

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

**МАТВІЙКІВ ТАРАС МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 004.414.2; 004.942; 004.02.

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ УСУНЕННЯ УДАРІВ ТА ВІБРАЦІЙ  
В ПОХИЛО-СКЕРОВАНОМУ БУРІННІ**

05.13.06 – інформаційні технології

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Теслюк Василь Миколайович,**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
професор кафедри систем автоматизованого проектування

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Тимченко Олександр Володимирович,**  
Українська академія друкарства МОН України,  
професор кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій

кандидат технічних наук, доцент  
**Говорущенко Тетяна Олександрівна,**  
Хмельницький національний університет МОН України,  
Завідувач кафедри системного програмування

Захист відбудеться “01” грудня 2016 р. о 14<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.14 у Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 28а, аудиторія 807, V навчальний корпус.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “28” жовтня 2016 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, канд. техн. наук, доцент

А.Є. Батюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Забезпечення енергетичної незалежності України в умовах виснаження приповерхневих нафтових і газових пластів спонукає бурити глибокі (5000 – 13500 метрів) похило-скеровані свердловини. Сам процес буріння супроводжується нагріванням бурового інструменту і контрольно-вимірювальних приладів до 100...150°C як за рахунок природного підвищення температури, так і за рахунок сил тертя. Одночасно буріння супроводжується ударами долота об дно свердловини та бурових труб об її стінки з енергетичним спектром до 150g і більше. Це призводить до виникнення вібрацій із частотою коливань близько 10 Гц і енергетичним спектром до 20g. Для збереження працездатності дорогого обладнання в екстремальних умовах часто вимагається прийняття оперативного рішення: продовжити буріння в попередньому режимі; продовжити буріння в новому режимі чи зупинити процес буріння. Рішення приймається в умовах невизначеності та наявності неточної і, часто, суперечливої інформації. Враховуючи людський фактор, різні оператори можуть приймати різні рішення.

Проблема розроблення засобів автоматизації процесу буріння відображена у роботах ряду науковців в різних країнах світу. В Україні вагомий внесок у створення теоретичного базису й вирішення прикладних задач автоматизації процесу буріння внесли відомі вчені Івано-Франківського НТУ нафти і газу, інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м.Київ), Донецького НТУ, НУ "Львівська політехніка", а саме: М.І. Горбійчук, В.Б. Кропивницька, Л.М. Заміховський, М.А. Мислюк, Г.Н. Семенцов, В.М. Карпенко, В.В. Мохор, В.С. Білецький, А.В. Маляр, Б.С. Калужний та ін. В Росії автоматизацією буріння займаються при ВАТ "Уралмаш" та науково-дослідному інституті «Газпром ВНИИГАЗ». Значний внесок внесли вчені: Греков С.В., Вольгемут Е.А., Е.Є. Лукьянов, М.Г. Лугуманов. На заході автоматизацією буріння займаються провідні університети, нафтогазовидобувні та сервісні компанії: Норвезький університет науки та технологій, Х'юстонський університет, університет Пердью (Вест-Лафает, США), Техаський університет (Остін), компанії ExxonMobil (США), Shell (Нідерланди), Schlumberger (США) та NOV (США). Значний внесок внесли такі вчені, як: P. Skalle, A. Aamodt, H.S. Baik, D.M. Abraham, S. Gokhale, E. Gundersen, F. Sørmo, F. Florence, M. Guggari, W.L. Koederitz, H. Rodriguez, C.O'Kelly, D. Russell, O. Breyholtz, M. Nikolaou, P. Ashok та ін.

Вчені значну увагу приділяють розробленню систем штучного інтелекту, зокрема систем підтримки прийняття рішень (СППР) для буріння нафтогазових свердловин. Аналіз наукових досліджень показав, що більшість таких СППР використовують апарат MBR- model-based reasoning (міркування на базі моделей) для побудови та реалізації експертних систем, котрі працюють в режимі порадики. В СППР для буріння недостатню увагу приділено використанню апарату мереж Байєса (МБ), котрий є доречнішим в умовах невизначеності, оскільки включає ймовірнісну складову певного процесу та є зручнішим при проведенні системного аналізу.

Суттєво зменшити негативний вплив людського фактору можливо шляхом автоматизації окремих задач управління, котрі виконуються оператором з буріння. Такими задачами є ідентифікація та усунення ударів і вібрацій під час буріння. Тому актуальним завданням є розроблення інформаційних технологій автоматичного усунення ударів і вібрацій в похило-скерованому бурінні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри автоматизованих систем управління “Методи, моделі та компоненти інформаційних управляючих систем і технологій” Національного університету “Львівська політехніка”. Дисертація безпосередньо пов'язана з планами наукових досліджень, які виконувалися в межах держбюджетних науково-дослідних робіт, а саме: “Розроблення компонентів для синтезу інтегрованих автоматизованих систем управління” (2014-2016 рр., № держ. реєстр. 0114U001232).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є розроблення моделей, методів і засобів інформаційної технології автоматичної ідентифікації та усунення ударів і вібрацій бурової колони під час похило-скерованого буріння глибоких свердловин для підвищення ресурсу роботи електронних свердловинних приладів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- провести аналіз особливостей, недоліків та переваг наявних інформаційних технологій та систем в бурінні а також СППР ідентифікації та усунення вібрацій під час похило-скерованого буріння;
- виявити основні інформаційні ознаки ударів та вібрацій бурової колони під час буріння;
- розробити модель автоматичної ідентифікації основних видів вібрацій, що враховує додаткову інформацію про процес буріння, зокрема сумісні покази як глибинних так і поверхневих давачів;
- розробити модель для оцінювання поточного ресурсу роботи електронних свердловинних приладів в умовах одночасної дії різних видів вібрацій;
- розробити метод автоматичного ухвалення рішення про необхідність усунення вібрацій в режимі реального часу та умовах невизначеності, що враховує наявну інформацію про процес буріння, стан ЕСП, та поточні геологічні умови;
- розробити метод автоматичного усунення ударів та вібрацій під час похило-скерованого буріння, який враховує знання та досвід експертів щодо усунення вібрації у відповідних геологічних умовах;
- здійснити програмну реалізацію СППР автоматичної ідентифікації та усунення вібрацій під час буріння на основі розроблених методів та моделей.

**Об'єктом дослідження** є автоматизація технологічних процесів керування похило-скерованим бурінням глибоких нафто-газових свердловин.

**Предмет дослідження** – методи, моделі та засоби системи підтримки прийняття рішень автоматичної ідентифікації та усунення вібрацій під час похило-скерованого буріння свердловин.

**Методи дослідження.** Враховуючи специфічні особливості буріння глибоких похило-скерованих свердловин, зокрема дороге обладнання та високу вартість процесу буріння, в роботі проводились переважно пасивні факторні експерименти. Опрацювання результатів факторних експериментів здійснювалось з використанням теорії ймовірності й математичної статистики. Для побудови формалізованого інтегрального оцінювання поточного ресурсу роботи ЕСП, використано метод математичного моделювання та аналогії із електронними апаратами. При розробленні СППР використовувалися методи з теорії експертних систем та математичного апарату мереж Байєса.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що:

*Вперше розроблено:*

- імовірнісну модель автоматичної ідентифікації видів ударів та вібрацій, яка ґрунтується на причинно-наслідковій моделі виникнення вібрацій та теорії мереж Байєса, що враховує сумісні покази глибинних та поверхневих сенсорів і дає змогу автоматично визначати вид та достовірність ударів та вібрацій під час буріння;

- модель оцінювання ресурсу роботи електронного свердловинного приладу, яка завдяки застосуванню методу аналогії із електронними апаратами шляхом розрахунку коефіцієнту інтенсивності вібрацій описує процес руйнування ЕСП в умовах одночасної дії різних видів вібрацій та дає змогу визначити поточний ресурс роботи ЕСП.

*Вдосконалено:*

- метод ухвалення рішення в режимі реального часу та умовах невизначеності шляхом використання інформаційної моделі ухвалення рішення на основі діаграм впливу, яка враховує історію усунення вібрацій в поточних геологічних умовах, очікуваний час до кінця рейсу буріння, поточний рівень вібрацій, стан електронного свердловинного приладу та дає змогу у автоматичному режимі прийняти рішення про необхідність усунення ударів і вібрацій;

- метод автоматичного усунення ударів та вібрацій, що враховує досвід усунення вібрацій в поточних геологічних умовах та базується на основних алгоритмах усунення вібрацій шляхом варіації навантаження на долото та зміни частоти обертання бурової колони і дає змогу автоматично усувати удари і вібрації під час похило-скерованого буріння.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені моделі та методи інформаційної технології реалізовані у вигляді СППР ідентифікації та усунення критичних ударів та вібрацій у похило-скерованому бурінні. Результати можуть бути використані в діяльності нафто- та газовидобувних підприємств для підвищення надійності та ресурсу роботи електронних свердловинних приладів.

- Розроблена структура та програмно реалізована система підтримки прийняття рішення автоматичного усунення вібрацій під час буріння похило-скерованих свердловин, що сумісно використовує показники як поверхневих, так і глибинних сенсорів для визначення наявності відповідного виду вібрацій та прийняття рішення по способу їх усунення.

- Розроблені та досліджені алгоритми ідентифікації та усунення вібрацій під час похило-скерованого буріння, що поєднують використання як імовірнісних елементів мереж Байеса, так і знання та досвід експертів в галузі буріння.
- Розроблений програмний продукт, який в режимі порадики, придатний для промислового використання під час буріння похило-скерованих свердловин за допомогою сучасних MWD-, LWD-, RSS-систем. СППР може бути розміщена як локально – на бурових установках, так і в центрах контролю за процесом буріння. Захоплення даних реалізовано згідно стандартів WITSML.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертації, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У працях, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить: вдосконалення методу автоматичного усунення ударів та вібрацій під час буріння [1], розроблення алгоритму оцінювання ситуації та вдосконалення методу ухвалення рішення в режимі реального часу та умовах невизначеності [2], розроблення причинно-наслідкової моделі індукування вібрацій та автоматичної ідентифікації видів ударів та вібрацій на основі теорії мереж Байеса [3, 10] та розроблення моделі оцінювання ресурсу роботи та ризику поломки електронних свердловинних приладів [4, 13], структури СППР, алгоритму роботи, програмного та інформаційного забезпечення СППР автоматичного усунення ударів та вібрацій під час буріння [5], моделі промиву бурової колони [6, 14], результати дослідження застосування MEMS в технології буріння [8, 9, 15, 16], моделі на основі мереж Петрі [1, 11], метод зменшення нагріву ЕСП [12].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень доповідалися і обговорювалися на 7-х міжнародних конференціях, зокрема: міжнародних науково-технічних конференціях "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" "TCSET" (Львів, Україна, 2006, 2010, 2012); Міжнародній науково-технічній конференції "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics", CADSM, (Поляна, 2009, 2011, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції "Perspective Technologies and Methods in MEMS Design"), MEMSTECH, (Поляна, 2006);

Матеріали дисертації регулярно доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри автоматизованих систем управління Національного університету "Львівська політехніка".

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено у 16 наукових працях, серед них 1 стаття опублікована в міжнародному виданні, яке включено до міжнародних наукометричних баз, 2 статті у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз, 6 статей у виданнях, що входять до переліку фахових видань України та 7 тез у матеріалах міжнародних науково-технічних конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 133 сторінки основного тексту, 52 рисунка та 12 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 155 сторінок, список літературних джерел налічує 120 найменувань на 15 сторінках. Дисертація містить 6 додатків, розміщених на 7 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету й задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами й темами, а також подано відомості про публікації та апробацію роботи.

У **першому** розділі проаналізовано сучасний стан інформаційних технологій та систем при бурінні глибоких похило-скерованих свердловин та виділено основні інформаційні технології які використовуються для розроблення СППР ідентифікації та усунення вібрацій під час похило-скерованого буріння свердловин.

Встановлено, що основними технічними засобами вибійних інформаційно-вимірювальних систем в бурінні є електронні свердловинні прилади (ЕСП), які входять до складу компоновки низу бурової колони (КНБК) та зазнають деструктивної дії тих самих механічних ударів та вібрацій що й долото чи КНБК. Незважаючи на заявлений ресурс роботи 1000-2000 год., їх реальне напрацювання на відмову складає лише 500 год., а кожний п'ятий рейс буріння закінчується відмовою якогось із модулів ЕСП. Аналіз статистичних даних пасивних факторних експериментів показав, що основною причиною передчасної відмови ЕСП є несвоєчасне виявлення та усунення ударів та вібрацій під час буріння.

Огляд літературних джерел показав, що в даний час в бурінні існують системи виявлення ударів і вібрацій, але вони мало придатні для автоматизації, оскільки не враховують повної інформації про процес буріння і можуть давати хибний результат при відмові одного із давачів, а також не приділяється належна увага виявленню і усуненню ударів та вібрацій в режимі реального часу. В процесі буріння діє цілий ряд чинників, інформація про які не завжди повна, а іноді суперечлива. За таких умов прийняття достовірних рішень залежить від досвіду та інтуїції особи, що приймає рішення (ОПР), а також наявності СППР. В зв'язку з чим виникає потреба в розробленні більш досконалих систем виявлення ударів та вібрацій під час буріння, які б враховували додаткову інформацію про стан інших компонент системи, зокрема використовували дані як глибинних так і поверхневих давачів.

На основі аналізу області дослідження проведено класифікацію інформаційних систем, які використовуються в глибокому похило-скерованому бурінні. Для СППР автоматичної ідентифікації та усунення вібрацій під час похило-скерованого буріння, виділено: 1) системи контролю та автоматизації технологічних параметрів режиму буріння; 2) вибійні інформаційно-вимірювальні системи.

Проведений аналіз наявних інформаційних технологій, які використовуються у вищезгаданих системах показав, що для розроблення СППР автоматичної ідентифікації та усунення вібрацій під час похило-скерованого буріння, можуть бути використані наступні технології: 1) ІТ передачі даних вибій-поверхня; 2) ІТ передачі команд поверхня-вибій; 3) ІТ збору, збереження та опрацювання даних; 4) ІТ WITSML віддаленого контролю та моніторингу процесу буріння; 5) ІТ СВР/МВР-методів та апарату мереж Байеса.

В **другому** розділі виявлено основні дестабілізуючі чинники, які впливають на надійність процесу буріння та розроблено модель оцінювання поточного ресурсу роботи ЕСП.

При визначенні надійності електронних свердловинних приладів використовувалися пасивні факторні експерименти, які ґрунтувались на тривалому спостереженні за ходом процесу буріння, наборі необхідних статистичних даних та аналізі отриманої інформації. Для збору, опрацювання та передачі глибинної інформації із вибою свердловини на поверхню використовувалися телеметричні системи (MWD-системи). В режимі реального часу вони не лише пересилають виміри інклінометрів, але і параметри динаміки буріння на вибої, що в сумісності із поверхневими технологічними параметрами дають змогу робити висновки про наявність ударів, вібрацій та інших неефективних затрат енергії.

За допомогою математичного опрацювання статистичних даних було виявлено та класифіковано основні причини та механізми відмов ЕСП, а також розміщено у рангований ряд основні дестабілізуючі чинники (табл.1).

Табл. 1.

Рангований статистичний ряд основних дестабілізуючих чинників

№	Основні дестабілізуючі чинники:	%
1	Людський фактор	28,7
2	Механічні удари і вібрації	26,2
3	Корозія та інші хімічні впливи	22,4
4	Перегрів	12,8
5	Механічна втомливість металу	7,6
	Решта: термальні удари, високий тиск, механічні навантаження, електромагнетизм, дифузія, та ін.	2,3

Встановлено, що основним дестабілізуючим чинником, який впливає на надійність роботи ЕСП, є саме людський фактор. Несвоєчасне ухвалення рішення чи прийняття хибних рішень призводить до передчасної відмови ЕСП. Для підвищення обґрунтованості рішень під час буріння, виникла необхідність в розробленні та впровадженні в бурову практику СППР для ідентифікації ударів і вібрацій та застосуванні відповідних заходів щодо їх усунення. Це дасть змогу збільшити надійність роботи як самого ЕСП, так і живучість всієї АСУ бурінням.

Самі по собі прискорення, які виникають при обертанні бурової колони незначні. Значно більшим є прискорення (сповільнення), які виникають при ударах і вібраціях. Відомо, що при бурінні мають місце від трьох до п'яти видів ударів, які ініціюють різні траєкторії руху бурової колони, та генерують відповідні їм види вібрації: осьові, латеральні, обертові. По своїй природі ці вібрації є затухаючими коливаннями, але якщо удари слідуєть один за одним, то вони накладаються, спричиняють спектр неперервних коливань, – вібрації. Долото, як і транспортні засоби, також генерує удари і вібрації. Використовуючи аналогію долота з транспортними засобами та електронними апаратами (ЕА), розроблено математичну модель, що дає змогу визначити поточний ресурс роботи ЕСП в умовах одночасної дії різних видів вібрацій. Аналогом транспортного засобу є бурова колона, аналогом ЕА – електронний свердловинний прилад, а аналогом ЕРЕ (електро-радіо-елементів) – елементи ЕСП (сенсори, пристрої оброблення та захоплення інформації).



Коливання ЕСП можуть вступати в резонанс з коливаннями бурової колони, так як на деякій ділянці їх власні частоти коливань співпадають. Що стосується сенсорів, інтегральних пристроїв оброблення та передачі інформації, розміщених в корпусі ЕСП, то їх резонанс з коливальними ЕСП мало імовірний через відносно малу масу ( $\approx 50$  г) та відносно високі власні частоти коливань ( $\approx 50$  кГц). Модулі коефіцієнтів передачі коливань визначалися експериментально. Спектр прискорень, яких набувають елементи ЕСП  $G_E(\omega)$  визначається добутком спектру прискорень бурової колони  $G_{БК}(\omega)$  та квадратів коефіцієнтів передачі коливань:

$$G_E(\omega) = G_{БК}(\omega) \times K_{ЕСП}^2(\omega) \times K_E^2(\omega). \quad (1)$$

де,  $K_{ЕСП}(\omega)$  – коефіцієнт передачі коливань ЕСП;  $K_E(\omega)$  – коефіцієнт передачі коливань елементів ЕСП.

Швидкість накопичення незворотних змін в елементах ЕСП визначається інтегральним показником інтенсивності вібрації  $K_{IB}$ . За умови, що спектр прискорень бурової колони рівномірний,  $K_{IB}$  визначаємо із виразу:

$$K_{IB} = [G_{БК}(\omega)]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_B} K_{ЕСП}^2(\omega) \cdot K_E^2(\omega) d\omega \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де  $K_{IB}$  – коефіцієнт інтенсивності вібрацій;  $G_{БК}(\omega)$  – енергетичний спектр вібрації БК;  $K_{ЕСП}(\omega)$  – коефіцієнт передачі коливань ЕСП;  $K_E(\omega)$  – коефіцієнт передачі коливань елементів ЕСП,  $\omega_B$  – верхня частота в спектрі вібрацій бурової колони.

Поступове накопичення незворотних змін в елементах ЕСП приводить до їх відмови, а значить і до відмови самого приладу. В лінійному наближенні модель, яка описує процес руйнування, представлена в наступному вигляді:

$$t_{II} = t_0 - \alpha_K \cdot K_{IB} \cdot t, \quad (3)$$

де  $t_0$  – поточний ресурс роботи ЕСП,  $t_0$  – ресурс роботи при відсутності вібрацій,  $\alpha_K$  – коефіцієнт, який враховує конструкцію кріплення і матеріал компонентів ЕСП,  $t_{II}$  – поточний час буріння.

В момент руйнування поточний ресурс роботи ЕСП стає нульовим, тобто  $t_{II} = 0$ . Отже час, що залишився до руйнування визначається як:

$$t = \frac{t_0}{\alpha_K \cdot K_{IB}}, \text{ при обмеженні: } \begin{cases} 0 < t_0 \leq 10^5; \\ 1 \leq K_{IB} \leq 232; \\ 1 < \alpha_K \leq 2. \end{cases} \quad (4)$$

Перевірка адекватності моделі здійснювалась в процесі спостереження за роботою ЕСП MWD-системи. Один із елементів, який на початку рейсу буріння мав заявлений ресурс  $5 \times 10^3$  годин, при наявності вібрацій із середнім зазначенням  $K_{IB} = 94.3$  відмовив після 51 години буріння. Цей результат є близьким до 46.9 годин, що розраховано згідно моделі (4).

У **третьому** розділі дисертаційної роботи розроблено імовірнісну модель автоматичної ідентифікації ударів і вібрацій з використанням теорії мереж Байєса та

вдосконалено метод ухвалення рішення про необхідність усунення ударів та вібрацій та метод їх автоматичного усунення.

Виявлено та описано основні інформаційні ознаки, які використовуються для визначення виду та рівня вібрацій під час буріння. Вони передбачають визначення вібрацій в масштабі реального часу за допомогою показів як глибинних (розміщених в ЕСП), так і поверхневих давачів (табл. 2, 3).

Табл. 2.

Параметри вимірів, отримані поверхневими сенсорами

Параметр	Позначення	Од. виміру	Розд. здатність	Діапазон
Навантаження на долото	WOB	1000 кг	0.1	-100 – 100
Частота обертання бурової колони	RPM	об/хв.	0.01	0-300
Крутний момент на верхньому приводі	Tq	кНм	0.01	0-100
Швидкість буріння	ROP	м/год	0.01	0-250

Табл. 3.

Параметри вимірів, отриманих із вибою свердловини

Параметр	Позначення	Од. виміру	Роздільна здатність	Діапазон вимірів
Частота лат. вібрацій, амплітудою більше 50g: 0 (0.2 – 1 Гц); 1 (1 – 5 Гц); 2 (5 – 10 Гц); 3 (10 – 125 Гц)	VIB_RATE	ум. од.	-	0-125
Середньоквадратичне значення осьових вібрації	VIB_AX	g (9.8 м/с <sup>2</sup> )	1	0 – 30
Середньоквадратичне значення латеральних вібр.	VIB_LAT	g (9.8 м/с <sup>2</sup> )	1	0 – 60
Рівень обертових вібрацій (різниця між $\omega_{max}$ і $\omega_{min}$ , виражена в об/хв.)	VIB_TOR	об/хв.	3	0 – 380
Поточний зенітний кут	INC_CONT	град.	0.01	0 – 180
Поточний азимут буріння	AZ_CONT	град.	0.01	0 – 360
Положення відхилювача	TF	град.	1	0 – 360

Процеси, що впливають на виникнення ударів та вібрацій, мають складний випадковий характер, залежать від багатьох чинників, містять велику долю невизначеності і досить важко підлягають формалізації. При моделюванні таких процесів доцільно використовувати експертні знання про область дослідження, що зводяться до набору правил аналізу ситуації та ухвалення рішень.

На основі аналізу ключових чинників що впливають на генерацію відповідних видів вібрацій, розроблено причинно-наслідкову модель (рис.1) виникнення вібрацій.

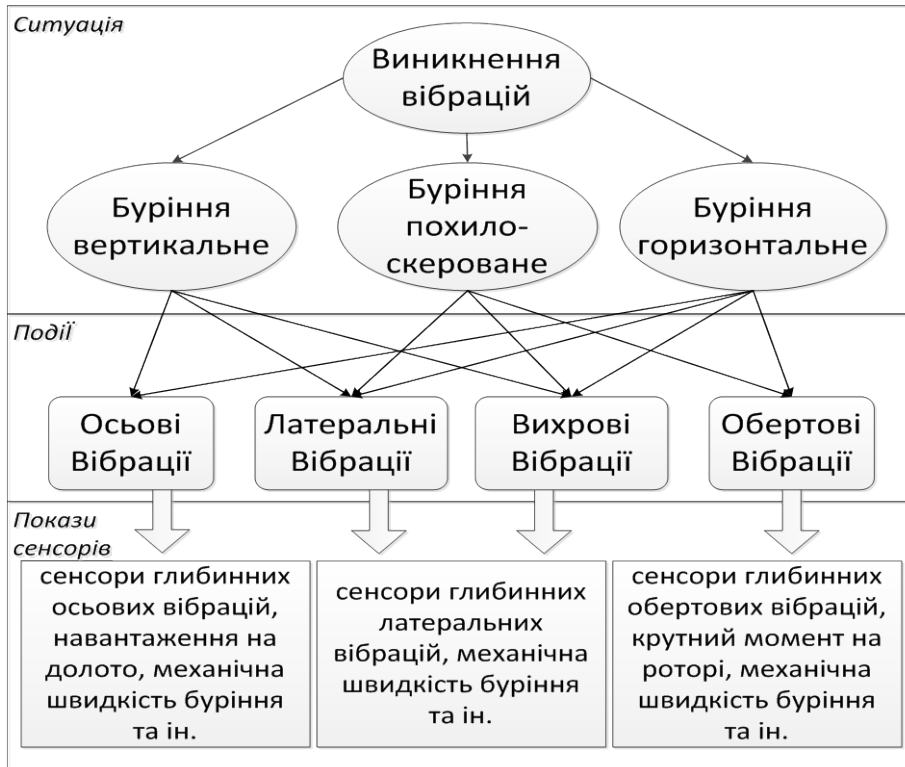


Рис.1. Причинно-наслідкова модель виникнення вібрацій під час буріння

Для розв'язання задачі ідентифікації ударів і вібрацій використано імовірнісний інструмент мереж Байеса та на основі причинно-наслідкової моделі виникнення ударів і вібрацій розроблено графо-теоретичну модель (рис.2) їх автоматичного виявлення.

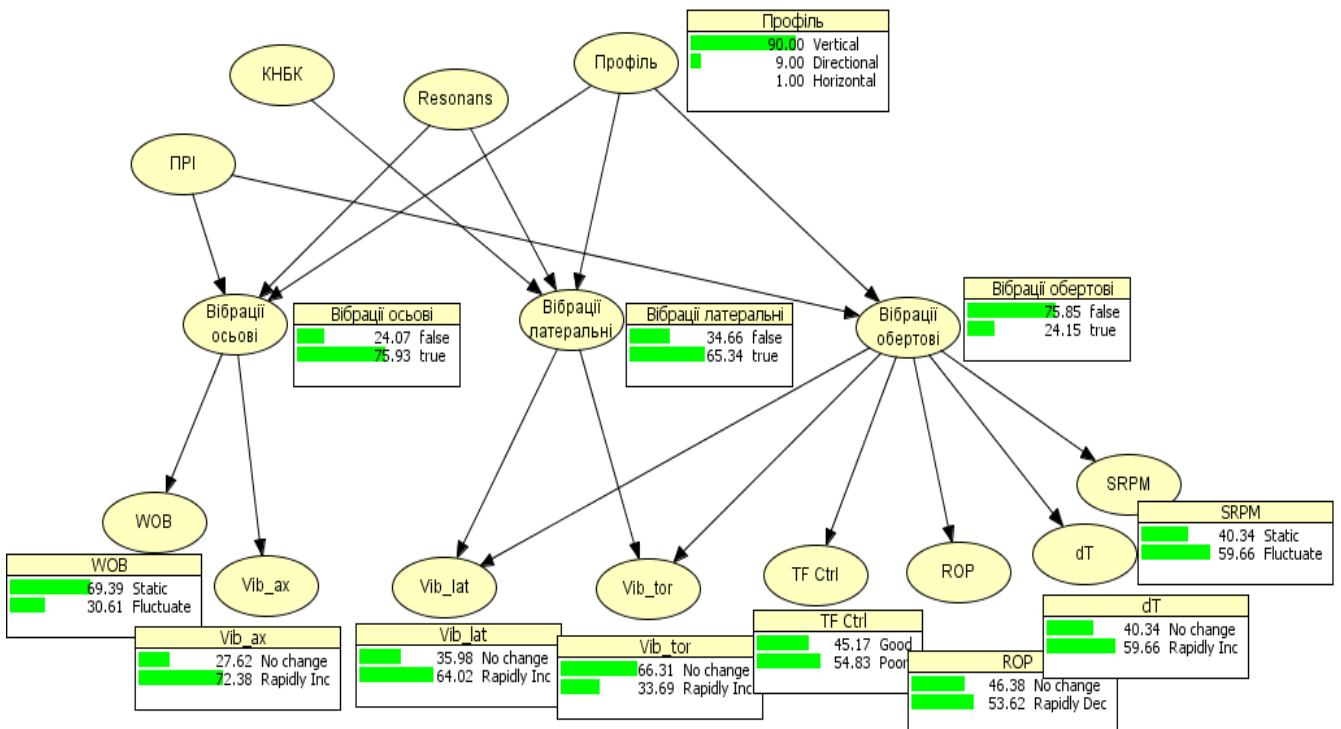


Рис 2. Мережа Байеса для автоматичної ідентифікації видів ударів та вібрацій під час буріння

Модель складається з трьох рівнів. Перший рівень це – вхідні вершини (табл.4), де імовірність появи стану не залежить від стану інших вершин, а задається користувачем (або системою автоматизації) заздалегідь. В основі другого рівня графу лежать види вібрацій КНБК (осьові, латеральні, обертові). Третій рівень складають змінні, що описують покази глибинних і поверхневих сенсорів (табл. 5).

Табл. 4.

Опис вершин 1-го та 2-го рівнів МБ ідентифікації видів вібрацій під час буріння

<b>Змінна</b>	<b>Інтерпретація</b>	<b>Значення</b>
C <sub>3</sub> (профіль)	траєкторія свердловини	“vertical” (вертикальна), “directional” (направлена), “horizontal” (горизонтальна)
C <sub>1</sub> (ПРІ)	тип долота (породоруйнівного інструменту)	“PDC” (PDC-долото) “Insert” (шарошкове долото)
C <sub>2</sub> (КНБК)	гнучкість компоновки низу бурової колони (КНБК)	“stiff” (жорстка) “soft” (м’яка)
C <sub>4</sub> (резонанс)	резонанс КНБК = True, при осьових та латеральних вібраціях	“true”, “false”
C <sub>5</sub> (вібр. осьові)	наявність осьових вібрацій	без змін, раптове зростання
C <sub>10</sub> . (вібр. латеральні)	наявність латеральних вібрацій	без змін, раптове зростання
C <sub>6</sub> (вібр. обертові)	наявність обертових вібрацій	без змін, раптове зростання

Табл. 5.

Опис вершин третього рівня МБ ідентифікації видів вібрацій

<b>Змінна</b>	<b>Тип сенсору</b>	<b>Інтерпретація</b>	<b>Значення</b>
C <sub>16</sub> (WOB)	поверхневий	навантаження на долото	“static” (статичне), “fluctuate” (колив.)
C <sub>12</sub> (SRPM)	поверхневий	частота обертів бурової колони	“static” (статичне), fluctuate (колив.)
C <sub>15</sub> (ROP)	поверхневий	механічна швидкість буріння	без змін, раптове зростання
C <sub>18</sub> (dT)	поверхневий	крутний момент на роторі	“static” (статичне), “fluctuate” (колив.)
C <sub>17</sub> (TF Ctrl)	глибинний	контроль над положенням відхилювача	“good” (задов.), “poor” (незадов.)
C <sub>9</sub> (vib_ax)	глибинний	датчик осьових ударів	без змін, раптове зростання
C <sub>10</sub> (vib_lat)	глибинний	датчик латеральних ударів	без змін, раптове зростання
C <sub>11</sub> (vib_tor)	глибинний	датчик обертових вібрацій	без змін, раптове зростання

Поява кожного із видів вібрацій зумовить певний вплив на виміри поверхневих і глибинних сенсорів. Для спрощення моделі, були вибрані лише основні сенсори, що використовуються для моніторингу вібрацій. А також побудовано причинно-наслідкові зв'язки лише для тих змінних, фізичні процеси яких мають найбільший вплив на генерацію відповідного виду вібрацій.

Розроблена модель відображає причинно-наслідкові зв'язки та ймовірнісні переходи між виникненням відповідних видів вібрацій та показами як глибинних, так і поверхневих приладів. Тому результат не залежить безпосередньо від одного індикатору вібрацій, але й від стану інших вершин графу. Модель допомагає визначити вид вібрації із відповідною достовірністю навіть при потенційній відмові одного із сенсорів ЕСП.

Кожній вершині  $A \in V$  із змінними-батьками  $B_1, B_2, \dots, B_n$  поставлена у відповідність таблиця умовних ймовірностей  $P(A|B_1, B_2, \dots, B_n)$ , які побудовані на основі знань експертів. Основним критерієм при побудові моделі Байєса вибрано її адекватність реальним спостереженням, тобто максимально наближені вихідні прогнози до рішень та прогнозів експертів. Для забезпечення максимальної адекватності моделі при надходженні нової інформації під час буріння база знань експертної системи доповнюється і результуючі показники оновлюються. На основі доповнених статистичних даних розраховуються нові ймовірності переходів. Таким чином проводиться навчання мережі Байєса.

Після збору даних та усвідомлення ситуації про наявність певного виду вібрацій потрібно ухвалити рішення про необхідність їх усунення. Усунення ударів та вібрацій полягає в маніпуляції над такими технологічними параметрами як навантаження на долото (WOB) та частота обертів бурової колони (RPM). Маніпуляція даними технологічними параметрами не завжди приводить до бажаного результату, вимагає додаткової затрати часу, зусиль, наявності відповідного досвіду фахівців та може призвести до негативного результату – зменшення механічної швидкості буріння.

Також у четвертому розділі шляхом використання інформаційної моделі на основі діаграм впливу (рис.3) вдосконалено метод ухвалення рішення про необхідність усунення ударів та вібрацій. Він базується на алгоритмі оцінювання ситуації та вище розроблених моделях. Вдосконалений метод дає змогу автоматично ухвалювати рішення про необхідність усунення ударів та вібрацій враховуючи історію усунення в поточних геологічних умовах, яка зберігається в базі знань СППР; очікуваного часу до кінця рейсу буріння, що задається користувачем; поточного рівня вібрацій, який визначається за допомогою вищеописаної моделі автоматичної ідентифікації видів вібрацій; стану електронного свердловинного приладу, що визначається за допомогою вищеописаної моделі оцінювання поточного ресурсу роботи ЕСП.

Розроблена інформаційна модель на основі діаграм впливу включає дві вершини корисності ( $U_1, U_2$ ) та вершину ухвалення рішення (“Усувати вібрації?”). Під час ухвалення рішення враховується ймовірнісна конфігурація усієї мережі. За принципом максимальної очікуваної корисності обчислюється очікувана корисність кожної альтернативи й вибирається альтернатива з найбільш очікуваною корисністю.

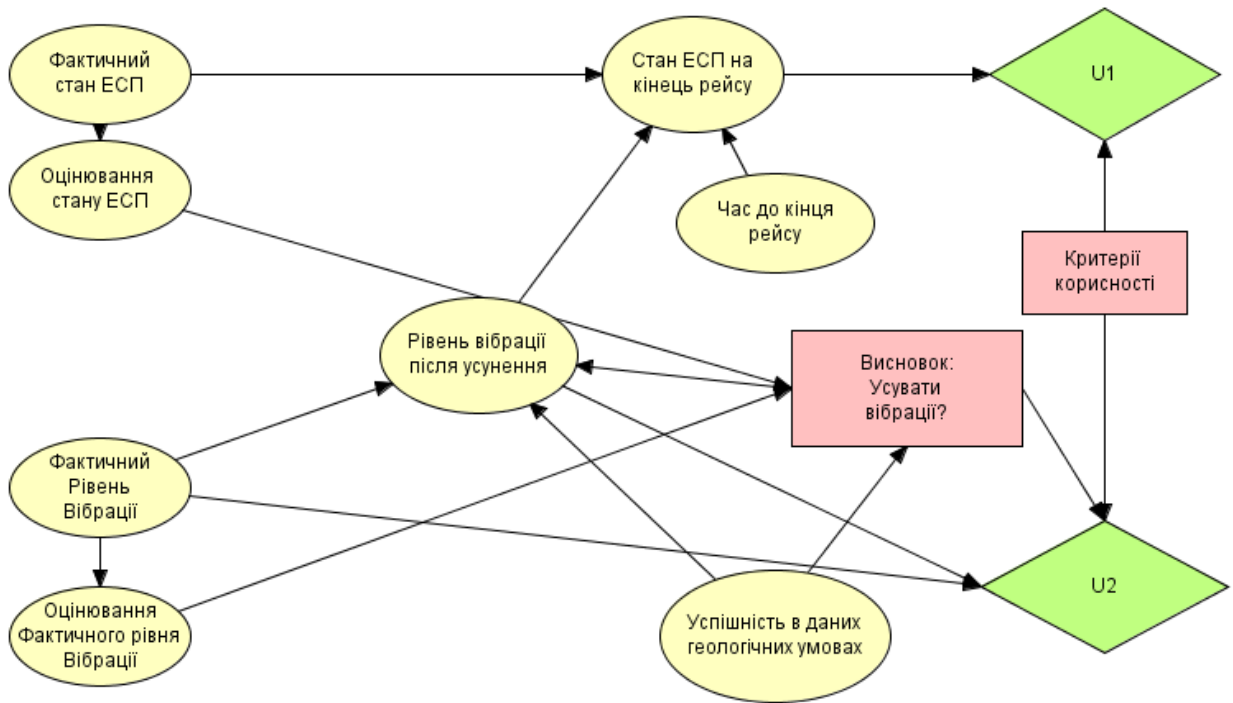


Рис. 3. Діаграма впливу для ухвалення рішення про усунення ударів та вібрацій

Загальна функція корисності є сумою усіх локальних функцій і має вигляд:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^k f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5)$$

де  $k$  – кількість локальних функцій корисності,  $x_1 - x_n$  – вершини мережі.

Для розробленої мережі загальна функція корисності приймає вигляд:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_g) = U_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + U_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (6)$$

де  $F$  – загальна функція корисності;  $U_1, U_2$  – локальні функції корисності.

Перевірка адекватності моделі проводилась під час її застосування на реальних рейсах буріння та порівняння отриманих результатів із висновками та рішеннями експертів. У трьох із чотирьох випадках, що досліджувались, система ухвалила аналогічне із операторами по бурінню рішення.

Усунення кожного із видів вібрацій вимагає диференційованого підходу до їх виявлення, визначення причин та розроблення способів усунення. Основними параметрами керування під час буріння є: навантаження на долото, частота обертів бурової колони та швидкість подачі бурового розчину. Основним способом усунення осьових вібрацій, як правило, є збільшення навантаження на долото та зменшення частоти обертів бурової колони. Латеральних – зменшення частоти обертів БК. Величину обертових вібрацій, як правило можна зменшити підвищивши частоту обертів БК та зменшивши навантаження на долото. Якщо поетапне змінення початкових параметрів на 5-20% не приводить до позитивного результату, то БК піднімається із вибою а оберти повністю зупиняють. Подальше буріння продовжують із зміненими технологічними параметрами.

Якщо в базі знань уже існує запис щодо успішності усунення вібрацій в поточних геологічних умовах, то експертна система використовує уже раніше знайдені оптимальні технологічні параметри режиму буріння. Таким чином вдосконалено метод автоматичного усунення ударів та вібрацій, котрий враховує

знання експертів, досвід усунення вібрації в поточних геологічних умовах. Він базується на існуючих методах усунення ударів та вібрацій, які застосовуються на сьогоднішній день та включає в себе алгоритм (рис.4) варіації навантаження на долото та швидкості обертання бурової колони.

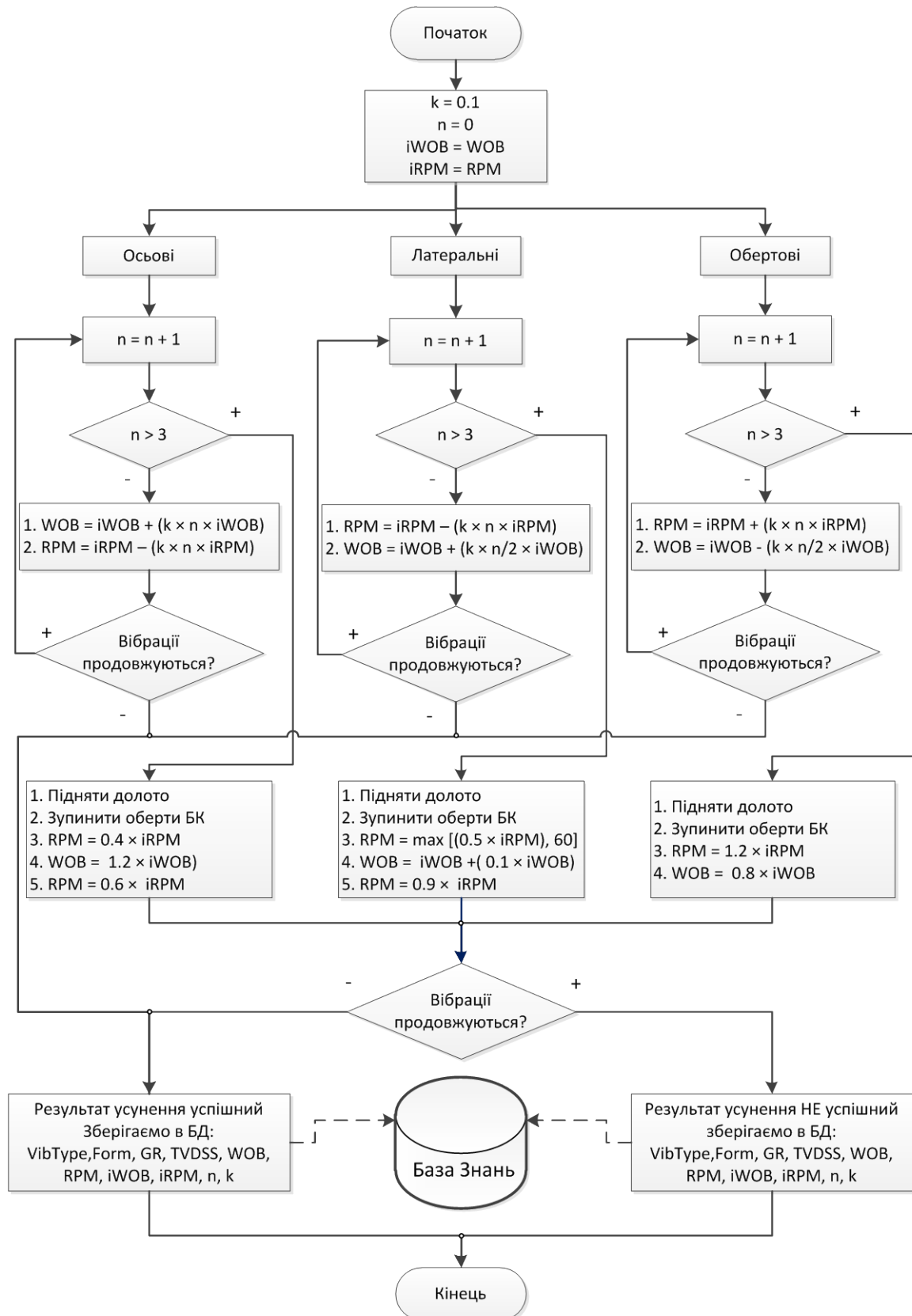


Рис. 4. Алгоритм усунення ударів та вібрацій під час буріння

Результат “успішності” заноситься в базу знань СППР, завдяки чому при наступному усуненню ударів та вібрацій система пропонує більш швидке та ефективне рішення у відповідних геологічних умовах.

В четвертому розділі розглянуто організаційні принципи побудови СППР, наведено особливості розроблення інструментальних засобів автоматичної ідентифікації та усунення вібрацій під час буріння. Розроблений прототип СППР належить до інформаційних систем нового покоління і включає такі компоненти:

- інтерфейс користувача (User Interface);
- систему керування базами даних, СКБД (Data Management System);
- систему управління базами моделей, СУБМ (Model Management System);
- систему управління базами знань (Knowledge Engine);
- систему управління повідомленнями (СУП).

На діаграмі (рис.5) штрих-пунктирною стрілкою зображено безпосередній зв'язок розробленої СППР із сервером накопичення та передачі даних OPC UA. Це є рекомендованим і логічним методом інтеграції подібного типу СППР в АСУ процесом буріння. Через фізичну відсутність доступу до OPC UA серверу в даній дисертаційній роботі інтеграція відбувалась за допомогою WITSML серверу даних.

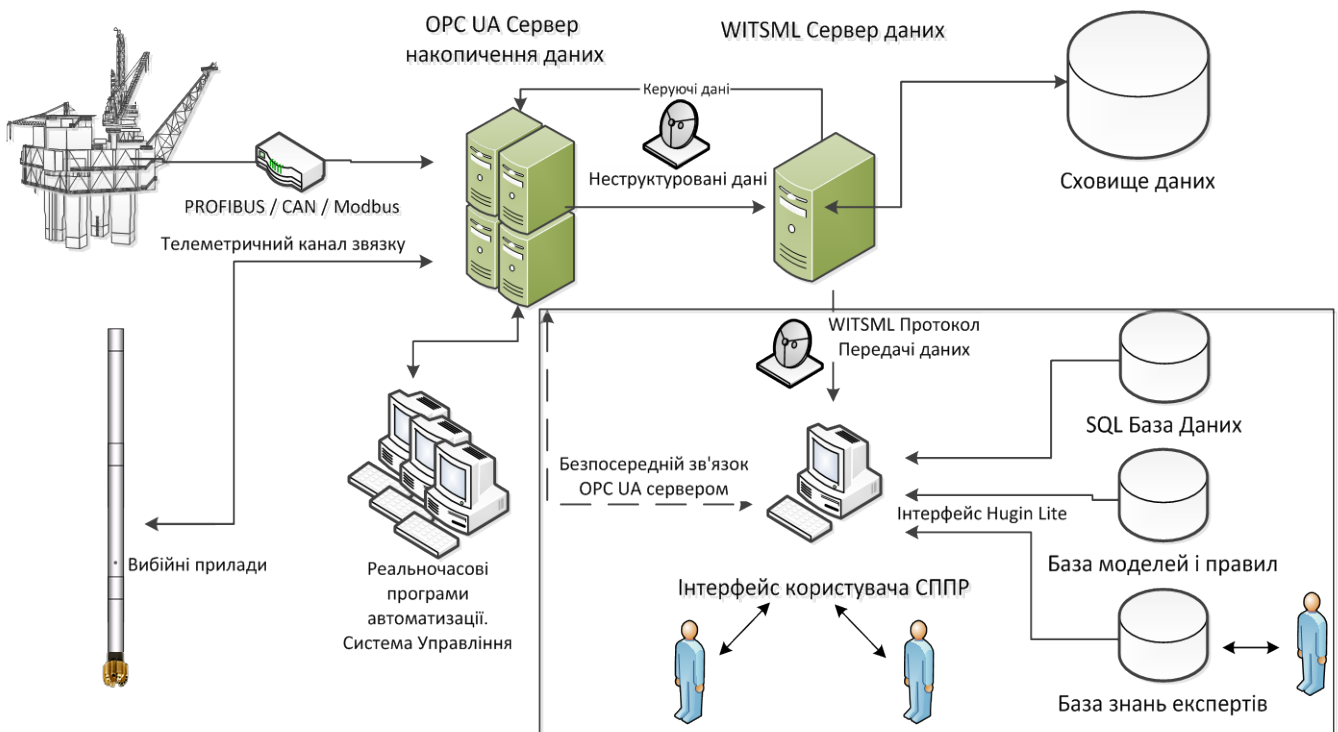


Рис. 5. Архітектура СППР для ідентифікації та усунення вібрацій

Структура системи підтримки прийняття рішень складається із окремих модулів, що взаємодіють із основним модулем моніторингу та управління і не мають прямого зв'язку між собою. Таким чином система набуває переваг модульного підходу, що дає можливість доповнювати її новими модулями та замінювати чи вдосконалювати існуючі. Вона включає: інтерфейс користувача, модуль захоплення даних реального масштабу часу, модуль моніторингу та управління даними, модуль реалізації моделей та алгоритмів, модуль візуалізації параметрів процесу буріння, бази даних та знань.



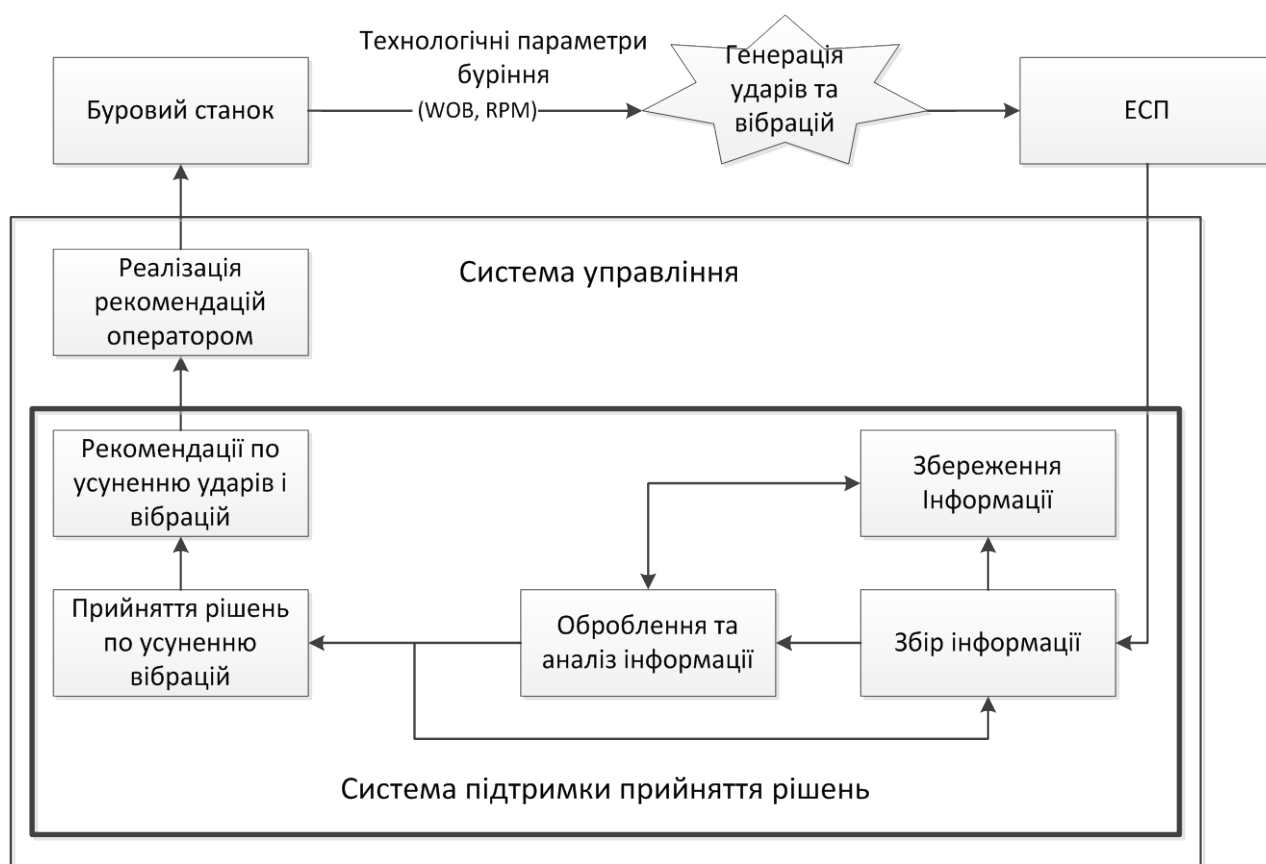


Рис.6. Функціональна схема СУ автоматичного усунення ударів та вібрацій

Функціональна схема (рис.6) відображає замкнутий процес автоматичного усунення ударів і вібрацій, що здійснюється за наступним алгоритмом:

1. СППР захоплює дані в режимі реального масштабу часу із WITSM потоку, які постійно доповнюються даними буріння із поверхневих та глибинних давачів.
2. Захоплені дані використовуються для оцінювання поточного стану процесу буріння та записуються в реляційну базу даних СППР.
3. Проводиться визначення достовірності ударів та вібрацій, а також - оцінювання ресурсу роботи електронних свердловинних приладів (ЕСП).
4. При ризикі передчасної відмови ЕСП СППР приймає рішення про необхідність усунення вібрацій та відображає його на екрані.
5. Згідно до ідентифікованого виду вібрації СППР пропонує алгоритм усунення.
6. Успішність подолання вібрацій в поточних геологічних умовах заноситься в базу знань для покращення прийняття рішення при наступному рейсі буріння.

Також у четвертому розділі розроблено інструментальні засоби СППР та наведено приклади програмної реалізації системи. Зокрема описано: розроблення інтерфейсу користувача та модуля візуалізації основних параметрів буріння; створення модуля захоплення даних в реальному масштабі часу, який забезпечує читання файлу xml потоку даних для отримання даних з WITSML серверу; програмну реалізацію моделей мереж Байеса та діаграм впливу.

Результати досліджень розробленого прототипу СППР показали, що система в режимі порадики є придатною для промислового використання і під час буріння похило-скерованих свердловин із використанням сучасних MWD-, LWD-, RSS-систем дає можливість підвищити ресурс роботи ЕСП на 15-20%.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розроблення моделей, методів і засобів інформаційної технології автоматичної ідентифікації та усунення ударів і вібрацій бурової колони під час похило-скерованого буріння глибоких свердловин для підвищення ресурсу роботи електронних свердловинних приладів.

1. Аналіз інформаційних технологій та систем в бурінні показав, що існуючі системи ідентифікації вібрацій не можуть використовуватися для автоматизації процесів буріння, оскільки не враховують повної інформації про процес буріння і можуть давати хибний результат при відмові одного із давачів. Більшість СППР в бурінні базуються на MBR-методах, проте використання ймовірнісного та експертного підходу мереж Байєса дає кращий результат в умовах неточної чи конфліктної інформації.

2. Виявлено основні інформаційні ознаки ударів та вібрацій бурової колони, які базуються на показах поверхневих і глибинних давачів, отриманих за допомогою MWD-систем, що дало змогу побудувати моделі та вдосконалити методи для визначення виду та рівня вібрацій КНБК під час похило-скерованого буріння свердловин.

3. Розроблено імовірнісну модель автоматичної ідентифікації видів ударів та вібрацій, яка ґрунтується на причинно-наслідковій моделі виникнення певних видів вібрацій та теорії мереж Байєса, що враховує сумісні покази як глибинних, так і поверхневих сенсорів та дає змогу під час буріння визначати достовірність відповідного виду вібрації навіть при потенційній відмові одного із давачів.

4. Розроблено завдяки застосуванню методу аналогії із електронними апаратами модель оцінювання ресурсу роботи електронного свердловинного приладу, яка шляхом розрахунку коефіцієнту інтенсивності вібрацій описує процес руйнування ЕСП в умовах одночасної дії різних видів вібрацій та дає змогу визначити поточний ресурс роботи ЕСП.

5. Вдосконалений шляхом використання інформаційної моделі на основі діаграм впливу метод ухвалення рішення в режимі реального часу та умовах невизначеності, який ґрунтується на алгоритмі оцінювання ситуації і дає змогу автоматично ухвалювати рішення про необхідність усунення ударів та вібрацій із врахуванням історії усунення вібрацій у відповідних геологічних умовах, очікуваного часу до кінця рейсу буріння, поточного рівня вібрацій, стану ЕСП. Спостереження показують що вдосконалений метод зменшив вплив людського фактору на 5-7%.

6. Вдосконалений шляхом збереження результату “успішності” в базі знань СППР метод автоматичного усунення ударів та вібрацій, який включає в себе варіації навантаження на долото та зміни частоти обертання бурової колони, дав змогу запропонувати більш швидке (10-15%) та ефективно рішення при наступному усуненні вібрацій.

7. Розроблені інструментальні засоби СППР автоматичного усунення вібрацій під час буріння похило-скерованих свердловин, в режимі порадики, придатні для промислового використання під час буріння з використанням сучасних MWD-, LWD-, RSS-систем і дають можливість підвищити ресурс роботи ЕСП на 15-20%. СППР може бути розміщена як локально, на бурових установках, так і віддалено, в центрах контролю за процесом буріння. Збір та передача даних відбувається згідно із стандартами WITSML.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Матвійків Т.М. Метод автоматичного усунення ударів та вібрацій під час буріння / Т.М. Матвійків, В.М. Теслюк // Науковий Вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – 2015. – Вип. 25.10. – С. 324 – 329. (*Index Copernicus*).
2. Matviyukiv T. M. Use of influence diagrams for decision support in drilling automation / T. M. Matviyukiv, V. M. Teslyuk // Journal of Global Research in Computer Science (JGRCS). – India, 2013., Vol. 4, No. 4 (April). – P. 1 – 7.
3. Матвійків Т.М. Причинно-наслідкова модель індукування вібрації під час буріння / Т.М. Матвійків // Науковий Вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – 2013. – Вип. 23.7. – С. 354 – 358.
4. Теслюк В.М. Формалізоване інтегральне оцінювання ресурсу роботи та ризику поломки бурових телеметричних систем / В.М. Теслюк, Т.М. Матвійків // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. –2011. – № 705 : Радіоелектроніка і телекомунікації. – С. 250 – 254.
5. Матвійків Т.М. СППР усунення ударів та вібрацій при глибинно-похилому бурінні / Т.М. Матвійків, В. М. Теслюк // Науковий Вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – 2016. – Вип. 26.1. – С. 363 – 370. (*Index Copernicus*).
6. Комп’ютерне моделювання промиву бурової колони / В. М. Теслюк, Т. М. Матвійків, А. Є. Струк, Р. В Загарюк. // Зб. наук. пр. ІППМЕ ім.Г.Є.Пухова НАН України. – Київ, 2012. – Вип. 63. – С.111 – 118.
7. Комп’ютерне моделювання розподілу пластових тисків у нафто-газових родовищах / А. Струк, Т. Матвійків, Є. Струк, І. Цмоць // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2009. – № 638 : Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – С. 157 - 163.
8. Петрушка А. Перспективи застосування МЕМС (МСК) структури КНІ, побудованих на спеціалізованих БМК, в технології буріння / А. Петрушка, Т. Матвійків // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2010. – № 680 : Радіоелектроніка і телекомунікації. – С. 161 – 164.
9. Аналіз доцільності побудови сенсорів мікроелектромеханічних систем на аналогових напівпровідникових елементах / М.Д. Матвійків, М.В. Лобур, В.М. Теслюк, Т.М. Матвійків / Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2006. – № 557 : Радіоелектроніка і телекомунікації. – С. 20 - 25.
10. Teslyuk V. Use of Bayesian Networks for Shock and Vibration Identification While Drilling / V. Teslyuk, T. Matviyukiv // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM’2013) : Proceedings of the XIIth Int. Conference, 19 – 23 February 2013, Lviv – Polyana. – Lviv, 2013. – P. 364 – 365.
11. Teslyuk V. Petri Networks Application during MEMS Design Process / V. Teslyuk, A. Romanuyk, T. Matviyukiv // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH’2006) : Proceedings of the 2nd Int. Conference, 24 – 27 May 2006, Lviv – Polyana. – Lviv, 2006. – P.159 – 160.
12. Matviyukiv T. Heat reduction of the MWD telemetry system / T. Matviyukiv // Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET’2012) : Proceedings of the XIth Int. Conference, 21-24 February 2012, Lviv – Slavske. – Lviv, 2012. – P.518.

13. Teslyuk V. The model of drill string vibrations influence on the telemetry system reliability / V. Teslyuk, T. Matviykyv / The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2011) : Proceedings of the XIth Int. Conference, 23 – 25 February 2011, Lviv – Polyana. – Lviv, 2011. – P. 250 – 251.
14. Teslyuk V. Computer modeling of drill string washout / V. Teslyuk, T. Matviykyv, A. Struk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2009) : Proceedings of the Xth Int. Conference, 24 – 28 February 2009, Lviv – Polyana. – Lviv, 2009. – P. 51 – 52.
15. The Analysis of the Appropriateness of the Microelectromechanical Systems Sensor Devices (MEMS) Construction on the base of the Active Semiconductor Elements / M. Matviykyv, M. Lobur, V. Teslyuk, T. Matviykyv // Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2006) : Proceedings of the IXth Int. Conference, 28 Feb. – 4 March 2006, Lviv – Slavske. – Lviv, 2006. – P. 663.
16. Matviykyv M. Prospects of using carbon film sensors for gas contamination monitoring in coal mines and drilling rigs / M. Matviykyv, V. Teslyuk, T. Matviykyv // Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2010) : Proceedings of the Xth Int. Conference, 23 – 27 February 2010, Lviv – Slavske. – Lviv, 2010. – P. 371.

## АНОТАЦІЯ

**Матвійків Т. М. Інформаційні технології усунення ударів та вібрацій в похило-скерованому бурінні.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний університет “Львівська політехніка” МОН України, Львів, 2016.

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розроблення моделей, методів і засобів інформаційної технології автоматичної ідентифікації та усунення ударів і вібрацій бурової колони під час похило-скерованого буріння глибоких свердловин для підвищення ресурсу роботи електронних свердловинних приладів.

Вперше розроблено імовірнісну модель автоматичної ідентифікації видів ударів та вібрацій, яка ґрунтується на причинно-наслідковій моделі виникнення вібрацій та теорії мереж Байеса, що враховує сумісні покази глибинних та поверхневих сенсорів і дає змогу автоматично визначати вид та достовірність ударів та вібрацій під час буріння, навіть при потенційній відмові одного із сенсорів. Розроблено модель оцінювання ресурсу роботи електронного свердловинного приладу, яка описує процес руйнування ЕСП в умовах одночасної дії різних видів вібрацій та дає змогу визначити поточний ресурс роботи ЕСП. Вдосконалено метод ухвалення рішення в режимі реального часу та умовах невизначеності шляхом використання інформаційної моделі ухвалення рішення на основі діаграм впливу. З метою автоматичного усунення ударів і вібрації під час похило-скерованого буріння вдосконалено метод, який враховує досвід усунення вібрацій у відповідних геологічних умовах та базується на основних алгоритмах усунення вібрацій шляхом варіації навантаження на долото та зміни частоти обертання бурової колони.

Розроблено інструментальні засоби СППР ідентифікації та усунення критичних ударів і вібрацій, що в режимі порадики придатна для промислового

використання під час буріння похило-скерованих свердловин із використанням сучасних MWD-, LWD-, RSS-систем.

**Ключові слова:** СППР, моделі, методи, похило-скероване буріння, удари, вібрації, мережі Байєса, діаграми впливу, бази даних.

### **АННОТАЦІЯ**

**Матвийків Т. М. Информационные технологии устранения ударов и вибраций при наклонно-направленном бурении.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - информационные технологии. - Национальный университет "Львовская политехника" МОН Украины, Львов, 2016.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача разработки моделей, методов и средств информационной технологии автоматической идентификации и устранения вибраций буровой колонны при наклонно-направленном бурении глубоких скважин для повышения ресурса работы электронных скважинных приборов (ЭСП).

Впервые разработана вероятностная модель автоматической идентификации видов ударов и вибраций, которая учитывает показатели поверхностных и глубинных сенсоров и позволяет автоматически определять вид и достоверность ударов и вибраций во время бурения. Для решения задачи идентификации ударов и вибраций использовано вероятностный инструмент сетей Байеса. При помощи причинно-следственной модели возникновения ударов и вибраций разработано графо-теоретическую модель их автоматического обнаружения. Модель отражает причинно-следственные связи и вероятностные переходы между возникновением определенных видов вибраций и показателями как глубинных, так и поверхностных приборов. Модель помогает определить вид вибрации с определенной достоверностью даже при потенциальном отказе некоторого из сенсоров.

По аналогии с электронными аппаратами разработана модель оценки ресурса работы ЭСП, которая описывает процесс разрушения ЭСП в условиях одновременного действия различных видов вибраций. Разработанная модель с помощью расчета коэффициента интенсивности вибраций дает возможность определить текущий ресурс работы ЭСП. Аналогом транспортного средства является буровая колонна, аналогом электронного аппарата – электронный скважинный прибор.

Для принятия решения о необходимости устранения ударов и вибраций было усовершенствовано существующий метод принятия решения в режиме реального времени и условиях неопределенности путем внедрения разработанной информационной модели на основе диаграмм влияния. Метод позволяет автоматически принимать решение о необходимости устранения ударов и вибраций учитывая историю устранения вибраций в текущих геологических условиях, которая хранится в базе знаний СППР; ожидаемого времени до окончания рейса бурения, которое задается пользователем; текущего уровня вибраций, который определяется с помощью разработанной модели автоматической идентификации видов вибраций; состояния электронного скважинного прибора, которое определяется с помощью разработанной модели оценки текущего ресурса работы ЭСП.

С целью автоматического устранения ударов и вибрации при наклонно-

направленном бурении усовершенствований существующий метод, который учитывает опыт устранения вибраций в конкретных геологических условиях. Он базируется на основных алгоритмах устранения вибраций путем вариации нагрузки на долото и изменения частоты вращения буровой колонны. Результат "успешности" заносится в базу СППР, благодаря чему, при следующем устранении ударов и вибраций, система может предложить более быстрое и эффективное решение: если в базе знаний уже существует запись по успешности устранения вибраций в конкретных геологических условиях, то экспертная система использует уже ранее найденные оптимальные технологические параметры режима бурения.

Разработаны инструментальные средства СППР для идентификации и устранения критических ударов, которая работает в режиме советчика и пригодна для промышленного использования при бурении наклонно-направленных скважин с использованием современных MWD-, LWD-, RSS-систем.

**Ключевые слова:** СППР, модели, методы, наклонно-направленное бурение, удары, вибрации, сети Байеса, диаграммы влияния, базы данных.

### ABSTRACT

**Matviyuk T.M. Information technologies for shocks and vibration mitigation during directional drilling.** – Manuscript.

Thesis for the Scholarly Degree of Doctor of Philosophy, in specialty 05.13.06 - Information Technology. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The dissertation solves relevant scientific problem of information technologies development for automatic drill string shock and vibration identification and mitigation during oilwell directional drilling process in order to increase operational life of downhole electronic equipment.

In current work, the development of probabilistic model for the automatic shock and vibration identification has been demonstrated. It combines causal model of vibration indication with the Bayesian Network theory and utilize measurements from both downhole and surface sensors. The model of operational life estimation of downhole electronic equipment has been developed, which uses the analogy method to electronic apparatus and considers destruction process of downhole electronic equipment under simultaneous impact of different vibration types. The real-time method of automatic decision-making under conditions of uncertainty has been developed, which is based on the designed situation assessment algorithm and influence diagrams. The method also incorporates history of successful mitigation in particular geological settings, expected time before end of drilling run, current level of vibration severity and remaining life assessment of downhole electronic equipment. Also the method of automatic shock and vibration mitigation has been designed, which incorporates expert knowledge and main shock and vibration mitigation technics used by directional drillers nowadays.

The decision support system has been developed in an advisory mode, which is designed for automatic drill string shock and vibration identification and mitigation during directional drilling process.

**Keywords:** DSS, models, methods, directional drilling, shock and vibration, Bayesian Networks, influence diagrams, databases.