, оцінка відносного

зношення озброєння долота, час, що витрачається на буріння 1м свердловини собівартість метра проходки, рейсова швидкість буріння та ін.

Окрему групу параметрів утворюють збурюючі впливи $f(t)$, які є недосяжними для вимірювання, до них відносяться: фізико-механічні властивості порід (контактна міцність, абразивність, пластичність та ін.), пружні сили, які діють на колону, повздовжні та поперечні коливання колони, сила тертя і т.д. [4].

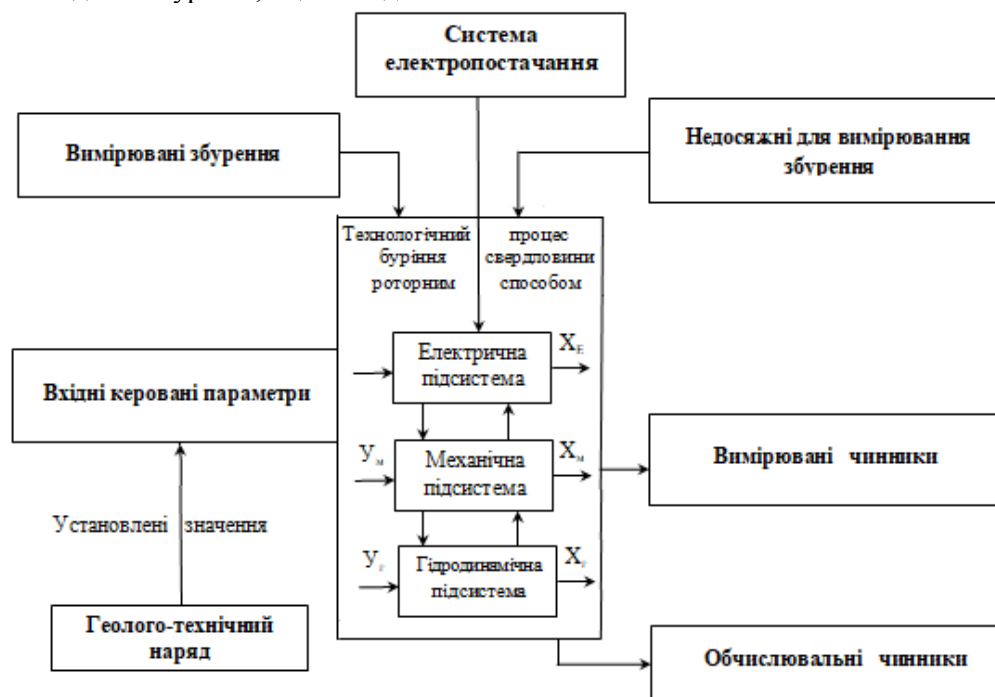


Рисунок 1 – Параметрична схема технологічного процесу буріння свердловин роторним способом

З рис. 1 видно, що процес буріння нафтових і газових свердловин можна розглядати як багатовимірний об'єкт керування, який має багато вхідних та вихідних параметрів.

Структурну схему процесу буріння свердловини як багатовимірного об'єкта керування класу Multy Input – Multy Output (MIMO) наведено на рис. 2 [4].

Вектор Y є вектором керувальних дій, до якого входять такі компоненти: $F(t)$ (осьове навантаження на долото), $n(t)$ (частота обертання долота), $Q(t)$ (витрата промивальної рідини); вектор X з коливаннями $h(t)$ (проходка

долота), $E(t)$ (оцінка стану озброєння долота), $g(t)$ (оцінка стану опор долота) є вектором стану об'єкта керування; f – вектор збурень, який характеризує взаємодію об'єкта з навколишнім середовищем; d – параметри долота (d – діаметр долота, $n_{ш}$ – кількість шарошок, n_z – кількість зубців на шарошках).

До показників, які характеризують стан об'єкта керування належать проходка долота $h(t)$, стан озброєння долота $E(t)$ і опор шарошок $g(t)$ [4].

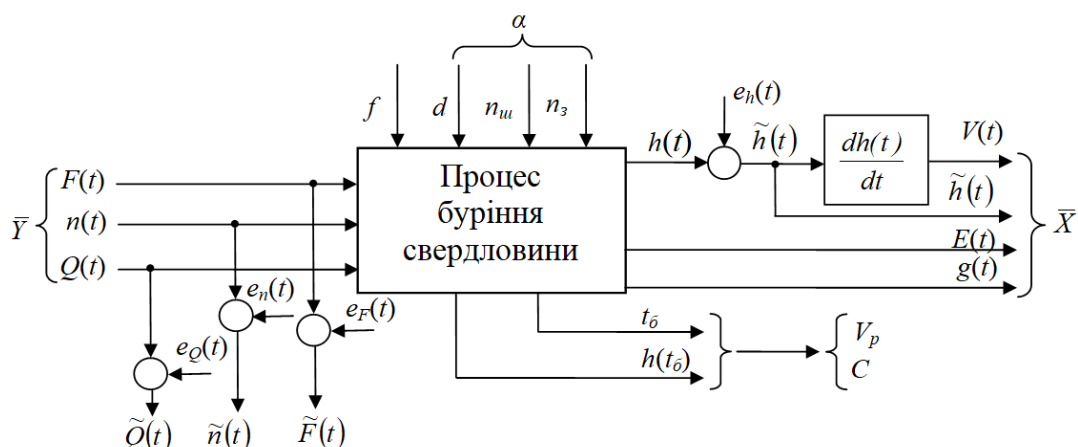


Рисунок 2 – Структурна схема процесу буріння свердловини як багатовимірнього об’єкта керування класу МІМО: e_F, e_n, e_Q, e_h – адитивні шуми у вимірювальних каналах

Доступною для вимірювань є лише проходка долота $h(t)$. Про стан озброєння і опору долота можна судити лише опосередковано за механічною швидкістю буріння та моментом на долото.

Ефективність процесу буріння оцінюють за механічною швидкістю буріння

$$V(t) = \frac{dh(t)}{dt}, \quad (1)$$

Часом буріння t_δ та проходкою на долото $h(t)$ [4].

Рейсова швидкість буріння

$$V_p = \frac{h(t_\delta)}{t_\delta + t_{cn}}, \quad (2)$$

та собівартість метра проходки свердловини

$$C = \frac{C_\delta(t_\delta + t_{cn}) + C_d}{h(t_\delta)}, \quad (3)$$

де C_δ – вартість години роботи бурової установки, t_{cn} – час на спуско-підймальні і допоміжні операції, C_d – вартість долота, утворюють групу основних техніко-економічних показників процесу буріння свердловини [2, 4].

До керувальних дій відносять [4, 5, 6] осьове навантаження F на долото, частоту його обертання n , витрату промивальної рідини Q і сукупність параметрів промивальної рідини.

Основною керувальною дією є осьове навантаження на долото, так як сучасні бурові установки дозволяють здійснювати його регулювання в широкому діапазоні.

Частота обертання долота при роторному способі буріння і електробурінні змінюється

ступенево. Проте, для електричних двигунів тут можна застосувати частотне керування, яке дозволяє змінювати частоту обертання долота в широкому діапазоні.

При турбінному бурінні частота обертання залежить від витрати промивальної рідини і навантаження на долото.

Витрата промивальної рідини – це третя керувальна дія, від якої залежить ступінь очищення вибою. Звичайно процес буріння проектується таким чином, щоб очищення вибою було досконалим. Тоді відпадає необхідність в регулюванні витрати промивальної рідини.

Некеровані вхідні параметри або взагалі не можуть змінюватись (потужність електродвигунів, тип спуско-підймального механізму і інші), або можуть бути встановлені лише на початку рейсу (тип долота, діаметр долота, кількість шарошок, кількість зубців на шарошках, компоновка бурильної колони, тип турбобура, електробура).

Основними вихідними параметрами процесу буріння є механічна швидкість буріння V_m , проходка h , оцінки зносу озброєння ε і опору долота g , рейсова швидкість буріння V_p , собівартість метра проходки C .

Основні результати досліджень.

Проведений аналіз процесу буріння як складного технологічного об’єкту показав, що він відноситься до складних систем [5÷8], тобто має складену структуру, його підсистеми утворюють складні взаємозв’язки між собою та існує багатокритеріальність оцінок процесів, які протікають в системі. Характерними для

буріння свердловин є унікальність, невідтворюваність, велика кількість визначальних взаємозалежних параметрів і факторів, невизначеність щодо параметрів і структури об'єкта, недосяжність вимірювань збурювальних впливів, неповнота і невизначеність інформації про функціонування системи.

З рис. 1 бачимо, що процес буріння свердловини є сукупністю трьох взаємодіючих підсистем [9]: електричної, механічної та гідродинамічної. Отже, технологічний процес буріння свердловини здійснюється в електричній, механічній і гідродинамічній підсистемах, що об'єднують пласт гірських порід, свердловину, колону бурильних труб, обважені бурильні труби, струмопідвід «два проводи – труба», або електробур, роторний механізм, механізм викривлення, телеметричну систему, талеву систему, лебідку і обладнання насосів в єдину систему, в якій здійснюється руйнування гірських порід за допомогою долота, руху бурового розчину до вибою свердловини і його підйом разом зі шламом на поверхню [9].

Електрична підсистема містить елементи електропостачання і електрообладнання. До елементів електропостачання відносяться силові трансформатори і розподільчі пристрої; до елементів електрообладнання – електроприводи насосних установок, лебідки, роторного механізму, електробура, допоміжних механізмів, що встановлені на буровій установці.

Загалом режими роботи електричної, механічної і гідродинамічної підсистем і чинники процесу буріння, X_E , X_M , X_G залежать від керувальних дій і різноманітних збурень, які мають випадковий характер. Ця обставина веде до створення в системі буріння свердловин складних динамічних процесів, які відбиваються на технологічних, енергетичних, інформаційних, економічних та інших показниках процесу буріння свердловини.

Розглянуті підсистеми є досить різномірними з точки зору фізичних законів в і математичних моделей, що описують їхнє функціонування, вони є автономними частинами буріння свердловини і забезпечують її функціонування та взаємодію з оточуючим середовищем.

В підсистемах, які складовими загальної системи, яка характеризує процес буріння, протікають різні процеси і ефективність кожної з підсистем оцінюється за власними критеріями, які іноді суперечливі між собою, що призводить до такого поняття як багатокритеріальність оцінок процесів.

Ефективність гідродинамічної підсистеми визначається ступенем очистки вибою свердловини від шламу, а також відповідним співвідношенням тиску в свердловині і пласті.

Ефективність механічної підсистеми оцінюється надійністю роботи, коефіцієнтом корисної дії обладнання, діючими навантаженнями та іншими показниками.

Ефективність електричної підсистеми характеризується витратами електроенергії на буріння, питомими витратами електроенергії на метр проходки, величиною коефіцієнта корисної дії електродвигунів і коефіцієнта потужності, $\cos(\varphi)$ та ін.

Велика кількість показників для кожної підсистеми, а також можливі їх протиріччя, ведуть до неможливості однозначної оцінки ефективності процесів в системі. Так, наприклад, надмірне збільшення осьового навантаження на долото веде до збільшення механічної швидкості але одночасно збільшується ймовірність аварії. Якщо зменшується тиск бурового розчину до стану рівноваги в системі «свердловина – пласт», покращуються показники буріння, але одночасно виникає небезпека викидів флюїдів в атмосферу.

Невідповідність або протиріччя можливостей, цілей і потреб всіх підсистем, ускладнює вирішення питання про вибір оптимальних режимів і забезпечення оптимального функціонування бурової установки. На даний час немає єдиної думки відносно техніко-економічних критеріїв, за допомогою яких можна визначити оптимальні умови будівництва свердловини. Кожна свердловина, що буриться, розкриває унікальний геологічний розріз продуктивних відкладень, тобто має своє геосередовище. Саме тому, свердловини відрізняються одна від одної. Геосередовище є центральним об'єктом цієї складної системи, оскільки визначає весь хід процесу буріння свердловини.

Складність системи буріння свердловини з позицій системного аналізу [5] зв'язана також зі статичною і динамічною складністю поведінки її в часі. Статична складність системи визначається, головним чином, складністю структур механічної і гідравлічної підсистем та геосередовища. Динамічна складність обумовлена не тільки наявністю нелінійностей і зв'язків між підсистемами та їх елементами, але і тим, що процес буріння є складним процесом, який розвивається у часі за умов апріорної та поточної невизначеності щодо параметрів і структури об'єкта керування.

При сумісному функціонуванні компонентів в такій динамічно складній системі як буріння свердловини, виникають нові властивості і стани, які неможливо визначити шляхом аналізу властивостей окремих компонентів. Прикладами таких властивостей і станів є: аномальне зменшення або збільшення пластового тиску, осипання і обвалювання стінок свердловини, прихват бурильного інструменту, карстові порожнини, високі темпи обводнення свердловини та інші.

Поява цих і багатьох інших ситуацій викликає необхідність оперативного прийняття технологічних рішень і керувальних дій на систему для того, щоб запобігти аварій або ускладнень.

Разом з тим, різні частини системи «буріння свердловини» описуються в різних масштабах часу. Можна виділити наступні динамічні процеси або рівні реагування: подача бурового розчину в свердловину за допомогою насоса; механічні навантаження в колоні бурильних труб і на долоті; електромеханічні процеси в електроприводах ротора, насосів лебідки; електричні процеси в елементах електропостачання. Кожна підсистема і система буріння свердловини в цілому описується великою кількістю змінних і мають складний характер причинно-наслідкових та часових зв'язків між цими змінними.

Слід мати на увазі, що існуючі зв'язки, закономірності і співвідношення не завжди можуть бути описані мовою чітких математичних формул і моделей. В багатьох випадках вони встановлюються на якісному рівні або у вигляді графіків чи таблиць, які узагальнюють велику кількість емпіричних даних.

Буріння свердловини характеризується динамічністю і нестационарністю окремих процесів у часі, тобто практично всі основні показники буріння свердловини змінюються в часі [7]. Проведений аналіз свідчить, що під час буріння свердловини існує постійна тенденція до погіршення якості процесу. Це обумовлено динамічністю внутрішніх і зовнішніх збурень – збільшення глибини свердловини, зміною фізико-механічних і абразивних властивостей гірських порід, зношенням озброєння і опор долота, збільшення температури на вибої свердловини, аваріями і ускладненнями, що з'являються в процесі поглиблення свердловини.

Вплив вказаних вище збурень приводить до зміни параметрів системи, внаслідок чого знижується якість функціонування системи, її надійність і міжремонтний період обладнання бурової установки.

Так як процес буріння є нестационарним, то неможливо передбачити реакцію об'єкта на одну і ту ж саму керувальну дію у різні моменти часу. Наприклад, при бурінні з постійними параметрами режиму можна отримати у різні моменти часу зовсім різні показники процесу. Це заважає використанню статистичних даних, які були отримані раніше на значному інтервалі часу.

Окрім того, дані, на підставі яких приймається рішення про управління бурінням, часто є неточними. Таким чином, задача дослідження такої складної системи, якою є «буріння свердловини», як об'єкта автоматизованого управління, має певні особливості, тобто інформація про загальні закономірності процесів буріння свердловини є недостатньою для моделювання і управління конкретною буровою установкою. До того ж при формалізації такої складної системи як буріння свердловини, завжди залишається неформалізований залишок, внаслідок чого традиційне математичне моделювання процесу буріння не може бути вичерпним. Необхідно розрахувати показники, які погано формалізуються, а також врахувати знання спеціалістів для визначення великої кількості факторів, їх структури і зв'язків.

Тобто якісну інформацію про процес можна подати у вигляді словесного опису, так званої

лінгвістичної моделі, яка базується на основі теорії нечітких множин та нечіткої логіки [10].

Теорія управління такими складними виробничими комплексами, як правило, ґрунтується на системному підході до дослідження об'єктів керування і використовує методи, які враховують щільний взаємозв'язок окремих елементів системи, а також фактори, що характеризують поведінку всієї системи в цілому. Тобто, складна система – буріння свердловини – повинна розглядатися як сукупність взаємозв'язаних підсистем, що об'єднані спільною метою функціонування. Для побудови математичної моделі процесу буріння свердловини доцільно [5] використання процедури декомпозиції системи, яка дозволяє отримати сукупність порівняно простих, хоча і взаємозалежних задач, що розв'язуються в підсистемах окремо.

Важливою обставиною є те, що в задачах управління буріння свердловини властивості всієї системи суттєво відрізняються від властивостей її елементів. Навіть якщо матимемо математичні моделі всіх елементів, що входять в систему, практично неможливо отримати модель всієї системи в цілому. Збільшення кількості елементів, з яких створена система, на певному етапі веде до нових якісних змін властивостей об'єкта управління – процесу буріння свердловини.

Ще однією важливою властивістю процесу буріння свердловини, яка відрізняє цей об'єкт від традиційних об'єктів управління, є існування в кожній з підсистем (поглиблення свердловини, промивання свердловини, закінчення свердловини(своїєї функції мети, що відображає потреби підсистеми під час буріння свердловини [4, 7].

Наприклад, функцією мети підсистеми поглиблення свердловини є забезпечення ходу процесу при мінімумі собівартості метра проходки; визначення моменту підйому долота з різними критеріями для заміни і типу долота для наступного рейсу; забезпечення оперативного визначення в процесі буріння уточнених значень осьового навантаження і частоти обертання долота, а також значень параметрів режиму спуско-підйомальних операцій.

Підсистемою промивання свердловини вирішуються питання поліпшення очистки вибою свердловини і показників роботи долота,

зменшення аварій і ускладнень, зв'язаних зі станом ствола свердловини.

Функція мети підсистеми закінчення свердловини – досягнення максимально можливого дебіту кожної пробуреної свердловини методами оптимального розкриття продуктивного горизонту [2, 4].

Буріння свердловини, як об'єкт управління, має ряд особливостей, що відрізняють його від інших промислових об'єктів, на більшості яких керовані параметри підтримуються на заданому рівні за рахунок зміни припливу енергії, що підводиться до машини. На бурових установках для підтримування керованої величини на заданому рівні змінюють не приплив енергії, а осьове навантаження на долото, яке впливає на споживану енергію. Це одна з особливостей процесу буріння свердловин.

Друга особливість полягає в тому, що процес буріння підлягає безперервно діючим невимірюваним збуренням випадкового характеру: зміну міцності і абразивності порід, зменшення озброєння долота тощо.

Третьою особливістю є здатність саморегулювання, яка обумовлена властивостями механічних характеристик електричних двигунів.

Крім цього, процес буріння це невідтворюваний нестационарний стохастичний нелінійний процес з неповною інформацією, що розвивається в часі, багатовимірний і багатокритеріальний.

Певну цільову функцію має і уся система буріння свердловини. Це такі глобальні цільові функції як мінімальна вартість або мінімальний час буріння свердловини [7]. Проте цільові функції окремих підсистем, тобто локальні цільові функції (максимум рейсової швидкості буріння, мінімум собівартості буріння одного метра свердловини, максимум проходки на долото, мінімум часу, що витрачається на спуско-підйомальні операції і т. п.) не співпадають з глобальною цільовою функцією буріння свердловини [4, 7].

Тому при прийнятті оптимального рішення по управлінню бурінням свердловини кожна підсистема прагне максимізувати (або мінімізувати) свою функцію мети на множині допустимих рішень, які визначаються реально існуючими обмеженнями. Таким чином, для знаходження значень вихідних координат

підсистема повинна розв'язати деяку екстремальну задачу, конкретні дані якої можуть змінюватися залежно від значень вхідних параметрів.

Аналіз літературних джерел [3, 5, 6, 8] показав, що поняття, складна система справедливе не тільки для буріння свердловини, але й для кожної з її підсистем, тобто при розв'язанні задачі управління бурінням свердловини необхідно враховувати той факт, що кожна досліджувана підсистема є частиною деякої ще більшої системи і всі прийняті рішення залежать від різних факторів взаємодії між окремими елементами процесу буріння.

Висновок. Отже, особливостями процесу буріння свердловини як об'єкта автоматизованого управління є складність зв'язків між елементами системи; різноманітний характер цих зв'язків – інформаційні, енергетичні, матеріальні; велика розмірність; активна участь людини в процесі буріння свердловини; наявність підсистем, кожна з яких має свою локальну функцію мети.

1. Про схвалення *Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»* / Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року. – [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon3.rada.gov.ua/Laws/show/605-2017-%D1%80/para%26#6>.

2. Булатов А.И. *Справочник инженера по бурению* / А.И. Булатов, А. Г.Аветисов. – М.: Недра, 1985. – 840 с.

3. S.H. Hoseinie, M. Atael, M. Osanloo, *F new classification system for evaluting rock penetrability*. In. *J. Rock Mech Min Sci.* 46(8), 1329-1340 (2009).

4. Горбійчук М.І. *Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: [навч. посібник]* /

М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенов // Івано-Франківськ: Факел, 2003.–493с.

5. Ладанюк А. П. *Основи системного аналізу: [навчальний посібник]* / А. П. Ладанюк. – Вінниця: Нова книга. – 2004. – 173 с.

6. Ладанюк А. П. *системна задача управління технологічними комплексами / Програма і матеріали між нар.наук.-техн.конф. «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами», 26-27 листопада 2009р., Київ / А.П. Ладанюк. – Київ: НУХТ, 2009. – С. 12-13.*

7. Мирзаджанзаде А. Х. *Повышение эффективности и качества бурения глубоких скважин* / А. Х. Мирзвджанзаде, С. А. Ширинзаде. – М.: Недра, 1986. – 278 с.

8. Балденко Ф. Д. *Автоматизированные системы управления режимом бурения скважин забойными двигателями* / Ф. Д. Балденко, А. П. Шмидт // *Бурение и нефть*. – 2003. – №4. – С. 14 – 17.

9. Палагушкин В.А. *Скважинная система как сложный объект управления/ В.А. Палагушкин, П. Н. Чариков // Проблемы нефтегазового комплекса России – УФА: УНИ. – 1998 – С. 38 – 42.*

10. Чигур Л. Я. *Система підтримки прийняття рішень для управління відпрацюванням породоруйнівного інструменту стираючої дії в процесі буріння: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування* / Л. Я. Чигур – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ – 2013. – 20 с.

Поступила в редакцію 10.11.2018 р.
Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Райтер П. М. докт. техн. наук, проф. Горбійчук М. І.