

УДК 621.3

СИМВОЛІЗАЦІЯ СИГНАЛІВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ ПОТОКУ ДЛЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО КОНТРОЛЮ СТРУКТУРИ БАГАТОФАЗНОГО ПОТОКУ

© Райтер П.М. 2004,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

© Ільницький Р.М., 2004

ДАК «Чорноморнафтогаз» (м. Сімферополь)

Викладено доцільність виконання та суть методу символізації реалізації сигналів давачів пульсацій багатозового потоку. Запропоновано кількісні оцінки порівняння символізованих інформаційних сигналів. Приведено результати символізації експериментальних сигналів давачів двохфазного потоку та обґрунтовано доцільність їх використання при реалізації систем нейромережевого контролю структури багатозового потоку

Проблема ідентифікації режимів потоків в процесі їх руху як багатозовних сумішей (ядерна енергетика, нафтогазовидобувна промисловість, хімічна промисловість) є відкритою проблемою. В загальному, різні режими потоку породжують відмінні як якісні, так і кількісні параметри потоку. Із-за значної нелінійності сил, що викликають зміни режимів потоку, їх прогнозування є реально досить складним. Підхід, який найбільше використовується, полягає в ідентифікації реальної моделі потоку на основі аналізу інформаційних сигналів, що зазнають флуктуацій в залежності від структури потоку. Значна кількість праць виконана в напрямку використання різних давачів та різних методів аналізу таких інформаційних сигналів. Дана робота присвячена подальшому розвитку вказаного напрямку. Метою даної роботи є показати потенціал нових методів аналізу, що базуються на символізації інформаційних сигналів пульсацій тиску при реальних режимах багатозового потоку та можливість їх реалізації в цифрових сигнальних процесорах з електроперепрограмованою пам'яттю команд та даних.

Сучасні підходи оцінки продуктивності свердловин в нафтогазовидобувній промисловості базуються на механістичних моделях, що дозволяють математично моделювати сталі та перехідні режими потоку. Однак існують і значні обмеження, пов'язані з проблемами конвергенції, обчислювальними обмеженнями, нестабільністю граничних умов, обмеженнями щодо використання існуючих моделей багатозових потоків і невизначеностями, пов'язаними з дросельно-клапанними моделями. Поряд з цим моніторинг продукції свердловин в ре-

альному часі розглядається як найкращий шлях до оптимізації роботи родовища. Моніторинг свердловини передбачає можливість відслідковувати довільні зміни в композиції потоку, швидкостях потоку, або профілях температури і тиску в реальному часі. Багатозовна витратометрія відіграє при цьому ключову роль. Така інформація в поєднанні з критичним аналізом історичних даних про свердловину дозволяє діагностувати систему і прогнозувати майбутній її стан.

За останні 10-15 років в галузі багатозовної витратометрії особливо при вимірюванні продукції нафтогазових свердловин відбулись кардинальні зміни, що пов'язані з великою увагою до даного питання з боку технологічного персоналу та геологічних служб нафтогазовидобувних підприємств. Розроблені, знаходяться на етапі дослідно-промислових випробувань або впроваджені в діючі технології видобутку на суші та шельфу такі витратовимірювальні системи, як: AGAR MPFM, Fluenta MF, MFI, ESMEER, TopFlow FMC, Framo MFM, DF868 ATW. Авторами розробок заявляються достатньо високі метрологічні та експлуатаційні характеристики, але поряд з цим вказані установки мають і недоліки. До них можна віднести: використання в деяких радіоактивного джерела, необхідність калібровки по місцю контролю, значна металоємність і достатньо висока вартість. Тому доцільна розробка методів контролю структури та витрати багатозовних потоків, при технічній реалізації яких використовувались би серійні доступні давачі параметрів потоку, а достовірність контролю досягалась б за допомогою ускладнення та пришвидшення обробки необхідного масиву інформаційних сигналів. Це дозволить зменшити мате-

ріалоемність таких систем і забезпечити можливість спостереження не тільки за миттєвим складом багатозафазного потоку, а і за історією зміни дебіту і функціонування конкретної свердловини.

Об'єкт контролю – багатозафазний потік – по своїй природі є складним об'єктом. Це в основному зумовлено тим, що, за виключенням розшарованого режиму течії, багатозафазні потоки є турбулентними потоками, які на даний час ще не мають цілісного аналітичного опису. А це призводить до того, що для забезпечення відповідних метрологічних характеристик контролю (хоча би на рівні $\pm 5\%$) існуючі та розроблювані витратоміри вимагають калібровки та настройки по місцю контролю. Тому доцільно алгоритм обробки вимірюваних інформаційних сигналів реалізувати програмно і зберігати в пам'яті, яку сам пристрій може модифікувати в процесі самокалібровки та настройки. Крім того, програмна реалізація обробки сигналу дозволяє більш коректно вирішити проблему нестационарності цих сигналів, що є наслідком нестационарності гідродинамічних параметрів турбулентного двофазного потоку.

Інформаційні сигнали датчиків пульсацій тиску потоку, вібрації трубопроводу та акустичного зондування мають суттєво стохастичну природу, що викликано природою тих процесів, що вони відображають. Тому в процесі попередньої обробки сигналів датчиків доцільно здійснити структурування і фільтрацію сигналів. Такий підхід називають символізацією і використовують в багатьох підходах та системах обробки стохастичних даних [1÷5].

Перетворення оригінальних вимірювань в символічну форму базується на поділі діапазону вимірюваної величини на дискретне число інтервалів, як показано на рис. 1.

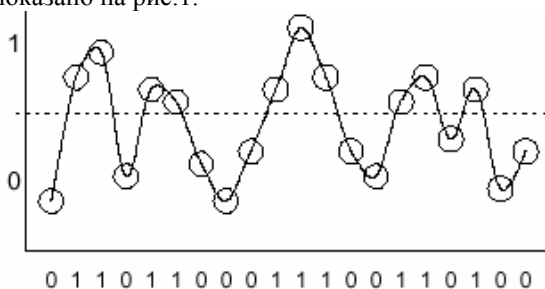


Рис. 1. Ілюстрація символізації (кожній точці серії даних графіка відповідає значення символічної серії на осі абсцис)

Для ілюстративних цілей ми обмежуємо себе тут найпростішим можливим поділом діапазону даних на два інтервали (бінарний поділ). Оригінальним вимірам, які є вище прийнятого значення межі поділу сигналу, присвоюється символічне значення 1, а вимірам, що знаходяться нижче межі поділу, присвоюється символічне значення 0. В даному випадку

межа поділу сигналу вибрана на рівні оцінки математичного очікування вибірки значень інформаційного сигналу давача.

Вищі рівні символізації створюються шляхом використання більшої кількості інтервалів поділу. Вищі рівні поділу можуть бути використані, коли доцільно дослідити деталі отриманих вимірів, які є малими по відношенню до всього діапазону. В процесі попередньої обробки інформаційних сигналів датчиків після їх підсилення та нормалізації виконується дискретизація аналогових сигналів по часу та квантування по рівню – аналого-цифрове перетворення (АЦП). Результат роботи АЦП – це значення в діапазоні від 0 до 1023 (від 0 до $2^{10}-1$ при десятирозрядному АЦП), які пропорційні значенням нормалізованих сигналів датчиків. Виділимо в оперативній пам'яті цифрового сигнального процесора 1024 комірки (з адресами від 0 до 1023). Після кожного аналого-цифрового перетворення інформаційного сигналу датчика вміст тієї комірки пам'яті, адреса якої дорівнює числу отриманому в результаті аналого-цифрового перетворення конкретного значення сигналу, збільшується на 1 (інкрементується). Таким чином, результат аналого-цифрового перетворення інформаційного сигналу – число - сприймається процесором як адреса комірки, яку треба інкрементувати. Дана операція виконується досить швидко і швидкість такої символізації сигналу практично визначається тільки швидкістю модуля АЦП. В процесі такої обробки сигналу в 1024-ох комірках пам'яті буде по суті оцінка функції густини розподілу виборки інформаційного сигналу. Поділивши значення в кожній з цих комірок пам'яті на загальну кількість аналого-цифрових перетворень сигналу за час спостереження, отримуємо в пам'яті символічно-послідовну гістограму розподілу енергії інформаційного сигналу. На рис. 2 приведено такий розподіл для 18 спостережень при використанні тільки трирозрядного АЦП (з метою спрощення рисунка та пояснень).

Вказану вище гістограму пропонується використовувати для досягнення таких цілей:

- 1) визначення виду розподілу та оцінки інтервалу стационарності стохастичного інформаційного сигналу датчика;
- 2) отримання образу інформаційного сигналу, який характерний для конкретного режиму двофазного потоку з метою ідентифікації співвідношення фаз потоку;
- 3) отримання образу інформаційного сигналу датчика пульсацій тиску, який через деякий час повинен бути отриманий від другого датчика сигналу, віддаленого від першого на задану відстань. Вказаний вище час повторення визначатиме швидкість потоку багатозафазної суміші.

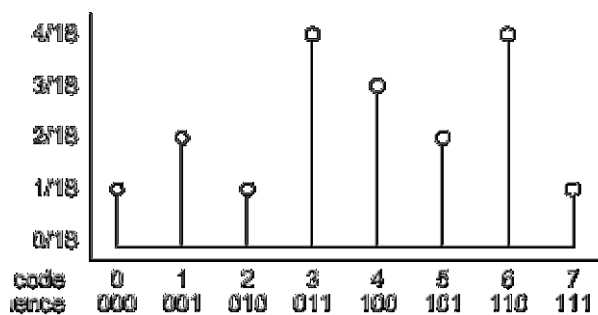


Рис.2. Приклад символно-послідовної гістограми для символної серії при восьми рівнях поділу діапазону сигналу

На додаток для забезпечення візуального подання динамічних образів сигналів і відповідних потоків, символно-послідовні гістограми повинні забезпечити основу для кількісної оцінки. Для цього в роботі [6] пропонується використати модифіковану ентропію Шенона, евклідову норму (Т-статистика) та модифіковану χ^2 статистику.

Модифікована статистика Шенона визначається так:

$$H_s = \frac{1}{\log N_{obs}} \sum_i p_i \log p_i, \quad (1)$$

де p_i - ймовірність (нормалізована частота спостережень) i -го символного інтервалу; N_{obs} - число можливих послідовностей, які фактично спостерігаються в даних. Використовуючи цю статистику, доцільно здійснювати поділ діапазону зміни інформаційного сигналу на інтервали з однаковою ймовірністю. Цей вид нормалізації вказує на те, що модифікована ентропія Шенона буде конвергувати до 1 тоді, коли набір даних буде слідувати до істинної випадковості. Якщо ж в даних будуть присутні складні детерміновані структури (наприклад, нестабільні або зашумлені періодичності), то ця статистика буде менша за 1.

Евклідова норма та модифікована χ^2 статистика використовується для порівняння гістограм інформаційних сигналів давача. Евклідова норма визначається так:

$$T_{xy} = \sqrt{\sum_i (X_i - Y_i)^2}, \quad (2)$$

а модифікована χ^2 статистика визначається так

$$\chi_{xy}^2 = \sum_i \frac{(X_i - Y_i)^2}{(X_i + Y_i)}, \quad (3)$$

де X_i та Y_i - індивідуальні інтервальні ймовірності для i -того інтервалу гістограм X та Y поділу діапазону двох інформаційних сигналів.

Обидві ці статистики генеруються відмінностями в частотах у відповідних індивідуальних інтервалах для різних наборів даних. Якщо частоти p знач-

но відрізняються, то результуючі статистики будуть також суттєво відмінними, що свідчать про те, що динамічні взірці сигналів (а отже і потоків, які вони відображають) в наборах даних сигналів є суттєво різними. Евклідова норма статистика базується на ідеї, що кожна складова інтервальної гістограми може бути розглянута як вектор в багатовимірному просторі, де число вимірів є числом можливих унікальних інтервалів діапазону зміни інформаційного сигналу і його праобразу - багатофазного потоку. Тоді модуль вектора відмінностей між гістограмами може бути параметром порівняння гістограм. Модифікована χ^2 статистика отримується з стандартної χ^2 статистики, де одновимірні частоти замінюються інтервальними частотами.

Для оцінки та практичної перевірки приведені методології символізації інформаційних сигналів використано реалізації сигналів, отриманих на експериментальній ділянці трубопроводу установки комплексної підготовки газу (УКПГ) Карачаганакського газоконденсатного родовища (Казахстан)[7]. Вимірювальна ділянка містить ділянку шлейфового трубопроводу з газоконденсатним потоком всередині, що знаходиться між двома опорами. На початку виходу шлейфового трубопроводу свердловини на поверхню (блоку входних ниток УКПГ) після опори на відстані 150 мм на трубопровід за допомогою хомути встановлено п'єзоелектричний акселерометр Δ -shear будови. Віброакустичний сигнал вказаним датчиком перетворювався в пропорційний електричний і в подальшому використовуються як інформаційний сигнал про характер гідродинамічних пульсацій двофазного потоку всередині трубопроводу. У зв'язку з високими значеннями тиску потоку (до 25 МПа) та значним вмістом сірководню (до 4%) в продукції свердловини, реєструвались не безпосередньо сигнали гідродинамічних пульсацій, а їх вплив на механічну систему трубопроводу (низькочастотні вібрації труби) та генеровані акустичні шуми через стінку трубопроводу товщиною 18 мм (високочастотні коливання). Інформаційний частотний діапазон коливань складав 3-6400 Гц. В табл.1 приведено витрати та технологічні параметри потоків, при яких проводилась реєстрація інформаційних сигналів.

Реєстрації інформаційних сигналів здійснювалась протягом 3 хвилин з метою забезпечення стаціонарності вимірювань. Зареєстровані сигнали після підсилення на рівні 40 Дб (для свердловини № 109) та 30 дБ (для свердловини № 118) були піддані восьмирозрядному аналого-цифровому перетворенню та розрахунку інтервальних діаграм за допомогою цифрової обробки сигналів в мікропроцесорному блоці. На рис.3 приведено такі гістограми в діапазоні сигналу від -10 до +10 В з кроком інтервалу

дискретизації 76 мВ для сигналів отриманих при багатофазному потоці свердловини № 109.

Аналогічну гістограму для сигналу давача свердловини №118 подано на рис.4, але оскільки інформаційний сигнал був більш інтенсивний, то вимагалось менше підсилення. Менший діапазон зміни інформаційного сигналу (від -3 до +3 В) при використанні того ж восьмирозрядного АЦП дозволяє забезпечити ширину символічного інтервалу 23,4 мВ. Використання меншого інтервалу символізації дозволяє відслідковувати більш детально зміни контрольованих потоків.

На основі аналізу даних рис.3 і рис.4 та табл.1 можна зробити наступні висновки:

- 1) зміна дебіту свердловини, що веде до зміни витрати фаз багатофазного потоку, призводить до розширення гістограм, що в числовому вигляді виражається у зміні статистики Шенона (див. табл.1);
- 2) при використанні 26-ти інтервалів символізації вимірювального діапазону сигналу існує пряма пропорційність між формою символічної гістограми (рис.3) і значенням статистики Шенона та витратою багатофазової суміші.

Таблиця 1 - Технологічні параметри газоконденсатного потоку на експериментальній ділянці

| № п/п | № свердл. | Витрата газу приведена до н.у., м ³ /год | Витрата конденсату, м ³ /год | Тиск в трубопроводі, МПа | Статистика Шенона H_s |
|-------|-----------|---|---|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 109 | 7000 | 30 | 239 | 0,3064 |
| 2 | 109 | 9000 | 32 | 244 | 0,3275 |
| 3 | 109 | 11500 | 36,5 | 235 | 0,3320 |
| 4 | 109 | 14500 | 38 | 231 | 0,3379 |
| 5 | 118 | 13000 | 16,8 | 245 | 0,3925 |
| 6 | 118 | 15500 | 42 | 231 | 0,4155 |
| 7 | 118 | 16500 | 30 | 230 | 0,4062 |
| 8. | 118 | 22500 | 35 | 205 | 0,3947 |

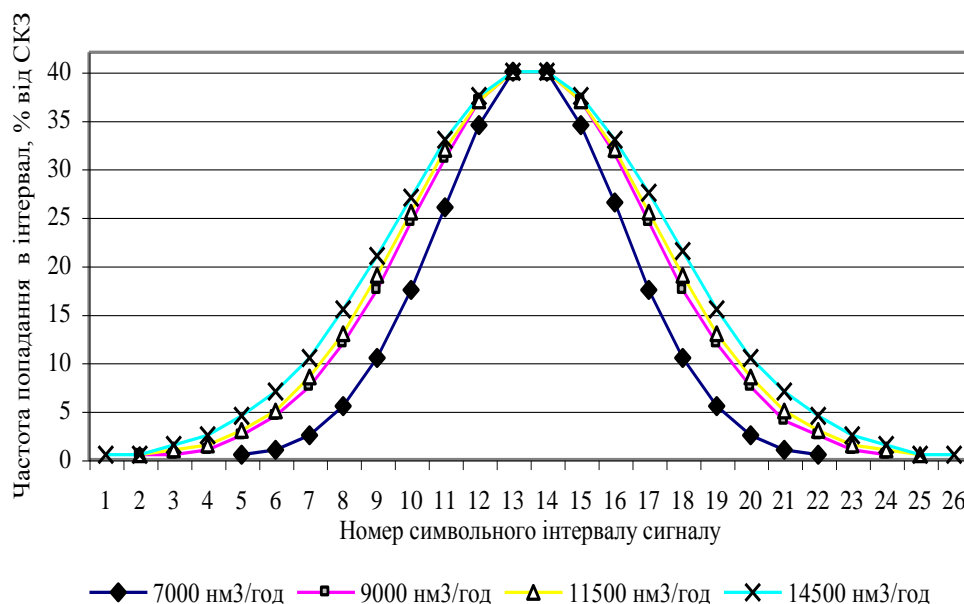


Рис.3 Гістограма зміни символічного перетворення інформаційного

сигналу при різних дебітах свердловини № 109 Карачаганаського газоконденсатного родовища

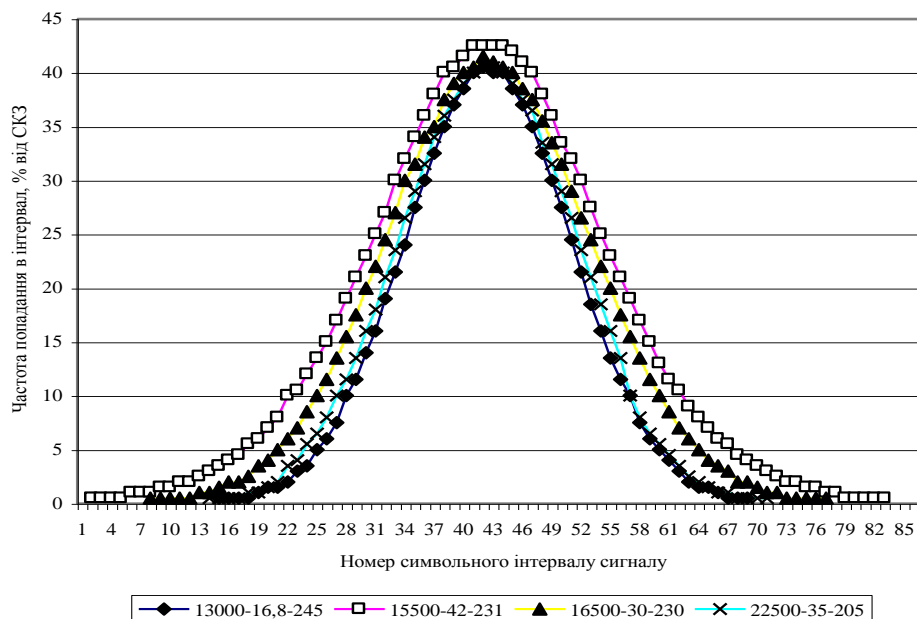


Рис.4. Гістограма зміни символічного перетворення інформаційного сигналу про різних дебітах свердловини №118 Карачаганаського газоконденсатного родовища

3) при використанні 86-ти інтервалів та збільшенні дебіту свердловини статистика Шенона також зростає, але на характер її зміни в більшій мірі впливає зміна витрати рідкої фази (конденсату), ніж зміна витрати газової фази. Це зумовлено різницею в густинах фаз потоку (рис.4). Додатковим фактором, який треба враховувати, є статичний тиск потоку, так як зростання тиску веде до зростання густини газу і, як наслідок, впливу витрати газу на характер інформаційного сигналу.

Отримані результати дозволяють обґрунтувати можливість використання символічних значень частот попадання в окремі інтервали діапазону інформаційного сигналу як входи до штучної нейронної мережі, реалізованої програмно в цифровому сигнальному процесорі блоку обробки інформації пристрою контролю структури потоку. Використання таких нейромережевих алгоритмів обробки інформації, описаних в [8,9], дозволяє забезпечити ідентифікацію структури потоку на основі тренувань розробленої системи безпосередньо по місцю контролю структури багатофазного потоку.

1. Tang X.Z., Tracy E.R., Boozer A.D., deBrauw A., Brown R. (1995). "Symbol sequence statistics in noisy chaotic signal reconstruction", *Physical Review E* 51:5, p. 3871–3889. 2. Kurths J., Schwarz U., Witt A., Krampe R.Th., Abel M. (1996). "Measures of complexity in signal analysis", in *Chaotic, Fractal, and Nonlinear Signal Processing*, AIP Conference Proceedings 375 (3rd Technical Conference on Nonlinear Dynamics and

Full Spectrum Processing (Mystic, Connecticut USA; 1995 July 10–14)) Woodbury, New York 1996, p.33–54. 3. Lehrman M., Rechester A.B., White R.B. (1997). *Symbolic analysis of chaotic signals and turbulent fluctuations*, *Physical Review Letters* 78:1, p.54–57. 4. Tang X.Z., Tracy E.R., Brown R. (1997). *Symbol statistics and spatio-temporal systems*, *Physica D* 102,p. 253–261. 5. Finney C.E.A., Green J.B.Jr., Daw C.S. (1998). *Symbolic time-series analysis of engine combustion measurements*", SAE Paper No. 980624. 6. Finney C.E.A., Nguyen K., Daw C.S., Halow J.S. (1998). "Symbol-sequence statistics for monitoring fluidization", to be presented at the 1998 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (Anaheim, California USA; 1998 November 15–20). 7. Разработка бесконтактных поточных методов и средств измерения дебита газоконденсатных скважин. Отчет НИИ/ Тема № 329-89; № гос.рег. 01900002986. – МИИГ им.И.М.Губкина. – г.Москва, 1990г. – 104 с.-(Отв.исполн. Райтер П.Н.). 8. Райтер П.М., Карнаш О.М., Методи апаратної реалізації нейронних мереж при вимірюванні витрати фаз вуглеводневих потоків// Методи та прилади контролю якості –2003-№10.- с.82-86. 9. Райтер П.М. Використання вейвлет-перетворень сигналів флуктуацій тиску газорідного потоку при реалізації нейромережевих пристроїв контролю його структури //Матеріали наукового збірника міжнародної конференції-семінару "Леотест-2004".-2004 – С.87-91