

УДК 681.514:621.029

Г. Я. ПРОЦЮК, Я. М. НИКОЛАЙЧУК

## ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА МЕТОД ПОБУДОВИ ОБРАЗНО-КЛАСТЕРНОЇ МОДЕЛІ ОПЕРАТОРА БУРОВОЇ УСТАНОВКИ

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна,  
E-mail: lmnik@rambler.ru*

**Анотація.** В роботі викладено теоретичні засади та методи моніторингу процесів буріння на основі побудови образно-кластерної моделі. Обґрунтована необхідність та ефективність інтерактивного моніторингу станів бурової установки шляхом розрахунку статистичних, кореляційних, спектральних, логіко-статистичних та ентропійних характеристик. Запропонований метод побудови образно-кластерної моделі та її демонстрації на моніторі оператора бурової установки у вигляді фейс-моделі, яка відображає квазістаціонарні стани об'єкта у режимах норми, не норми та аварії. Трансформація зображення образно-кластерної моделі відбувається за рахунок просторового векторного зміщення атрибутів моделі пропорційно до статистичних та інших характеристик об'єкта моніторингу.

**Аннотация.** В работе изложены теоретические основы и методы мониторинга процессов бурения на основе построения образно-кластерной модели. Обоснована необходимость и эффективность интерактивного мониторинга состояний буровой установки путем расчета статистических, корреляционных, спектральных, логико-статистических и энтропийных характеристик. Предложенный метод построения образно-кластерной модели и ее демонстрации на мониторе оператора буровой установки в виде фейс-модели, которая отражает квазистационарные состояния объекта в режимах нормы, не нормы и аварии. Трансформация изображения образно-кластерной модели происходит за счет пространственного векторного смещение атрибутов модели пропорционально статистических и других характеристик объекта мониторинга.

**Abstract.** This paper describes the theoretical principles and methods of monitoring the drilling process based on image-building cluster model. The necessity and effectiveness of interactive monitoring the state of the rig by calculating statistics, correlation, spectral, statistical and logical entropy characteristics. The method of image-cluster model and its display on the monitor rig operator as a face model that reflects the state of quasi-stationary object in Normal mode, no rules and accidents. Transformation image image-cluster model is due to spatial displacement vector attributes in proportion to the statistical models and other characteristics of the object monitoring.

**Ключові слова:** теоретико-числовий базис, унітарний базис, структуризовані дані, структуризація, структурна складність, поліфункціональні дані.

### ВСТУП

Досвід розробки та багаторічної експлуатації у промислових умовах інформаційних засобів контролю та моніторингу процесів роторного буріння набутий іноземними фірмами та українськими науковцями дозволяє констатувати наступні особливості технології буріння – як джерела інформації та об'єкта управління:

1) процеси будівництва та буріння глибоких свердловин є довготривалі, енергоємні, капіталозатратні, вибухо- та екологічно небезпечні, що вимагає і дозволяє здійснити оснащення бурової установки (БУ) відповідно потужною, надійною та ефективною інформаційною моніторинговою системою;

2) БУ як джерело інформації характеризується квазістаціонарними і часто нестаціонарними ймовірнісними характеристиками [1];

3) оперативне вирішення задачі оптимізації буріння ускладнене внаслідок відсутності адекватних математичних моделей процесу, які б відповідали у повній мірі взаємозв'язком параметрів технологічного процесу буріння [2];

4) аналіз структури та декларованих функцій сучасних інтегрованих комп'ютеризованих систем універсального призначення та проблемно-орієнтованих до моніторингу процесів буріння свідчить, що проблемі розвитку теорії, вдосконалення функцій та методів підвищення ефективності роботи операторів при взаємодії «оператор – моніторингова система» («ОМС») приділено недостатньо уваги [3—6];

5) практично відсутні дослідження моделей «ОМС» адаптованих до конкретних інформаційних, технологічних, евристичних та семантичних станів реальних промислових об'єктів, наприклад бурових установок;

6) недостатньо розвинута теорія та реалізація принципів побудови образно-кластерних моделей (ОКМ) моніторингу відхилень станів об'єктів від норми на основі статистичних, кореляційних, спектральних, ентропійних та логіко-статистичних інформаційних моделей [1, 7, 8];

7) існує необхідність розробки відповідного прикладного алгоритмічного та програмного забезпечення шляхом виконання високопродуктивних обчислень, генерації ОКМ та дослідження у промислових умовах ефективності моделей захисту об'єктів управління (ОУ) від виникнення нештатних, передаварійних, прогнозу аварійних та катастрофічних ситуацій на промислових установках нафтогазового комплексу України, у тому числі при моніторингу процесів буріння.

### 1. МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

В [2] показано, що БУ, з точки зору об'єкта керування є «багатомірним складним керованим об'єктом, що функціонує за умов апіорної та поточної невизначеності під впливом суттєвих зовнішніх збурень і має декілька каналів для передачі як керувальних впливів, та і збурень, зумовлених унікальними властивостями бурових установок і взаємодією системи з навколишнім середовищем».

На рис. 1 показана функціональна структура моделі процесу буріння [2], де  $U(t)$  — функція керувальних впливів виду [1]:

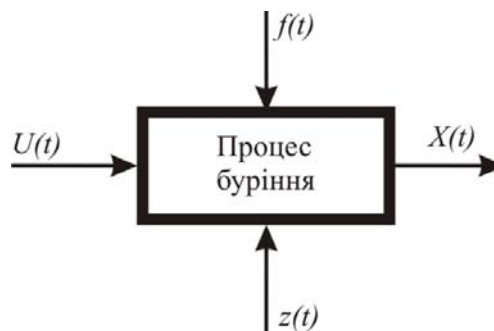


Рис. 1. Функціональна структура моделі технологічного процесу буріння

$$U(t) = F_1 [F(t), h(t), Q_1(t), \gamma(t), v(t), V(t), \rho(t), Q_n(t)];$$

Параметри фрейму впливів  $F_1[\bullet]$  відповідно:

$F$  — осьова сила;  $h$  — частота обертання долота;  $Q_1$  — витрата промивної рідини;  $\gamma$  — водневий показник;  $v$  — вміст піску;  $V$  — швидкість витікання з насадок долота;  $\rho$  — зовнішні впливи;  $Q_n$  — .....  $f(t)$ ,  $z(t)$  — некеровані параметри.  $X(t)$  — вихідна функція реакції керованої БУ, яка також описується фреймом показників:

$$X(t) = F_2 [H(t), V_m(t), V_p(t), \mu(t), g(t), M(t), E(t), S(t), N(t), \dots)],$$

де відповідно:

$H$  — проходка;  $V_m$  — механічна швидкість буріння;  $V_p$  — момент на роторі;  $E$  — енергозатрати;  $S$  — собівартість буріння;  $N$  — рівень безпеки та надійності обладнання;  $\mu, g, M$  — інші режимні, технологічні та соціально-економічні показники.

Аналіз супроводжуючого комплексу параметрів, які вимірюються, контролюються та діагностуються у різних станах БУ в існуючих моніторингових системах буріння поданий у табл. 1.

Таблиця 1.

## Моніторингова система буріння

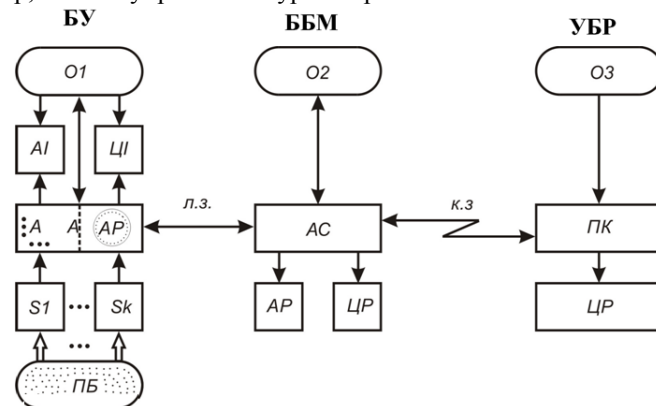
№ п/п	Оперативно контрольовані параметри	Стан бурової установки													
		Буріння				СПО			Промивка			Випробування		Компонівка	
1	Вага інструмента	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q				Q	Q		Q
2	Навантаження на долото	+	+	+	+										
3	Момент на роторі	Q	Q	Q	Q							Q	Q	Q	
4	Глибина забою	+	+	+	Q	Q	Q	Q				Q	Q	Q	
5	Кількість свічок					+	+	+							Час виконання операції
6	Проходка / час	Q	Q	Q	Q	+	+	Q				+	Q	Q	
7	Час / одиниця проходки	+	+	+	+										
8	Проходка на долото	+	+	+	+										
9	Обороти ротора / од. часу	Q	Q	Q	Q										
10	Обороти на заборі	+	+	+	+										
11	Загальне число оборотів	+	+	+	+										
12	Знос обладнання	+	+	+	+										
13	Знос опори	+	+	+	+										
14	Число ходів / од. часу	+	+	+	+	+	+	Q	+	+	Q	Q			
15	Загальне число ходів	+	+	+	+	+	+	+	+	+					
16	Рівень в ємностях	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
17	Тиск на вх. Свердловині	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
18	Розхід на вході	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
19	Розхід на виході	Q	Q	Q	Q				Q	Q	Q				
20	Щільність на вході	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q				
21	Щільність на виході	Q	Q	Q	Q				Q	Q	Q				
22	Вміст газу	Q	Q	Q	Q				Q	Q	Q	Q	Q	Q	

Умовні позначення до таблиці:

$X(t)$  — некеровані параметри, які залежать від режиму буріння (тип, діаметр, кількість та геометрія зубців шарошок, глибина свердловини, параметри бурильної колони та БУ);  $f(t)$  — збурюючі впливи (сила статичного опору, тертя колони бурильних труб, фізико-механічні і абразивні властивості).

На рис. 2 показана функціональна архітектура інтерактивної розподіленої інформаційної системи моніторингу процесів буріння свердловин, який виконується в реальному часі паралельно трьома операторами:

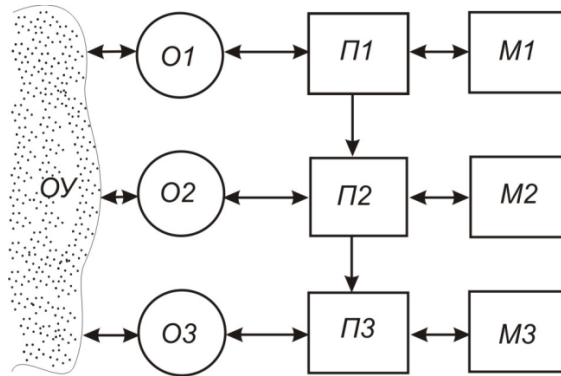
O1 — бурилищик, БУ — бурова установка; O2 — буровий майстер, БМ — будка бурового майстра; O3 — диспетчер, УБР — управління бурових робіт.



AI, CI, AP, CP — відповідно: аналогові (A) та цифрові індикатори (I) та реєстратори (P);  
 A, AI, ПК — відповідно: адаптер O1, абонентська станція O2, персональний комп'ютер;  
 S1, ... Sk — сенсори технологічних параметрів процесу буріння (ПБ);  
 л.з. — кабельна лінія зв'язку між БУ та БМ; к.з. — безпроводна цифрова або телефонна лінія зв'язку між БУ та УБР

Рис. 2. Функціональна архітектура системи інтерактивного моніторингу процесів буріння

Таким чином з рис. 2 видно, що інтерактивні функції моніторингу та управління процесами буріння оператори виконують відповідно до монопольної структури взаємодії «ОМС» (рис. 3).



М1, М2, М3 — монітори операторів бурильщика, бурового майстра та диспетчера УБР

Рис. 3. Монопольна структура інтерактивної системи моніторингу та управління процесами буріння

Аналіз структури, приведеної на рис. 3, показує, що моніторингова система контролю та управління процесами буріння належить до класу монопольно-ієрархічних інтерактивних розподілених систем. Такі системи характеризуються особливо високим рівнем надійності, роботоздатності та живучості за рахунок оснащення кожного оператора практично автономною системою доступу до інформаційних ресурсів та їх паралельного опрацювання монопольним ієрархічно підпорядкованим програмно-апаратним засобами.

З іншої сторони ієрархічна підпорядкованість 3-х операторів може створювати прецеденти недостатньо швидкодіючої та ефективної реакції системи моніторингу у цілому, що потребує глибоких досліджень на основі теорії суб'єктивних складних активних систем. Недоліком таких систем є також висока вартість обладнання та системи комунікації, а також відносно низький коефіцієнт завантаження ресурсів процесорного та периферійного обладнання [3]. Особливістю спеціалізації таких систем є жорсткі експлуатаційні вимоги до сенсорів, електроніки адаптера, цифрових та аналогових моніторів обладнання на БУ в умовах широкого діапазону температур, високого рівня вібрації і вибухобезпеки, впливу інтенсивних промислових завод, води, пилу та інших факторів польових умов експлуатації.

Як показано в [2] процеси буріння глибоких свердловин на нафту і газ, внаслідок квазістаціонарних факторів вивчені недостатньо повно як експериментально, так і теоретично.

Багатьма зарубіжним та українським вченим запропоновані варіанти математичних моделей процесу буріння, сформульовані техніко-економічні показники ефективності технологічного процесу буріння, які по суті є критеріями оптимального управління процесами будівництва свердловин.

В табл. 2 наведені аналітичні вирази оптимальних моделей залежності частоти обертання ( $y$ ) долота від осьової сили ( $x$ ) за допомогою програми Curve Expert [2]:

Таблиця 2.

Оптимальні моделі управління бурінням

	Моделі $y = f(x, a, b, c, d)$	Коефіцієнти моделі				Відношення похибки %
		$a$	$b$	$c$	$d$	
1	Hoerl $ab^x x^c$	1,27	0,66	-0,32	—	0,0037
2	Weibull $a - be^{-cx^d}$	2,51	3,16	0,63	-0,57	0,0046
3	Rational Function $\frac{a + bx}{1 + cx + dx^2}$	2,64	-1,18	1,62	-0,88	0,0053
4	MMF $\frac{ab + cx^d}{b + x^d}$	-0,26	1,73	2,76	-0,88	0,0058

В якості вікна програми Curve Expert, як показано в [2] на моніторі формується структуризована образна модель даних (рис. 5), яка відображає аналітичне рівняння моделі та графік функції оптимальної залежності між осьовим навантаженням та частотою обертання долота.

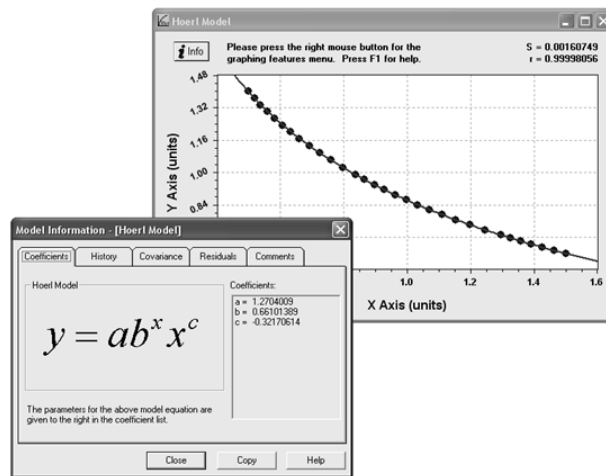


Рис. 5. Образна модель оптимальних параметрів роторного буріння

Крім характеристик оптимального режиму буріння оператори БУ та ББМ повинні виконувати моніторинг інших технологічних параметрів процесу буріння відповідно до вибраного на адаптері стану БУ згідно з табл. 1. При цьому процесорне обладнання абонентського пункту О1 повинно реалізувати алгоритми статистичного, кореляційного, спектрального і ентропійного опрацювання сигналів сенсорів та виконання моніторингу відхилень контрольованих параметрів буріння від норми. Виконується також слідкування за переходами квазістаціонарних станів БУ на основі кластерних та образно-кластерних моделей [8], шляхом розрахунку аналітики характерного функціоналу станів ОУ

$$X_{OY} = F(\{x_i\}, \{x_j\}, S_{OY}, M_x, M_j, M_v, D_x, \delta_x, R_{xx}, R_{xy}, S_w, L_i, \rho_{ij}, S_{ij}, P_{ij}, I_x),$$

де:  $\{x_i\}, \{x_j\}$  — масиви оцифрованих моніторингових даних параметрів ОУ;  $S_{OY}$  — відповідно семантичний, інформаційний та технологічний стани ОУ;  $M_x, M_j, M_v$  — відповідно вибіркове, ковзне та вагове математичні сподівання;  $D_x, \delta_x$  — відповідно дисперсія та середньоквадратичне відхилення;  $R_{xx}, R_{xy}$  — автокореляційна та взаємкореляційні функції;  $S_w$  — спектри параметрів ОУ у різних теоретико-числових базисах;  $L_i$  — логіко-статистичні інформаційні моделі (ЛСІМ),  $i \in \overline{1, 5}$ ;  $\rho_{ij}, S_{ij}, P_{ij}$  — відповідно матриці коефіцієнтів взаємкореляції, кластерної моделі ймовірнісних переходів та ентропійних станів;  $I_x$  — кореляційна міра ентропії стану ОУ.

## 2. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ОБРАЗНО-КЛАСТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ СТАНІВ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ

На основі синтезованого об'єднання параметрів характеристичного функціоналу  $X_{OY}$  реалізується ОКМ станів багатопараметричного квазістаціонарного об'єкта, яка демонструється на екрані монітора оператора у вигляді інтерактивного діалогу оператор-моніторингова система. Максимальне структуризоване завдання такої моделі є упрощене відображення стану ОУ, доступне для сприйняття оператором відхилень від норми, швидкої реакції та правильного розпізнавання небезпеки відхилення стану ОУ.

Прикладом такої образно-кластерної моделі є фейс-модель запропонована в роботі [8] на базі потужного алгоритму складеного на основі глибокого цифрового опрацювання технологічних даних та відображення стану ОУ, яка показана на рис. 5.

Зони слайдів, які відображають класи СД:



Рис. 5. Структуризоване представлення образно-кластерної моделі ОУ

### ВИСНОВКИ

В роботі викладено теоретичні засади та методи моніторингу процесів буріння на основі побудови образно-кластерної моделі. Обґрунтована необхідність та ефективність інтерактивного моніторингу станів бурової установки шляхом розрахунку статистичних, кореляційних, спектральних, логіко-статистичних та ентропійних характеристик. Запропонований метод побудови образно-кластерної моделі та її демонстрації на моніторі оператора бурової установки у вигляді фейс-моделі, яка відображає квазістаціонарні стани об'єкта у режимах норми, не норми та аварії.

Викладені методологічні, теоретичні та технічні програмно-апаратні аспекти побудови інтерактивної моніторингової системи контролю та управління процесами буріння створюють перспективу розробки та впровадження такого класу оптико-електронних моделей ОУ в інших галузях промисловості.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карпаш О. М. Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання : навч. посібн. — Івано-Франківськ : ІФДТУНГ, 2007. — 272 с.
2. Семенов Г. Н. Основи моніторингу технологічних об'єктів нафтогазової галузі : навч. посібн. / Г. Н. Семенов, М. М. Дранчук, О. В. Когутяк, Я. Р. Когуч, Я. В. Куровець / Івано-Франківськ : ІФДТУНГ, 2010. — 808 с.
3. Николайчук Я. М. Теорія джерел інформації / Николайчук Я. М. — Тернопіль : ТНЕУ, 2008. — 536 с.
4. Вінцюк Т. К. Образний комп'ютер: концепції, методологія, підходи. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — № 1, 2001. — С.125-160.
5. Кожем'яко В. П. Аналіз та перспективи розвитку кодування зображень / В. П. Кожем'яко, В. П. Майданюк, К. М. Жуков // Вісник ВПІ, 1999, № 3. — С. 42—48.
6. Поморова О. В. Проектування інтерфейсів користувача: навчальний посібник / О. В. Поморова, Т. О. Говорущенко. — Хмельницький : ХНУ, 2011. — 206 с.
7. Николайчук Я. Н. Эффективное кодирование суточного рапорта бурового мастера для формализованного ввода в ЭВМ / Я. Н. Николайчук, Р. В. Процюк, Г. Я. Ширмовский / М. : ВНИИОЭНГ, 1986. — 256 с.
8. Vozna N., Protsiuk H., Pituh I., Nykolaychuk Y. Image-cluster Method of Data Structuring of Multipsrsmeter Objects Monitiring of Interactive Computer Systems Proceedings of XIIIth International Conference CADSM'2015. — Lviv, 2015. — PP. 295—299.

### REFERENCES

1. Karpash O. Technical diagnostics drilling and natural gas equipment: manual. posibn .. — Ivano-Frankivsk: IFSTUOG, 2007. — 272 p.
2. Sementsov G. Basics monitoring of oil and gas industry: Teach. posibn. / G. Sementsov, M. Dranchuk, O. Kohutyak, Ya. Kohuch, Ya. Kurovets / Ivano-Frankivsk IFSTUOG, 2010. — 808 p.
3. Nykolaichuk Ya. Theory sources / Ya. Nykolaichuk - Ternopil: TNEU, 2008. — 536 p.
4. Vintsyuk T. Shaped computer : concepts, methodology, approaches. Opto-electronic information-energy technologies. № 1, 2001. — P. 125—160.
5. Kozhemiako V. Analysis and prospects of encoding images / V. Kozhem'yako, V. Maydanyuk,

- K. Zhukov VPI // Bulletin, 1999, № 3. — P. 42—48.
6. Pomorova O. Designing user interfaces: a tutorial / O. Pomorova, T. Novoruschenko. — Khmel'nitsky : KNU, 2011. — 206 p.
  7. Nykolaichuk Ya. Effectiveness encoding daily report driller for formal input into the computer / Ya. Nikolaychuk, R. Protsyuk, G. Shirmovsky / M. : VNIIOENG, 1986. — 256 p.
  8. Vozna N., Protsiuk H., Pituh I., Nykolaychuk Y. Image-cluster Method of Data Structuring of Multipsrsmeter Objects Monitiring of Interactive Computer Systems Proceedings of XIIIth International Conference CADSM'2015. — Lviv, 2015. — PP. 295—299.

Надійшла до редакції 24.05.2015 р.

**НИКОЛАЙЧУК ЯРОСЛАВ МИКОЛАЙОВИЧ** — д.т.н., професор, завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, Тернопільський національний економічний університет, м.Тернопіль, Україна.

**ПРОЦЮК ГАЛИНА ЯРОСЛАВІВНА** — асистент кафедри інформатики, Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна.