

**Івано-Франківський державний технічний
університет нафти і газу**

На правах рукопису

Бандура Вікторія Валеріївна

УДК 622.276.53:621.671(047)

Б23

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ВІБРАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШТАНГОВИХ ГЛИБИННО-
НАСОСНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИДОБУТКУ НАФТИ**

**Спеціальність 05.11.13.– Прилади і методи контролю та
визначення складу речовин**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

**Науковий керівник:
доктор технічних наук,
професор Заміховський Л.М.**



Івано-Франківськ – 2000



ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНІЧНОГО

СТАНУ ШГНУ.....	9
1.1. Умови виникнення і розвитку дефектів ШГНУ.....	10
1.2. Аналіз відмов, що обумовлюють надійність ШГНУ.....	16
1.3. Сучасний стан методів і засобів діагностування ШГНУ.....	26
1.4 Обґрунтування і вибір напрямку дослідження	36

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ШГНУ.....	38
2.1. Особливості об'єкту вібродіагностування і вимоги до його опису.....	38
2.2. Логічна діагностична модель вставного насоса ШГНУ.....	42
2.3. Математична діагностична модель ШГНУ.....	49
Висновки до розділу.....	70

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИЧНОГО, ТЕХНІЧНОГО ТА ПРОГРАМНОГО

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	72
3.1. Методика проведення експериментальних досліджень вібраційного стану ШГНУ в промислових умовах.....	72
3.2. Розробка технічного забезпечення експериментальних досліджень....	75
3.3. Розробка програмного забезпечення експериментальних досліджень	
Висновки до розділу.....	86

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВІБРАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО

СТАНУ ШГНУ

4.1. Дослідження статистичних характеристик коливного процесу в штанговій колоні.....	93
4.2. Експериментальні дослідження вібраційного стану ШГНУ.....	99

4.3. Виділення інформативних ділянок для аналізу вібраційного процесу в штанговій колоні.....	106
4.4. Моделювання вібраційних процесів в штанговій колоні.....	117
4.5. Вибір діагностичної ознаки і розробка алгоритму контролю технічного стану ШГНУ	125
4.6. Визначення умов роботоздатності ШГНУ і оцінювання степені її роботоздатності з врахуванням похибки вимірювання.....	137
4.7. Оцінка достовірності діагностування	143
Висновки до розділу.....	147
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ.....	162

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ШГНУ	– штангова глибинно-насосна установка
ВК	– верстат-качалка
ОД	– об'єкт діагностування
КНКТ	– колона насосно-компресорних труб
СО	– структурна одиниця
ГН	– глибинний насос
ПД	– плунжерна динамограма
НД	– наземна динамограма
СН	– свердловинний насос
ТЗД	– технічні засоби діагностування
НСВ	– насос свердловинний вставний
МІВС	– мікропроцесорна інформаційно – вимірювальна система
ТД	– тензодавач
ВД	– вібродавач
МтП	– мультиплексор
ТП	– тензопідсилювач
ОЗП	– оперативна пам'ять
ВС	– вібраційний сигнал
ВКФ	– взаємкореляційна функція
ЛДЗ	– логарифмічний декремент затухання
АКФ	– автокореляційна функція
БД	– база даних
ШК	– штангова колона

ВСТУП

Актуальність теми. Сьогодні більше 70% діючого фонду нафтових свердловин України оснащені штанговими глибинно-насосними установками (ШГНУ), за допомогою яких видобувається до 50% всієї нафти. Це пояснюється відносною простотою конструкції ШГНУ, яка забезпечує їх надійність, зручністю експлуатації мало- та середньодобітних свердловин і обумовлює тенденцію їх подальшого збільшення.

В той же час, як показує практика експлуатація ШГНУ, незважаючи на простоту конструкції мають місце багаточисельні їх відмови і аварії. Будь яка відмова ШГНУ пов'язана з необхідністю проведення підземного ремонту свердловини, тривалість якого з подальшим освоєнням свердловин може сягати декількох діб, а витрати на його проведення деколи співставимі з вартістю самого обладнання.

У зв'язку з цим питання контролю технічного стану ШГНУ є одним з центральних і вимагає використання методів технічної діагностики.

Аналіз сучасного стану методів діагностування ШГНУ показав, що найбільш розповсюдженими залишаються динамографічний та ватметрографічний методи, які мають ряд недоліків. Так, динамографічний метод може застосовуватися лише у випадках, коли мають місце незначні спотворюючі збурення – мале число качань, невелика глибина свердловини та інш., а на точність оцінки технічного стану ШГНУ при використанні ватметрографічного методу впливають додаткові спотворення ватметрограм, обумовлені кінематикою верстата-качалки (ВК), ступінню його зрівноваженості, характеристикою привідного електродвигуна ВК, та величиною його навантаження.

В той же час така діагностична інформація як вібрація ШГНУ не використовувалась для контролю її технічного стану, хоча відомо, що певні види відмов призводять до зміни характеристики вібраційних процесів (діагностичних ознак), які супроводжують роботу ШГНУ.

У зв'язку з цим задача розробки нових віброакустичних методів діагностики ШГНУ і модернізація загальноприйнятих, зокрема динамографічного, є актуальною і має важливе народногосподарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм по розвитку нафтопромислового комплексу України і базується на результатах довготривалої науково-дослідної роботи “Розробка теоретичних та методологічних принципів діагностики обладнання нафтового комплексу України”, частина науково-дослідної теми 145/1 номер держаної реєстрації в УкрНДІНТІ №01980005799, що входить в координаційний план міністерства освіти і науки “Наукові основи розробки нових технологій видобутку нафти і газу, газопромислового обладнання, поглибленої розробки нафти і газу з метою отримання високоякісних моторних палив, мастильних матеріалів, допоміжних продуктів і нафтохімічної сировини”. Вказаний план входить в національну програму “Нафта і газ України”.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є дослідження і розробка методу вібраційного контролю технічного стану штангових глибинно-насосних установок в процесі експлуатації.

Задачі досліджень:

1. Проаналізувати основні види відмов ШГНУ, закономірності їх виникнення з врахуванням впливових факторів, зокрема вібрації та сучасні тенденції діагностування ШГНУ.

2. Створити діагностичні моделі ШГНУ. Дослідити закономірності зміни коливних процесів в колоні насосно-компресорних штанг, обумовлених зміною технічного стану ШГНУ.

3. Розробити методичне, технічне та програмне забезпечення експериментальних досліджень вібраційного стану ШГНУ в процесі експлуатації.

4. Розробити метод вібраційного контролю технічного стану ШГНУ та провести його промислову апробацію.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку нового напрямку – методів вібраційного контролю технічного стану ШГНУ і визначається наступними основними положеннями:

- вперше створена логічна діагностична модель ШГНУ, яка дозволяє прослідкувати напрямок розвитку дефектів, класифікувати та визначити зв'язок з іншими дефектами;

- створена математична діагностична модель, яка дозволяє описати коливання ШГНУ з урахуванням реальних умов експлуатації, з метою врахування особливого характеру тертя використано опис процесу коливання на основі рівняння Ван-дер-Поля, оцінено напружений стан колони, характер його зміни, параметри вібрацій;

- вперше проведено дослідження статистичних характеристик коливального процесу в ШК і встановлено, що він відноситься до нестационарно-періодичних процесів;

- вперше виділені і досліджені інформативні ділянки коливного процесу в ШК за період качань, зміна амплітудних складових спектру яких, обумовлена розвитком деградаційних процесів ШГНУ;

- виявлена і досліджена діагностична ознака технічного стану ШГНУ – відношення логарифмічного декременту затухання АКФ на інтервалах зняття та сприйняття навантаження ШК, визначені умови і проведена оцінка степені її роботоздатності з врахуванням похибки вимірювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці:

- методу вібраційного контролю технічного стану ШГНУ, технічних засобів та програмного забезпечення для його реалізації;

- методики визначення моменту часу сприйняття навантаження за максимальним значенням взаємкореляційної функції між реальною і еталонними наземними динамограмами, використання якої дозволяє відмовитися від давача переміщення ШК.

Розроблений метод і технічні засоби пройшли промислову апробацію в НГВУ "Надвірнанафтогаз", і прийняті до впровадження НГВУ "Надвірнанафтогаз", "Бориславнафтогаз", "Долинанфтогаз", "Чернігівнафтогаз".

Результати теоретичних і експериментальних досліджень використано в навчальному процесі – в робочій програмі дисципліни “Основи теорії надійності та технічної діагностики” і “Проектування систем дагностування”, які читаються для студентів спеціальності “Системи управління і автоматики”.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Проаналізовано сучасний стан методів діагностування ШГНУ [15], досліджено вплив дефектів ШГНУ на її експлуатаційну надійність [89], створено логічну модель вставного насоса ШГНУ [82], та проведено експлуатаційні дослідження вібростану ШГНУ [83]. В роботах, опублікованих у співавторстві, проаналізовані принцип і умови виникнення дефектів ШГНУ [4,84], обгрунтована можливість використання характеристик коливних процесів в колоні НКШ для оцінки технічного стану ШГНУ [85], запропонована розрахункова схема і діагностичні ознаки для оцінки технічного стану ШГНУ [86,87]. Прийнята особиста участь в розробці системи контролю вібраційного стану ШГНУ [88].

Апробація результатів досліджень. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на XII, XIII, XIV, XV Міжнародних міжвузівських школах семінарах “Методи і засоби технічної діагностики” (м.Івано-Франківськ, 1992, 1995, 1997р.р.), (Йошкар-Ола – 1996, 1998 р.р.); науково-практичній конференції “Стан проблеми і перспективи розвитку нафтогазового комплексу Західного регіону України” (м.Львів, 1995 рік); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу (1995, 1997, 1999 р.р.); наукових семінарах кафедри автоматизованого управління (1995 – 1999 р.р.).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 13 робіт.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, викладених на 153 сторінках тексту, 45 рисунків, 9 таблиць, списку використаних джерел, який містить 99 найменувань, та 11 додатків на 43 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШГНУ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В роботі об'єкт діагностування (ОД) – ШГНУ, це складна динамічна система з розподіленими параметрами, технічний стан якої підлягає визначенню. Свердловина при цьому розглядається як зовнішнє середовище, що здійснює значний вплив на зміну параметрів ОД і характеризується рядом впливових факторів.

Під технічним станом розуміють стан, який характеризується в певний момент часу при певних умовах зовнішнього середовища значеннями параметрів, що встановлені технічною документацією на ОД [1]. Процес визначення технічного стану ОД називається діагностуванням. Загальним поняттям теорії надійності і технічної діагностики є роботоздатність. Це поняття використовується для позначення класу станів ОД, находячись в якому він виконує властиві йому функції. Стан, при якому значення всіх діагностичних ознак (параметрів або характеристик, які використовуються при діагностуванні), що характеризують здатність ОД виконувати покладені на нього функції, відповідають встановленим вимогам, називається роботоздатним. Стан, при якому значення хоча б однієї діагностичної ознаки не відповідає встановленим вимогам, називається нероботоздатним. Перехід з класу роботоздатних станів в клас нероботоздатних, називається відмовою. Причиною втрати роботоздатності або різкого зниження запасу роботоздатності є дефект. При діагностуванні можуть вирішуватися задачі $Z_i \in Z$, $i = \overline{1,3}$: Z_1 – контроль роботоздатності (контроль технічного стану); Z_2 – пошук дефекту; Z_3 – прогнозування стану об'єкту або їх поєднання. В подальшому в роботі вирішується перша задача – контроль роботоздатності ШГНУ в процесі експлуатації. Першим етапом вирішення вказаної задачі є аналіз і дослідження факторів, що обумовлюють роботоздатність ШГНУ.

Тому в розділі розглядаються умови виникнення і розвитку дефектів ШГНУ, аналізуються відмови, що обумовлюють надійність установки, а також

розглядається сучасний стан методів та засобів діагностування ШГНУ і формуються задачі досліджень.

1.1. Умови виникнення і розвитку дефектів ШГНУ

Проведення досліджень по виявленню джерел і умов, які сприяють виникненню і розвитку дефектів ШГНУ так само, як і виявлення різних видів її відмов, є першим етапом розробки методології діагностування будь-якого об'єкту [2]. Ці дослідження служать основою подальшої розробки методу контролю роботоздатності ШГНУ і є обов'язковою ланкою в загальному ланцюгу подальшої розробки, вдосконалення конструкції, виготовлення, експлуатації і ремонту вузлів ШГНУ.

Результати аналізу вітчизняних і зарубіжних джерел, в яких розглядалися причини відмов, а також аналізувалася аварійність ШГНУ показали, що фактори, які обумовлюють виникнення відмов, можна звести до класифікації (рис.1.1), наведеній в [3] стосовно електроустановок для видобутку нафти.

Згідно вказаної класифікації конструкторські фактори відображають невдалі конструкторські рішення і недосконалий вибір параметрів контролю і захисту. Вони поетапно ліквідуються в процесі подальшої модернізації вузлів установки.

Технологічні - визначаються рівнем конкретних виробництв і технологічністю конструкції, а також рівнем стабільності виробництва вузлів установки.

Експлуатаційні - пов'язані з умовами експлуатації ШГНУ.

Людський фактор - відображає поведінку персоналу під час обслуговування, ремонту, експлуатації ШГНУ (неправильні дії, недотримання ТУ, відсутність уважності, недбалість і інш.).

Вібрація відокремлена від експлуатаційних факторів як одна з найбільш впливових, на наш погляд, і найменш вивчених причин виникнення відмов. Вона обумовлена сукупністю вищеперелічених факторів і чинить переважаючий вплив на розвиток дефектів. Так, вібраційні напруження є типовим прикладом

експлуатаційних навантажень, що викликають втомні напруження і можуть бути основною причиною відмов ШГНУ, наприклад, обриву штанг.

В роботі [4] наведені результати аналізу факторів, що спричиняють виникнення дефектів ШГНУ. Проведена детальна класифікація причин виникнення дефектів з врахуванням фізико-хімічного, механічного складу рідини, що видобувається, та технологічних характеристик пласта, привибійної зони свердловини, тощо.

Оскільки найбільший відсоток відмов обумовлений експлуатаційними факторами, проведемо їх аналіз.

Вплив вільного газу.

Газ, який поступає разом з нафтою на прийом насоса займає частину корисного об'єму циліндра насоса і знижує його продуктивність. Можливі випадки, коли під впливом газу робота клапанів повністю паралізується і насос практично не подає рідину. Мають місце фонтанні викиди газу, обумовлені дією вільного газу, що поступає з пласта при відсутності роботи клапанів, або газу, що виділяється з свердловинної рідини у верхній частині колони насосних труб. Має місце видимість підвищення коефіцієнта подачі до дуже великих одиниць. При цьому відбувається зрив подачі насоса, а потім знову відновлення подачі (це завдяки високій газонасиченості нафти, яка залишається в об'ємі шкідливого простору) [5].

Вплив вмісту піску.

Негативний вплив піску у рідині, що видобувається, призводить до абразивного зносу плунжерної пари, клапанних вузлів; при найменшій негерметичності НКТ пісок швидко розмиває канали протікання рідини в різьбових з'єднаннях, посилено зношує штангові муфти і внутрішню поверхню НКТ, особливо в викривлених свердловинах. Найбільш негативну роль відіграє явище утворення осаду піску над насосом і на вибої при зупинці насосної установки по тій чи іншій причині. Навіть при короткочасних зупинках (до 10-20 хв) можливе заклинювання плунжера в насосі, а при великому осаді - і заклинювання штанг в трубах. Явище пробкоутворення в свердловинах і дія піску на СН взаємозв'язані: зниження або зупинка подачі рідини, внаслідок швидкого зносу робочих пар насоса, розмиву

трубних з'єднань і т.д. викликає утворення пробки на вибої. Тому часто буває, що першопричиною зупинення подачі рідини є не утворення пробки на вибої, а дефекти, викликані піском в роботі СН. Але, яким би не був характер піскоутворення, в кінцевому результаті дефекти, викликані ним, ведуть до різкого зменшення МРП свердловини, необхідності заміни насоса і промивки пробки [6].

Вплив обводненості продукції пласта.

Обводненість нафти призводить до збільшення її в'язкості і питомої ваги. Найбільшу в'язкість рідина має при вмісті води приблизно до 70% від об'єму, при цьому гідродинамічні сили тертя при русі штанг в рідині, рідини в трубах і через клапани досягають найбільшої величини. Це все призводить до збільшення навантаження в точці підвісу ШК.

Обводненість прискорює корозійну втому деталей установки. Внаслідок низьких змащувальних властивостей пластової води відбувається інтенсивне тертя деталей насоса, що спричиняє їх знос, посилюється випадання в осад в застійних порожнинах насоса механічних домішок і інш.

З ростом питомого вмісту води в продукції свердловини термін служби НКТ при наявності сірководню знижується в кратну кількість разів. Основними видами пошкоджень є наскрізні свищі і раковини в тілі труби, порушення міцності різьбового з'єднання, що призводить до втрати герметичності колони. Інтенсивність утворення відкладання парафіну і солей, в деякій мірі, також залежить від процентного вмісту води в нафті. Як показує практика витікання через трубні з'єднання, знос штангових муфт і внутрішньої поверхні труб різко зростає при досягненні обводненості продукції більше 50% [5].

Вплив в'язкості нафти.

Шкідливий вплив гідродинамічних сил тертя, обумовлений впливом в'язкості нафти, зводиться до збільшення максимального навантаження P_{\max} , зменшення мінімального навантаження P_{\min} і коефіцієнта корисної дії ШГНУ. Все це призводить до виникнення зайвих навантажень на всі ланки насосної установки.

В'язкість нафти, в більшості, визначається її складом і змінюється в досить широких межах: від долі одиниці до сотень, а деколи і тисяч МПа*с.

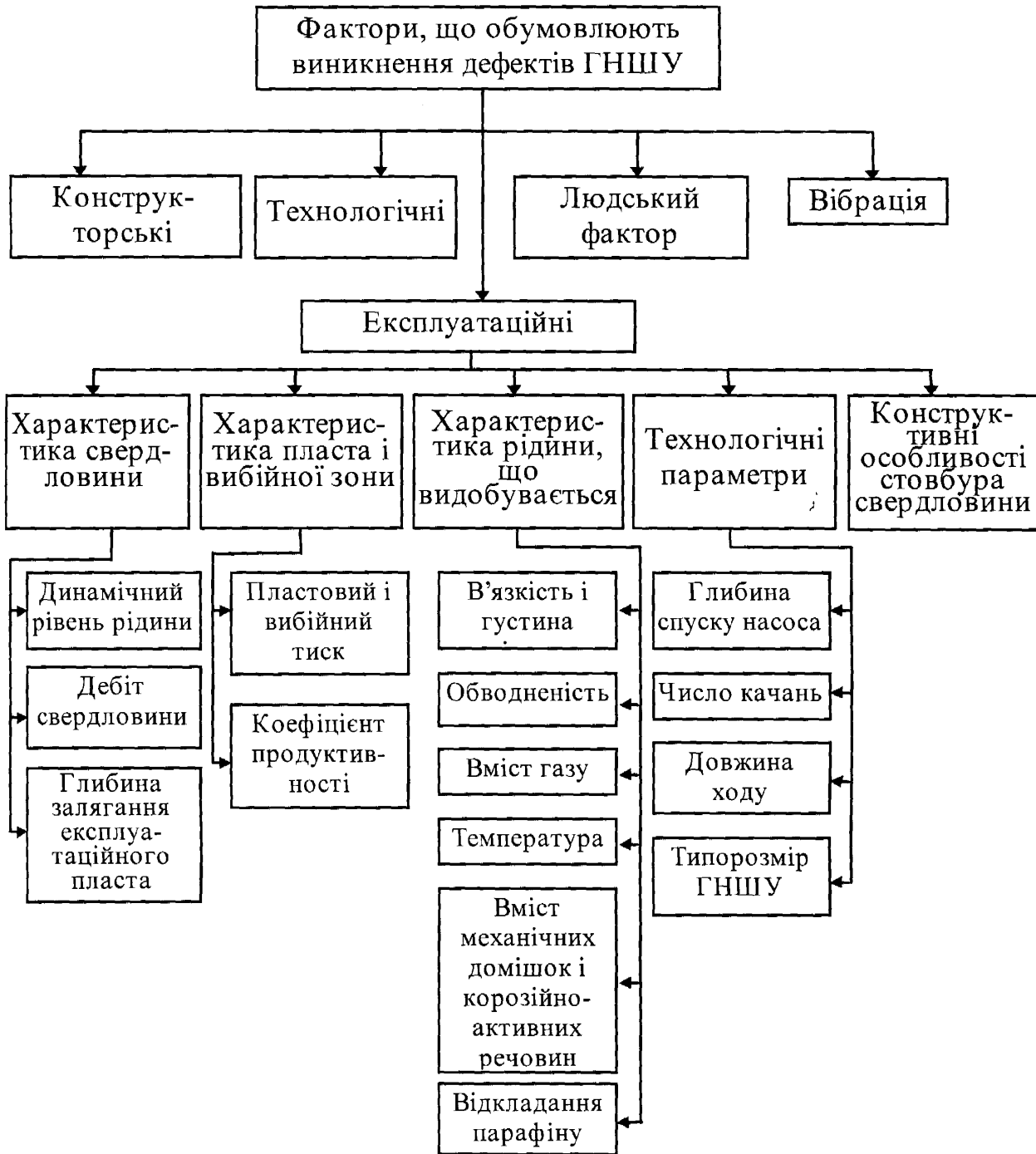


Рисунок 1.1 – Класифікація факторів, що обумовлюють виникнення дефектів ШГНУ

При видобутку нафти з в'язкістю, яка перевищує $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$, сила тертя штанг об рідину при їх ході вниз і, особливо при високих тисках на гирлі свердловини, може перевищити власну вагу штанг і призвести до "зависання" штанг при ході вниз, тобто до явища, коли швидкість опускання штанг у в'язкій рідині стане меншою за

швидкість руху головки балансира. В цьому випадку неминучі будуть удари і ривки в канатній підвісці і можливі обриви штанг [6]. Крім цього, аномально низькі темпи відбору нафти підвищеної в'язкості можуть призвести до надмірного зносу елементів насоса.

Вплив корозійно-активних речовин, солей і парафіну.

Мінералізована вода, яку видобувають разом з нафтою, внаслідок електрохімічної корозії передчасно виводить з ладу приймальну або нагнітальну частини (кульки і гнізда клапанів), і знижує продуктивність насосної установки [7].

Найбільш корозійно активним є сірководень в присутності води. Він викликає руйнування обладнання в результаті електрохімічної, загальної корозії і водневої крихкості. В результаті дії сірчаного газу поверхня кульок клапанів стає нерівною, а матеріал клапана стає крихким і при ударі руйнується. Відомі випадки, коли через відсутність захисних міроприємств проти агресивності сірководню доводилось припиняти експлуатацію свердловини, так як значний вміст H_2S і CO_2 у флюїдах свердловин створював небезпечні ситуації для життя і роботи людей, і сприяв виходу з ладу підземного обладнання.

Пластові води є складними розчинами, до складу яких входять - неорганічні солі, гази, розчинені в воді органічні речовини. Загальний вміст в воді розчинених солей прийнято називати мінералізацією.

Наявність високомінералізованої води є причиною роз'їдання клапанів, насоса, що спричинює витіканню свердловинної рідини з насосних труб, а також виходу з ладу нагнітальної та приймальної частин і руйнування кульок. Все це, в свою чергу, призводить до зменшення продуктивності насоса.

Кристали солей, які відкладаються на робочих органах насосу, зменшують вільний простір між насосом і експлуатаційною колоною, що затруднює піднімання установки із свердловини [7], ускладнює її ремонт, так як розібрати вузли і деталі насоса можна лише після відповідної їх обробки соляною кислотою.

Продуктивність глибинного насосу знижується внаслідок великого вмісту парафіну в нафті, (характерно для свердловин, що мають високий газовий фактор), який випадає і осідає на стінках фільтра, або в насосі і затруднює нормальне

поступлення нафти в насос, порушує правильну дію клапанів, що призводить витіканню рідини з насоса. Крім цього парафін може осідати на стінках НКТ, в результаті цього звужуються поперечний переріз труб, зростає опір руху рідини і переміщенню колони штанг, збільшується навантаження на головку балансира ВК, порушується його зрівноваженість, зменшується коефіцієнт подачі [8].

На великих глибинах робота ШГНУ пов'язана з високими температурами під впливом яких металеві деталі насоса збільшуються в об'ємі. Так, у втулочному насосі з чавунними втулками коефіцієнт температурного розширення сталі плунжера більший, ніж чавуна втулок циліндра, тому при несприятливих умовах плунжер може бути заклинений в циліндрі і, як наслідок, визвати обрив штанг [8].

З ростом глибини залягання нафтоносних пластів температура підвищується, що впливає на в'язкість нафти. Однак при підніманні нафти по НКТ в'язкість підвищується за рахунок зниження температури.

Число качань і довжина ходу плунжера також впливають на виникнення дефектів ШГНУ. При великій кількості качань робота ШГНУ порушується: через динамічні навантаження на балансир, штанги, редуктор, що швидко виводить установку з ладу. Збільшення довжини ходу плунжера буває корисною, оскільки сприяє підвищенню продуктивності насоса в свердловинах, що дають разом з нафтою газ, а також збільшує коефіцієнт наповнення насоса [7].

З інших експлуатаційних причин, що обумовлюють виникнення дефектів ШГНУ, відомий вплив таких технологічних параметрів як глибина заглиблення насоса, що безпосередньо зв'язана з характеристикою свердловини (динамічним рівнем і глибиною залягання пласта) та коефіцієнт подачі насоса.

Надмірне занурення насосу під динамічний рівень недопустиме, так як при цьому необхідна більша довжина труб і штанг і створюються додаткові навантаження на всі ланки насосної установки. А недостатнє занурення призводить до виділення з нафти розчиненого в ній попутного газу, незаповнення циліндра рідиною і зниження подачі насоса [6].

Характеристика пласта - пластовий тиск, також є причиною виникнення дефектів ШГНУ. Так, високі пластові тиски (120-170 кгс/см) створюють напружений режим роботи вузлів і деталей ШГНУ збільшуючи їх знос [9].

Проведений аналіз експлуатаційних причин, що обумовлюють виникнення дефектів ШГНУ в процесі експлуатації, дозволяє зробити наступні основні висновки:

Характеристика рідини, що видобувається - її обводненість, вміст механічних домішок, корозійно-активних елементів, відкладання парафіну, в'язкість і густина, характеристика пласта (конструктивні особливості ствола свердловини) є причиною корозії, тріщин, зносу елементів ШГНУ і КНКТ.

Характеристика пласта (пластовий і вибійний тиск), технологічні параметри (глибина спуску ШГНУ, число качань, довжина ходу плунжера), температура рідини, що видобувається, є причиною змін (відхилень від встановленої норми) параметрів установки ШГН (напору, подачі, потужності) і як наслідок, наступної її відмови.

1.2. Аналіз відмов, що обумовлюють надійність ШГНУ

Надійність ШГНУ в процесі експлуатації можна підвищити за допомогою її діагностичного забезпечення (моделей, алгоритмів, методів, процедур і технічних засобів), яке дозволяє підтримувати ОД в роботоздатному стані і, тим самим, більш повно використати закладений в ньому ресурс.

До основних структурних одиниць (СО) ШГНУ відносяться: ШК (найбільш навантажений вузел); колона НКТ; клапанна пара, яка складається з кульки і сідла; плунжерна пара, яка складається з плунжера і циліндра.

Аналіз відмов ШГНУ по нафтовидобувних підприємствах (НГВП) ВАТ "Укрнафта", проведений на основі матеріалів актів аварій, архівних матеріалів НГВП і звітності їх служб показав, що для основних СО установки характерні наступні найбільш розповсюджені види відмов: обрив тіла штанги, обрив штанги по різьбі, відкручення штанг, обрив штангових муфт, відкручення труб, обрив труб,

втрата герметичності НКТ, знос плунжерної пари, втрата герметичності клапанного вузла.

На рис.1.2 наведені у вигляді гістограм результати статистичного аналізу відмов основних СО ШГНУ по НГВП “Долинанафтогаз” за 1998 рік. Як видно з рис.1.2 найбільший відсоток (58,9%) відмов обумовлений обривом штанг. Уявлення про матеріальні збитки, обумовлені відмовами ШГНУ по НГВП “Долинанафтогаз” за 1996-1998 роки дає табл. 1.1.

Як видно з табл.1.1 середня тривалість одного закінченого ремонту має тенденцію до збільшення починаючи з 1997 року, що можна пояснити характером відмов. Вартість як одного так і всіх завершених ремонтів з кожним роком зростає. Так, середня вартість одного закінченого ремонту у 1997 р. зросла на 128% в порівнянні з 1996 роком, а у 1998 році уже на 140%, що обумовлюється як інерційними процесами, так і складністю ремонтних робіт і підтверджує актуальність проблеми забезпечення надійності ШГНУ в процесі експлуатації.

Оскільки наочне представлення про найбільш вразливі і відповідальні СО будь-якого об'єкту діагностування, зв'язки їх структурних і діагностичних параметрів дають логічні моделі ОД [10], що створюються на основі інженерного вивчення конструкції ОД і його функціонування та статистичного аналізу показників надійності і діагностичних параметрів, то з метою подальшого створення логічної діагностичної моделі ШГНУ проведемо більш детальну класифікацію відмов ШГНУ за характером та видам відмов (причиною виникнення, ступенем втрати корисних властивостей, первинна це відмова чи її наслідок – вторинна відмова) . Вказана класифікація (табл.1.2) є основою для побудови логічної діагностичної моделі ШГНУ, яка дозволить в свою чергу класифікувати розвиток дефектів СО, визначити напрямки їх подальшого розвитку і зв'язок з іншими СО.



Рисунок 1.2 – Гістограма відмов СО ШГНУ по НГВП "Долинанафтогаз" за 1998 рік

Таблиця 1.1.

Витрати на ліквідацію результатів відмов ШГНУ
по НВГП "Долинанафтогаз" за 1996-1998 роки

	1996	1997	1998
Середня тривалість одного закінченого ремонту (діб)			
всього (фонтаним механізованим способами) і	21.6	20.6	24.9
ШГНУ	19.6	19.6	22.2
Вартість всіх закінчених ремонтів (грн)			
всього (фонтаним механізованим способами) і	2230493	2099227	2633770
ШГНУ	1176754	1833615	1831708
Середня вартість одного закінченого ремонту (грн)			
всього (фонтаним механізованим способами) і	34315	32800	41153
ШГНУ	25582	31614	35225

Нормальна робота свердловини порушується з різних причин. Вони призводять або до повного припинення роботи установки або до поступової зміни (відхилень від встановленої норми) параметрів ОД (к.к.д., подачі і т.д.), тобто нештатного його функціонування [89].

Вихід з ладу установки відбувається через виникнення повних (аварійних) відмов, що обумовлює необхідність проведення підземних ремонтних робіт по заміні ушкоджених елементів, а отже і втрати нафти внаслідок простою свердловини. При повних відмовах відбувається обрив (відкручення) вузлів ШГНУ і колони НКТ як в процесі експлуатації, так і при спуско-підйомних операціях, що призводить до падіння на вибій свердловини всієї підземної частини ШГНУ і обумовлює проведення довготривалих ловильних робіт.

Таблиця 1.2.

Класифікація відмов СО ШГНУ

	Причина відмови	Характер відмови	Вид відмови					
			за причиною виникнення	за ступенем втраги корисних властивостей	первинний чи вторинний			
1	2	3	4	5	6			
Ш Т А Н Г О В А	Низька посадка плунжера	Обрив тіла штанги	експл.	повний	втор.			
	Зависання штанг		свердл.					
	Заїдання або прихват плунжера		експл.					
	Механічні пошкодження матеріалу і знос тіла штанги		експл.					
	Втомні тріщини в штанзі		експл.					
	Повздовжній згин нижньої частини штанг		експл.					
	Незаповнення циліндра рідиною		свердл.					
	Втомні тріщини в різьбі		Обрив штанги по різьбі			експл.	повний	втор.
	Скриті первинні дефекти (технологічні) в різьбі					технол.		
	Експлуатаційний знос різьби					експл.		
К О Л О Н А	Низька і висока посадка плунжера	Відкручення штанг	експл.	повний	втор.			
	Згин нижньої частини штанг		експл.					
	Технологічні дефекти різьбового з'єднання (кріплення, змащування, забруднення)		технол.					
	Запізнювання посадки кульок клапанів		свердл.					
	Вібрація Знос різьби		мех.впл. експл.					
Ш Т А Н	Тріщини в муфті	Обрив штангових муфт	експл.	повний	втор.			
	Знос муфт		експл./св.					
	Недостатня міцність поперечного січення тіла муфти		констр.					
	Наявність піску в рідині		свердл.			частк.	перв.	
Наявність парафіну на стінках труби	свердл.							
Кривизна свердловини	свердл.							
Ш Т А Н	Викривлення свердловини	Знос штанг , труб і з'єднувальних муфт по тілу	свердл.	частк.	перв.			
	Вплив корозійно-активних елементів робочого середовища: - мінералізована вода (при обводненості більше 60%);		свердл.					

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6
Г О В А К О Л О Н А	- абразивні частинки. Повздовжній згин нижньої частини штанг		експл.		
	Надмірний крутний момент при згвинчуванні різьбового з'єднання	Знос штангових і трубних різьбових з'єднань	технол. свердл.	частк.	перв.
	Руйнування різьби піском і високомінералізованою водою				
	Тертя між плунжером і циліндром Гідравлічні опори в нагнітальному клапані при ході вниз	Згин нижньої частини штанг	експл./свердл. експл./свердл.	частк.	перв.
	Корозійна втома матеріалу Скриті тріщини при виготовленні Механічні пошкодження від ударів при розгвинчуванні і під час роботи Поперечні вібрації Знос штанги Згин штанги під час її транспортування або спускопідіймальних операціях	Тріщини в штанзі і з'єднувальній муфті	екс/свер технол. експл. мех.впл. екс/свер технол.	частк.	перв.
Велика в'язкість рідини, яка перевищує 0,5 Па·с	Зависання штанг	свердл.	частк.	перв.	
Н К Т	Знос з'єднувальних різьб Технологічні дефекти різьбового з'єднання (кріплення, змащування, забруднення) Послаблення муфтових з'єднань при постукуванні кувалдою	Відкручення труб	екс/свер технол. експл.	повний	втор.
	Знос тіла і з'єднань НКТ по внутрішній і зовнішній поверхні Викривлення свердловини Дефекти в матеріалі	Обрив труб	екс/свер свердл. технол.	повний	втор.
	Технологічні дефекти різьбового з'єднання (кріплення, змащування, забруднення) Вплив корозійно-активних елементів робочого середовища: - мінералізована вода (при обводненості більше 60%);	Втрата герметичності НКТ	технол. свердл.	повний/ частковий.	втор.

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6
	- абразивні частинки. Знос штанговими муфтами тіла труби в зоні різьбового з'єднання Частота підземних ремонтів (число згвинчувань і розгвинчувань) Експлуатаційні дефекти в різьбових з'єднаннях (промиви, тріщини)		експл. експл. експл.		
	Неправильне регулювання довжини штанг	Низька або висока посадка плунжера	експл.	частк.	перв.
П Л У Н Ж	Недостатнє занурення під динамічний рівень Збільшення числа качань Вплив газу	Незаповнення циліндра рідиною	свердл. експл. свердл.	частк.	перв.
Е Р Н А	Вплив абразивних частинок Невідповідність степені пригонки Підвищ. температури на вибої	Заїдання або прихват плунжера	свердл. технол. свердл.	частк.	перв./ втор.
П А Р А	Вплив корозійно-активних елементів робочого середовища: - мінералізована вода (при обводненості більше 60%); - абразивні частинки. Механічний знос	Знос плунжерної пари	свердл. експл.	частк./ повний	втор.
К Л А П А Н Н А	Знос клапана Запізнювання посадки кульок клапанів Попадання стороннього предмету під кульку (резинки від набивки сальника) Невідповідність степені пригонки	Втрата герметичності клапанного вузла	екс/свер екс/свер свердл. технол.	частк./п овний	втор.
А П А Р А	Вплив абразивних частинок Механічний знос і втома матеріалу при ударі кульки по сідлу Режим відкачки (велике число качань) Наявність вільного газу	Знос клапана	свердл. експл. експл. свердл.	частк.	перв.

Причиною зміни параметрів установки є часткові відмови. До них ми відносимо: знос елементів ШГНУ (штанг, труб, муфт, різьбових з'єднань, плунжерної пари, клапанів), появу тріщин в СО, заклинювання плунжера або штанг, зависання штанг і т.д. Більшість з них є першопричинами появи повних відмов. Так, низька посадка плунжера, яка частіше всього визвана неправильним регулюванням довжини ШК при з'єднанні полірованого штока з головкою балансира, розладнує муфтові з'єднання штанг, а також сприяє обриву штанг від втоми металу. Під час зависання штанг, що обумовлюється великою в'язкістю рідини (більше 0,5 Па·с), відбуваються ривки і удари в канатній підвісці і як наслідок - обрив штанг.

Проаналізуємо таблицю.

Втрата герметичності приймальної частини може виникнути внаслідок виникнення зазору: між сідлом і кулькою приймального клапана; в місці посадки сідла приймального клапана; між конусом і конусною муфтою трубного насоса; в різьбі подовженого патрубку трубного насоса.

Зазор в свою чергу може бути наслідком: абразивного зносу клапана; механічного зносу кульки (зміна форми або розміру сідла в процесі роботи не позначаються на герметичності клапана); руйнування клапанного вузла внаслідок ударів при низькій посадці плунжера; руйнування матеріалу сідла від удару кульки; неякісного виготовлення деталей і недбалості виготовлення вузлів (невідповідність степені пригонки кульки і сідла, конуса і конусної муфти трубного насоса умовам в свердловині), а також запізнювання посадки кульки на сідло. Особливо значне запізнювання при високов'язкій нафті і в значній мірі зменшує подачу насоса, крім цього удари в момент посадки згубно впливають на працездатність штанг.

Втрата герметичності приймальної частини призводить до перетікань рідини в свердловину, а отже й неповного заповнення СН, що зменшує подачу насоса (часткова, поступова відмова клапана); а при значних витіканнях, коли для перетоку рідини потрібні незначні перепади тиску, можливий вихід з ладу приймальної частини – подача на гирлі відсутня (повна відмова клапана). Перетікання рідини мають місце тільки в процесі зняття навантаження, при ході вниз і при знятті навантаження. При ході вгору витрати відсутні [6,11].

Втрата герметичності нагнітальної частини або перетік рідини з насосних труб в циліндр насоса найчастіше буває при наявності зазору: між плунжером і циліндром; між сідлом і кулькою нагнітаючого клапана; в місці посадки сідла нагнітаючого клапана.

Причини виникнення зазору в нагнітаючому клапані ті ж самі, що і в приймальному клапані. Збільшення зазору між плунжером і циліндром виникає внаслідок: абразивного, корозійного та механічного зносу плунжерної пари. Механічний знос найбільш інтенсивний в початковий період роботи, з часом темп зносу зменшується. Він може бути наслідком викривлення свердловини; згину нижньої частини штанг; підвищення температури на вибої; невідповідністю степені пригонки плунжера і циліндра умовам свердловини [6,12].

Витрати рідини в нагнітальній частині приводять до зменшення подачі на гирлі свердловини. При будь-якій роботі насоса зазор в плунжерній парі не може збільшитись настільки, щоб спричинити вихід з ладу нагнітальної частини. При великій довжині шляху завжди будуть виникати опори, які забезпечать сприйняття хоча б частини навантаження від ваги рідини.

Заїдання плунжера спричиняється значним перенапруженням в ШК і, як наслідок, – обриву штанг (від скачкоподібного навантаження під час зриву плунжера), а також "змакаронування" штанг при ході головки балансира вниз, коли вона, стискуючись, приймає форму гвинтової лінії при ході вниз. Можливість аварії росте із збільшенням глибини спуску і числа качань. Прихват плунжера може призвести до виривання вставного насоса із замкової пружини і перетікань рідини [5].

Неповнота заповнення циліндра рідиною може бути визвана: шкідливим впливом газу, який займає частину корисного об'єму циліндра насоса і значно знижує його продуктивність. При неповному заповненні циліндра рідиною робота установки супроводжується стрясіннями колони штанг і всього поверхневого обладнання, поштовхами, ударами. Це прискорює втому штанг і визиває значний ріст навантаження на них і, як наслідок, обриву штанг [5,8].

Удари плунжера при ході вниз або низька посадка плунжера найчастіше виникають внаслідок: неправильного регулювання довжини штанг при з'єднанні полірованого штока з головкою балансира (плунжер б'є по клітці приймального клапана, внаслідок чого останній може повністю зруйнуватися; внаслідок посадки плунжера на якусь перегородку (торець втулки, яка змістилася або зайвого предмета над приймальним клапаном і т.п.). Удари приводять до стрясу ШК; відвороту плунжера; розладнюють муфтові з'єднання труб і штанг, сприяють обриву штанг від втоми метала і зменшують подачу насоса (так як корисна довжина хода плунжера зменшена).

Висока посадка плунжера можлива внаслідок неправильного регулювання довжини штанг. В трубному насосі висока посадка плунжера може призвести до виходу останнього з втулок, що призведе до перетікання рідини в плунжер і цим самим зменшить подачу насоса.

Для вставного насоса висока посадка плунжера спричинить викидання насоса з замкової пружини і підняття з посадочного кільця. При ході вниз насос знову захоплюється замковою пружиною і сідає на кільце. При кожному такому ході за той час, коли насос не сидить на посадочному кільці, із насосних труб витікає велика кількість рідини, що зменшує подачу насоса [13].

ШК є найбільш вразливим місцем ШГНУ і найбільша частина відмов спостерігається саме тут, оскільки вона працює в найбільш напружених умовах. Штанги сприймають статичні навантаження від сили тяжіння штанг і рідини, а також сили тертя плунжера в циліндрі і штанг в трубах; сили інерції рушійних мас рідини і штанг; ударні навантаження, які виникають в результаті невідповідності руху плунжера і рідини; зусилля від вібрацій колони штанг. Руйнування ШК проходить, як правило, або при розриві тіла штанги, або при руйнуванні різьбового з'єднання.

Самовідкручення штанг найчастіше відбувається внаслідок: стрясу системи від ударів при низькій посадці плунжера або при посадці на якусь перегородку; при неповному заповненні циліндра рідиною; при посадці конуса в конусну муфту трубного насоса (при високій посадці плунжера); внаслідок поганого згвинчування

різьбового з'єднання; поганого змащування і забруднення різьби; повздожнього згину нижньої частини штанг, зносу різьби.

Обриви і самовідкручення штанг визивають простої і необхідність проведення підземного ремонту [13,14].

Умови роботи НКТ досить важкі: труби окрім постійного навантаження – власної ваги колони, додатково отримують перемінне навантаження: вагу стовпа рідини при ході плунжера вниз, сили тертя плунжера по стінках робочого циліндра і штанг по стінках труб. Крім цього колони труб повинна витримати додаткове навантаження – вагу штанг в випадку обриву. Найбільш частою причиною відмов в НКТ є втрата герметичності різьбових з'єднань. Порушення герметичності призводить до втрат в добуванні нафти і складним та витратним ремонтним роботам. Крім цього на герметичність труб впливає величина крутного моменту, який розвивається при кріпленні різьбових з'єднань. Недостатня величина крутного моменту сприяє виникненню витікань. Завеликий крутний момент викликає попередній знос різьби [7].

Таким чином, приведена в табл. 1.2 класифікація відмов дозволяє згрупувати найбільш типові відмови по вузлам ШГНУ, виявити причини їх виникнення, визначити напрямок їх подальшого розвитку та взаємозв'язок з іншими структурними елементами ШГНУ, що є основою подальшої побудови логічної діагностичної моделі ШГНУ і першим етапом розробки її діагностичного забезпечення.

1.3. Сучасний стан методів і засобів діагностування ШГНУ

Сьогодні відома велика різноманітність методів і засобів технічної діагностики ШГНУ для видобутку нафти. Серед них одні перевірені практикою, інші знаходяться на стадії впровадження або розробки. До останніх відносяться методи, що базуються на використанні складних математичних залежностей, які реалізуються мікропроцесорною технікою. Однак, як показує практика, сьогодні відсутні загальноприйняті промислові методи і засоби технічної діагностики ШГНУ

в процесі експлуатації, на що вказують багаточисельні аварійні ситуації, а також ситуації, пов'язані з обривом ШК.

Методи діагностування ШГНУ можна представити у вигляді наступної класифікації (рис.1.3). Як видно з рис.1.3 їх можна розділити на три групи – методи, діагностування за динамограмами, методи діагностування за ватметрограмами та методи діагностування за інформативними характеристиками віброакустичного процесу, що генерується елементами ШГНУ в процесі її роботи і передається по ШК, як по механічному каналу зв'язку, та реєструється на гирлі свердловини.

Оскільки детальний аналіз методів діагностування ШГНУ проведено в [15], зупинимося на аналізі окремих методів, які дозволяють алгоритмізувати процес діагностування з подальшою його технічною реалізацією.

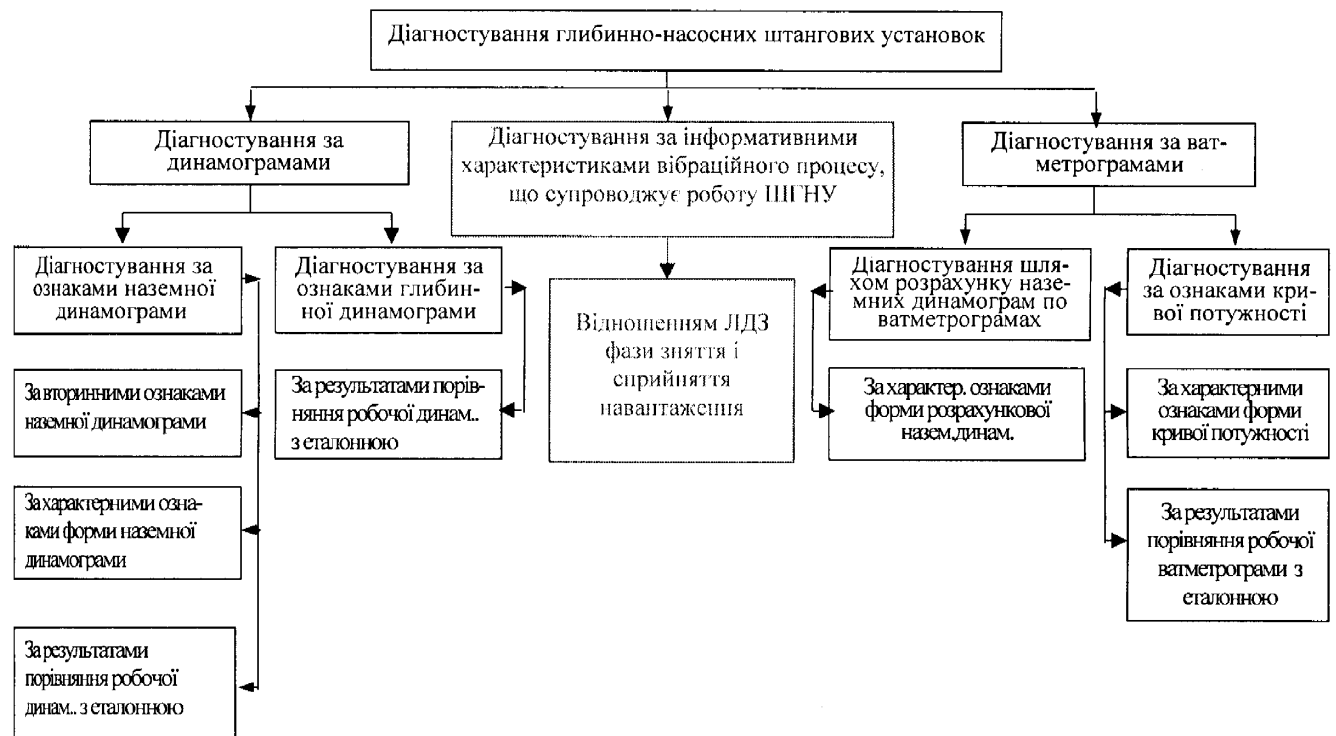


Рис.1.3. Класифікація методів діагностування ШГНУ

Під час роботи ШГНУ зусилля від дії рідини на плунжер СН передається вгору по ШК і далі через полірований шток, балансир, кривошипно-шатунний механізм, редуктор, клиноремінну передачу - до електродвигуна ВК. Інформація про зміну зусилля в точці підвісу штанг характеризує стан підземного насосного

обладнання. Тому динамометрування (зняття і аналіз кривої зусилля в функції переміщення точки підвісу штанг) - загальноприйнятий метод діагностування ШГНУ [16].

В основному динамограми знімаються за допомогою гідравлічного динамографа. При умові дотримання точності показів динамографа і проведення відповідної обробки динамограм завдяки динамометруванню можна отримати більше тридцяти різних повідомлень про стан СН і підземного обладнання.

Однак він не дозволяє виявити дефекти динамічного характеру (значна глибина свердловини, сильна загазованість, велике число качань), так як за спотвореними та складними діаграмами важко судити про стан обладнання. Під час його роботи динамографа необхідно контролювати також роботу приводу ШГНУ, оскільки його стан (наприклад, в результаті дефектів редуктора) впливає на характер динамограми, що призводить до неправильної оцінки стану СН. Недоліком методу є також обмеження автоматизації процесу обробки динамограм.

При діагностуванні за НД виникає необхідність в давачах, які встановлюють на рухомих частинах ВК. Від дії вібрації і динамічних навантажень може порушитися їх робота. Цей недолік відсутній в методі діагностування за ватметрограмою (змінюю споживаної електродвигуном приводу ВК потужністю), який дозволяє оцінити стан всієї ШГНУ, а не лише її підземної частини, як ПД або НД, що підтвердили дослідження, проведені Л.Ф.Куліковським і В.О.Крічке [16]. Однак за останні роки невідомі роботи по дослідженню вказаного методу, розробці технічних засобів для його реалізації та широкого впровадження.

В роботі [15] на основі проведеного аналізу зроблено висновок, що розпізнавання технічного стану ШГНУ за ознаками НД або ватметрограми має обмежене використання: при динамометруванні - для свердловин з динамограмами паралелограмного типу, при ватметрографуванні - для свердловин з паралелограмними динамограмами, добре зрівноваженими ВК і правильно підібраними електродвигунами. Розпізнавання з попереднім приведенням наземних кривих до ПД, потребує більшого об'єму обчислень і складніший в реалізації, але дозволяє проводити діагностування будь-яких глибиннонасосних свердловин. Для

здійснення цього підходу необхідне знання законів зміни і величин спотворюючих впливів.

Метод діагностування стану ШГНУ за вторинними ознаками НД [17] базується на аналізі спектру сигналу, що поступає з давача зусиль з використанням базису Фур'є. За ДО стану установки пропонується скористатися відношенням амплітуд $N-1$ гармонік до амплітуди першої гармоніки (для амплітудного спектра), а для фазового спектра - фазовий зсув цих гармонік відносно фази першої гармоніки, збільшеної в відповідне число раз. Автори статті доказують, що вибрані ДО інваріантні паралельним переносам осей, до зміни масштабів по осям координат, до положення нульової лінії і початку відліку, однак не наводять результатів діагностування ШГНУ. Останнє не дозволяє оцінити його ефективність.

Розпізнавання дефектів ШГНУ безпосередньо за характерними ознаками форми кривої дає хороші результати (достовірне розпізнавання значної кількості видів відмов) для паралелограмних ПД і НД, тому багатьма науково-дослідними і навчальними закладами вирішувалася задача автоматизації обробки динамо- та ватметрограм з використанням ЕОМ. Так, інститутом кібернетики АН АзСРСР було розроблено алгоритм автоматичного аналізу динамограм [16], за методом Белова І.Г. [13], згідно якого визначається сім характерних точок динамограми, і за результатами заданої послідовності арифметичних і логічних операцій над координатами цих точок видається заключення про стан ШГНУ. Однак, область його використання обмежена, через неможливість обробки динамограми без нульових ліній і встановлених масштабів.

Детерміновано-статистичний підхід до діагностування ШГНУ [16] дозволяє провести повну алгоритмізацію процесу обробки динамограми на ЕОМ. Для цього кожна динамограма за допомогою лінійної зміни масштабів вписується в орієнтований по осям зусилля квадрат заданого розміру. При цьому забирається частина динамограми, яка містить несуттєві інформаційні ознаки про робочий стан насоса.

Відмінність цього підходу, який полягає в розкладі розвернутої в часі динамограми в ряд за заданою системою рівнянь, полягає в тому, що система

функцій розкладу знаходиться в результаті визначення деякого оптимального критерія якості за статистичними властивостями навчаючої вибірки, а не задається попередньо.

Вказаний підхід хоча і дозволяє повністю виключити трудомістку ручну працю, що є його перевагою, але залишається неперспективним через незначну кількість технічних станів ШГНУ, які розпізнаються (4 класа).

В [18] розглянуті аналітичні методи визначення ПД за наземною динамометричною інформацією з подальшим перерахунком на основі відомих математичних моделей. Аналітичні методи ґрунтуються на розв'язку телеграфних рівнянь і отриманні залежностей, що необхідні для практичного використання. При цьому отримують вирази для переміщення і зусилля в будь-якому перерізі ШК, які в подальшому використовують для побудови ПД. У відомій роботі [19] використовується класичний базис Фур'є для обробки сигналів, заданих в вигляді закону зміни в часі переміщення і зусилля на кінці ШК, з подальшим визначенням їх амплітуд і фазових кутів в будь-якому перерізі штанг, після чого проводять гармонічний синтез в точці прийняття сигналу.

Вказана задача була також розв'язана інтегруванням телеграфного рівняння методом Даламбера-Рімана [20], який не вимагає проведення гармонічного синтезу вихідних функцій. Для цього достатньо лише взяти два їх значення в інтервалі часу, який необхідний для проходження прямої і відбитої хвилі деформації по штангах. За цими двома значеннями, вводячи поправку на тертя, визначають характеристики сигналу, який приймається на іншому кінці штанг в середині вказаного інтервалу часу.

Аналітичні методи діагностування стану СН мають великі функціональні можливості, так як дозволяють здійснити більш повну діагностику насосного обладнання в цілому. За розрахованою ПД можна отримати цілий ряд практично важливих додаткових відомостей, які неможливо взяти з НД. Крім цього, більш правильна геометрична форма плунжерної динамограми дозволяє якісніше проаналізувати криві, що характеризують роботу СН.

Дані аналізу показують, що використання аналітичного методу доцільне не лише для дослідження обладнання свердловин, які працюють з підвищеною динамікою, але й для звичайних свердловин, динамограми які за своєю формою близькі до паралелограму.

Метод різницевої кривої [21] ШГНУ дозволяє охопити діагностикою не тільки свердловини в області паралелограмних динамограм, але й значну частину свердловин із області динамічних динамограм. Перевагою є те, що він не прив'язується до характерних точок динамограми, які важко виявити, а базується на порівнянні форми кривої зусилля при ході штанг вверх і вниз, тобто порівнянні півперіодів розвернутої в часі динамограми та інваріантний до форми вхідного сигналу (динамограма - ватметрограма) і інерційності повороту динамограми, до масштабу динамограми і не потребує відміток нульового рівня, запам'ятовування і зберігання будь-якої додаткової інформації про установку. Метод, за виключенням аварійних, дозволяє ідентифікувати основні класи, кількісно оцінити стан системи і знайти коефіцієнт подачі і наповнення.

Метод автоматичного розпізнавання відмов [22] полягає в порівнянні двох ДД: реальної динамограми нормальної роботи, знятої після чергового ремонту свердловини, яка зберігається в пам'яті ЕОМ, а друга - дослідна.

За основні ДО, при обробці динамограм, вибрані проекції векторів, що відносять характерні точки динамограми. Далі виділяють ознаки відмов на основі аналізу апроксимуючих кривих: напрямок кривизни лінії зняття навантаження; критерії витягнутості; критерії стиснутості; відносна площа замкнутої кривої; характер динамічних коливань при ході плунжера вверх і вниз і т.д. Загальне число ознак - 12.

Надійність описаного методу в значній мірі залежить від точності визначення координат характерних точок. Достатньо точне визначення цих координат можливе для паралелограмних динамограм, тобто для динамограм з малою динамікою. Крім того, очевидно, що ознаки апроксимуючих кривих для одних і тих самих відмов в випадку динамічних і паралелограмних динамограм будуть відрізнятися. Таким чином, виникає необхідність зберігати не лише еталонні динамограми, але й

укупність ознак кожного дефекту по всім свердловинам, що є недоліком розглянутого методу.

Широке використання в зарубіжній практиці, зокрема в США, найшли методи розрахунку ПД, що обумовлено як значною кількістю свердловин, працюючих в так званому "динамічному" режимі (НД спотворена і не піддається розшифруванню звичайними методами), так і насиченістю систем автоматизації нафтовидобутку засобами обчислювальної техніки.

Суттєві недоліки розглянутих методів вимагають як їх вдосконалення, так і розробки нових більш ефективніших методів діагностування ШГНУ на основі використання, наприклад, інформативних характеристик вібраційних процесів, що супроводжують роботу ШГНУ, тобто методів вібродіагностики [23]. Вказані методи вже найшли широке використання при діагностуванні заглибних електроустановок для видобутку нафти [28,29,30,31,32].

Зупинимось на розгляді відомих технічних засобів, що реалізують розглянуті методи діагностування ШГНУ.

Всі відомі технічні засоби діагностування (ТЗД) ШГНУ можна поділити на дві групи: стаціонарні і нестаціонарні ТЗД. Через значні затрати на виготовлення перевагу, зазвичай, надають нестаціонарним. Стаціонарні ТЗД – це засоби, як правило, з автоматичним режимом роботи, що встановлюється по місцю і забезпечують неперервний контроль роботи насоса, або ТЗД, які шляхом дистанційної передачі передають дані до обчислювального центру або за допомогою безпроводної лінії зв'язку. Такі ТЗД обходяться досить дорого, особливо ТЗД з дистанційною передачею даних, які вимагають значних затрат для передачі і обробки інформації. Нестаціонарні ТЗД – це засоби, як правило на базі ЕОМ, які дозволяють проводити збір інформації безпосередньо на свердловині, а її обробку – в лабораторних умовах.

Фірмою "Leuter" розроблено гідравлічний динамометр LL57, у вигляді реєструючого вимірювального пристрою [36], що встановлюється в підймальній пристосованій над полірованим штоком насосного приводу і видає діаграму навантаження-шлях в вигляді замкнутої кривої. Запис навантаження, яке діє на

полірований шток, здійснюється через гідравлічну систему, що дозволяє в будь-якій фазі руху насоса визначити як статичні так і динамічні навантаження. Завдяки цьому маємо постійну інформацію про характер притоку, роботу клапанів, їх пошкодження, знос плунжера і циліндра, негерметичність НКТ і т.д.

Фірмою "Leuter" розроблена також переносна електронно-аналітична система "DYCOMASTER DYC/PC 5000" [33] для діагностування всмоктуючих поршневих насосів. Система складається з динамометра; пристрою DYC/PC 5000 – мікропроцесорного блоку збору і обробки даних, його прикладного програмного забезпечення; та реєстратора (принтера).

Зручний і простий програмний інтерфейс дозволяє в будь-який момент часу отримати інформацію по насосам і вимірювальним величинам і не вимагає спеціальних технічних знань і навичок, в користуванні системою.

Фірмою Baker [34] розроблено контролер моделі 8800 RPC, який призначений для забезпечення найбільш ефективного режиму роботи СН, а також для виявлення критичних ситуацій при роботі насоса, обумовлених виникненням відмов. Система складається з контролера ВК; давача зусилля в ШК, що встановлюється між захватом штока і балансиrom насоса; кінцевого вимикача (встановлюється на фундаменті насоса і спрацьовує при виході з ладу насоса) також давача переміщення (постачається за окремим замовленням) та тензометричного давача, який монтується на балансири ВГ.

Система дозволяє контролювати зусилля в ШК і переміщення штока; будувати на основі цієї інформації динамограми; порівнювати отримані дані з граничними значеннями і зупиняти ШГНУ при їх перевищенні. При будь-яких відмовах насосного обладнання вмикається візуальна сигналізація і контролер визначає тип відмови та видає необхідні рекомендації, що дає можливість оператору на центральній станції легко і швидко проаналізувати ситуацію.

Фирма *Shel oil Co* [16] створила потужну комплексну мережу контролю і передачі даних про роботу ШГНУ на ділянці Денвер Юніт Вассонського нафтопромисла. Центральним блоком системи є ЕОМ, яка автоматично визначає

холосту роботу насоса, проводить його відключення та повний аналіз роботи в випадку виникнення дефектів.

Фірма *DELTA-X CORPORATION* [16] розробила спеціальну, автоматичну систему *DXI 30* для визначення технічного стану ШГНУ. Система встановлюється на свердловині і включає ПЕОМ, вхідними величинами якої є сигнали зусилля і переміщення в функції часу. З використанням ліцензії фірми *Shell*, фірми *Computer Automation Co.* і *Hidrill Co.* розробили стаціонарну систему, яка дозволяє проводити локальний контроль роботи насоса, а при необхідності – підключатися – до центральної ЕОМ.

Система технічної діагностики стану свердловини, запатентована фірмою "*Holliburton Co*" [16], містить термінали, що обслуговують групи свердловин, і центральну ЕОМ. Термінал (комп'ютер) збирає необхідні дані (загальний об'єм рідини, що видобуваємо, її склад, вміст газу, температуру, тиск і інш.) з групи свердловин і передає їх на центральну ЕОМ, де проводиться розшифрування, обробка отриманих даних і видача інструкцій.

Система технічної діагностики "*Mobil oil Co*" [16] включає давачі зусилля в ШК, систему збору даних і канали від кінцевих комп'ютерів, розміщених на територіально-об'єднаній групі свердловин, до центральної ЕОМ. Система не вимагає при виконанні промислових операцій постійного зв'язку з центральною ЕОМ. Давачі зусилля опитуються через фіксовані інтервали часу, які визначаються терміном роботи ШГНУ. Обробка і аналіз отриманих даних проводиться в реальному масштабі часу. Для оцінки технічного стану ШГНУ порівнюються дані послідовних вимірювань зусилля в ШК в одному, а отримані результати безпосередньо використовуються при управлінні процесом видобутку нафти.

Розроблена фірмою "*Nabla Corp.*" пересувна діагностична установка фірми "*Shell*", яка змонтована на шасі автомобіля – це обчислювальна система на базі міні-ЕОМ [26]. За вимогою диспетчера установка виїжджає на свердловини, де виконуються роботи по діагностуванню стану ШГНУ; аналізу розподілу напружень на ШК, аналізу якості роботи наземного обладнання ВК, оцінці максимально можливої подачі установки, а також оптимізації режиму її роботи. При вирішенні

задач діагностування НД перетворюють в ПД і проводять візуальну оцінку стану підземного обладнання за ПД [25].

Використання установки дозволяє суттєво зменшити кількість помилок, що виникають при передачі даних на відстань, однак успішне її застосування системи залежить від стану доріг.

Фірмою "Shell" для нафтовидобувного району, де знаходиться більше 700 свердловин була впроваджена система регулювання видобутку нафти на базі ЕОМ. Система дозволяє контролювати тривалість включення установки, досліджувати в автоматичному режимі роботу свердловини, оцінювати стан ШГНУ, обробляти і контролювати результати робіт різної аварійної сигналізації.

Вимірювання зусилля і переміщення ШК проводиться 12 разів на секунду за допомогою давача зусилля, що кріпиться на полірованому штоці, і давача кута повороту балансира ВК. Одержані дані передаються по підземному кабелю на центральну промислову ЕОМ для побудови і відтворення НД. За запитом ЕОМ перераховує НД в плунжерну, яка характеризує вибійні умови. За результатом аналізу ПД визначають ступінь незаповнення ГН і вибирають момент відключення установки [26,27].

Відомі системи фірми "Дельта-Екс" [24], яка поставляє динамометри з бібліотекою програм, що дозволяють проводити аналіз і прогнозування роботи ШГНУ.

DDJ-01 – це динамометричний аналоговий інтерфейс даних, що під'єднується до будь-якої ЕОМ через порт RS 232. Він приймає аналогові сигнали від давачів зусилля, положення і струму та під'єднує їх до комп'ютера, в який може бути закладена бібліотека програмного забезпечення фірми "Дельта-Екс", що дає можливість використовувати програми для аналізу стану вибою свердловини, і величини Мкр, а також програми для прогнозування стану ШГНУ DDJ-01 – це самий останній варіант динамометричної системи фірми "Дельта-екс".

Розроблений фірмою "Highland Pump Co" програмний комплекс діагностики свердловин складається з двох самостійних вимірювальних систем, загальними

елементами яких є персональний комп'ютер типу *Note Book* і електронний блок-перетворювач сигналів з давачів.

Живлення перетворювача і давачів, управління режимами роботи, приймання інформації, яка поступає з давачів, здійснюється через штатні роз'єми комп'ютера.

Для виконання динамометрування на свердловині з ШГНУ встановлюється два давачі: давач зусилля і переміщення.

Програмне забезпечення комплексу дозволяє отримати результати заміру в графічному і цифровому вигляді на екрані комп'ютера. Підключивши до комп'ютера графобудувач або друкуючий пристрій можна протокол заміру вивести на папір. Система автоматично веде архів замірів, де реєструється: дата заміру, номер свердловини, продуктивність насоса.

1.4. Обґрунтування і вибір напрямку дослідження

Проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки: основним методом діагностування ШГНУ сьогодні залишається динамометричний метод, на основі якого розроблені різноманітні алгоритми розрахунку динамограм, та перерахунку їх, при необхідності, в плунжерні з використанням як стаціонарних, так і мобільних систем на базі ЕОМ. Основним недоліком вказаного методу є значна похибка при визначенні стану ШГНУ, які працюють в свердловинах з так званим "динамічним режимом", що характерно для нафтопромислів Прикарпаття, а також вплив дефектів редуктора, привідного електродвигуна і незрівноваженості ВК на покази динамографа.

Основним недоліком розглянутих технічних засобів діагностування стану ШГНУ є висока вартість, складність в користуванні і обслуговуванні, що вимагає висококваліфікованого обслуговуючого персоналу.

Найбільш перспективними є методи вібродіагностики. Ці методи вже знайшли своє застосування при оцінці технічного стану заглибних електроустановок для видобутку нафти. Основною їх особливістю є використання, як джерела інформації про технічний стан ШГНУ, характеристик коливних процесів, що

зупроводжують роботу установки, і розповсюджуються по штанговій колоні як механічному каналі зв'язку та реєструються на гирлі свердловини. Саму ШГНУ при цьому можна розглядати як складну протяжливу динамічну систему з розподіленими параметрами, елементи якої при взаємодії генерують коливання в широкому діапазоні частотного спектру. Мала інерційність і значна швидкість їх розповсюдження обумовлюють миттєву реакцію вібраційного сигналу на зміну стану об'єкту, що дуже важливо в аварійних ситуаціях, коли визначальним фактором є швидкість постановки діагнозу і прийняття рішення.

Вітчизняними і зарубіжними дослідниками роботи по вивченню проблеми забезпечення експлуатаційної надійності ШГНУ на основі використання вібродіагностичних методів, за винятком [35], не проводились. В зв'язку з чим не вивчена природа виникнення і розповсюдження коливань в установці, не виявлені раціональні діагностичні ознаки станів установки, обумовлені впливом дефектів та інш., що стримує розробку методів і засобів діагностування її технічного стану.

У зв'язку з цим існує наукова проблема розробки методологічних основ методів, алгоритмів, процедур, технічних засобів) вібродіагностики ШГНУ, які забезпечать підвищення її експлуатаційної надійності за рахунок більш повного використання закладеного в установку ресурсу.

Для вирішення першого етапу вказаної проблеми, яка має велике наукове і практичне значення, необхідно:

1. Розробити діагностичні моделі ШГНУ.
2. Розробити методичне, технічне і програмне забезпечення експериментальних досліджень.
3. Дослідити природу виникнення і розповсюдження коливань ШГНУ, обумовлених її станом та впливом на них вібростану вузлів верстата-качалки.
4. Виявити раціональні (найбільш інформативні) діагностичні ознаки технічного стану ШГНУ, та провести їх дослідження.
5. Розробити метод вібраційного контролю технічного стану ШГНУ і провести його промислову апробацію.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ШГНУ

Розв'язок задачі діагностування складних механічних об'єктів, до яких відносяться ШГНУ, може бути отриманий в результаті аналізу множини станів, в яких знаходиться установка на протязі життєвого циклу. Такий аналіз приводить до розробки діагностичних моделей, які встановлюють зв'язок між просторовими станами установки і діагностичними ознаками.

З точки зору об'єкту діагностики ШГНУ є протяжливою складною коливною системою з розподіленими параметрами і нескінченним числом степеней вільності. Крім того, вона відноситься до конструктивно насичених об'єктів, які характеризуються специфічними умовами експлуатації.

З врахуванням викладеного, в розділі розглядається: особливості об'єкту вібродіагностування і вимоги до його опису, побудова логічної діагностичної моделі ШГНУ, яка відображає існуючі логічні зв'язки між прийнятими до розпізнавання технічними станами і ознаками станів та базується на результатах проведених в 1.2 досліджень, а також математична діагностична модель, яка дозволяє дослідити процес зародження і закономірності розповсюдження коливань, обумовлених деградаційними процесами в ШГНУ.

2.1. Особливості об'єкту вібродіагностування і вимоги до його опису

Діагностування технічного стану об'єкту включає наступні процеси: організацію і отримання інформації про ознаки стану ШГНУ; перетворення і передача інформації; аналіз і обробка отриманих даних; прийняття рішення про стан ШГНУ і подальшу її експлуатацію. При цьому сам процес діагностування будується на визначених властивостях ОД. Оскільки раніше властивості ШГНУ не вивчалися, зупиняємося на описі установки і більш детально – на її особливостях з точки зору об'єкту вібродіагностики.

Об'єкт діагностування – ШГНУ, це впорядкована структура вузлів і елементів її свердловинної частини. Робота ШГНУ обумовлена взаємодією елементів і вузлів між собою і зовнішнім середовищем. Ця взаємодія може бути виражена (виміряна) фізичними величинами, так званими структурними параметрами, або параметрами технічного стану.

ШГНУ, як об'єкт діагностування, фізично характеризується: по-перше, об'ємом і частотою отримання інформації про її технічний стан і, по-друге, можливістю зняття цієї інформації (приспосованістю). Перша характеристика визначається законами розподілу відмов вузлів і елементів ШГНУ, реалізаціями процесів зміни її технічного стану. Друга характеристика – визначає контролепридатність установки і оцінюється трудоемкістю і вартістю діагностичних робіт.

Розглянемо конструктивні особливості ШГНУ. ШГНУ складається з колони НКТ, ШК і, безпосередньо, з СН, який за принципом дії не відрізняється від звичайного плунжерного насоса і має вертикальну конструкцію одинарної дії з нерухомим циліндром, рухомим металевим плунжером і кульковими клапанами. Довжина ходу плунжера в залежності від виконання, може коливатися, в основному, в межах від 1200 мм до 3500 мм, а довжина плунжера відповідно від 1200 мм до 1800 мм, діаметр плунжера – від 29 до 57 мм. Габаритні розміри: діаметрів – від 48,2 до 72,9 мм, довжин – від 4000 до 9000 мм. Маса насоса сягає від 36 до 135 кг.

При вказаній довжині, обмежених діаметрах та значній довжині ШК, яка зв'язана з плунжером, така насосна установка володіє значно меншою жорсткістю, чим звичні поршневі насоси однакової продуктивності. До конструктивних особливостей, що визначають ШГНУ як об'єкт діагностування, відносяться контролепридатність її вузлів та деталей, тобто придатність його до діагностування. Для ефективного управління контролепридатністю ШГНУ необхідно знайти параметри, які впливають на цю властивість і кількісно оцінити їх за допомогою критеріїв, що задовільняють вимогам розглянутим в [37].

Як видно з розглянутих конструктивних особливостей ШГНУ її конструкція не відповідає вимогам контролепридатності: вона не дозволяє використати

вбудовані штатні і додаткові засоби для контролю параметрів установки, а умови експлуатації (відсутність прямого доступу до насосу, віддаль до гирла свердловини, свердловинні умови, тощо), не лише затруднюють, але і роблять неможливим визначення місць встановлення давачів, які потрібно монтувати з врахуванням місцезнаходження дефектів, і дотримування вимог до встановлення давачів (вібродавачів, давачів зусилля на ШК на вибої свердловини та її переміщення).

Задача опису ШГНУ полягає в отриманні експериментальної інформації, необхідної для визначення класу її стану. При цьому за ДО вибирають незалежні узагальнені параметри, що відображують технічний стан декількох вузлів установки, кожному з яких властиві свої характерні фізичні процеси накопичення дефектів. Стосовно ШГНУ незалежними параметрами є параметри вібрації – ДО, а процеси, що несуть ці ознаки – діагностичними сигналами.

Предметом досліджень технічної діагностики вібраційними методами є вивчення діагностичних властивостей ОД, що передбачає проведення його віброобстеження. Отримані при цьому результати узагальнюються у вигляді загальних властивостей вібраційних процесів і динамічних моделей ОД, на основі яких знаходять інформаційну систему ознак для розробки системи діагностування і прийняття рішень.

Однак, таких досліджень, стосовно ШГНУ, на сьогодні не проводилося, у зв'язку з чим:

- відсутні дані про характер зв'язків параметрів елементів і вузлів ШГНУ (знос клапана, руйнування клапанного вузла, знос плунжерної пари, тощо), що визначають її технічний стан, з параметрами пружних коливань, генеруємих елементами та вузлами ШГНУ в процесі експлуатації;

- практично не досліджений механічний канал зв'язку, яким є ШК, по якій розповсюджуються коливання від СН і на які накладаються її власні коливання, коливання транспортуємої по НКТ свердловинної рідини, а також завади, визвані взаємодією ШК з стінками НКТ та останніх з стінками свердловини.

Вказане, обумовлено наступними особливостями ШГНУ, які визначають специфіку розв'язку задач її діагностування:

1. Об'єкт діагностування – ШГНУ, це унікальна динамічна система, що не має відомих аналогів.

2. Конструктивні особливості ШГНУ не відповідають вимогам контролепридатності, у зв'язку з чим відсутня можливість встановлення необхідних давачів в найбільш інформативних її місцях.

3. Відсутність каналу зв'язку між насосною установкою і гирлом свердловини, визначає використання механічного каналу зв'язку, яким є ШК, для передачі коливань, що збуджуються елементами СН в процесі її експлуатації.

4. Вплив на характеристики пружних коливань, що розповсюджуються по ШК, коливань транспортуємої зі свердловини рідини, обумовлених як її властивостями, так і роботою СН, власних коливань ШК і конфігурації стовбура, свердловини та умов взаємодії КНКТ зі стінками свердловини, а також ШК зі стінками колони НКТ, визначає необхідність її врахування при розробці діагностичних моделей.

5. Різний рівень надійності елементів та вузлів ШГНУ вимагає поєднання індивідуального та комплексного підходів при формуванні алгоритмів діагностування.

При описі вібростану ШГНУ з метою оцінки технічного стану окремих її вузлів необхідно описувати вібрацію в цілому, так як всі сигнали від віброактивних елементів і вузлів установки інформативні і приймають участь в формуванні загальної вібрації ШГНУ. Вичерпний опис вібростану ШГНУ вимагає, щоб число виходів було рівним числу степенів вільності ШГНУ. Практично такий стан неможливий і ШГНУ необхідно представити у вигляді моделі, що відображає найбільш важливі вібраційні властивості, які не ускладнюють діагноз.

Характеристика ШГНУ, як об'єкту вібродіагностики, повинна виходити також з показників надійності її вузлів і елементів, закономірностей зміни її технічних станів. Вона обумовлюється трудовими і вартісними затратами і узагальнюється за допомогою моделей, котрі викривають внутрішні і зовнішні зв'язки між структурними і діагностичними параметрами, а також зв'язки між елементами. При цьому вирішальне значення для характеристики ШГНУ мають закономірності

розподілу її ресурсу. Якраз велика варіація ресурсу ШГНУ, розглянута в 1.2, доказує недоцільність системи ППР і обумовлює необхідність її діагностування.

2.2. Логічна діагностична модель вставного насоса ШГНУ

Вихідною інформацією, на основі якої будується логічна модель, може бути причинно-наслідковий зв'язок між параметрами об'єкта і вихідними реакціями; структурні функціональні і принципові схеми; алгебраїчні і диференціальні рівняння, які зв'язують вхідні і вихідні координати об'єкта [10].

Приймаємо за вихідну інформацію при побудові логічної моделі ШГНУ її структурну функціональну схему, тобто відомі всі взаємозв'язки деталей і вузлів ШГНУ, їх вплив на роботу установки і взаємозв'язок один з одним.

Згрупуємо СО насоса в блоки і позначимо їх символами $P_{i1} \dots P_{in}$. Входи блока P_{in} , які є зовнішніми входами позначимо через $X_{i1} \dots X_{in}$; входи блока P_{in} , які є виходами інших блоків – $Y_{i1} \dots Y_{in}$; а виходи блока P_{in} – $Z_{i1} \dots Z_{in}$, де $i = (1, N)$. Кожен блок має число входів (виходів), рівне числу його вихідних (вхідних) параметрів. Функціональну схему показано на рис.2.1.

Робочими частинами глибинного насоса є: приймальний клапан (P_1) (основні елементи – кулька (P_{16}) і сідло (P_7)); циліндр (P_2); нагнітальний клапан (P_3) (основні елементи – кулька (P_8) і сідло (P_9)); плунжер (P_4); вузол замкової опори (P_5) (основні деталі – опорне кільце (P_{10}) і пружинний якір (P_{11})); вузол замка (P_6) (основні деталі – конус (P_{12}) і упорний ніпель (P_{14})).

На елементи діють: зовнішні сили (впливи) (X_1), визвані зворотньо-поступальним рухом ВК; сили (X_2), обумовлені гідродинамічними характеристиками видобуваної рідини (вплив газу, механічних домішок, в'язкість рідини і т.д.); підйимальної сили (X_3), визвані тиском притоку рідини, утримуючі сили (X_4), визвані гідростатичним тиском стовпа рідини; утримуючі сили X_5 самого замка.

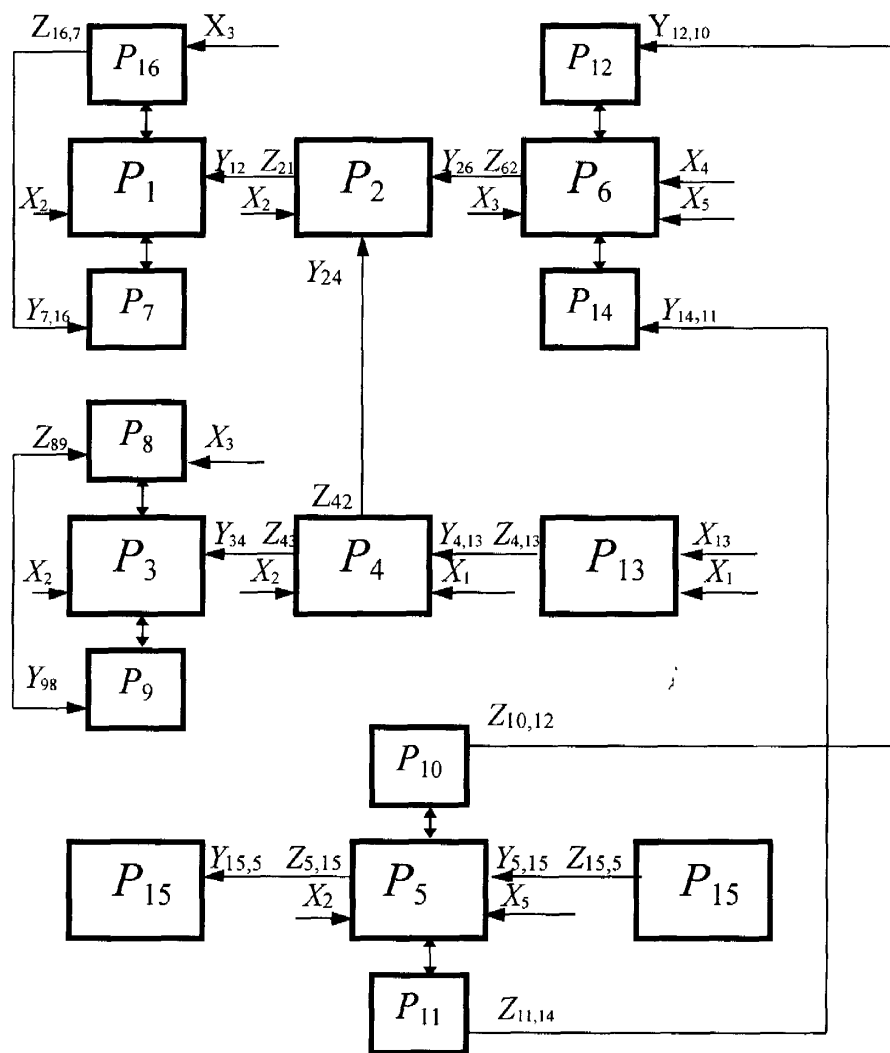


Рисунок 2.1 – Функціональна схема вставного насоса.

На механічний рух полірованого штока, який передається ШК, накладається власний рух штанг (X_{13}), визваний видовженням, інерцією і вібрацією, що передається штоку (P_{13}), а від нього циліндру (P_4) вихідною $Z_{13,4}$ і вхідною $Y_{4,13}$ силою, а також нагнітальному клапану (P_3) вихідною $Z_{4,3}$ і вхідною $Y_{3,4}$ силами. Механічне з'єднання приймального клапана (P_1), циліндра (P_2) і вузла замка (P_6) представлені вихідними $Z_{2,1}$ і $Z_{6,2}$ і вхідними $Y_{2,6}$ і $Y_{1,2}$ сигналами.

Між плунжером і циліндром виникає напіврідке тертя, що позначається вихідною $Z_{4,2}$ і вхідною $Y_{2,4}$ силами.

В клапанній парі має місце характерний удар кульки по сідлу, що виражено вихідними $Z_{6,7}$ і $Z_{8,9}$ і вхідними $Y_{7,6}$ і $Y_{9,8}$ сигналами. А на самі кульки діють зовнішні сили X_3 від тиску стовпа рідини.

Силу утримання конуса (P_{12}) на опорному кільці (P_{10}), завдяки якій насос утримується в замковій опорі, а також забезпечує надійну герметичність, показано вихідною $Z_{10,12}$ і вхідною $Y_{12,10}$ силами.

Сила притискання, з якою пружинний якір (P_{11}) утримує насос в опорі від переміщень і руху плунжера, до упорного ніпеля (P_{14}) показана вихідною $Z_{11,13}$ і вхідною $Y_{13,11}$ силами.

Вузол замкової опори попередньо спускають в свердловину на насосно-компресорних трубах (НКТ) (P_{15}) і цей механічний зв'язок показано вихідними $Z_{15,5}$, $Z_{5,15}$ і вхідними $Y_{5,15}$, $Y_{15,5}$ сигналами.

Таким чином, функціональна схема вставного СН дозволяє визначити всі механічні, гідродинамічні та інші зв'язки елементів і вузлів насоса, їх взаємодію і вплив один на другого.

В зв'язку з тим, що ШГНУ призначена для виконання одного робочого алгоритму функціонування, в реалізації якого приймають участь всі блоки і елементи, а також всі зв'язки функціональної СН насоса, для всього робочого процесу діагностування будується лише одна функціональна схема.

Для отримання логічної моделі насоса кожен блок функціональної схеми замінюємо блоками, які мають загальний вихід і суттєві для кожного виходу входи. В загальному випадку кожному вихідному блоку функціональної схеми відповідає підмножина блоків логічної моделі із множини $Q_1 \dots Q_n$, де $n = \sum n_i = 19$ (рис. 2.2).

Позначимо блоки логічної моделі через: Q_1 – втрата герметичності приймальної і нагнітальної частини; Q_2 – абразивний знос клапана; Q_3 – механічний клапана; Q_4 – запізнювання посадки кульки на сідло клапана; Q_5 – знос плунжерної пари; Q_6 – збільшення зазору в плунжерній парі; Q_7 – заїдання або прихват плунжера; Q_8 – виривання насоса з замкової пружини; Q_9 – висока посадка плунжера; Q_{10} – удар плунжера при ході вниз; Q_{11} – зміна характеристики видобуваної рідини; Q_{12} – поломка пір'їв якоря; Q_{13} – зазор між опорним кільцем і конусом; Q_{14} – незаповнення циліндра рідиною; Q_{15} – неякісне виготовлення деталей і недбалість збирання вузлів; Q_{16} – поломки в штангах; Q_{17} – поломка стаканів; Q_{18} – відворот або злом клітки клапана; Q_{19} – відворот плунжера.

До логічної моделі входять основні конструктивні недоліки, монтажні і експлуатаційні дефекти; позначені зв'язки і вплив дефектів, які виникли, на інші елементи насоса і представлено весь ланцюг розвитку цих дефектів.

Втрата герметичності приймальної чи нагнітальної частини Q_1 обумовлена абразивним зносом клапана Q_2 (зокрема кульки, так як зміна форми або розміру сідла в процесі роботи не позначається на герметичності клапана) (вихід $Z_{2,1}$ вхід $Y_{1,2}$). Останній визваний зміною характеристики свердловинної рідини Q_{11} (збільшення кількості абразивних частинок, сірководню, мінералізованої води, газу і т.д.) (вихід $Z_{11,2}$ вхід $Z_{2,11}$), що визивається зовнішніми джерелами X_{11} .

При роботі насоса в момент зняття навантаження під впливом власної ваги

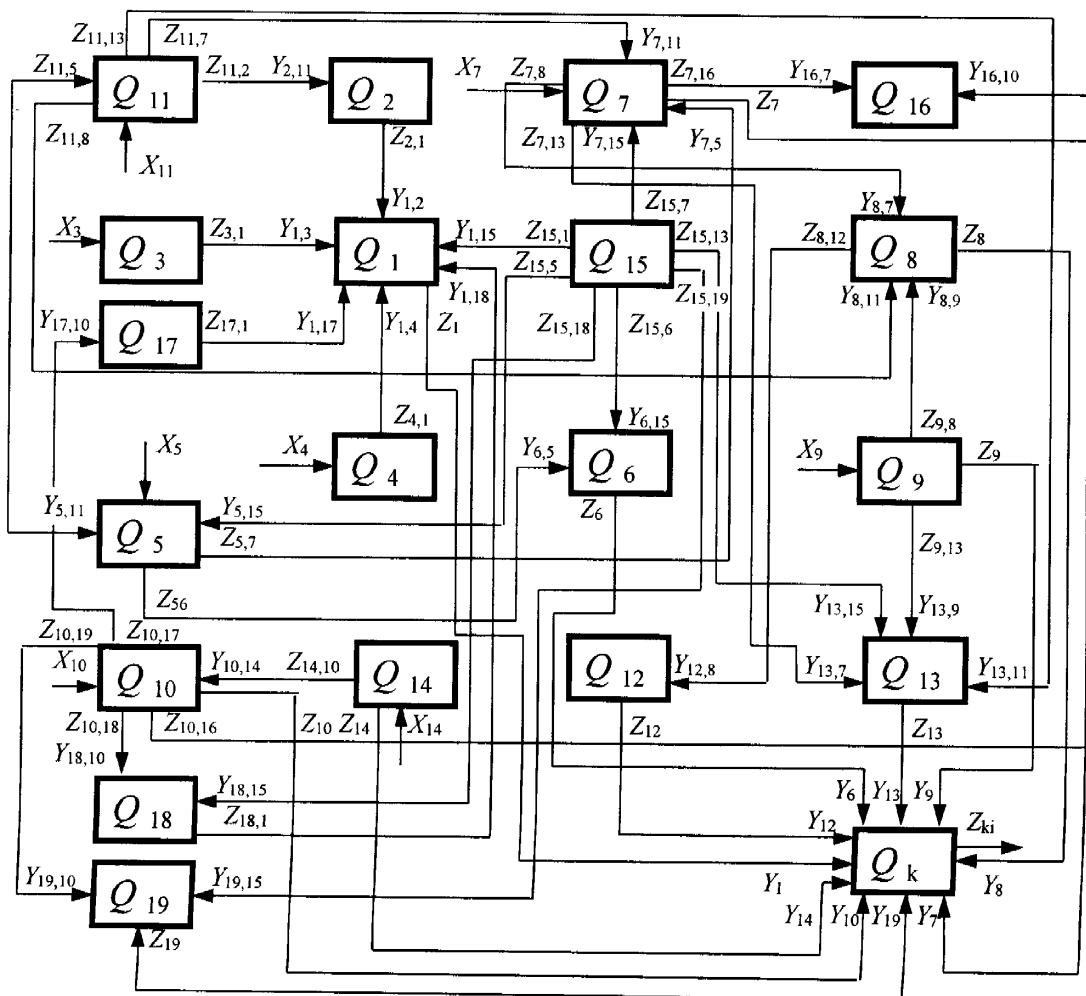


Рисунок 2.2 – Логічна модель вставного насоса ШГНУ

відбувається удар кульки по сідлу X_3 . Так як в загальному випадку кулька рухається не по осі сідла і ударяється в його край, то площа дотику їх в момент удару незначна, а тому навантаження в момент удару велике, це визиває втому метала сідла, виникає розкришування поверхні фаски, відколювання дрібних частинок від сідла, а також знос поверхні кульки (механічний знос клапанної пари) Q_3 , і як наслідок, втрачається герметичність клапана (вихід $Z_{3,1}$, вхід $Y_{1,3}$). Втрата герметичності клапана може виникнути і від джерела Q_{15} технологічного характеру – невідповідність степені пригонки кульки і сідла а також внаслідок запізнювання посадки кульки на сідло Q_4 (вихід $Z_{4,1}$, вхід $Y_{1,4}$), що збільшується з збільшенням в'язкості рідини. Остання відмова не носить чисто механічного характеру, вона визначається гідродинамікою потоку X_4 , який проходить через сідло і клітку клапана. Але це запізнення в значній мірі зменшує подачу насоса. Втрата герметичності як приймального, так і нагнітального клапана призводить до перетікань рідини відповідно в свердловину або в циліндр, і, як наслідок, зменшується подача насоса. При дуже великій величині зазора, коли для перетока рідини потрібні незначно малі перепади тиску, можливий вихід з ладу відповідно або приймального або нагнітального клапана.

Збільшення зазору в плунжерній парі Q_6 призводить до втрати герметичності нагнітальної частини і виникає внаслідок зносу плунжерної пари Q_5 (вихід $Z_{5,6}$, вхід $Y_{6,5}$). Останній може бути визваний зміною характеристики свердловинної рідини Q_{11} (вплив корозійно-активних речовин робочого середовища: мінералізованої води і абразивних частинок, підвищення температури на вибої і т.д.) (вихід $Z_{11,5}$, вхід $Y_{5,11}$); зовнішніми джерелами X_5 експлуатаційного характеру: механічний знос, неякісне виготовлення циліндра, недбалість складання його вузлів Q_{15} (вихід $Z_{15,5}$, вхід $Y_{5,15}$) (зміщення втулок, непрямолінійність їх, неперпендикулярність торців втулок до геометричної осі їх каналу; невідповідність степені пригонки насоса). Як би не працював насос, зазор в плунжерній парі не може збільшитись настільки, щоб спричинити вихід з ладу насоса. При великій довжині шляху завжди виникають опори, що забезпечують сприйняття хоча б частини навантаження від ваги рідини.

Зазор в плунжерній парі також може бути визваний джерелом Q_{15} (вихід $Z_{15,6}$, вхід $Y_{6,15}$) технологічного характеру (невідповідністю степені пригонки деталей).

Заїдання або прихват плунжера Q_7 спричиняється підвищенням тертям на окремих участках його шляху або на всьому протязі ходу внаслідок зміни характеристики видобуваної рідини Q_{11} (вихід $Z_{11,7}$, вхід $Y_{7,11}$), а також від джерела Q_{15} (вихід $Z_{15,7}$, вхід $Y_{7,15}$) технологічного характеру (невідповідність степені пригонки деталей), джерела свердловинного характеру X_7 (викривлення свердловини). Внаслідок цього виникають значні напруження в ШК, які спричиняють «змакаронювання» ШК, коли вона, стискаючись, приймає форму гвинтової лінії при ході головки балансира вниз і їх обрив (від скачкоподібного навантаження під час зриву плунжера) (вихід $Z_{7,16}$, вхід $Y_{16,7}$). При механічному зносі плунжерної пари є можливість відриву великих частинок металу від поверхні, що спричиняє прихват плунжера (вихід $Z_{5,7}$, вхід $Y_{7,5}$), а останній, в свою чергу, може призвести до виривання насоса з замкової пружини Q_8 (вихід $Z_{7,8}$, вхід $Y_{8,7}$) і перетікання рідини в свердловину. Виривання насоса з замкової пружини Q_8 можливе завдяки підймальним силам, що виникли внаслідок зміни характеристики свердловинної рідини Q_{11} (вихід $Z_{11,8}$, вхід $Y_{8,11}$) (високого пластового тиску, який діє на нижню частину плунжера, і високій в'язкості рідини).

Висока посадка плунжера Q_9 можлива внаслідок зовнішніх джерел X_9 монтажного характеру (неправильного регулювання довжини штанг). Під час високої посадки плунжер впирається в упор циліндра і, якщо, величина високої посадки незначна, то при натяжці насоса утворюється зазор між конусом і сідлом Q_{13} , що веде до витікань рідини з труб і зниженню подачі. Якщо величина посадки велика, то відбувається виривання насоса з замкової пружини Q_8), внаслідок чого з насосних труб витікає велика кількість рідини. При ході полірованого штока вниз насос знову буде захоплений замком і посаджений на посадочне місце. За пару таких ходів є можливість поломки пір'їв якоря Q_{12} (вихід $Z_{8,12}$, вхід $Y_{12,8}$), внаслідок чого він не зможе достатньо утримувати насос в опорі від переміщень при русі плунжера.

Удари плунжера при ході вниз Q_{10} , що можливо внаслідок неправильного регулювання ШК або при незначному виході нижньої втулки циліндра з нормального положення X_{10} , спричиняють удари плунжера по приймальному клапану насоса або по втулці, що призводить до поломки стакана клапана Q_{17} (вихід $Z_{10,17}$, вхід $Y_{17,10}$); злом клітки клапана Q_{18} (вихід $Z_{10,18}$, вхід $Y_{18,10}$); відворот плунжера Q_{19} (вихід $Z_{10,19}$, вхід $Y_{19,10}$); стряс ШК і може призвести до поломок в ШК (обриву штанг, повздовжнього згину нижньої частини штанг, розлад муфтових з'єднань) Q_{16} (вихід $Z_{10,16}$ вхід $Y_{16,10}$). Останнє може призвести до зменшення подачі або повністю виходу з ладу насоса.

Відворот плунжера Q_{19} , та клітки клапана Q_{18} також можливі від джерела Q_{15} (недостатнього крутного моменту зтяжки вузлів при зборці) (виходи $Z_{15,18}$ і $Z_{15,19}$, вхід $Y_{18,15}$ і $Y_{19,15}$), що спричинить вихід з ладу насоса.

Незаповнення циліндра рідиною Q_{14} визивається зовнішніми джерелами X_{14} свердловинного характеру: внаслідок перевищення продуктивності насоса над притоком рідини в свердловину (включаючи частковий випадок повної відсутності подачі), при цьому динамічний рівень знаходиться на прийомі насоса; і в випадку, коли динамічний рівень знаходиться вище прийому насоса, але в насос разом з рідиною поступає газ. Незаповнення циліндра рідиною призводить до зменшення подачі насоса або заблокування його газом. В залежності від початкового тиску газу можливий значний удар плунжера по рідині під час ходу вниз (вихід $Z_{14,10}$ вхід $Y_{10,14}$), що може спричинити поломки в штангах Q_{16} (вихід $Z_{10,16}$ вхід $Y_{16,10}$).

Зазор між опорним кільцем і конусом Q_{13} може бути визваний зміною характеристики свердловинної рідини Q_{11} (високий пластовий тиск, висока в'язкість рідини, пісок) (вихід $Z_{11,13}$, вхід $Y_{13,11}$), а також від підйимальної сили, визваної опором тертя в плунжерній парі Q_7 (вихід $Z_{7,13}$ вхід $Y_{13,7}$), або визваний джерелом Q_{15} технологічного характеру (невідповідність степені пригонки, неправильно посаджене кільце) (вихід $Z_{15,13}$ вхід $Y_{13,15}$). Зазор призводить до зменшення подачі насоса або виходу його з ладу.

Виходи Z_{ij} з блока кожного дефекту є входами Y_{ij} блоків корпусних деталей Q_k , вихід з яких Z_{kj} є вібраційним сигналом.

Таким чином, логічна модель дає наочне представлення про найбільш вразливі і відповідальні елементи ШГНУ, а також зв'язки структурних і діагностичних параметрів, що в кінцевому результаті дозволить вибрати діагностичні ознаки і покласти їх в основу методів діагностування ШГНУ, які розробляються. Логічна модель ШГНУ дозволила встановити і класифікувати розвиток дефектів, визначити напрямок їх розвитку та зв'язок з іншими дефектами.

2.3. Математична діагностична модель ШГНУ

Дослідженнями впливу коливань ШК, (як вимушених, викликаних дефектами вузлів та елементів СН, так і власних), на ефективність роботи ШГНУ, займалися такі відомі вчені, як А.С.Вірновський, А.Н. Адонін, І.Г.Белов, М.М.Багіров, Н.Б.Джаларідзе, Н.Б.Рабінович [6, 38, 39-46]. Отримані результати досліджень показали, що коливання ШК можуть призвести до суттєвого збільшення її деформації в порівнянні з деформаціями від статичних сил і сил інерції. Вказане явище має не лишень позитивний характер – збільшення ходу плунжера насосної установки, але і негативні наслідки – збільшення навантажень на штанги, виконавчий і передаточний механізми, а також привід ВК. Останнє має місце при наступленні явища резонансу, тобто збігу частот власних і вимушених коливань ШК [39, 42, 43, 47, 48, 49, 50, 51]. Як показує практика, більшу подачу насосної установки можна отримати при сприятливому співпаданні фази коливань і меншу (в порівнянні з розрахунковою) в протилежному випадку. Як показують результати проведених досліджень [6], при видобутку високов'язких свердловинних рідин коливання ШК (як власні так і вимушені) швидко затухають і не впливають на подачу насоса, а степінь впливу власних коливань на подачу насоса пропорційна глибині його опускання і кількості ходів штока [6, 40].

Технічний стан ШГНУ проявляється як в зміні характеристики коливних процесів в ШК, так і зміні зусиль, що в ній виникають. Найбільш відомі формули для визначення зусиль в ШК, запропоновані Л.С.Лейбензоном:

$$F_{\text{дин}} = Ef_{\text{шт}} \frac{S_o}{L} \mu g \mu,$$

та А.С.Вірновським:

$$F_{\text{дин}} = Ef_{\text{шт}} \frac{V}{\alpha} (1 + 0,307m_1),$$

де E – модуль пружності матеріалу штанг,

$f_{\text{шт}}$ – площа поперечного перерізу штанг,

S_o – довжина ходу точки підвісу,

L – довжина ШК,

μ – параметр динамічної подібності $\mu = \frac{\omega L}{\alpha}$,

ω – частота коливань точки підвісу,

α – швидкість звуку в матеріалі штанг,

V – швидкість точки підвісу штанг відносно плунжера в момент початку його руху, тобто в момент завершення деформації штанг,

m_1 – коефіцієнт, який враховує вплив маси рідини.

$$m_1 = \frac{m_p}{m_{\text{шт}}} \left(\frac{f_{\text{пл}} - f_{\text{шт}}}{f_{\text{тр}} - f_{\text{шт}}} \right),$$

де m_1 , $m_{\text{шт}}$ – маса рідини в трубах і маси штанг,

$f_{\text{пл}}$, $f_{\text{тр}}$, $f_{\text{шт}}$ – площі перерізу плунжера, труб і штанг відповідно.

Вказані формули виведені з умови гармонічного закону руху підвісу

$$S = \frac{S_o}{2} (1 - \sin \omega t)$$

мають обмежене використання. Результати попередньо проведених експериментальних досліджень показали, що низькочастотний спектр повздовжніх коливань ШК крім гармонічних складових, містять також і субгармонічні складові, обумовлені технічним станом СН. Оскільки сьогодні відсутні теоретичні дослідження закономірностей зміни коливних процесів в штанговій колоні, обумовлених деградаційними процесами, що протікають в насосній установці при експлуатації, а також теоретичні дослідження процесів виникнення резонансних

коливань – виняток складає робота [47] проведемо необхідні дослідження з метою розробки математичної діагностичної моделі ШГНУ.

При дослідженні коливань ШГНУ представимо модель СН як абсолютно твердого (недеформованого) тіла. У випадку, коли коливання мають малу амплітуду, що відповідає специфіці роботи насоса, закон руху такого тіла можна описати лінійним диференціальним рівнянням:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + kx = 0, \quad (2.1)$$

де m – маса заглибного насоса,

λ – коефіцієнт демпфування,

k – коефіцієнт жорсткості з'єднань,

загальний розв'язок якого відомий:

$$x = ae^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (2.2)$$

$$\text{де: } \delta = \lambda/2m; \omega^2 = k/m - (\lambda/2m)^2. \quad (2.3)$$

Зауважимо, що знак λ буде визначати характер коливань: при $\lambda > 0$ мають місце затухаючі коливання; при $\lambda < 0$ – коливання з амплітудою, що зростає за експоненціальним законом. Як відомо з практики, амплітуда коливань насоса не може необмежено зростати, тому обґрунтованим можна вважати допущення про те, що, починаючи з певного моменту часу, коефіцієнт затухання змінює знак. Стосовно заглибного насоса, це моменти переходу полірованого штока до крайньої верхньої і нижньої точок, при русі балансиру вгору і вниз. Вказане дозволяє зробити припущення про аналітичну структуру коефіцієнта демпфування і подати його у вигляді [52,53]:

$$\lambda = -A + B(dx/dt)^2, \quad A > 0; B > 0,$$

де A – постійна складова коефіцієнту демпфування; B – коефіцієнт, який характеризує степінь впливу на коефіцієнт демпфування квадрата швидкості руху насоса в свердловинній рідині.

В результаті такої заміни рівняння (2.1) набуває вигляду:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \left\{ -A + B \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\} \frac{dx}{dt} + kx = 0. \quad (2.5)$$

Проводячи заміну змінних:

$$y = dx/dt, \quad (2.6)$$

одержимо:

$$m \frac{dy}{dt} + \left\{ -A + B(y^2) \right\} y + kx = 0, \quad (2.7)$$

Проводячи диференціювання рівняння (2.7), одержимо:

$$m y'' + (-A + 3B y^2) y' + ky = 0. \quad (2.8)$$

Вводячи нову змінну:

$$\tau = t \sqrt{k/m},$$

визначимо похідні, що входять в (2.8):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{dy}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} \right) = \frac{d^2 y}{d\tau^2} \cdot \left(\frac{d\tau}{dt} \right)^2 = \frac{d^2 y}{d\tau^2} \cdot \frac{k}{m}, \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{dy}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \frac{dy}{d\tau} \sqrt{\frac{k}{m}}. \end{aligned}$$

Після підстановки в (2.8) одержимо:

$$m \cdot \frac{k}{m} \frac{d^2 y}{d\tau^2} + \left(\frac{-A}{\sqrt{km}} + \frac{3B}{\sqrt{km}} \cdot y^2 \right) \frac{dy}{d\tau} \cdot k + ky = 0. \quad (2.9)$$

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} - \frac{A}{\sqrt{km}} \left(1 - \frac{3B}{A} y^2 \right) \frac{dy}{d\tau} + y = 0. \quad (2.10)$$

Приймаючи:

$$\varepsilon = \frac{A}{\sqrt{km}}; \quad \tilde{y} = y \sqrt{\frac{3B}{A}}, \quad (2.11)$$

одержимо відоме рівняння Ван-дер-Поля:

$$\frac{d^2 \tilde{y}}{d\tau^2} - \varepsilon (1 - \tilde{y}^2) \frac{d\tilde{y}}{d\tau} + \tilde{y} = 0, \quad (2.12)$$

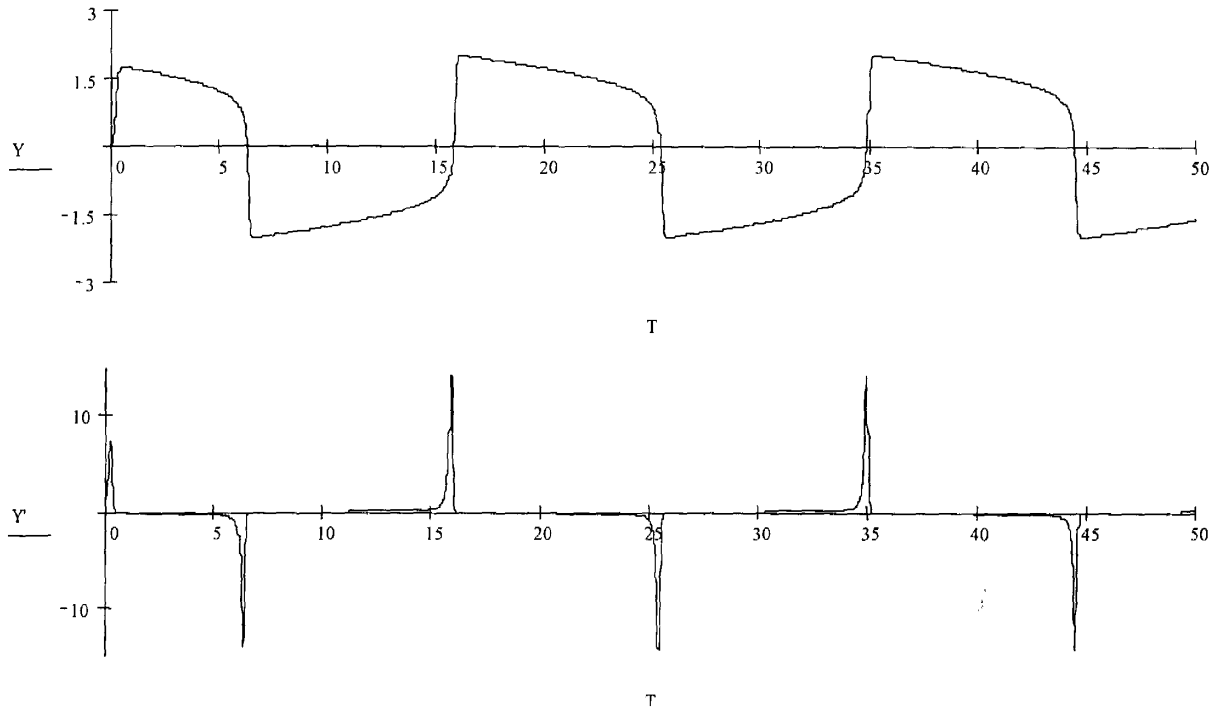


Рисунок 2.3 – Діаграми розподілу швидкості та прискорення в часі при $\varepsilon=10$

асимптотичні та чисельні розв'язки якого широко відомі [52,53]. При цьому слід зауважити, що рівняння (2.12) однорідне, тобто дія зовнішніх сил не враховується. З урахуванням дії зовнішньої сили (в нашому випадку зовнішня сила характеризується дефектом насоса), яку можна змодельовати деякою функцією $f(t)$, рівняння (2.12) набуває вигляду:

$$\frac{d^2 \tilde{y}}{d\tau^2} - \varepsilon(1 - \tilde{y}^2) \frac{d\tilde{y}}{d\tau} + \tilde{y} = f(t). \quad (2.13)$$

Отримане рівняння другого порядку для одержання єдиного розв'язку необхідно доповнити наступними початковими умовами:

$$y(0)=y_0; \quad \frac{d\tilde{y}}{d\tau}(0) = \dot{\tilde{y}}(0), \quad (2.14)$$

які встановлюються з урахуванням проведених заміन змінних.

Дослідження резонансу ШГНУ у випадку різних типів зовнішніх сил (дефектів насосної установки) може бути проведено шляхом аналізу середньої

потужності, що вноситься в систему зовнішньою силою $f(t)$ за час T , протягом якого зона не змінює форму коливань суттєво:

$$N = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cdot y(t) dt. \quad (2.15)$$

Проводячи чисельне інтегрування методом Рунге-Кута IV порядку [53, 54] рівнянь (2.12) та (2.13), можна одержати діаграми розподілу переміщень, швидкостей та прискорень ШГНУ в часі, які добре узгоджуються з даними робіт [52, 53]. При цьому рівняння II порядку (2.12) записується у вигляді системи:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{y}}_1 = \tilde{y}_2, \\ \dot{\tilde{y}}_2 = \varepsilon(1 - \tilde{y}_1^2)\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1, \varepsilon > 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

Результати розрахунків наведено на рисунку 2.3, 2.4, 2.6. Одержані графіки $\hat{y}(t), \ddot{y}(t)$ при різних значеннях параметрів ε виявляють добре узгодження результатів математичного моделювання коливань ШГНУ з реальною фізичною картиною процесу при різних параметрах коливань.

Зокрема, на рис.2.3 відображена ситуація при якій зміна швидкості руху ШК при ході вниз або вгору мала і обумовлена динамічним рівнем свердловинної рідини та її в'язкістю, а зміна швидкості при переході балансира від крайніх верхньої і нижньої точок, тобто при зміні напрямку руху ШК, відбувається різко за короткий проміжок часу, що обумовлює імпульсну зміну прискорення. Останнє призводить до збільшення динамічних навантажень на елементи та вузли СН і, як наслідок, наступної його відмови.

На рис.2.4 наведено результати чисельного моделювання процесу коливань при інших параметрах системи, які характеризуються значенням коефіцієнту $\varepsilon=10$: зміна швидкості більш рівномірна в часі, тобто суттєвішим є вплив тертя на параметри коливань та запас руху ШК, який може бути результатом заїдання плунжера, викривлення свердловини і інш.факторів, детально описаних в 1.2.

Рівняння (2.12) добре описує процес коливань і у випадках, коли тертя не чинить помітного впливу на процес руху колони штанг (рис.2.6). Таким чином, для

основних законів тертя, що використовуються при вивченні реальних коливальних систем:

а) сила тертя пропорційна швидкості (коливання ШК при знаходженні насоса на динамічному рівні і малому числі ходів штока $n=5$);

б) сила тертя пропорційна квадрату швидкості (коливання ШК при знаходженні насоса на 25-50 м нижче динамічного рівня і великій в'язкості свердловинної рідини та великому числі ходів штока $n = 12-15$);

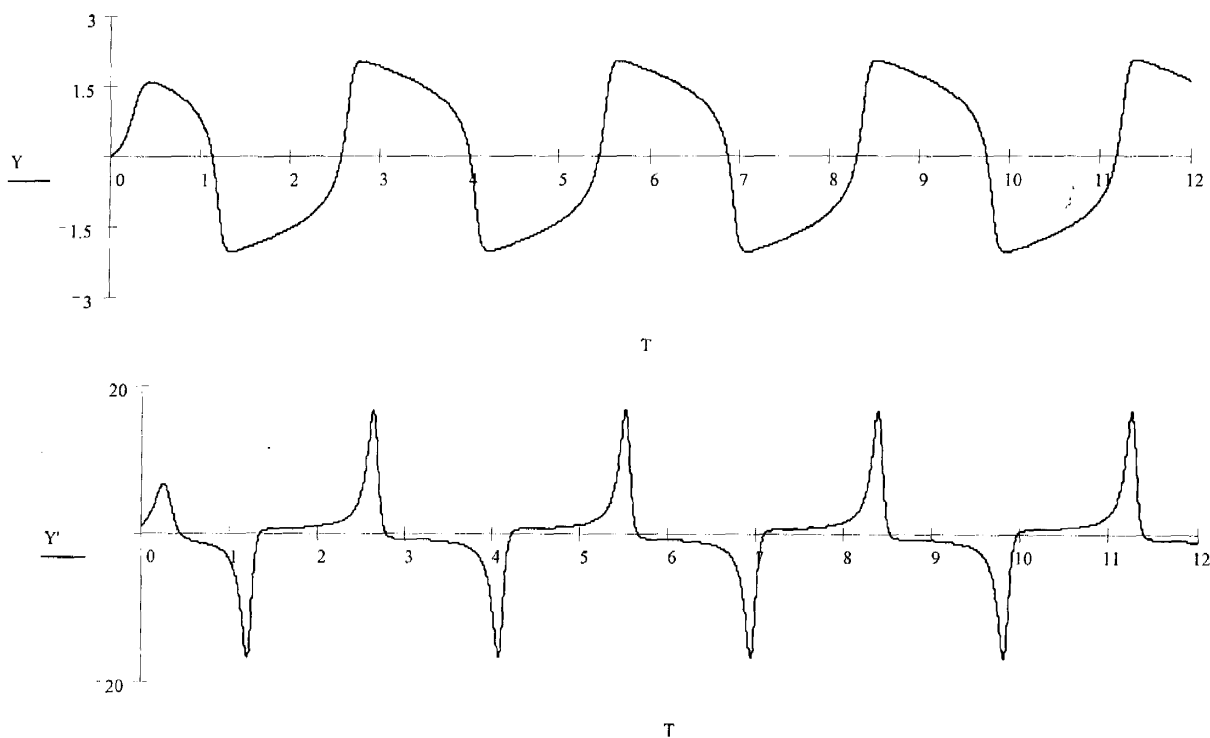


Рисунок 2.4 – Діаграми розподілу швидкості та прискорення в часі при $\epsilon=10$ із суттєвим впливом тертя

в) постійна сила тертя – нормальний режим експлуатації ШГНУ;

г) внутрішнє тертя, що залежить від факторів, детально описаних в 1.2 (сила тертя залежить від швидкості та переміщення, причому аналітично ці функції виражаються складними залежностями) вказані рівняння типу (2.12), (2.13) дають зв'язки добре узгоджені з реальною фізичною картиною процесу залежності між величинами, що підлягають оцінці в процесі діагностування технічного стану ШГНУ.

Дослідження параметрів коливань ШГНУ при великих значеннях ε

Ошибка связи. •

Як показує практика, характеристики коливних процесів ШГНУ обумовлюються як режимними параметрами, так і видами відмов їх вузлів, що виникають в процесі експлуатації. Тому, в одержаних рівняннях типу (2.10), (2.13) коефіцієнт ε може приймати різні значення. Оскільки для даного коефіцієнту введено наступну формулу:

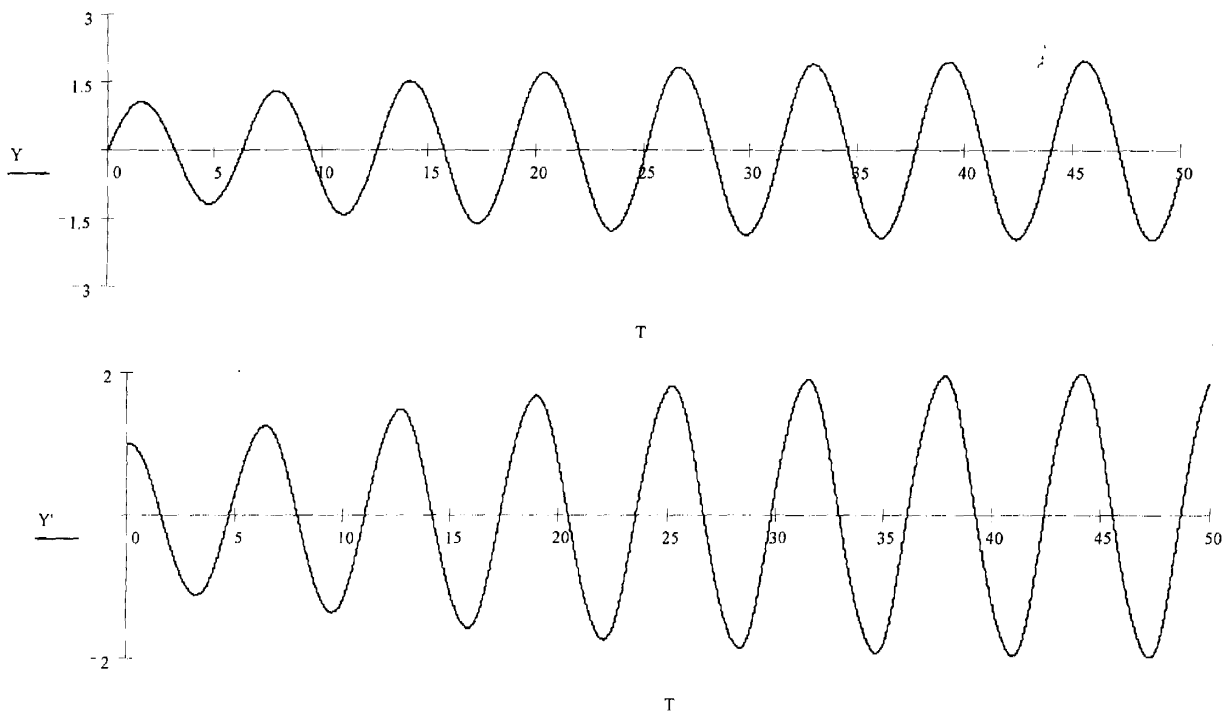


Рисунок 2.6 – Діаграми розподілу швидкості та прискорення в часі при $\varepsilon=0,1$ при незначному значенні тертя

$$\varepsilon = \frac{A}{\sqrt{km}},$$

то при її аналізі можна виділити комбінації відповідних параметрів, які дозволяють одержати значення $\varepsilon \gg 1$. Це досягається за умов великих значень A або, постійної складової коефіцієнта опору. Випадки, коли k та m є малими, мало поширені в реальних технічних системах. •

Якщо подати рівняння (2.12) у вигляді (2.16), то при розгляді системи (2.16) для великих ε (Ошибка! Ошибка связи.) похідна $\tilde{y}'_2 = \varepsilon \cdot (1 - \tilde{y}_1^2) \tilde{y}_2 - \tilde{y}_1$ в околі кривої $g(\tilde{y}_1, \tilde{y}_2) = \varepsilon \cdot (1 - \tilde{y}_1^2) \tilde{y}_2 - \tilde{y}_1 = 0$ має велике за модулем від'ємне значення, тобто, розв'язок буде швидко наближатися до положення рівноваги в околі кривої $\tilde{y}_2 = g(\tilde{y}_1, \tilde{y}_2) = 0$. З системи (2.16) одержуємо:

$$\dot{\tilde{y}}_1 = \frac{\tilde{y}_1}{\varepsilon(1 - \tilde{y}_1^2)}, \quad (2.17)$$

$$\frac{d\tilde{y}_1}{d\tau} = \frac{\tilde{y}_1}{\varepsilon(1 - \tilde{y}_1^2)} = \frac{\varepsilon(1 - \tilde{y}_1^2) d\tilde{y}_1}{\tilde{y}_1} = d\tau = \varepsilon \ln \tilde{y}_1 - \frac{\varepsilon \tilde{y}_1^2}{2} = \tau + c. \quad (2.18)$$

Криві (2.18) визначаються наступним чином: константи C одержуються для відомих значень максимальних швидкостей у відповідні моменти часу. В реальній системі при великих ε лінії (2.18) позначаються на рис.2.3: Після досягнення мінімального значення кривої (2.18) відбувається перехід на нову гілку кривої – одержуються нові умови для визначення константи. Графік функції

$f(x) = \ln x - \frac{x^2}{2} + c$ схематично може бути подано у вигляді (рис.2.5); вона має

єдиний максимум – в даному випадку в точці $x=1$.

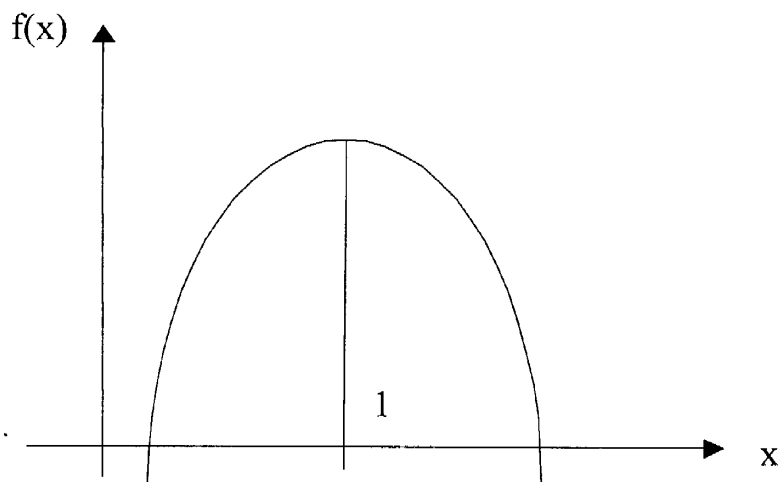


Рисунок 2.5 – Графік функції $f(x) = \ln x - \frac{x^2}{2} + c$

Використовуючи одержані результати можна отримати графік $\tilde{y}_1(\tau) = \tilde{y}_1$, а також $\dot{\tilde{y}}_1(\tau) = \dot{\tilde{y}}_1$, розподіл переміщень в часі – роблячи обернений перехід у формулі (2.6).

Дослідження коливань ШГНУ при малих ε .

Випадок $\varepsilon \gg 1$ виникає при $\kappa \gg 1$, $m \gg 1$, $A \gg 1$, тобто для елементів реальних технічних систем.

При значеннях параметра ε близьких до нуля використовуються асимптотичні методи дослідження: розв'язок шукається у вигляді ряду по степенях малого параметра ε . Згідно з [53], після заміни змінних:

$$x = t(1 + \gamma_1 \varepsilon + \gamma_2 \varepsilon^2 + \dots), \quad (2.19)$$

вважатимемо, що:

$$y(t) = z(x) = z_0(x) + \varepsilon z_1(x) + \varepsilon^2 z_2(x) + \dots \quad (2.20)$$

Очевидно, що:

$$y'(t) = z'(x)(1 + \gamma_1 \varepsilon + \gamma_2 \varepsilon^2 + \dots), \quad (2.21)$$

$$y''(t) = z''(x)(1 + \gamma_1 \varepsilon + \gamma_2 \varepsilon^2 + \dots)^2, \quad (2.22)$$

Після підстановки (2.21), (2.22) в рівняння типу (2.12), одержуємо:

$$\begin{aligned} & (z_0'' + \varepsilon z_1'' + \varepsilon^2 z_2'' \dots)(1 + 2\gamma_1 \varepsilon + (2\gamma_2 + \gamma_1^2) \varepsilon^2 + \dots) + \\ & + \varepsilon (z_0 + \varepsilon z_1 + \dots)^2 - 1 (z_0' + \varepsilon z_1' + \dots)(1 + \gamma_1 \varepsilon + \gamma_2 \varepsilon^2 \dots) + (z_0 + \varepsilon z_1 + \varepsilon^2 z_2 + \dots) = 0 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Аналітичні наближення одержуються шляхом прирівнювання коефіцієнтів при різних степенях ε . Так, для ε^0 одержуємо:

$$z_0'' + z_0 = 0, \quad (2.24)$$

звідки $z_0 = A \cos x$.

Аналогічно для першого степеня ε :

$$\begin{aligned} & z_1'' + z_1 = -2\gamma_1 z_0'' - (z_0^2 - 1) z_0'; \\ & z_1'' + z_1 = 2\gamma_1 A \cos x + \left(\frac{A^3}{4} - A \right) \sin x + \frac{A^3}{4} \sin 3x. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Коефіцієнти підбираються таким чином, щоб розв'язки (2.25) не давали б резонансних членів, які характеризуються лінійним входженням змінної x у вигляді:

$$k x \sin x; k x \cos x.$$

Отже:

$$z_1 = B \cos t + 3/4 \sin t - 1/4 \sin 3t; \quad (2.27)$$

$$z_2 = C \cos t + 3/16 \cos 3t - 5/6 \cos 5t. \quad (2.28)$$

Визначення B і C та інших коефіцієнтів проводиться на кожному наступному кроці.

В результаті одержуємо:

$$y(t) = z(x) \quad x = t(1 - \varepsilon^2/8 + \dots) \quad (2.29)$$

$$Z(x) = 2 \cos x + \varepsilon(3/4 \sin x - 1/4 \sin 3x) + \varepsilon^2(-1/8 \cos x + 3/16 \cos 3x - 5/96 \cos 5x) + \dots$$

Таким чином, траєкторія Ван-дер-Поля має період:

$$2\pi(1 + \varepsilon^2/8 + \dots) \quad (2.30)$$

Для практичних обчислень достатньо взяти кілька членів по степеням ε ($n=2,3$), проте остаточно відповісти на питання про кількість членів розкладу для вибору періодичних розв'язків можна лише при заданих значеннях параметра ε .

Результати проведеного моделювання дозволяють зробити наступні висновки:

1. Моделювання процесу коливання ШГНУ за допомогою рівнянь типу рівняння Ван-дер-Поля дозволяє одержати залежності від часу для її переміщень, швидкостей та прискорень в залежності від маси установки m , коефіцієнта жорсткості k , коефіцієнта $\lambda = \lambda(x, \dot{x})$, який є узагальненням коефіцієнту тертя для різних типів взаємодії установки з оточуючим середовищем.

2. Для вказаних рівнянь можна побудувати як аналітичні розв'язки (для різних значень коефіцієнту ε) в наближеннях $\varepsilon \rightarrow 0$, $\varepsilon \gg 0$ за методом асимптотичних наближень – так і чисельний розв'язок з використанням одного з методів скінчених різниць – наприклад методи Рунге-Кутта.

3. За допомогою наведених методів можна побудувати еталонні класи розв'язків, які можуть бути основою для проведення ідентифікації реальних процесів, що мають місце при експлуатації ШГНУ.

4. При вивченні напружено-деформованого стану ШГНУ необхідно знати умови на границях досліджуваної стержневої системи. Вказані граничні умови можуть бути визначені для теоретичної оцінки напружено-деформованого стану шляхом розв'язання рівнянь Ван-дер-Поля для граничних ділянок ШГНУ.

Вивчення напружено-деформованого стану ШГНУ.

При вивченні напружено-деформованого стану ШГНУ будемо базуватися на наступних основних положеннях, що визначають технічний стан установки і ефективність процесу її експлуатації:

– закон зміни збурюючої сили $F(x,t)$ (визначає технічний стан установки) як правило є величиною відомою, або такою, що піддається достатньо точній математичній формалізації;

– суттєвим є тертя, або опір коливного процесу ШК з боку зовнішнього середовища (свердловинні умови, деградаційні процеси елементів самого СН). Моделювання цього процесу проводиться з урахуванням різних типів залежності коефіцієнта затухання від параметрів руху об'єкта (розглянуто в п.1.). Особливістю моделювання є використання рівняння Ван-дер-Поля для опису коливальних процесів з урахуванням опору середовища.

Виходячи з викладених положень природньо розглянути наступну задачу: знайти розв'язок рівняння [55,56]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \alpha \frac{\partial U}{\partial t}; \quad x > 0; \quad 0 \leq x \leq L; \quad t > -\infty \quad (2.31)$$

при заданих граничних умовах:

$$\begin{aligned} u(0,t) &= \mu_1(t); \\ u(L,t) &= \mu_2(t), \end{aligned} \quad (2.32)$$

де u – переміщення; L – довжина ШК; $\mu_1(t)$ – визначається законом коливання ВК; $\mu_2(t)$ – функція, що описує коливання СН. При цьому аналітично $\mu_2(t)$

визначається шляхом розв'язання рівнянь типу рівняння Ван-дер-Поля. Природно зробити допущення про те, що на різних ділянках ШК в рівняннях Ван-дер-Поля можна вибрати різну аналітичну структуру для коефіцієнта затухання, різні значення параметрів в рівнянні (2.5).

Задача (2.31)–(2.32) може бути розділена на дві:

$$\begin{aligned} \text{I. } \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \alpha \frac{\partial U}{\partial t}; \\ u(0, t) &= 0; \\ u(L, t) &= Ae^{i\omega t}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \text{II. } \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \alpha \frac{\partial U}{\partial t}; \\ u(0, t) &= Be^{i\omega t}; \\ u(L, t) &= 0. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Вважається, що граничні функції допускають періодичний характер зміни переміщень.

Це допущення аргументовано результатами пункта 3.

Вважається, що:

$$U(x, t) = X(x)e^{i\omega t} \quad (2.35)$$

шляхом підстановки в (2.33), (2.34) одержуємо:

$$\ddot{X}(x) + K^2 X(x) = 0$$

$$X(0) = 0.$$

$$X(L) = A.$$

$$K^2 = \frac{\omega^2}{a^2} - i\alpha \frac{\omega}{a^2}, \quad (2.36)$$

де A – амплітуда коливачь. Звідси знаходимо, що:

$$X(x) = C \sin xk, \quad (2.37)$$

при $x=L$ маємо:

$$C = \frac{A}{\sin kL}, \quad (2.38)$$

тобто:

$$X(x) = A \frac{\sin kx}{\sin kL} = X_1(x) + iX_2(x), \quad (2.39)$$

де $X_1(x)$ – відповідно дійсна чи уявна частина $X(x)$. Шуканий розв'язок може бути поданий у вигляді:

$$U(x,t) = [X_1(x) + iX_2(x)]e^{i\omega t} = U^1(x,t) + iU^2(x,t), \quad (2.40)$$

де

$$\begin{aligned} U^1(x,t) &= X_1(x)\cos\omega t - X_2(x)\sin\omega t, \\ U^2(x,t) &= X_1(x)\sin\omega t - X_2(x)\cos\omega t. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Тут враховано, що:

$$\sin(a+ib) = chbsina + ishbcosa.$$

За умов відсутності тертя ($a \rightarrow 0$) знаходимо, що:

$$\tilde{k} = \lim_{a \rightarrow 0} k = \frac{\omega}{a}, \quad (2.42)$$

звідки:

$$U^1(x,t) = A \frac{\sin \frac{\omega}{a} x}{\sin \frac{\omega}{a} L} \cos \omega t, \quad (2.43)$$

$$U^2(x,t) = A \frac{\sin \frac{\omega}{a} x}{\sin \frac{\omega}{a} L} \sin \omega t. \quad (2.44)$$

Звідси відразу витікає наступний висновок: розв'язок задачі при $a=0$ існує не завжди, оскільки при збігу частот власних та вимушених коливань:

$$\omega = \omega_n = \frac{\pi n}{L} a, \quad (2.45)$$

розв'язки (2.43) та (2.44) мають знаменники, що дорівнюють нулю, тому розв'язків задач без початкових умов не існує. Фізично це означає, що має місце явище резонансу – амплітуда коливань, починаючи з деякого моменту часу $t=t_0$, починає необмежено зростати. При наявності тертя ($a \neq 0$) стійкий режим можливий при будь-якому ω , оскільки $\sin kL \neq 0$ при $k = a + ib$; $b \neq 0$; що впливає з (2.42).

Якщо $\mu_1(t) = 0$, а $\mu_2(t)$ – періодична функція, що може бути подана у вигляді ряду:

$$\mu_2(t) = \frac{A}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t), \quad (2.46)$$

де ω_n – частота, A_n і B_n – коефіцієнти Фур'є, то розв'язок задачі при $x=0$ набуває вигляду:

$$U(x,t) = \frac{A_0}{2L} x + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \frac{\sin \frac{\omega_n}{a} x}{\sin \frac{\omega_n}{a} L}, \quad (2.47)$$

якщо тільки жодна з частот ω_n не співпадає з власними частотами коливання ШК.

У випадку, коли $\mu_2(t)$ – неперіодична функція, необхідно скористатись розкладом в ряд Фур'є, після чого розв'язок одержується аналогічно.

Отже, розв'язок задачі без початкових умов за наявності граничних умов (2.32) визначається у вигляді суми двох складових, для кожної з яких неоднорідною є лише одна з граничних умов: [(задачі (2.33) та (2.34)]. В такому випадку маємо:

$$X_1(x) = \operatorname{Re} \left[A \frac{\sin kx}{\sin kl} \right] = \operatorname{Re} \left[\frac{A \sin(\sqrt{r}x \cos \frac{\varphi}{2} + ix\sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2})}{\sin(\sqrt{r}L \cos \frac{\varphi}{2} + iL\sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2})} \right] \quad (2.48)$$

$$R = \sqrt{\frac{\omega^2}{a^2} - i\alpha \frac{\omega}{a^2}} = \sqrt{r} \cos \frac{\varphi}{2} + i\sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2}, \quad (2.49)$$

$$r = |k| = \frac{\omega}{a^2} \sqrt{\omega^2 + \alpha^2}, \quad (2.50)$$

$$\varphi = \arg k = -\arctg \frac{\alpha}{\omega}, \quad (2.51)$$

$$X_1(x) = \operatorname{Re} \left[\frac{A \operatorname{sh}(\sin \frac{\varphi}{2} \sqrt{r}x) \sin(\sqrt{r}x \cos \frac{\varphi}{2}) + i \operatorname{sh}(\sqrt{r}x \cos \frac{\varphi}{2}) \cos(\sqrt{r}x \sin \frac{\varphi}{2})}{\operatorname{sh}(\sqrt{r}L \sin \frac{\varphi}{2}) \sin(\sqrt{r}L \cos \frac{\varphi}{2}) + i \operatorname{sh}(\sqrt{r}L \cos \frac{\varphi}{2}) \cos(\sqrt{r}L \sin \frac{\varphi}{2})} \right] \quad (2.52)$$

Введемо позначення:

$$v_1 = A \operatorname{ch}(x\sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2}),$$

$$P_1 = \operatorname{ch}(L\sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2}),$$

$$v_2 = \sin(x\sqrt{r} \cos \frac{\varphi}{2}),$$

$$P_2 = \sin(L\sqrt{r} \cos \frac{\varphi}{2}),$$

$$\omega_1 = A \operatorname{ch}(x\sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2}), \quad q_1 = ch(L\sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2}), \quad (2.53)$$

$$\omega_2 = \cos(x\sqrt{r} \cos \frac{\varphi}{2}), \quad q_2 = \cos(L\sqrt{r} \cos \frac{\varphi}{2}),$$

звідки:

$$X_1(x) = \operatorname{Re} \left[\frac{(v_1 v_2 + i \omega_1 \omega_2)(p_1 p_2 + i q_1 q_2)}{p_1^2 p_2^2 + q_1^2 q_2^2} \right] = \frac{v_1 v_2 p_1 p_2 - \omega_1 \omega_2 q_1 q_2}{p_1^2 p_2^2 - q_1^2 q_2^2}. \quad (2.54)$$

$$X_2(x) = \operatorname{Im} \left[\frac{v_1 v_2 + i \omega_1 \omega_2}{p_1 p_2 + i q_1 q_2} \right] = \frac{\omega_1 \omega_2 p_1 p_2 - v_1 v_2 q_1 q_2}{p_1^2 p_2^2 - q_1^2 q_2^2}. \quad (2.55)$$

Таким чином, одержані результати свідчать про те, що наявність тертя дає позитивний ефект в плані картини напружено-деформованого стану. Розв'язок даної задачі, крім визначення закону коливань, дозволяє також виявляти максимальні напруження в ШК.

Особливу цікавість становить вивчення процесу коливань ШК, що описується рівнянням:

$$L(u) = \frac{\partial}{\partial x} (ES(x) \frac{\partial u}{\partial x}) - q(x)u = \rho(x)S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2.56)$$

$$0 < x < L; \quad t > 0,$$

яке задовільняє умовам, що витікають з особливостей фізичної картини:

$$U(0, t) = q_1(t), \quad U(L, t) = q_2(t), \quad t \geq 0 \quad (2.57)$$

$$U(x, 0) = \varphi_1(x), \quad \frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = \varphi^2(x).$$

Дану задачу введенням допоміжної функції можна звести до задачі з однорідними граничними умовами:

$$v(0, t) = v(L, 0) = 0. \quad (2.58)$$

Узагальнюючи викладене, можна записати, що розв'язок задачі зводиться до знаходження розв'язку задачі Штурма-Ліувілля:

$$\frac{d}{dx} (ES(x) \frac{dX}{dx}) - q(x)X = -\lambda \rho(x)S(x)X. \quad (2.59)$$

$$X(0) = X(L) = 0,$$

$$T'' + \lambda T = 0,$$

після чого формально можна записати:

$$U(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \sqrt{\lambda_n} t + B_n \sin \sqrt{\lambda_n} t) X_n(x), \quad (2.60)$$

де $X_n(x)$ – розв’язки задачі Штурма-Ліувілля, а для визначення коефіцієнтів A_n , B_n , справедливі формули:

$$U(x,0) = \varphi_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n X_n(x). \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x,0) = \varphi_2(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sqrt{\lambda_n} X_n(x), \quad (2.62)$$

звідки випливає, що

$$A_n = \varphi_{1n}, \quad B_n = \frac{\varphi_{2n}}{\sqrt{\lambda_n}}, \quad (2.63)$$

де φ_{1n} , φ_{2n} – коефіцієнти Фур’є функцій $\varphi_1(x)$ та $\varphi_2(x)$ при розкладі по ортогональній системі (з вагою $\rho(x)S(x)$) функцій $\{X_n(x)\}$, які є власними функціями оператора L . Вибір конкретної схеми практичної реалізації моделі залежить від аналітичної структури модельних функцій $S(x)$, $q(x)$, $\rho(x)$, $q_1(t)$, $q_2(t)$, $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$. При необхідності враховування крутильних коливань з математичної точки зору їх рівняння матимуть аналогічну структуру.

Розглядаючи задачу (2.56) при $q(x)=0$, $E_1 S_1 \rho = const$; і враховуючи відомі граничні та початкові умови (2.57), які дозволяють враховувати особливості функціонування ШК, одержимо задачу:

$$a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad a^2 = \frac{E}{\rho}; \quad (2.64)$$

$$U(x,0) = \varphi_1(x), \quad \frac{\partial u}{\partial t}(x,0) = \varphi_2(x), \quad (2.65)$$

$$U(0,t) = \mu_1(t), \quad U(L,0) = \mu_2(t).$$

Введемо функцію, що зв’язує граничні умови:

$$v_1(x,t) = \frac{L-x}{L} \mu_1(t) + \frac{x}{L} \mu_2(t). \quad (2.66)$$

Розв’язок $U(x,t)$ будемо шукати у вигляді суми:

$$U(x,t) = v_1(x,t) + \omega(x,t). \quad (2.67)$$

При цьому $\omega(x,t)$ є розв’язком задачі:

$$a^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{x-l}{l} \mu_1''(t) - \frac{x}{L} \mu_2''(t) = \omega_{tt} \quad (2.68)$$

$$\omega(x,0) = \varphi_1(x) + \frac{x-L}{L} \mu_1'(0) - \frac{x}{L} \mu_2'(0) = \tilde{\varphi}_1(x) \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}(x,0) = \varphi_2(x) + \frac{x-L}{L} \mu_1'(0) - \frac{x}{L} \mu_2'(0) = \tilde{\varphi}_2(x) \quad (2.70)$$

$$\omega(0,t) = \omega(l,t) = 0.$$

Функції $\mu_1(t)$ та $\mu_2(t)$ є неперервно диференційованими до порядку 2, що не суперечить їх фізичній природі:

$\mu_1(t)$ – закон коливання верхньої частини ШК, $x=0$, який визначається режимом роботи верстата-качалки;

$\mu_2(t)$ – закон коливання нижньої частини ШК (СН), $x=L$, який моделюється шляхом розв'язання рівняння Ван-дер-Поля, з урахуванням тертя, пропорційного квадрату швидкості,

$\mu_1(t)$ та $\mu_2(t)$ визначаються експериментальним ($\mu_1(t)$) та аналітичним ($\mu_2(t)$) шляхами і достатній рівень гладкості забезпечується параметрами моделі.

Функцію $\omega(x,t)$ знаходимо у вигляді суми $\omega(x,t) = R(x,t) + Q(x,t)$, де для $R(x,t)$ справедливе рівняння:

$$a^2 \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 R}{\partial t^2}. \quad (2.71)$$

$$R(x,0) = \varphi_1(x); \quad \frac{\partial R}{\partial t}(x,0) = \tilde{\varphi}_2(x), \quad (2.72)$$

$$R(0,t) = R(l,t) = 0;$$

даний розв'язок знаходиться в аналітичній формі:

$$R(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cos a\sqrt{\lambda_n}t + D_n \sin a\sqrt{\lambda_n}t) \sin \frac{\pi n}{L} x, \quad (2.73)$$

$$\lambda_n = \frac{\pi^2 n^2}{L^2}, \quad C_n = \frac{2}{l} \int_0^l \tilde{\varphi}_1(\xi) \sin \frac{\pi n}{L} \xi d\xi, \quad (2.74)$$

$$D_n = \frac{1}{a\pi n} \int_0^l \tilde{\varphi}_2(\xi) \sin \frac{\pi n}{L} \xi d\xi, \quad (2.75)$$

а $Q(x,t)$ є розв'язком задачі з однорідними граничними та початковими умовами:

$$a^2 \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + f(x,t) = \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}. \quad (2.76)$$

$$Q(x,0) = \frac{\partial Q}{\partial t}(x,0) = 0. \quad (2.77)$$

$$Q(0,t) = Q(L,t) = 0. \quad (2.78)$$

$$f(x,t) = \frac{x-L}{L} \mu_1''(t) - \frac{x}{L} \mu_2''(t).$$

Для даної задачі з використанням методу Фур'є маємо наступний розв'язок:

$$Q(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(t) \sin \frac{\pi n}{L} x. \quad (2.79)$$

Для функцій $\psi_n(t)$ існує відома аналітична форма подання:

$$\psi_n(t) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \sin[(t-\tau)\sqrt{\lambda_n}] f_n(\tau) d\tau, \quad (2.80)$$

$$\text{де } f_n(\tau) = \frac{2}{l} \int_0^L f(\xi,t) \sin \frac{\pi n}{L} \xi d\xi = \frac{2}{\pi n} [(-1)^n \mu_2''(\tau) - \mu_1''(\tau)]. \quad (2.81)$$

Якщо граничні умови задачі мають вигляд:

$$\begin{aligned} \alpha_1 U_x(0,t) - \beta_1 U(0,t) &= \mu_1(t), \\ \alpha_2 U_x(0,t) + \beta_2 U(0,t) &= \mu_2(t), \end{aligned} \quad (2.82)$$

то за функцію $v_1(x,t)$ можна взяти функцію наступного виду:

$$v_1(x,t) = Dx^2 \mu_2(t) - C(x-l)^2 \mu_1(t), \quad (2.83)$$

де

$$C = \frac{l}{2\alpha_1 l + \beta_1 l^2}; \quad D = \frac{l}{2\alpha_2 l + \beta_2 l^2}. \quad (2.84)$$

Вказаний тип граничних умов дозволяє врахувати умови закріплення ГНШУ. Всі наведені формули, для визначення $U(x,t)$, подані у вигляді, який дозволяє застосувати методи обчислень за допомогою ЕОМ. У випадку, коли інтеграли (2.74)-(2.75), (2.80)-(2.81) не допускають аналітичного розв'язку, використовуються методи чисельного інтегрування вказаних функцій.

У випадку, коли на ШК діють зовнішні сили, що мають циклічний характер, рівняння (2.56) набуває вигляду:

$$\rho(x)S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -Lu + F(x, t) \quad (2.85)$$

В такому випадку формула (2.60) набуває вигляду:

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos \sqrt{\lambda_n} t + B_n \sin \sqrt{\lambda_n} t + \frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^+ C_n(\tau) \cdot \sin \sqrt{\lambda_n} (t - \tau) d\tau \right] X_n(x), \quad (2.86)$$

$$\text{де} \quad C_n(t) = \int_G F(x, t) X_n(x) dx, \quad (2.87)$$

де G - область, в якій вивчаються коливання.

В подальших міркуваннях розглянемо лише третій доданок даної суми, оскільки перші два члени є розв'язками задачі (2.59) без дії зовнішніх сил. Третій доданок в даному випадку є розв'язком задачі (2.85) за наявності нульових крайових умов.

Нехай зовнішнє збурення $F(x, t)$ може бути подано у вигляді:

$$F(x, t) = \sum_{m=1}^{N1} \sum_{k=1}^{N2} C_{mk} \sin \omega_m t \rho(x) S(x) X_k(x) \quad (2.88)$$

Це означає, що зовнішнє збурення є періодичною функцією, яка допускає аналітичний розв'язок за власними функціями оператора L . В такому випадку вдається визначити параметри коливань ШК при частотах, близьких до резонансних.

Подаючи скалярний добуток у вигляді:

$$(u, x)_{\rho S} = \int_G \rho(x) S(x) u(x) X(x) dx, \quad (2.89)$$

та перетворюючи (2.87) до виду:

$$C_n(t) = \sum_{m=1}^{N1} \sum_{k=1}^{N2} C_{mk} \sin \omega_m t (X_k, X_n)_{\rho S}, \quad (2.90)$$

запишемо:

$$C_n(t) = \sum_{m=1}^{N1} \sum_{k=1}^{N2} C_{mk} \sin \omega_m t \delta_{kn} \quad (2.91)$$

$$\delta_{kn} = \begin{cases} 0 & k \neq n \\ 1 & k = 1 \end{cases} \quad (2.92)$$

Умова (2.92) витікає з умови повноти [56] системи власних функцій оператора L задачі (2.85), яка передбачає її ортогональність. за таких умов третій член у формулі (2.86) набуває виду:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t C_n(\tau) \sin \sqrt{\lambda_n} (t - \tau) d\tau \right) X_n(x) = \\ & = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{N1} \sum_{k=1}^{N2} \frac{C_{mk} \delta_{kn}}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \sin \omega_m t \sin \sqrt{\lambda_n} (t - \tau) d\tau = \quad (2.93) \\ & = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^N \frac{C_{mn}}{\omega_m^2 - \lambda_n} \left(\frac{\omega_m}{\sqrt{\lambda_n}} \sin \sqrt{\lambda_n} t - \sin \omega_m t \right) X_n(x) \end{aligned}$$

Особливістю даного розв'язку є те, що при умові $\omega_m \rightarrow \sqrt{\lambda_n}$ (2.93) може необмежено зростати, що доводиться шляхом розв'язку наступної границі:

$$\begin{aligned} & \lim_{\omega_m \rightarrow \sqrt{\lambda_n}} \frac{C_{mn}}{\omega_m^2 - \lambda_n} \left(\frac{\omega_m}{\sqrt{\lambda_n}} \sin \sqrt{\lambda_n} t - \sin \omega_m t \right) x_n(x) = \\ & = \frac{C_{mn}}{2\sqrt{\lambda_n}} \left(\frac{\sin \sqrt{\lambda_n} t}{\sqrt{\lambda_n}} - t \cos \sqrt{\lambda_n} t \right) x_n(x). \quad (2.94) \end{aligned}$$

Тут було застосовано правило Лопіталя для знаходження границь, які містять невизначеність типу $\frac{0}{0}$ []. З формули (2.94) витікає, що під дією періодичного зовнішнього збурення (2.88) з частотою, яка співпадає з $\sqrt{\lambda_n}$, λ_n - власна частота оператора L , амплітуда коливань необмежено зростає при $t \rightarrow \infty$, тобто має місце явище резонансу.

Шляхом дослідження (2.93) встановлюється, при якій величині різниці:

$$|\omega_m^2 - \lambda_n| \quad (2.95)$$

значення $U(x, t)$ не перевищують значень вібропереміщень U_{max} , які встановлюються з урахуванням реальних умов експлуатації, значень амплітуд C_{mk} і аналітичного вигляду функцій $X_i(x)$ та характеру їх поведінки. Важливою особливістю процесу коливань є те, що резонансна частота може приймати кілька значень, проте суттєвий вплив на процес чинять лише кілька з них. Явища резонансу слід приймати до уваги,

оскільки опір коливанням з боку середовища, описаний моделлю (2.31), (2.52), часто є незначним.

Висновки до розділу

1. На основі аналізу особливостей ШГНУ як об'єкта діагностування встановлено:

– конструктивні особливості насосної установки не відповідають вимогам контролепридатності, що не дозволяє використати серійні технічні засоби і вимагає розробки індивідуальних засобів діагностування;

– складний вплив на характеристики коливних процесів, що розповсюджуються по ШК, технічного стану вузлів і елементів насосної установки та рівня їх надійності, свердловинних факторів і параметрів ШК, виключає можливість отримання універсальних рішень і вимагає різних підходів до розв'язку задач її діагностування.

2. Розроблена логічна діагностична модель ШГНУ, яка дозволяє встановити і класифікувати дефекти та визначити напрямок їх розвитку і взаємозв'язок з іншими елементами насосної установки.

3. Запропонована математична діагностична модель ШГНУ, в основу якої покладено модель стержня циліндричної форми, коливання якого описуються в наближеннях абсолютно твердого (недеформованого) тіла лінійним диференціальним рівнянням, що зводиться до відомого рівняння Ван-дер-Поля.

4. Проведено дослідження повздовжніх коливань з використанням реальних значень параметрів ШГНУ та отримані залежності переміщень, швидкості і прискорення в часі та побудовано фазовий портрет динамічної системи – ШГНУ, що дозволяє аналізувати її поведінку. Запропонована модель адекватно описує закономірності зміни коливального процесу ШК при різних видах тертя, яке супроводжує роботу установки.

5. Отримані, на базі запропонованої моделі, результати моделювання, використані у виді по чаткових умов при дослідженні на пружено-деформованого

стану ШК. При цьому коливання верхньої частини ШК, описується з врахуванням режиму приводу ВК, а коливання нижньої частини – моделюється з врахуванням опору рідини та особливостей режиму експлуатації на основі рівняння Ван-дер-Поля.

6. Розглянуті передрезонансні явища, що, як відомо з практики експлуатації ШГНУ, у випадку, коли на неї діють періодичні силові фактори з відомими частотами. Одержано розв'язок рівняння коливань за умов наявності періодичних збурень, оцінено допустимі відхилення власних частот ШК від частот зовнішніх силових збурень, які не допускають переміщень системи резонансного характеру.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИЧНОГО, ТЕХНІЧНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В розділі розглядаються питання методичного, технічного і програмного забезпечення експериментальних досліджень вібраційного стану ШГНУ в промислових умовах.

3.1. Методика проведення експериментальних досліджень вібраційного стану ШГНУ в промислових умовах

Методика проведення експериментів була розроблена таким чином, щоб в результаті проведених досліджень можна було вирішити цілий комплекс задач як методичного характеру – вибору кількості і місця розташування вібродавачів, вибору контролюемого параметра вібрації, тощо, так і задач по визначенню вібростану ШГНУ з врахуванням впливових факторів, вибору раціональних діагностичних ознак і інш.

Визначальним при дослідженні вібростану ШГНУ є отримання оперативної і достовірної інформації про закономірності зміни коливних процесів в ШК, обумовлені як технічним станом СН, параметрами режиму її роботи, впливом свердловинних факторів, а також впливом наземної частини ШГНУ.

Окрім вимірювання параметрів вібрації ШГНУ методика передбачає також вимірювання зусиль в ШК у верхній точці.

Основний об'єм експериментальних досліджень було проведено на нафтопромислах НГВУ "Надвірнанафтогаз", фонд якого складає 155 глибинно-насосних свердловин, а середня глибина спуску насосів – 1850 м. В основному використовуються насоси типу НСВ діаметром 32 мм та числом качань рівним 6.

При дослідженні впливу технічного стану вузлів установки на вібростан ШГНУ відбиралися свердловини одного родовища з відомими параметрами пласта,

які експлуатувалися ШГНУ визначеного типорозміру з заданими параметрами режиму відкачки свердловинної рідини і глибиною спуску насоса. При цьому період експлуатації відібраних ШГНУ був різний: початок експлуатації (стан установки відмінний); 10; 90; 220 – діб експлуатації, на протязі яких деградаційні процеси призводять до значних змін технічного стану ГН, що відображається на зміні характеристик коливних процесів в ШК (Битківське родовище, свердловини № 2, 308, 708, 736, насоси типу – НСВ1, діаметри насосів – 32 мм, довжини ходу відповідно – 2,5 м; 2 м; 2, м; 2,5 м і числом качань – 6; глибиною спуску відповідно – 1900, 2265, 2175, 1991 м, дебіт рідини в середньому – 1 т/добу). Період 220 діб був відібраний виходячи з результатів обробки статистичних даних по аварійності ШГНУ, і відповідає передаварійному періоду експлуатації, на протязі якого можуть мати місце як раптові відмови, обумовлені обривом ШК, так і поступові (зносіві), подальша експлуатація ШГНУ при цьому є не лишень економічно недоцільною, але може призвести також до виникнення раптових відмов.

Крім того, в процесі проведення експлуатаційних досліджень були відібрані свердловини, експлуатація яких характеризується регулярним виникненням раптових відмов ШГНУ, так звані "чортові" свердловини. На таких свердловинах проводили періодично (1 раз в 15 днів) вимірювання параметрів вібрації і зусилля в ШК у верхній точці (Пнівське родовище, свердловина № 3, насос типу – НСВ1, діаметр насоса – 32 мм, довжина ходу – 3,4 м; число качань – 6, глибина спуску – 2103 м, дебіт рідини – 1,035 т/добу, періодична відкачка рідини. Битківське родовище, свердловина № 463, насос типу – НСВ1, діаметр насоса – 38 мм, довжина ходу – 2 м; число качань – 7, глибина спуску – 2046 м, дебіт рідини – 4,1 т/добу, неперервна відкачка рідини.). Такі експерименти дозволяють встановити тенденцію зміни коливних процесів в ШК, обумовлених зміною технічного стану ГН, при його експлуатації.

З метою дослідження впливу свердловинних умов та режиму відкачки свердловинної рідини на закономірності зміни коливних процесів в ШК, проводилися експерименти на свердловинах, які різнилися глибиною залягання

нафтоносного пласту та його характеристиками і режимами експлуатації ШГНУ (Битківське родовище, свердловина №260, насос типу НСВ1-32, глибина спуску – 2265 м, довжина ходу плунжера – 3 м, число качань – 5; свердловина №119, насос типу НСВ-32, глибина спуску – 1015 м, довжина ходу – 0,9 м, число качань – 9,5. Луквицьке родовище, свердловина №4, насос типу НСВ1-32, глибина спуску – 1520 м, довжина ходу – 2,5 м, число качань – 6. Довбушанське родовище, свердловина №88, насос типу НСВ1-32, глибина спуску – 1832 м, довжина ходу плунжера – 3 м, число качань – 7).

Методика проведення експериментів передбачала для ШГНУ, вібраційний стан яких досліджувався, проведення детального опису дефектів, що мали місце, і вимірювання величини зносу окремих елементів ГН у випадку припинення експлуатації ШГНУ, обумовленої її відмовою з демонтаванням і відправкою на ремонтну базу для подальшої розборки.

Вимірювання параметрів вібрації і зусиль в ШК проводили за допомогою мікропроцесорної інформаційно-вимірювальної системи (МІВС-01), основний вузол якої – вимірювальний блок, монтувався на полірованому штоці (конструкція і принцип роботи МІВС-01 детально описано в р.3.2.). При виборі місця і способу його кріплення керувались тим, що давачі необхідно було розмістити в найбільш інформативному місці, якомога ближче до джерела вібрації. Найбільш інформативним місцем встановлення давачів є підземна частина – СН. Але в зв'язку з неможливістю встановлення давачів у підземній частині обладнання, що обумовлено його неконтролепридатністю і іншими особливостями, детально розглянутими в 2.1., блок з давачами монтували під канатною підвіскою після рупинки ВК. Для отримання повної характеристики вібраційного стану вузлів ШГНУ вимірювання параметрів вібрації проводили в повздовжньому і поперечному (до осі штока) напрямках. З метою отримання достовірної інформації, вимірювання показників режиму роботи ШГНУ (вібрацій і зусиль на полірований шток) проводили за три цикли роботи установки. В середньому для всіх ШГНУ, які використовувалися при дослідженнях, один цикл складав 11 секунд. Для оцінки

впливу вібростану вузлів ВК (привідного електродвигуна, редуктора, опори ВК) на ШК, вібростан якої досліджується, методика передбачала проведення дослідження їх вібростану. При цьому вимірювання параметрів вібрації вузлів ВК проводили в трьох напрямках: повздовжньому (по осі валів двигун-редуктор), поперечному і перпендикулярному до осі за допомогою магнітного вузла кріплення вібродавачів, (конструкція і принцип роботи описано в 3.2.).

3.2. Розробка технічного забезпечення експериментальних досліджень

Виходячи з методики проведення експериментальних досліджень необхідно проводити вимірювання зусилля в ШК у верхній точці і параметрів її вібрації. Стосовно останнього, то сьогодні відсутні спеціалізовані технічні засоби для вимірювання параметрів вібрації ШК, що обумовлено її неконтролепридатністю.

У зв'язку з цим була поставлена задача розробити МІВС-01, яка дозволяє: проводити вимірювання, як повільно- так і швидкоплинних процесів з заданою точністю; отримати необхідну точність і швидкодію обробки результатів вимірювання; реєстрацію отриманих результатів в графічній і цифровій формі, та забезпечує: простоту компоновки і експлуатації системи, зручність в користуванні та можливість функціонального розширення за рахунок розробки додаткового програмного забезпечення.

Структурна функціональна схема МІВС-01 приведена на рис.3.1 і складається з вимірювального блоку, в який входять тензодавач ТД-1 типу 2ПКБ-20-200 ГВ (технічна характеристика наведена в додатку А1), двох вібродавачів ВД-1 і ВД-2 для вимірювання відповідно повздовжніх $f_{\text{пд}}$ і поперечних $f_{\text{пп}}$ вібрацій типу АНС-004-03 (технічна характеристика наведена в додатку А2). Вибір якого обумовлювався як особливостями об'єкту діагностування, так і вимогами до вимірювання вібрації та кріплення вібродавачів [90, 91, 92, 93]; тензопідсилювача ТП-1 і двох вібропідсилювачів ВП-1 та ВП-2; мультиплексора МтП; аналогово-цифрового перетворювача АЦП та мікропроцесорного пристрою МПП. З метою

спрощення системи і зменшення трудовитрат на її виготовлення як МПП використано персональний ІВМ – сумісний комп’ютер класу АТ.286/287 . Іхне програмне забезпечення може без змін використовуватися на більш сучасних комп’ютерах.

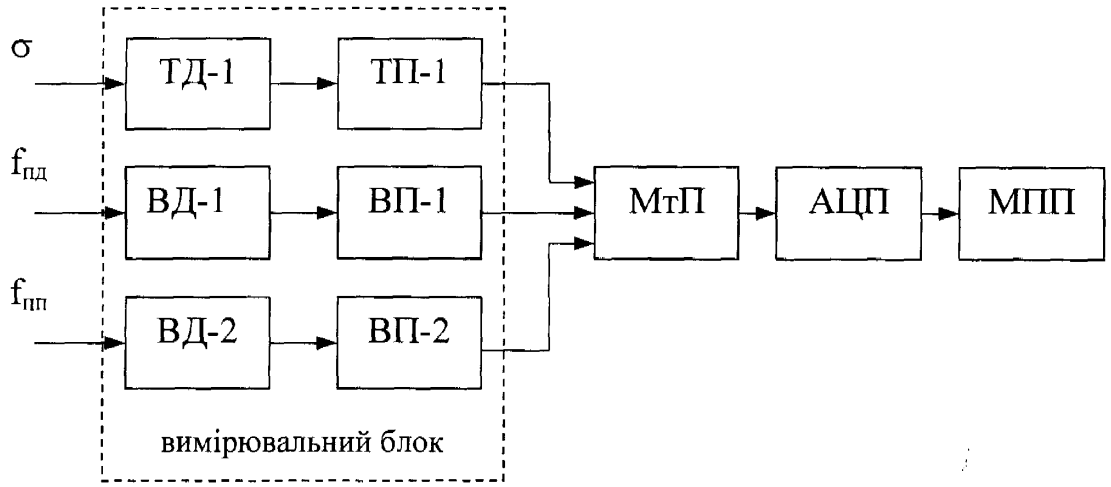


Рисунок 3.1 – Структурна функціональна схема мікропроцесорної інформаційно-вимірювальної системи

Вимірювальний блок – це функціонально-завершений вузол оригінальної конструкції, що складається з чутливого елемента у вигляді кільця 1, з наклеєними клеєм БФ чотирма тензодавачами 2, підключеними за мостовою схемою, яке з’єднане з механізмом кріплення 3 до полірованого штока 4 (рис.3.2.). На останньому за допомогою епоксидної смоли закріплені два вібродавача ВД-1 – 5 і ВД-2 – 6, а також металевий пиля-вологозахисний корпус 7, в якому розміщена електронна плата підсилювачів 8, та роз’єми 9 для під’єднання підсилювачів, вимірювального кабелю 9 та блоку живлення (рис.3.3).

Розглянемо принцип роботи вимірювального блоку і особливості його схемних рішень.

Пружні деформації полірованого штока, а також вібрації, причини виникнення яких детально розглянуті в 1.2, що розповсюджуються на ШК, вимірюються за допомогою ТД-1, ВД1-ВД2 і перетворюються в пропорційні вказаним фізичним величинам, електричні сигнали, які подаються відповідно на ТП-1 з коефіцієнтом підсилення $K_{вп}=400$ і ВП-1,2 з коефіцієнтом підсилення

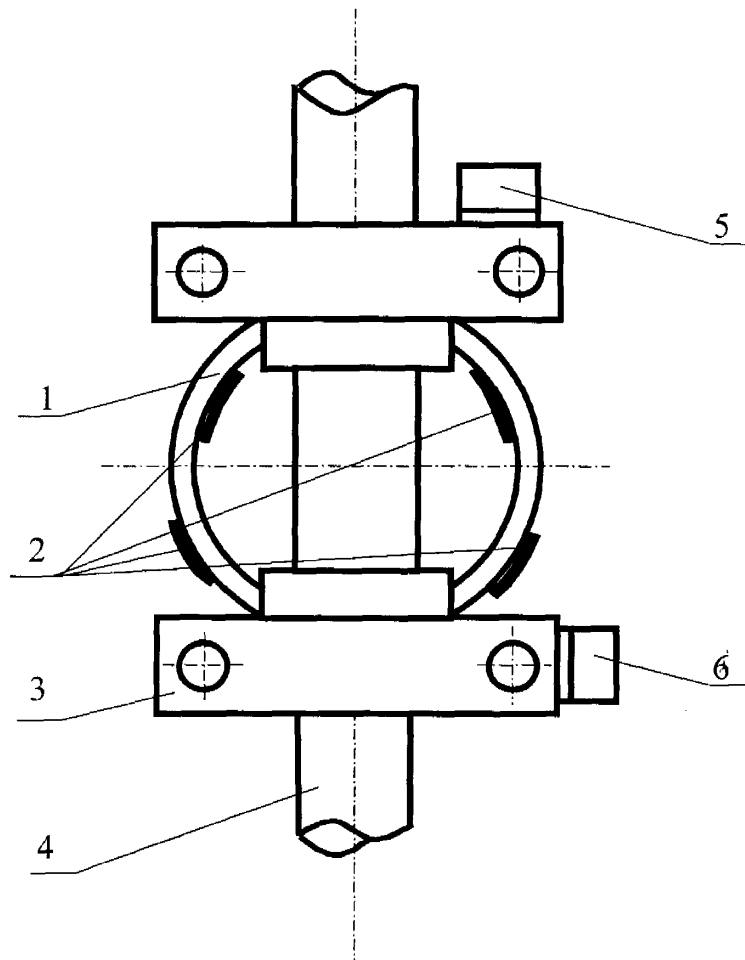


Рис. 3.2 - Конструкція вимірювального блока

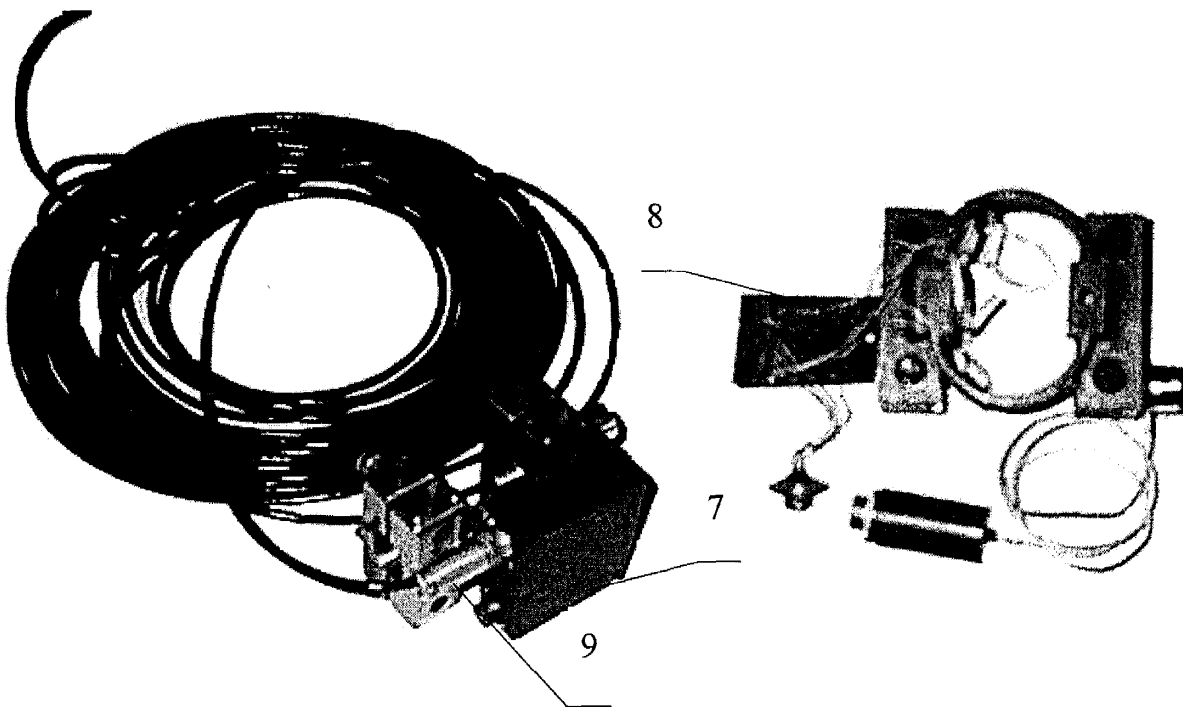
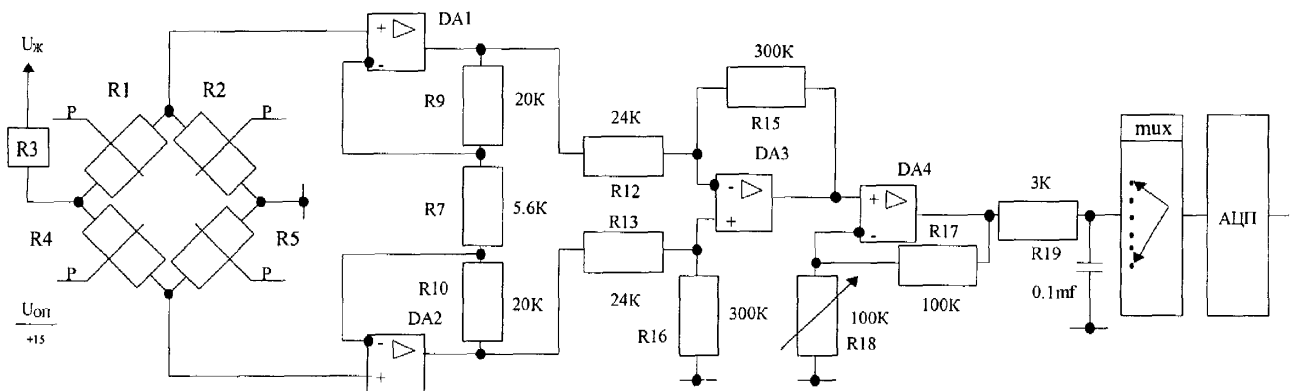


Рисунок 3.3 – Вимірювальний блок МІОС

$K_{\text{вн}}=30 \cdot 10^3$, де підсилюються до величин, необхідних для нормальної роботи АІПТ

При підключенні тензодавачів було використано схему незрівноваженого моста [57, 58, 59], яка дає можливість контролювати динамічний процес. Зрівноваження вимірювального моста проводили шляхом тарування підсилюючого пристрою. В процесі проведення тарування вимірювального моста було встановлено, що при максимальному навантаженні 8.0 тон, яке вибрано, виходячи з глибини свердловини, умов роботи ШГНУ і інш., напруга на його виході становить 0.02 В, а робота АЦП вимагає 5.0В. Тому для підсилення вихідного сигналу вимірювального моста було використано схему диференційного підсилювача, побудовану на операційних підсилювачах, що обумовлювалося великим вхідним опором, можливістю зміни коефіцієнта підсилення за допомогою одного підстроювального опору, великим коефіцієнтом подавлення синфазного сигналу[60, 61]. Перший каскад схеми побудовано на трьох операційних підсилювачах (рис.3.4).



Рисунік 3.4 – Принципова електрична схема тензопідсилювача

Резистори R12-R16, даного підсилювача, повинні задовільняти відношенню $R16/R13=R15/R12$. Тоді вихідна напруга визначається за простою формулою :

$$U_{вих.}=\Delta U/(R15/R12)((R9+R10/R7)+1)$$

Другий каскад підсилення, виконаний на мікросхемі DA4, є неінвертуючим підсилювачем з змінним коефіцієнтом підсилення, що знаходиться в межах від 1 до 100 одиниць. За допомогою другого каскаду проводиться точна настройка амплітуди вихідного сигналу, а також регулюється зміщення “нуля”.

Після монтажу, перевірки і наладки підсилюючого пристрою проводилась процедура тарування тракту тензосигналу, що полягала в наступному. Вимірювальний блок закріплювали на полірованому штоці і проводили регулювання зміщення нуля за допомогою підстроювального опору R_{10} підсилувача тензосигналу (рис.3.4). Потім проводили регулювання коефіцієнта підсилення другого каскаду, що дозволило провести нормування значення вихідної напруги до 5.0 В при розтягу полірованого штока зусиллям, яке складало 8 тонн. Далі проводили запис отриманих значень напруг при поступовому зменшенні навантаження з кроком $\Delta P=1.0$ тн до однієї тони і збільшення навантаження, з тим же кроком, знову до 8.0 тон. В результаті отримали залежність вихідної напруги підсилюючого пристрою від навантаження на полірованому штоці.

Сигнал на виході вібродавача – це змінна напруга досить низької амплітуди, яка також вимагає підсилення і нормування.. При цьому підсилувач вібросигналу повинен задовільняти наступним вимогам: мати великий вихідний опір, лінійну АЧХ в низькочастотному (до 1000 Гц) діапазоні; малий дрейф нуля і малий рівень власного шуму. Таким вимогам задовільняють схеми підсилувачів з від'ємним зворотнім зв'язком, які мають високий вхідний опір і стабільність коефіцієнта перетворення. Однак використання в вихідних ланцюгах підсилувачів-повторювачів пов'язане з замиканням ланцюга зворотнього зв'язку для змінної складової сигналу через ємність давача.

Оскільки ємнісний опір ланцюга для всього діапазону робочих частот підсилувача менше активного опору ланцюга зворотного зв'язку, то зміна ємності давача і з'єднувального кабелю призведе до зміни коефіцієнта підсилення підсилувача напруги. Для уникнення цієї ситуації необхідно провести процедуру тарування давача з підсилувачем при вибраній довжині кабелю.

З врахуванням вищенаведеного була розроблена схема вібропідсилувача, що задовольняє вказаним вимогам, основу якої складає операційний підсилувач К544УДІА (технічні параметри наведені в додатку А3) [61, 62, 63].

Для задоволення вимог, сформульованих вище, була обрана неінвертуюча схема включення операційного підсилювача (рисунок 3.5). Така схема забезпечує великий вхідний опір, який фактично буде рівний вхідному опору операційного підсилювача. Коефіцієнт підсилення в такій схемі визначається за формулою:

$$K = \frac{R2}{R3} + 1. \quad (3.1)$$

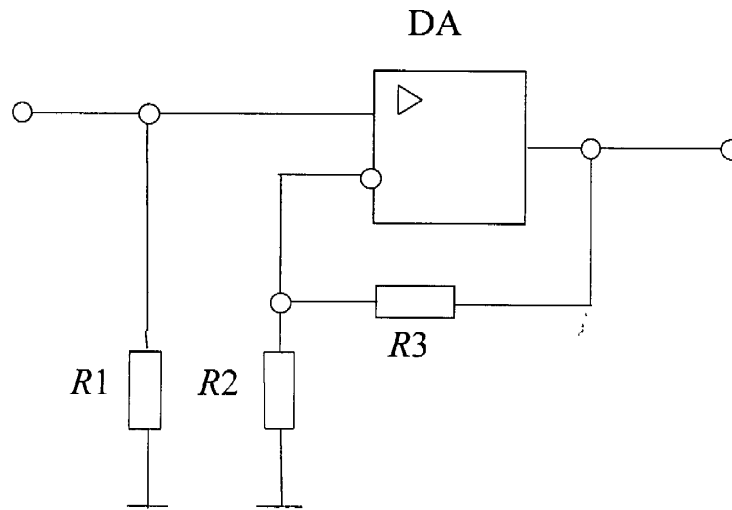


Рисунок 3.5 – Неінвертуючий підсилювач

При таруванні підсилювача було встановлено, що одного каскаду підсилення недостатньо. Тому для підсилення сигналу з вібродавачів було розроблено підсилювач, який складається з двох каскадів, ввімкнених за схемою неінвертуючого підсилювача з коефіцієнтом підсилення першого каскаду $K_1=100$, що забезпечує уникнення його самозбудження і підтримку лінійності амплітудно-частотної характеристики. Коефіцієнт підсилення другого каскаду є змінним і регулюється в межах $K_2=1-47$, що дозволяє нормувати амплітуду вихідного сигналу до рівня, який сприйматиме АЦП (± 5.0 В) при допустимому рівні вібрації.

Принципова електрична схема вібропідсилювача приведена на рис.3.6. В схемі конденсатор $C1$ використано для попередження можливого самозбудження підсилювача при різкому збільшенні віброприскорення. Резистори $R2$ і $R3$ і відповідно $R4$, $R5$ і $R6$ складають ланцюги зворотного зв'язку і регламентують коефіцієнт підсилення відповідних каскадів. Резистор $R1$ виконує роль

навантажувального. Конденсатор $C1$ працює як фільтр постійної складової вібросигналу.

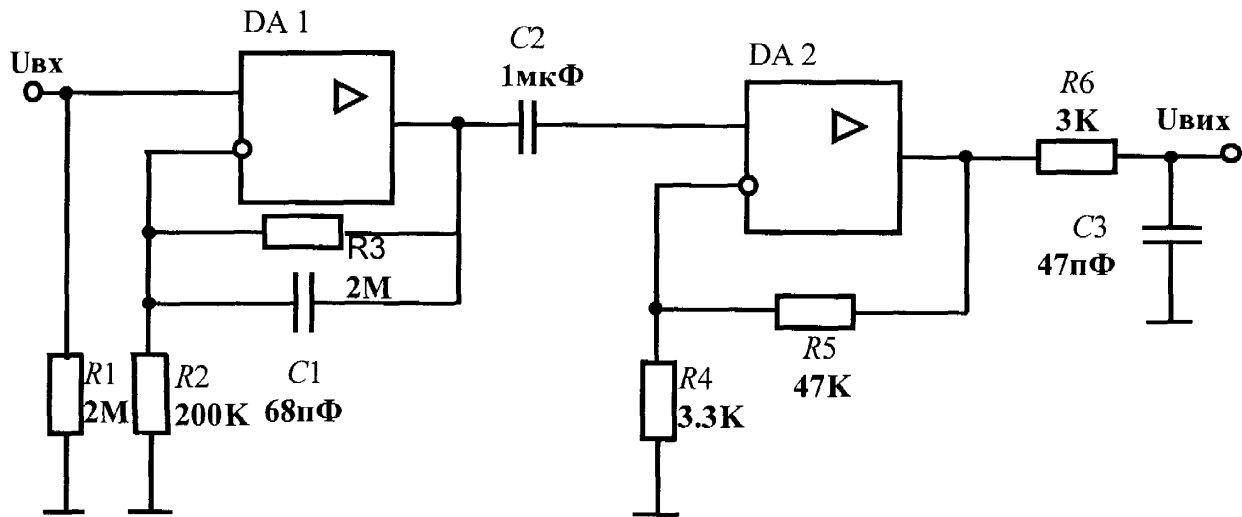


Рисунок 3.6 – Принципова електрична схема вібропідсилювача

Підсилені сигнали з ТП-1, ВП-1, 2 подаються на мультиплексор МтП, який по чергово підключає їх до АЦП для подальшого перетворення в цифрову форму, необхідну для запису отриманої інформації в оперативну пам'ять МПП з метою її подальшої обробки.

Для проведення експериментів по дослідженню впливу вібростану вузлів ВК на вібростан ШК була розроблена конструкція вузла кріплення вібродавачів на їх корпусах за допомогою магніта. Конструктивно вузол кріплення це прямокутний дюралюмінієвий корпус розміром 110x70x22 з двома сотами, в середині конструкції в соті розміром 55x56 мм розміщена магнітна система (рис. 3.7), яка відноситься до класу утримуючих і забезпечує надійне кріплення конструкції до корпусів вузлів ВК. Магнітна система складається з постійних магнітів 2 і магнітоприводів 1. З метою захисту магнітів від пошкоджень і попередження попадання бруду в зону контакту з магнітопроводами, робоча поверхня системи залита епоксидною смолою 3. Магнітопроводи виконані з низьковуглецевої сталі (ст.3,10,20), яка має значну індукцію насичення (до 2.13 Тл) і магнітною проникненістю 2000-4000. За постійні магніти вибрані ферито-барієві магніти марки М22РА-220-1, які володіють значним радіусом стабільності (50...100 кА/м) і стійкі до впливу зовнішніх розмагнічуючих

факторів. Максимальна енергія магнітів цієї марки $W_{\max}=11$ кДж/м, а залишкова індукція $B_2=0.36$ Тл.

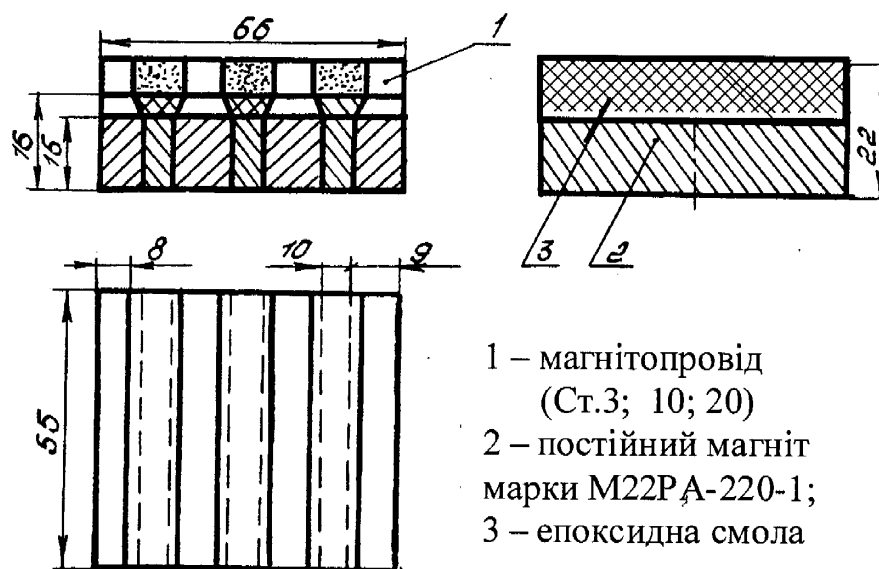


Рисунок 3.7 – Конструкція магнітної системи вузла кріплення вібродавачів

При розрахунку силової характеристики магнітної системи використовувалась методика [64], яка враховує динаміку роботи всіх її елементів з паралельними з'єднаннями постійних магнітів.

В другій соті вузла кріплення розміром 50x66 мм в захисному екрані розміщено блок вібродавачів, аналогічний описаному вище.

Метрологічне забезпечення вимірювальних трактів розробленої мікропроцесорної інформаційно обчислювальної системи приведено в додатку А5.

Аналого-цифровий перетворювач. Для АЦП вхідними є три розглянутих нормованих аналогових сигналів в діапазоні ± 5 В. Процес аналого-цифрового перетворення реалізували на одній мікросхемі одноканального АЦП, а саме функціонально завершеному АЦП порозрядного зрівноваження К1113ПВ1, що може працювати з двохполярним вхідним сигналом, має вбудоване джерело опорної напруги та внутрішній генератор тактових імпульсів [65, 66, 67, 63]. Для вказаної

мікросхеми максимально допустима частота дискретизації $F_{д_{\max}}$ не перевищує 33 кГц. Тому визнано доцільним застосування нерівномірної дискретизації сигналів. При цьому вибірка відліків з каналів номер 0 та 7 робиться з частотою, рівною половині загальної частоти дискретизації $F_{заг}$ для кожного каналу, а з каналу під номером 1 - з частотою $F_{заг}/250$.

Для комутації вхідних сигналів використовується аналоговий мультиплексор, який призначений для почергового виставлення на вході мікросхеми АЦП напруги кожного з вищеназваних сигналів у відповідності з кодом, наявним на виході "Регістру адрес аналогових каналів". Запис до регістра адреси довільного з наявних каналів ініціюється програмно. Поточна адреса аналогового каналу надходить з системної шини ISA, наскрізно проходить через буферний регістр і фіксується в регістрі адрес аналогових каналів визначаючи, який із вхідних аналогових сигналів буде в даний момент часу надходити на АЦП і виступати в якості сигналу $U_{вх}$. Керування роботою всіх регістрів схеми здійснюється дешифратором, на основі сигналів "1" системної шини ISA.

Під "адресами звертання до пристрою" мається на увазі те, що адаптер для спряження АЦП з ПЕОМ, здійснюючи інфообмін з комп'ютером, в цілому функціонує як один із системних портів вводу/виводу. Тобто існують спеціально зарезервовані системні адреси, за якими процесор через системну шину ISA звертається до пристрою, здійснюючи операції зчитування/запису даних, аналогічно тому, як це відбувається при роботі зі стандартними портами [67].

Запуск процесу аналого-цифрового перетворення також ініціюється програмно, відразу після виставлення чергової адреси одного з аналогових каналів.

Одновібратори №1 та №2 призначені для формування імпульсів певної тривалості з метою забезпечення правильності спрацювання логічних схем деяких елементів пристрою. Сигнал "ST" (Start) запуску АЦП надходить з дешифратора на одновібратор №1, який формує одиничний імпульс з тривалістю, необхідною для початкового встановлення ("скидання" результату попереднього аналого-цифрового перетворення) і нового запуску АЦП.

Після завершення мікросхемою АЦП процесу формування результату перетворення, на інформаційних входах “Регістрів для зчитування коду з АЦП” даний результат виставляється у вигляді додаткового двійкового коду. Сигнал готовності результату RDY (Ready) запускає одновібратор №2, який формує одиничний імпульс CLOCK 2, котрим тактуються “Регістри для зчитування коду з АЦП”, забезпечуючи занесення до них поточного оцифрованого відліку.

Однією з особливостей роботи системи є те, що програма, яка здійснює зчитування даних з АЦП, не виставляє запитів готовності результату перетворення. Не задіяно також і ліній запиту переривання. Після виставлення адреси аналогового каналу та запуску АЦП читання готового результату аналого-цифрового перетворення здійснюється через строго фіксований проміжок часу, за який мікросхема АЦП гарантовано встигає сформувати код. Тобто програмним шляхом реалізується затримка на час t_3 , який дещо більший від часу, необхідного АЦП для формування результату перетворення та занесення його до регістрів для зчитування коду з АЦП. Такий підхід дещо відрізняється від традиційного, коли сигналом RDY формується переривання, або коли після запуску АЦП програмним шляхом через достатньо малі проміжки часу циклічно формується запит готовності результату перетворення. Проте перевагою запропонованого способу є те, що усувається залежність від стабільності частоти внутрішнього тактового генератора АЦП та від незмінності часових параметрів обох одновібраторів. Отже, тривалість інтервалу часу між вибіркою двох суміжніх оцифрованих відліків буде більш постійною величиною, ніж при традиційних підходах, так як величина часової похибки практично залежатиме тільки від точності внутрішнього тактового генератора МПП.

Механізм формування фіксованої часової затримки може бути різним. В даному випадку застосовано один з найпростіших способів – формування “порожнього” програмного циклу. Тому тривалість часової затримки (а відтак – і загальна частота дискретизації) залежить від тактової частоти процесора. Зокрема,

при використанні МПП з тактовою частотою 5 МГц загальна частота дискретизації складала 15 800 Гц, для сигналів вібрації - 7900 Гц, для тензосигналу - 603,2 Гц.

Після завершення стадії очікування готовності результату, коли результат аналого-цифрового перетворення практично гарантовано є зафіксованим в регістрах для зчитування коду з АЦП, мікропроцесором, через системну шину ISA, здійснюється зчитування даного відліку (спочатку – до акумулятора, потім – з акумулятора до оперативної пам'яті МПП). Далі реалізується повернення до процедури виставлення адреси аналогового каналу, запуску АЦП, і т. д. Таким чином проводиться накопичення в ОЗП ПЕОМ вибірки оцифрованих відліків вхідних аналогових сигналів.

Шлях проходження оцифрованих відліків вхідних аналогових сигналів ("DATA") пролягає через:

а) регістри для зчитування коду з АЦП, які тактуються блоком АЦП за допомогою "одновібратора №2", а відкриваються для читання – за допомогою сигналу EO, який формується дешифратором ;

б) буферний регістр (шинний формувач), який призначений не для "запам'ятовування" даних, які надходять на його входи, а для наскрізного одностороннього "пропускання" (або непропускання – при "забороненому " стані) даних.

Запис вибірки оцифрованих відліків у файл на жорсткому магнітному диску ЖМД (допускається використання і гнучких магнітних дисків ГМД) здійснюється вже після накопичення всієї вибірки в ОЗП. Це обумовлено необхідністю усунення впливу менш швидкодіючого запам'ятовуючого пристрою на інтервали часу між сусідніми відліками.

Принципова електрична схема АЦП та її опис наведено в додатку А4.

3.3. Розробка програмного забезпечення експериментальних досліджень

Опис асемблер-програми зчитування даних з АЦП. Програма призначена для формування файлу вибірки восьмибітних оцифрованих відліків вхідних аналогових сигналів, що надходять на вхід АЦП по трьох аналогових каналах.

Програма створює файл з іменем “ shu5 ” для виводу вибірки оцифрованих відліків на магнітний диск. Для виконання операцій створення, відкриття і закриття файлу та запису вибірки відліків з оперативної пам'яті (ОЗП) у файл, використовуються стандартні функції 21-го (INT 21h) переривання DOS.

Процедура зчитування організована у вигляді двох вкладених циклів. При кожному виконанні внутрішнього циклу відбувається виставлення адреси аналогового каналу і запуск АЦП, після чого зчитується один відлік з одного із трьох вхідних каналів. При цьому вибірка відліків з каналів номер 0 та 7 (вібросигнали) робиться з частотою, рівною половині загальної частоти дискретизації $F_{заг}$, а з каналу 1 (тензосигнал) - з частотою, у 250 разів нижчою. Відповідно номер каналу поперемінно приймає значення 0 та 7, а через кожні 250 циклів - 1.

При однократному виконанні зовнішнього циклу здійснюється зчитування до ОЗП “пакету” розміром 64000 відліків. Кількість зовнішніх циклів прийнято рівною 9, тобто загальний об'єм вибірки складає 576000 відліків.

Ключовими для розуміння процесу функціонування асемблер-програми та особливостей інфообміну між 8-ми каналним АЦП й МПП є наступні команди :

- а) OUT [DX], AL (при DX=300h) — виставлення адреси аналогового каналу у відповідності із значенням, що міститься в AL ;
- б) OUT [DX], AL () — ініціалізація запуску АЦП (незалежно від вмісту регістра AL) ;
- в) IN AL, [DX]— занесення результату аналого-цифрового перетворення до акумулятора (при DX=300h - старшої тетради, при DX=301h - молодшої).

Як видно з блок-схеми (рис.3.7), змінна `su_count` виступає як лічильника зовнішнього циклу, а регістр SI - внутрішнього циклу. Адресація аналогового кана-

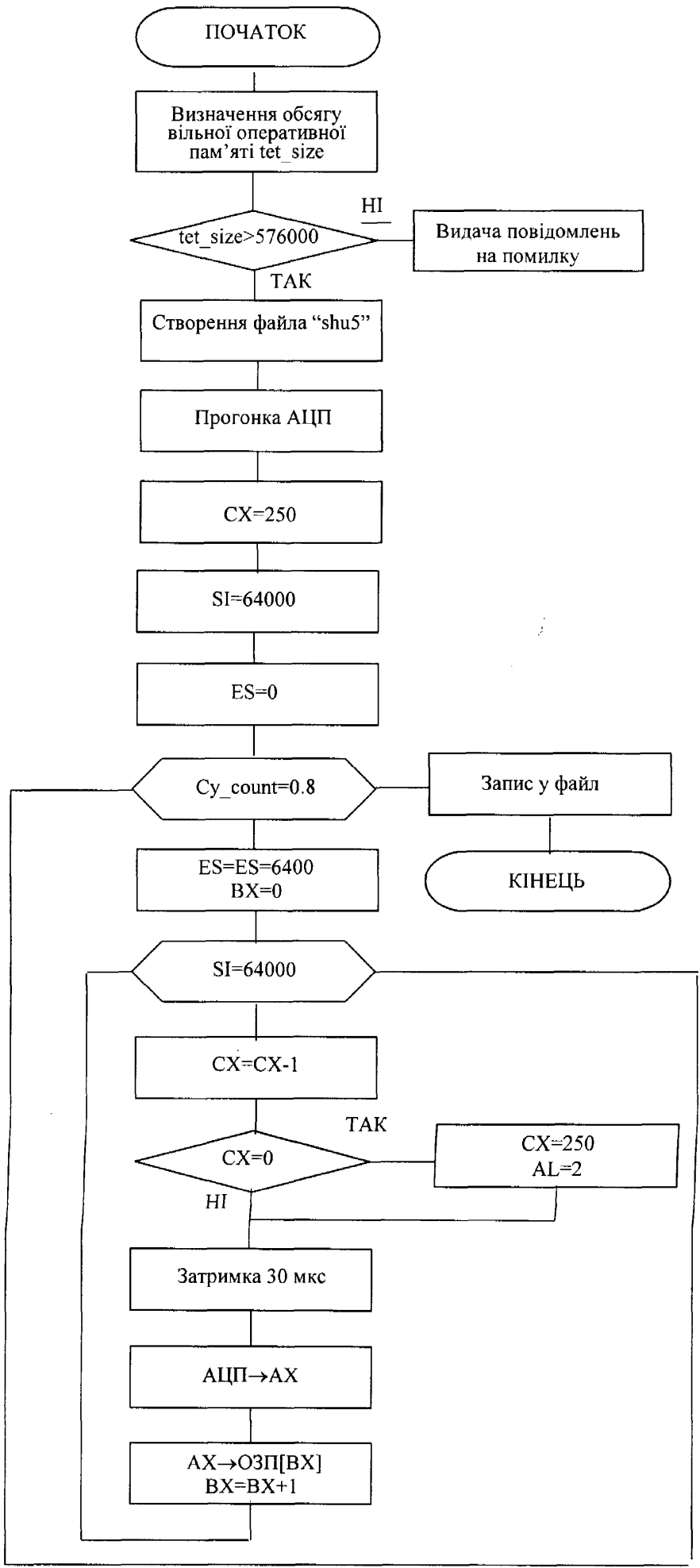


Рисунок 3.7 – Блок-схема асемблер-програми зчитування даних з АЦП

лу здійснюється трьома старшими двійковими розрядами молодшої тетради акумулятора. Акумулятор (реєстр AX) використовується також для проміжного зберігання операндів при виконанні операцій вводу-виводу. За допомогою реєстру VX здійснюється адресація “комірок “ ОЗП, в яких накопичуються відліки вибірки. Реєстр CX використовується для задання частоти каналу №1 $F_{д1} = F_{д}/250$, а також як лічильник порожнього циклу при формуванні часової затримки при очікуванні готовності результату аналого-цифрового перетворення. В реєстрі DX зберігається поточна адреса порту вводу-виводу (300h або 301h), яка використовується при виконанні команд IN та OUT вводу та виводу через порт.

Запис вибірки оцифрованих відліків у файл на жорсткому магнітному диску ЖМД (допускається використання і гнучких магнітних дисків ГМД) здійснюється вже після накопичення всієї вибірки в ОЗП. Це обумовлено необхідністю усунення впливу менш швидкодіючого запам'ятовуючого пристрою на інтервали часу між сусідніми відліками.

Текст програми наведено в додатку А6.

Допоміжне програмне забезпечення призначене для спрощення процесу під'єднання системи до давачів (акселерометри та тензодавач з первинними та нормуючими підсилювачами), забезпечення можливості контролю параметрів вхідних сигналів, тощо. Потреба в створенні такого забезпечення обумовлена тим, що при використанні в складі системи МПП з мінімальною конфігурацією апаратно-програмних засобів застосування стандартних пакетів універсальних прикладних програм для математичних обчислень та візуалізації дискретизованих сигналів (наприклад, MCAD) буде надзвичайно неефективним. Розроблені спеціалізовані програми в значній мірі полегшують завдання коректного під'єднання та експлуатації МІВС-01.

Програми viewten.exe та viewvib.exe призначені для візуалізації сигналів, записаних до файлу вибірки за програми asr4shu5.exe При запуску програми в ко-

мандному рядку DOS слід вказувати ім'я потрібного файлу вибірки, який підлягає перевірці.

Приклад : `viewten.exe 1_shtock`.

Після запуску однієї з програм візуалізації, на дисплеї з'явиться запит номера початкового відліку. Слід ввести число в заданому діапазоні. Тоді на екран буде виведено робоче вікно програми (рис. 3.8), в котрому сумісно зображено декілька сигналів. Програма `viewten.exe` налаштована на відображення тензосигналу, що подався на канал № 1, а `viewvib.exe` – на відображення двох сигналів вібрації, котрі подавались на канали № 0 та № 7. Одночасно на дисплеї відображаються 160 відліків кожного із сигналів. Для циклічної “прокрутки” зображення по всьому діапазону можна використовувати курсорні стрілки “вліво” і “вправо” (відповідно для зменшення та збільшення на одиницю номера початкового відліку) та клавіші PgUp і PgDn (відповідно для збільшення та зменшення номера початкового відліку у вікні на десять). При переході в результаті прокрутки за верхню або нижню межу діапазону, відбувається, відповідно, перехід до першого або останнього номера початкового відліку в заданому діапазоні. Вихід з програми здійснюється клавішею ESC. При натисканні на інші клавіші видаються повторні запити номера початкового відліку.

Використання вищеназваних допоміжних програм не передбачає відмови в процесі аналізу та обробки результатів вимірювань та досліджень від застосування пакетів універсальних прикладних програм для здійснення математичних обчислень, відпрацювання різних алгоритмічних процедур, які базуються на стандартних бібліотеках алгоритмів. Таку обробку даних доцільно здійснювати з використанням більш сучасних ПЕОМ, з процесором 80486 або вище, при відповідному апаратно-програмному забезпеченні. Тому в середовищі Turbo C, було написано програму `h2decsh1.exe` для перетворення файлу первинної вибірки оцифрованих відліків до формату в кодах ASCII. При виконанні програми `h2decsh1.exe`, за умови вказання у командному рядку імені файлу первинної вибірки, який знаходиться в директорії запуску, буде сформовано два файли тієї ж

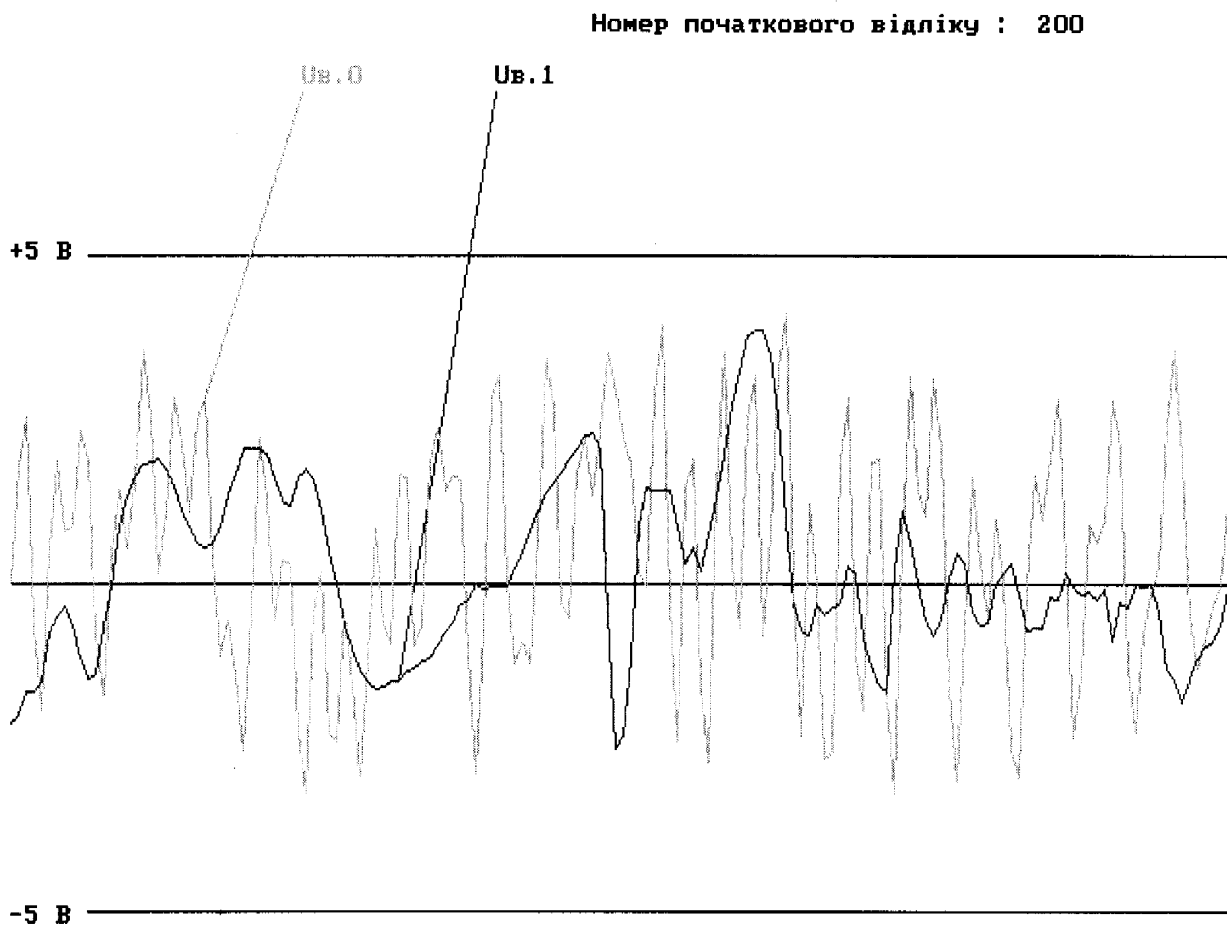
назви з розширеннями .t для тензосигналу та .v для вібросигналу. У випадку успішного завершення програми h2decsh1.exe буде видано повідомлення:

Кількість відліків у файлі < ім'я файла >.v = < кількість відліків >

Кількість відліків у файлі < ім'я файла >.t = < кількість відліків >

Кожен з новоутворених файлів містить числові відліки дискретизованих сигналів у № вигляді колонки чисел формату ASCII, в діапазоні від 0 до 255. Масив чисел, поданих у такому файловому форматі, можна, зокрема, ввести для обробки в середовище MCAD, застосовуючи стандартну функцію READ.

Файл *.v містить відліки двох сигналів вібрації (відліки з каналів № 0 та №7, які, відповідно, чергуються між собою : 0, 7, 0, 7, ..., 0, 7,...). Файл *.t містить відліки тензосигналу з каналу №1.



Ширина вікна=160 відліків

Номер початкового відліку (від 0 до 16224) ? 11780

Рисунок 3.8 – Робоче вікно програми візуалізації сигналів вібрацій –

viewvibl.exe

У випадку виникнення необхідності застосування більш сучасних ПЕОМ в поєднанні з відповідними мовами програмування, розглянуті вище програми без особливих зусиль можуть бути перенесеними до іншого операційного середовища. Наприклад, програми, написані на Turbo C, можуть сприйматись та оброблятись компіляторами Borland C++.

У додатку А7 наведено лістинг програми h2decsh1.exe перетворення файлів первинної вибірки оцифрованих відліків до формату ASCII.

Висновки до розділу

1. З врахуванням конструктивних особливостей об'єкту контролю розроблено методичне забезпечення, яке дозволяє здійснити весь комплекс досліджень вібраційного стану ШГНУ в процесі експлуатації.

2. Розроблено вимірювальний блок, який дозволяє проводити вимірювання параметрів вібрацій і зусиль в ШК з заданою точністю (похибка каналів тензометрії – 0,755%, віброметрії – 10%, що обумовлено технічною характеристикою акселерометра АНС-14-03), а конструкція чутливого елемента з вузлом кріплення дозволяє оперативно встановлювати його на полірованому штоці в заздалегідь вибраних місцях, обумовлених довжиною його ходу.

3. Розроблена оригінальна конструкція вузла кріплення вібродавачів за допомогою постійних магнітів з вбудованим блоком віброперетворення, яке дозволяє оперативно встановлювати його в будь-якій точці на корпусах вузлів верстата-качалки при проведенні їх віброобстеження.

4. Розроблена мікропроцесорна інформаційно-обчислювальна система, яка призначена для збору і обробки результатів експериментів в реальному масштабі часу і забезпечує їх вірогідність і оперативність.

5. Розроблено програмне забезпечення МІВС-01, що забезпечує:

– керування роботою цифрових елементів схеми (АЦП та мультиплексора);

- запис оцифрованих відліків вимірюваних величин у файл первинної вибірки на жорсткому магнітному диску;
- оперативний перегляд файлу первинної вибірки з представленням даних у вигляді графіків вібрації та зусилля;
- перетворення файлу первинної вибірки до формату ASCII.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВІБРАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШГНУ

4.1. Дослідження статистичних характеристик коливного процесу в ШК

Представлення будь-якого фізичного процесу як випадкового (зокрема як суми детермінованої та випадкової складової) є найбільш загальним способом його опису, оскільки повністю детермінованих процесів в природі не існує.

Для коливного процесу (КП), що реєструється на полірованому штоці ШГНУ, детермінована складова обумовлена, з одного боку, вимушеними коливаннями установки з частотою, рівної частоті качань балансира ВК, а з іншого власними коливаннями вузлів ШГНУ, в основному ШК. Математична модель, що описує ці процеси, була розглянута в розділі 2.3, в зв'язку з чим їх можна вважати до певної степені детермінованими, тобто такими, що допускають, по крайній мірі, наближене передбачення їх в будь-який момент часу на основі відомих математичних залежностей.

Випадкова складова КП обумовлена наступними факторами:

а) недосконалістю виготовлення, зборки і монтажу деталей і вузлів ШГНУ, зміною форми поверхонь контактуючих деталей з напрацюванням (особливо для пар тертя плунжер-циліндр та штанги-НКТ), температурними змінами геометричних параметрів деталей та з'єднань, нестабільністю обертів валу привідного двигуна ВК та ряду інших факторів, що призводять до флуктуацій амплітуди ВС та появи випадкових викидів [68];

б) недосконалістю системи вимірювання КП, обумовленою, в основному, значною похибкою вібродавачів, дрейфом нуля та дрейфом коефіцієнту передачі давачів та підсилювачів, впливом випадкових завад, температурними похибками всіх ланок вимірювального тракту, похибкою перетворення та квантування АЦП та рядом інших причин.

Для дослідження статистичних характеристик КП було використано експериментальні дані, отримані при проведенні комплексу експериментальних досліджень на нафтопромислах НГВУ "Надвірнанафтогаз" за допомогою

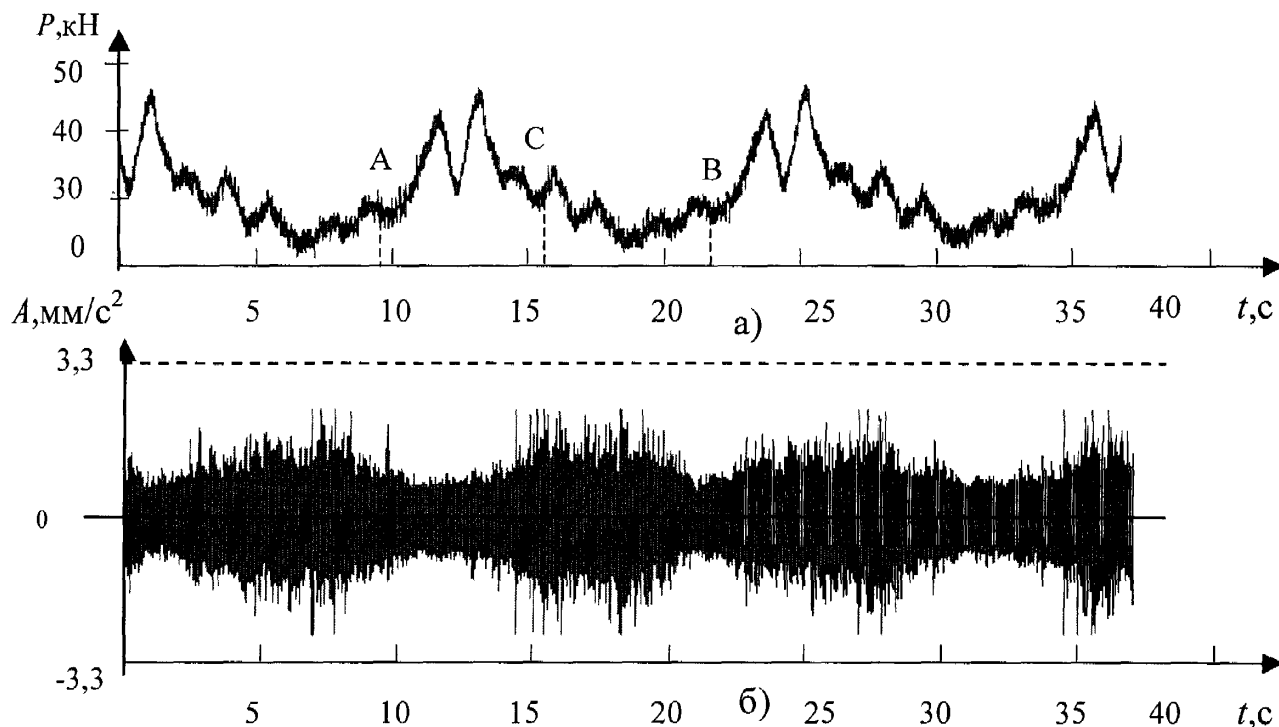


Рис. 4.1. Графіки зміни рівня а) пружних деформацій P та б) віброприскорення повздовжніх коливань A полірованого штока в часі t

розробленої системи МІВС-01. На рис.4.1 представлені тензометричні та віброакустичні сигнали, зареєстровані на полірованому штоці ШГНУ, яка експлуатувалася на свердловині 260 Битківського родовища. Технічні характеристики ШГНУ наступні: довжина колони насосних штанг 1884 м; довжина ходу точки підвісу штанг – 3 м; тип насосу – НСВ-32; кількість качань за хвилину – 5.

Досліджувана реалізація містить 140000 відліків, що відповідає часу запису 40 сек, тобто приблизно 3 періодам качань.

Розглядаючи вібраційний процес, що реєструється на полірованому штоці ШГНУ, як випадкову функцію часу, необхідно встановити, до якого типу випадкових процесів він відноситься, зокрема перевірити його на стаціонарність.

Від результатів цієї перевірки залежить метод подальшого аналізу, оскільки більшість методів аналізу, зокрема спектрально-кореляційні, використовуються лише для стаціонарних процесів.[23].

Судячи з вигляду КП на рис. 4.1б, його статистичні властивості змінюються в часі, причому ця зміна явно корелює зі зміною навантаження на полірований шток на протязі періоду качання, яка відображається у тензограмі (рис. 4.1а).

Виділивши ділянки, методика детально описана в 4.3, що відповідають ходу плунжера вверх (АС) і ходу плунжера вниз (СВ) і порівнюючи два одночасно зняті сигнали, можна відмітити, що в точці А, яка відповідає різкому сприйняттю навантаження і в точці С, яка відповідає різкому зняттю навантаження, амплітуда коливань різко збільшується, а в подальшому, при продовженні руху вверх і вниз, коливання згасають. Цей процес відповідає реальній роботі ГН, коли в момент сприйняття навантаження перед відкриттям приймального клапана сумарне навантаження на ШК збільшується на величину ваги рідини, а в момент зняття навантаження штанги різко розвантажуються, передаючи навантаження від ваги рідини на НКТ.

Подальший аналіз будемо здійснювати, розбиваючи реалізацію на інтервали і обчислюючи статистичні характеристики на кожному з інтервалів. Кількість та довжина інтервалів при цьому вибираються таким чином, щоб з достатньою точністю відобразити зміну властивостей сигналу (обґрунтовано в 4.5).

Випадковий процес вважається стаціонарним у вузькому розумінні, якщо усі його ймовірнісні характеристики є інваріантними відносно переносу початку відліку часу. Найбільш вичерпною ймовірнісною характеристикою випадкового процесу є багатомірна функція розподілу ймовірності $p_n(x_1, t_1 \dots x_n, t_n)$, але на практиці, в основному, використовуються одно- та двомірні функції розподілу, оскільки вони несуть основний об'єм інформації про властивості процесу, використання функцій розподілу вищих порядків пов'язане зі значними технічними і обчислювальними ускладненнями і є недоцільним [69]. За експериментальними даним вигляд одномірної функції розподілу ймовірності може бути визначений шляхом побудови статистичного ряду, кількість інтервалів якого визначається за формулою [70]:

$$\kappa = 1 + 3,32 \lg N,$$

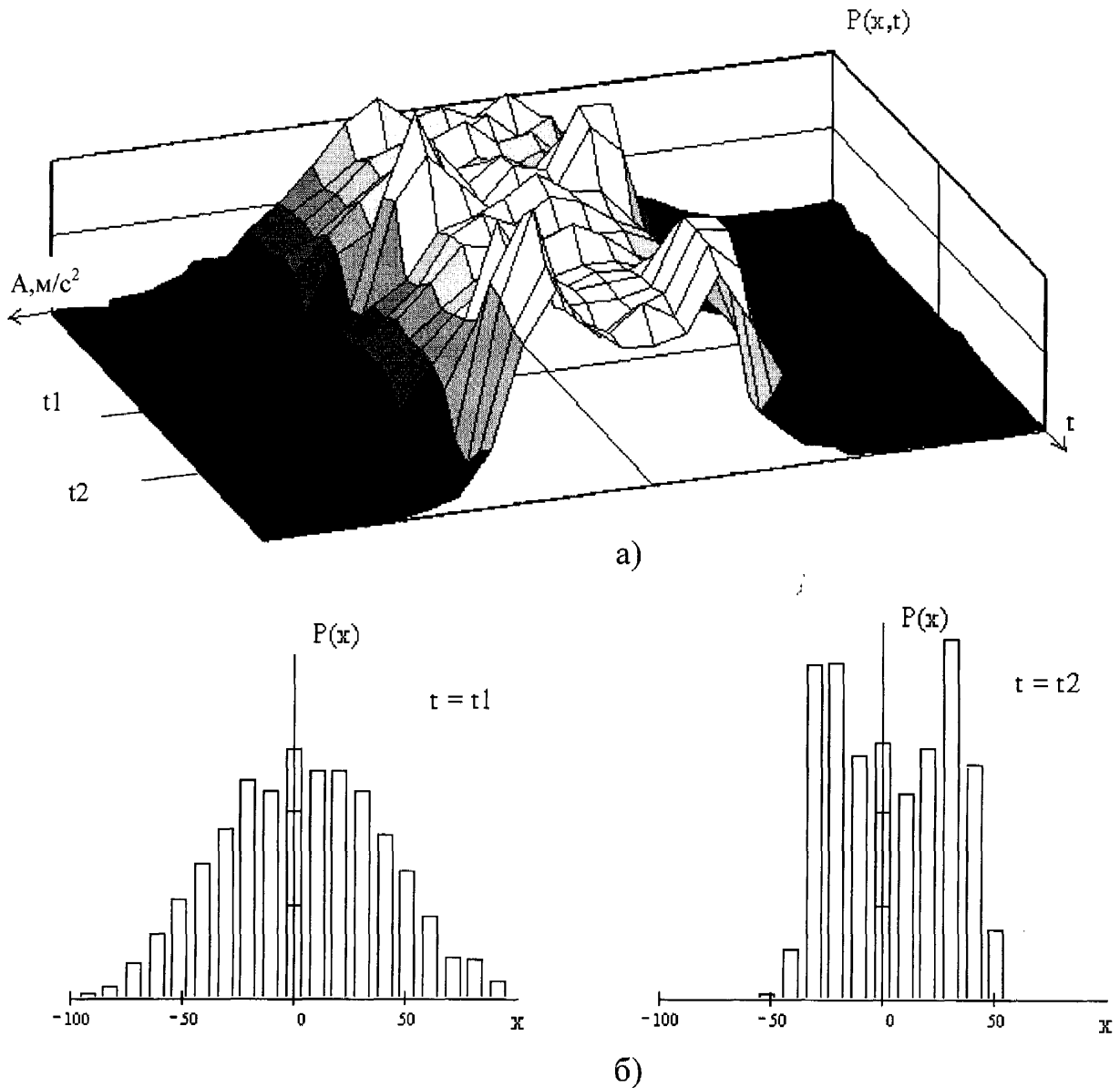


Рис. 4.2. Зміна закону розподілу віброакустичного сигналу на протязі періоду качання, зображена:

а) у трьохмірному просторі, б) у вигляді гістограм

де N – кількість відліків у реалізації.

На рис.4.2. приведено графічну залежність зміни закону розподілу віброприскорення повздовжніх коливань ШК у часі на протязі 1 періоду качання, насос типу НСВ-32, довжина ходу – 2м; число качань – 6,5; глибина спуску – 1895 м, який експлуатувався.

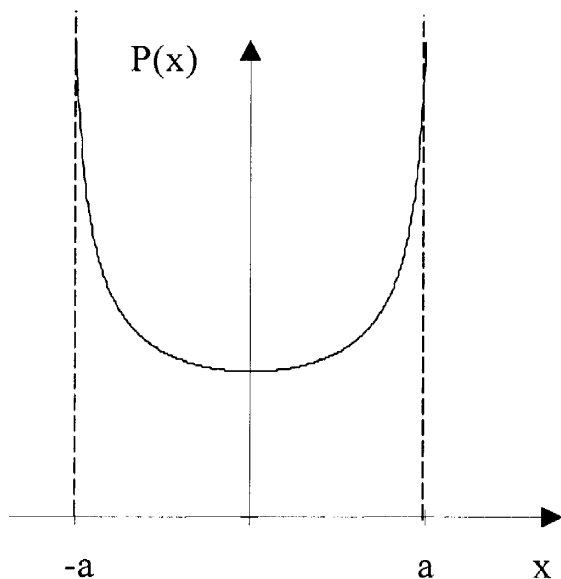


Рис. 4.3. Арксинусоїдальний закон розподілу

Крім очевидного факту, що досліджуваний процес не є стаціонарним у вузькому сенсі, отриманий результат дозволяє зробити деякі висновки щодо структури процесу. Так, закон розподілу, зображений на рис.4.2б, для часу $t=t_1$ є близьким до нормального з математичним очікуванням $M_x=0$ та середньоквадратичним відхиленням $\sigma_x=37$. Щодо закону розподілу, зображеного на рис.4.2б для часу $t=t_2$, можна припустити, що це композиція нормального (або іншого експоненційного) та арксинусоїдального розподілів. Як відомо, згідно арксинусоїдального закону розподілені миттєві значення гармонічного сигналу [72, 73] (типова крива арксинусоїдального закону розподілу приведена на рис.4.3).

В додатку Б1 наведені діаграми зміни закону розподілу віброприскорення повздожніх коливань ШГНУ, які експлуатувалися на свердловинах № 463 та 588. В усіх випадках спостерігається аналогічна більше чи менше виражена зміна форми кривої закону розподілу, що можна інтерпретувати як періодичне виникнення та затухання в системі синусоїдальних коливань, причому найбільш чітко виражений є вплив гармонічної складової (як на рис.4.2,б) під час сприйняття та зняття навантаження на колону штанг, а хід вверх та вниз при усталеному режимі характеризується більшою стохастичністю КП, так що він наближається до випадкового процесу, розподіленого за нормальним законом.

Випадковий процес вважається стаціонарним в широкому розумінні, якщо його математичне очікування і дисперсія не залежать від часу, а кореляційна функція залежить тільки від різниці моментів часу [23].

Кореляційна функція $R_{xx}(t_1, t_2)$ описує статистичний зв'язок між значеннями випадкового процесу у два моменти часу t_1, t_2 . Для стаціонарних сигналів

кореляційна функція залежить лише від різниці моментів часу, тобто є функцією однієї змінної $\tau = t_2 - t_1$ і може бути визначена за експериментальною вибіркою як

$$R_{xx_j} = \frac{1}{n-j} \sum_{i=1}^{n-j} (x_i - mx)(x_{i+j} - mx), \quad (4.1)$$

де x - дискретизований в часі сигнал, n - обсяг вибірки, mx - математичне очікування.

Для нестационарних процесів, у яких математичне очікування і дисперсія змінюються в часі, це твердження невірне і формула (4.1) не може бути застосована. Тому, якщо процес є нестационарним, необхідно або розглядати його в інтервалі часу, на протязі якого статистичні характеристики залишаються відносно стабільними, або деяким чином усунути нестационарність. На рис. 4.4 наведений графік зміни математичного очікування M_x і дисперсії D_x КП в часі. Зміна M_x є випадковою і, найбільш імовірно, обумовлена дрейфом нуля вимірювальної системи. Зміна D_x хоча і важко піддається формалізації, але виявляє певну залежність від фази періоду качань.

З рисунка видно, що дисперсія ВС зростає на початку сприйняття навантаження. Аналогічна обробка даних з інших свердловин свідчить, що в окремих випадках різке підвищення дисперсії відбувається після закінчення

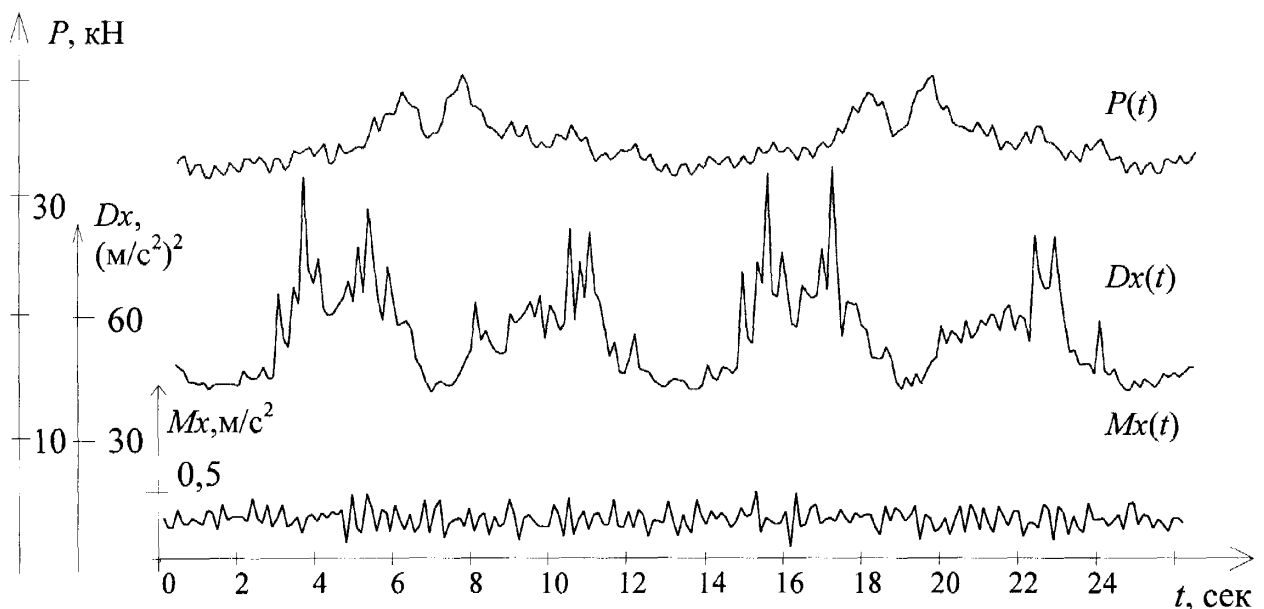


Рис. 4.4. Зміна математичного очікування і дисперсії коливного процесу в часі

процесів сприйняття і зняття навантаження (свердловини № Б-463, Б-588, Б-320, Б-26, додаток Б1.1). Причиною підвищення віброактивності в ці моменти часу можуть бути інерційні навантаження на ШК при різкій зміні напрямку її руху. Крім того, можна відмітити, що дисперсія КП при ході вниз, починаючи від моменту зняття навантаження, приймає більші значення і змінюється за іншим законом, ніж при ході вверху, що, імовірно, зумовлено різним характером впливу стовпа рідини на ШК при ході вверху і вниз: при ході вверху колона навантажена стовпом рідини і коливається спільно з ним як одна коливна система, а при ході вниз рідина чинить демпфуючий вплив на колону, яка коливається самостійно (в обох випадках мова йде про власні коливання).

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що досліджуваний КП є “періодично-нестационарним”, тобто його статистичні характеристики змінюються на протязі періоду качання, причому у ті інтервали часу, що відповідають процесам сприйняття та зняття навантаження (включаючи початок ходу вверху і вниз) у сигналі з’являються додаткові складові, які характеризують інерційні процеси у ШК та ГН і тісно пов’язані з їх технічним станом. Логічно припустити, що КП саме у ці інтервали часу є найбільш інформативним з точки зору відображення технічного стану вузлів і деталей ШГНУ. Цю обставину необхідно було враховано при подальшому аналізі і розробці методу діагностування.

4.2. Експериментальні дослідження вібраційного стану ШГНУ

Спектрально-кореляційні методи аналізу є основним інструментом дослідження віброакустичних процесів.

Під спектром сигналу, як правило, розуміють сукупність коефіцієнтів розкладу сигналу в ряд по деякій системі ортогональних функцій, найчастіше – функцій базису Фур’є, тобто синусоїд з частотами, кратними основній частоті. В цьому випадку спектр $A(\omega)$, що описує сигнал в частотній області, є перетворенням Фур’є часової форми представлення сигналу $a(t)$. Інколи використовують

спектральну щільність, або спектральну щільність потужності, яка є перетворенням Фур'є автокореляційної функції сигналу $a(t)$ [23].

В 4.1 було встановлено, що КП, виміряний на полірованому штоці, відноситься до “періодично-нестационарних” процесів. Тому, з метою подальшого використання спектрального аналізу при дослідженні вібростану ШГНУ було приведено його до стаціонарного вигляду шляхом віднімання поточного математичного очікування та ділення на поточну дисперсію. Звичайно, застосування такої процедури означає стаціонаризацію сигналу відносно вказаних статистичних характеристик, оскільки статистичні характеристики вищих порядків можуть залишатися нестационарними, тобто строго кажучи, КП не приводиться до повністю стаціонарного вигляду. Але, враховуючи складність задачі повної стаціонаризації, яка у більшості випадків взагалі не може бути розв’язана [69], можна обмежитися стаціонаризацією по математичному очікуванню та дисперсії.

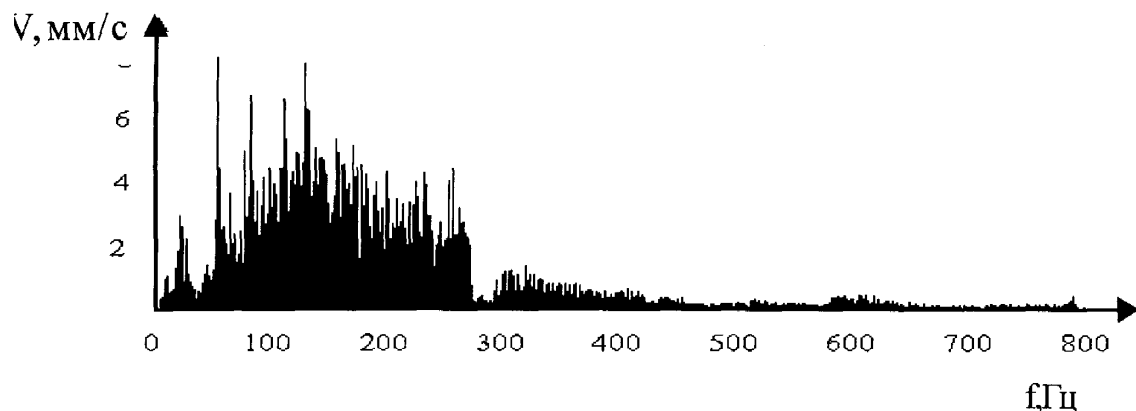


Рисунок 4.5 – Спектр віброшвидкості поздовжніх коливань ШК (насос НСВ-32 $L=1884$ м, $n=5$, $l=3$)

Використовуючи швидке перетворення Фур'є [71] побудували спектр віброшвидкості поздовжніх коливань ШК за повний період качань і проводили його аналіз. На рис.4.5 наведено спектр віброшвидкості поздовжніх коливань процесу, представленого на рис.4.1. Аналізуючи спектр, спостерігаємо підвищений рівень спектральних складових в низькочастотному діапазоні від 0 до 300 Гц. Більш детальний аналіз дозволив виявити складові з частотами, кратними частоті качань ВК - 5качань в хвилину, що відповідає $f_k=0.08$ Гц, а також складові досить значної

амплітуди на частотах $f_2=20$ Гц, $f_3=23$ Гц, $f_4=77$ Гц, $f_5=106$ Гц, $f_6=140$ Гц, $f_7=170$ Гц, $f_8=270$ Гц. Оскільки на характеристики КП ШК може здійснювати вплив вібростан механізмів та вузлів ВК, необхідно було провести їх аналіз. Для цього одночасно з вимірюванням віброшвидкості поздовжніх коливань ШК, вимірювалися також характеристики КП привідного електродвигуна (ПД), редуктора (Р), кривошипа (КР), в місці встановлення підшипника цапфи; шатуна (Ш), в місці встановлення підшипника шатуна; траверси (ТР); в місці встановлення підшипника хрестовини траверси; балансира (Б), в місці встановлення підшипника балансира (рис.4.6), для чого використовувався вимірювальний блок з магнітним вузлом кріплення, описаний в 3.2.

Після обробки КП будували спектри для кожного вузла ВК і проводили їх аналіз. Проведений аналіз спектрограм показав, що основний вплив на вібростан ШГНУ здійснює лишень електродвигун приводу ВК, який є джерелом коливань. В його спектрі були виявлені складові з частотами, кратними роторній частоті $f_0=16,3$ Гц; що обумовлені частотою обертання ротора електродвигуна (980 об/хв). Аналогічні результати були отримані і по іншим установкам. Однак інші механізми та вузли ВК гасять коливання, генеруємі ПД, оскільки в спектрі КП, отриманого на полірованому штоці рівень цих складових в 7-8 раз перевищує рівень складових на двигуні. В спектрі полірованого штоку виявлені складові, характерні для спектрів інших вузлів ВК, деякі з них з збільшеною амплітудою, інші з меншою. Аналогічні результати були отримані і по іншим установкам. Таким чином, спектральний аналіз не дозволив встановити степінь впливу наземної частини на глибинний насос.

Тому доцільним було б використати коефіцієнт взаємкореляції

$$r_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i \quad (4.1)$$

між сигналом, отриманим з полірованого штока x , і сигналами, отриманими з наземної частини y , що характеризує загальну залежність значень одного процесу від значень іншого. Використання коефіцієнта взаємкореляції безпосередньо для виміряних сигналів вимагає фазового узгодження, оскільки вібрації різних вузлів вимірювалися неодноразово, а статистичні характеристики вібраційного процесу, як

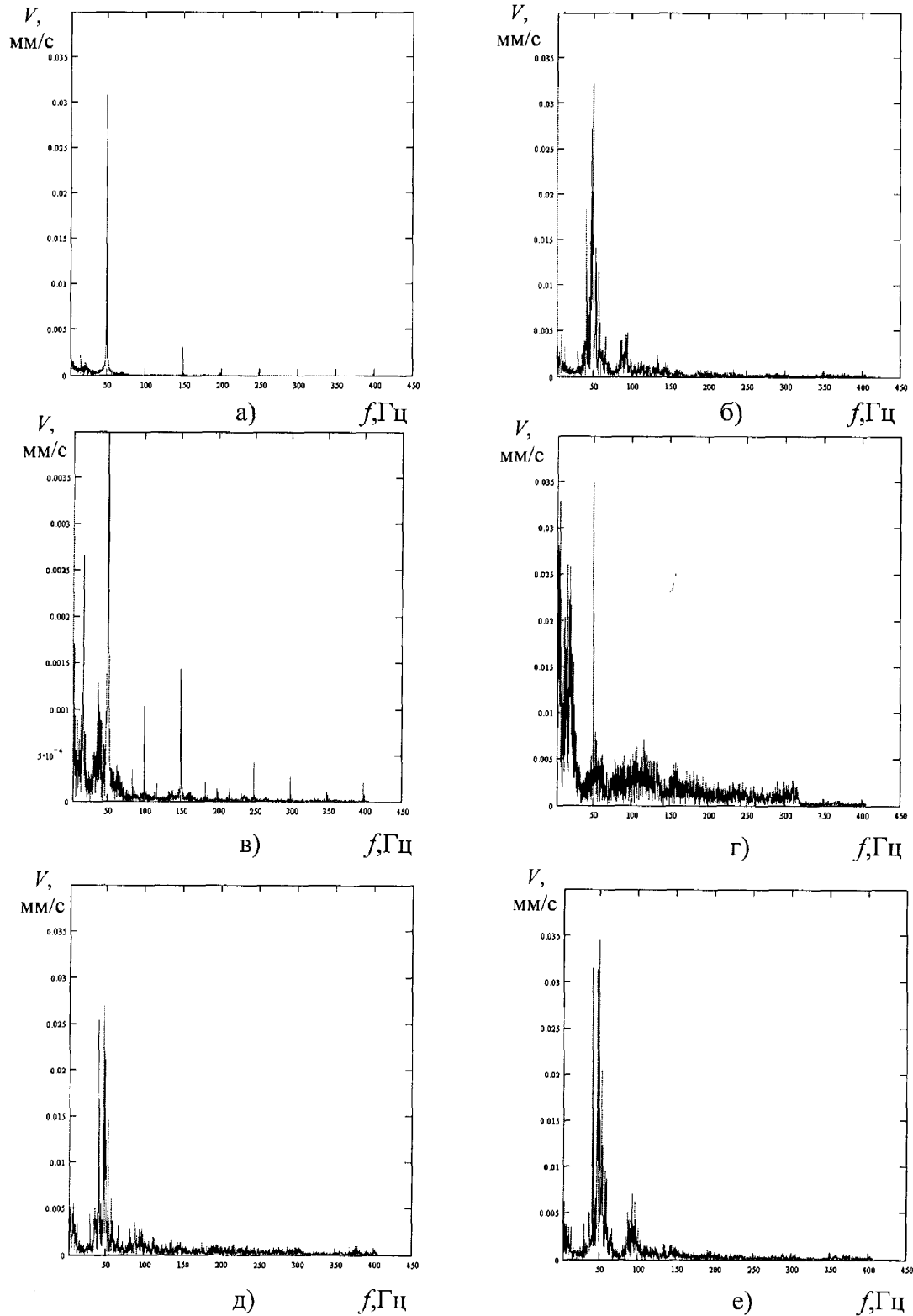


Рис. 4.6. Спектри віброшвидкості поздовжніх коливань:
 а) двигуна; б) полірованого штоку; в) балансира;
 г) траверси; д) шатуна; е) редуктора

було показано вище, змінюються на протязі періоду качання установки, тобто значною мірою залежать від фази періоду качання. Тому коефіцієнт взаємкореляції визначаємо для амплітудних спектрів отриманих сигналів. Результати розрахунку

коефіцієнта взаємкореляції наведені в табл.4.1. Проведений аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про незначний вплив на стан штангової колони двигуна ВК, що найбільш ймовірно пояснюється використанням ремінної передачі до редуктора, яка виступає в якості амортизатора. Вплив інших одиниць збільшується по ланцюгу до підшипника балансира.

Таблиця 4.1

Коефіцієнти кореляції між амплітудними спектрами вібраційних процесів на полірованому штоці та на різних вузлах ВК

№	Вузол	Коефіцієнт кореляції
1	Підшипник балансира	0,530
2	Підшипник хрестовини траверси	0,534
3	Підшипник шатуна	0,523
4	Підшипник цапфи	0,489
5	Редуктор	0,518
6	Двигун	0,219

Таким чином, дослідження спектральних характеристик вібраційних процесів наземної частини ШГНУ показали, що існує взаємозв'язок між цими процесами та процесами у підземній частині, що цілком реально, оскільки всі вузли є частинами однієї механічної системи. Разом з тим значення коефіцієнту кореляції не є настільки близьким до одиниці, щоб говорити про визначальний вплив наземної частини на вібраційні процеси на полірованому штоці.

На рис.4.7 зображені спектри віброшвидкості, отримані для насосу НСВ32 при глибині спуску 2046 м, числі качань – 7 і довжині ходу 2 м. Рисунок 4.7 а відповідає часу напрацювання насоса 1 місяць, рисунок 4.7 б – 3 місяця.

Результати аналізу спектрів насосів з різним часом напрацювання наведені в таблиці 4.2.

Аналізуючи таблицю можна зробити висновок, що з часом напрацювання загальний рівень вібрації в середньому зріс на 67%. В окремих частотних діапазонах рівень навпаки знизився в середньому на 32%. Також появляються нові складові,

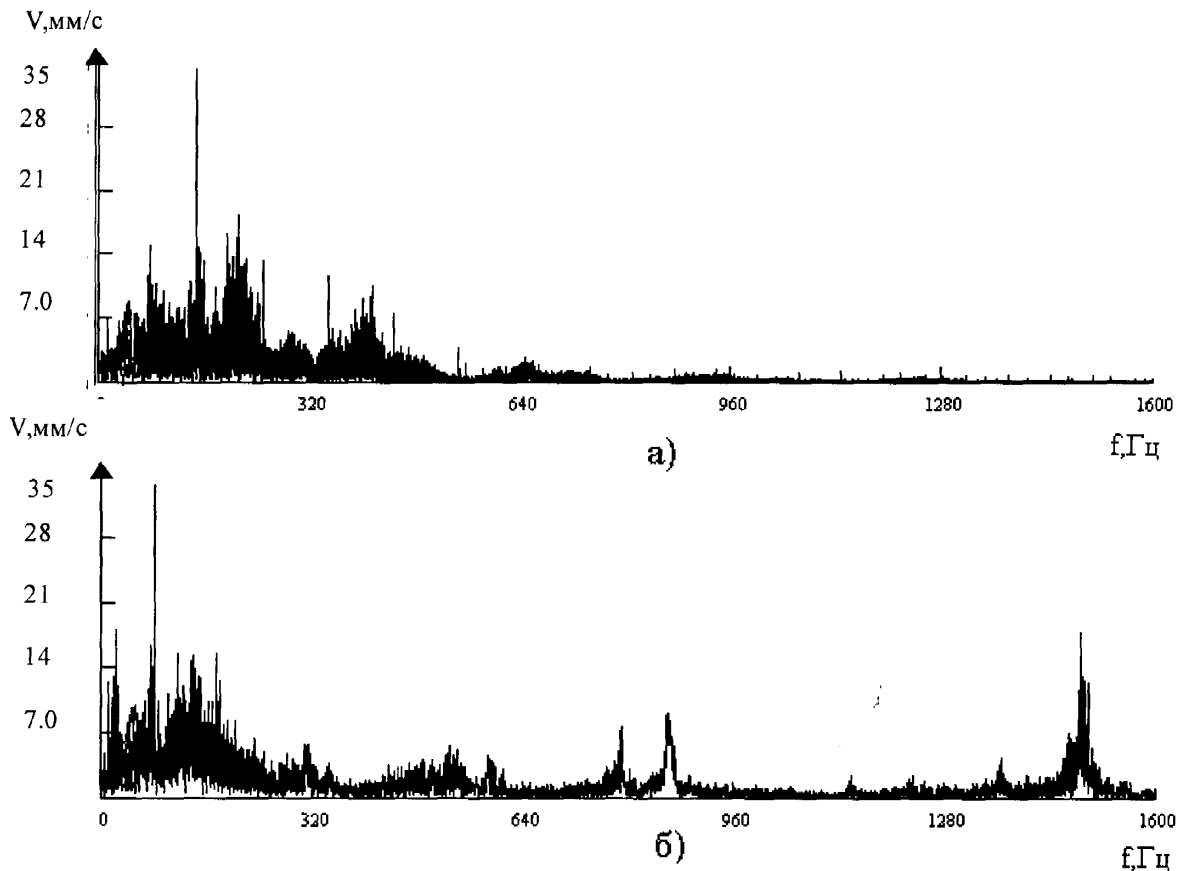


Рисунок 4.7 – Спектри віброшвидкості поздовжніх коливань ШК (насос НСВ-32, $L=2046$ м, $n=7$, $l=2$ м) для часу напрацювання:
а) 3 місяці, б) 5 місяців

відсутні для меншого часу напрацювання (на протязі всього діапазону частот), і навпаки, знизилася потужність спектральних складових, які для насоса з меншим часом напрацювання досягали максимальних значень.

Аналогічний характер мають спектрограми і для ШГНУ з іншим режимом роботи (довжиною ходу, числом качань) і глибиною спуску (рис.4.8).

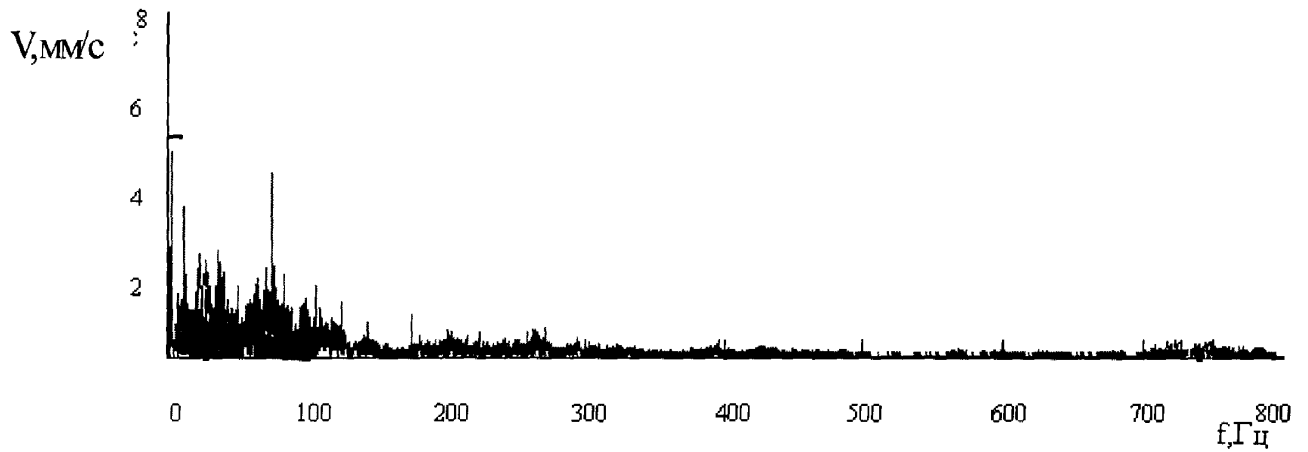
З проведеного дослідження вібростану ГНШУ можна зробити висновок, що вібросигнал, зареєстрований на полірованому штоці може бути використаний для їх діагностування, особливо для установок, які працюють в динамічних режимах. За діагностичні ознаки можуть бути використані амплітуди частотних складових спектру, зміна яких обумовлена зміною технічного стану установки. Однак спектр ВС за весь період качань не дозволяє виявити як конкретні частотні смуги, так і

загальні закономірності зміни в них амплітуд частотних складових, обумовлених технічним станом ШГНУ. У зв'язку з цим виникає задача вибору найбільш інформативних ділянок ВС з метою їх подальшого аналізу.

Таблиця 4.2.

Розподіл рівнів гармонічних і субгармонічних складових віброшвидкості поздовжніх коливань ШК при різних періодах напрацювання насоса НСВ-32 (L=1884 м, n=5, l=3м)

Діапазон частот	Середній рівень вібрації для насосів з різним періодом напрацювання					
	1 місяць			3 місяці		
	середнє знач.А, мм/с	max знач.складової		середнє знач. А,мм/с	max знач.складової	
		f,Гц	A,мм/с		f,Гц	A,мм/с
0...20	1.7	13.5	7.0	3.5	13.5	12.25
20...30	3.5			7.0	22.5	17.7
30...80	6.5	80	14.2	7.0	80	33.0
80...130	7.0			10.5	115	14.5
130...150	7.0	148	35.0	14.0		
150...160	10.5	152	14.1	8.0	152	13.0
160...190	6.7	176	10.5	9.0	176	14.5
190...240	10.5	210	17.5	6.0		
240...380	3.5	250	13.8	3.0		
380...430	7.0	415	10.5	1.7		
430...520	1.7	445	7.0	3.5		
520...610	1.0			3.5		
610..1060	1.5			1.7	860	10.0
1060...1600	0.5			2.0	1485	1.78



а)

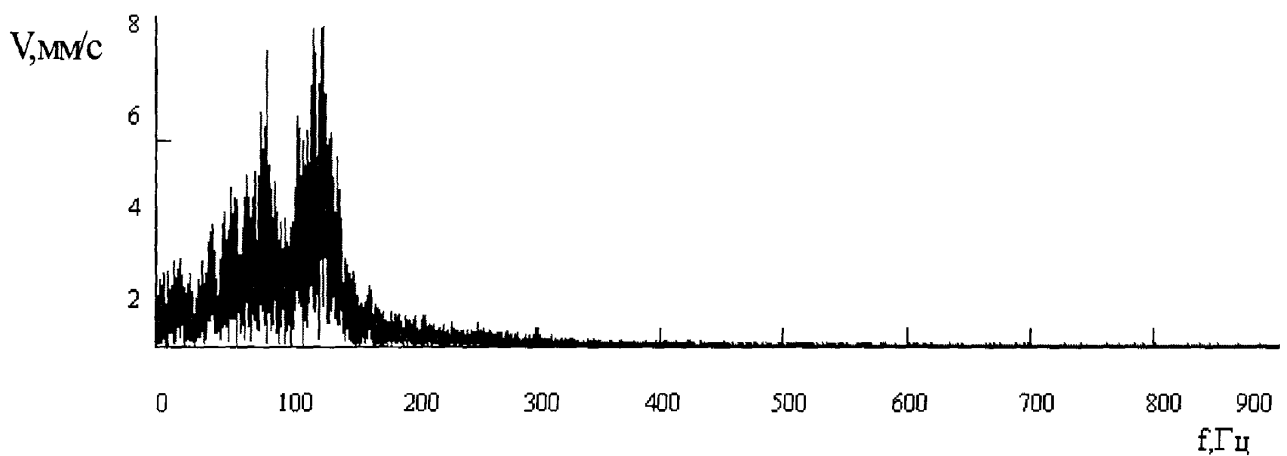


Рисунок 4.8 – Спектри віброшвидкості поздовжніх коливань ШК (насос НСВ-32, $L = 2070$ м, $n = 4$, $l = 2,5$ м) для часу напрацювання:
а) 3 місяці, б) 5 місяців

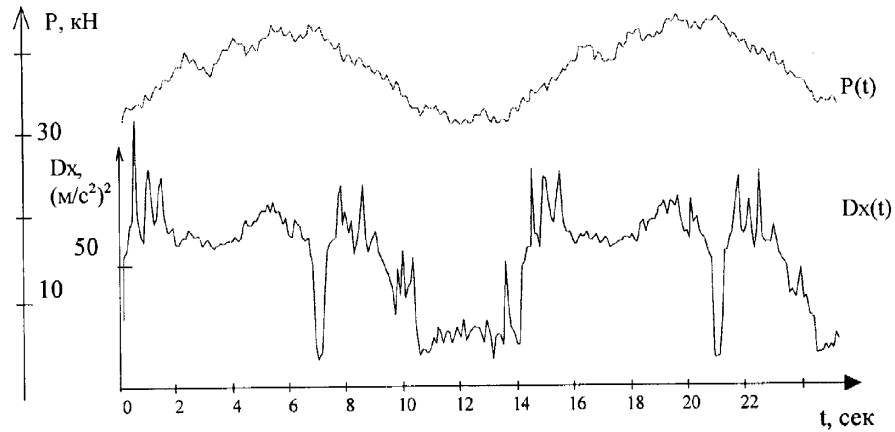
4.3 Виділення інформативних ділянок для аналізу коливного процесу в ШК

В 4.1 було відмічено, що вимушені та власні коливання ШК можна вважати детермінованою складовою випадкового КП. Це твердження справедливе в тому сенсі, що теоретично можна з певною степінню точності визначити частоти і

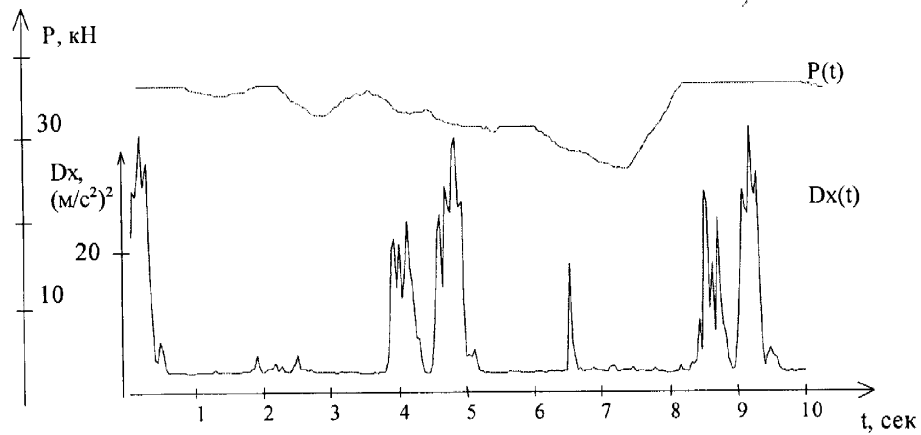
амплітуди цих коливань. Про момент їх виникнення у коливній системі можна стверджувати лише те, що це у більшості випадків відбувається під час процесів сприйняття і зняття навантаження на ШК, але положення цих інтервалів практично неможливо однозначно визначити за деякою реалізацією КП. Так, аналізуючи експериментальні дані (рис.4.9 та дод. Б1.1), бачимо, що в одному випадку різке збільшення рівня сигналу відбувається на початку сприйняття та зняття навантаження (рис.4.9 а, рис.4 дод. Б1.1), в іншому (рис.4.9 б, рис.1,2 дод.Б1.1) після закінчення цих процесів, а в деяких випадках спостерігається стрибкоподібна зміна дисперсії сигналу на протязі всього періоду качання (від 2 до 6 піків, див. рис.4.9 в, рис.3,5 дод.Б1.1). Пояснити природу виникнення цих збурень в кожному окремому випадку не представляється можливим, і, оскільки форма віброграми при їх наявності змінюється приблизно таким же чином, як і під час процесів сприйняття (зняття) навантаження, а значення максимуму дисперсії в ці моменти часу може навіть перевищувати максимум дисперсії під час вказаних процесів, то задача визначення інформативних ділянок ВС на підставі тільки віброграми дуже ускладнюється. У відомих технічних засобах діагностування стану ШГНУ (розділ 1.3) для вирішення цієї задачі використовується давач переміщення, який точно визначає моменти зміни напрямку руху ШК. Наявність такого давача ускладнює технічні засоби діагностування, призводить до зростання трудоемкості монтажних робіт і збільшує вартість технічних засобів. В той же час інформація про напрям руху КШ певним чином міститься у тензосигналі, оскільки навантаження на штанги суттєво відрізняється при ході вверх і вниз за рахунок навантаження колони вагою стовпа рідини при ході вверх, а також різного напрямку сил тертя і гідравлічного опору при ході вверх і вниз.

Під час описаного вище аналізу експериментальних даних ідентифікація моментів початку чи закінчення сприйняття і зняття навантаження проводилася шляхом візуального співставлення вібро- та тензограм, отриманих в однакові моменти часу. Такий метод є недостатньо точний, особливо для сигналів, спотворених динамічними навантаженнями і наявністю явно виражених дефектів,

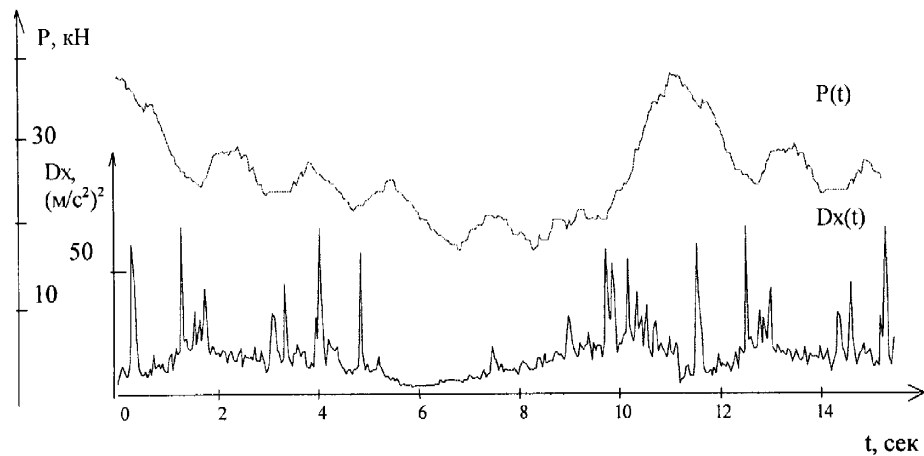
хоча для аналізу на якісному рівні він є цілком задовільним. Для отримання більш точних значень шуканих моментів часу доцільно розробити метод, що дозволив би



а



б



в

Рисунок 4.9 – Зміна рівня зусилля P та дисперсії Dx віброприскорення поздовжніх коливань ШК в часі t , отримана при експлуатації насоса НСВ-32:
 а) свердловина № 588 ($L=2070$ м, $n=4$, $S_0=2,5$ період напрацювання 120 діб);
 б) свердловина № 463 ($L=2046$ м, $n=7$, $S_0=2$ м, насос зношений);
 в) свердловина Пнів-3 ($L=2103$, $n=6$, $S_0=-3,4$ м, насос зношений).

автоматизувати їх ідентифікацію, ґрунтуючись на деяких теоретичних засадах.

Тензометричний сигнал є фактично розгорткою в часі динамограми – традиційної діагностичної ознаки технічного стану ШГНУ (детально розглянуто в розд.1.3). При відомих технічних параметрах і умовах роботи свердловинного обладнання форма тензосигналу може бути досить точно передбачена, причому не тільки для умов нормальної роботи, але і для таких найбільш поширених дефектів, як вплив газу, витікання в приймальній чи в нагнітальній частинах, тощо. Однак нас в даному випадку цікавить не стільки точна форма цього сигналу, скільки можливість виділення за його допомогою окремих інтервалів часу, які відповідають реальним процесам у КШ, тому надалі будемо розглядати найпростішу модель тензосигналу, яка будується на основі теоретичної паралелограмної динамограми. Принцип побудови такої динамограми і його теоретичне обґрунтування наведено, наприклад в [8].

Для визначення моменту початку сприйняття навантаження пропонується використати взаємкореляційну функцію (ВКФ):

$$R_{xy_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \cdot E_{i+j} \quad (4.2)$$

між тензосигналом P , отриманим експериментальним шляхом, та еталонним тензосигналом E , що отримується шляхом перетворення теоретичної паралелограмної динамограми на підставі рівняння руху точки підвісу штанг [13]

$$\begin{aligned} S(t) &= a \cdot \frac{T}{2} \cdot (1 - \cos b \frac{2\pi}{T} t), \\ t(S) &= \frac{T}{2\pi b} \cdot \arccos(\frac{2(1-S)}{aT} t), \end{aligned} \quad (4.3)$$

де T – період качання, a, b – кінематичні параметри верстата-качалки.

Метод ґрунтується на тому, що положенню максимуму ВКФ $R_{xy_{max}}(\tau)$ відповідає зсуву фаз τ між двома сигналами, між якими існує лінійна залежність. При цьому значення максимуму характеризує степінь подібності (лінійної залежності) між сигналами, зсунутими один відносно одного на інтервал τ . Для нормованої ВКФ:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{D_x D_y}},$$

де , D_x D_y – дисперсії сигналів, значення максимуму при наявності строгої лінійної залежності, тобто співпадання сигналів з точністю до масштабного коефіцієнту, дорівнює 1. Для реальних тензосигналів при використанні даного алгоритму були отримані значення $R_{xy\max}=0,5...0,7$.

Слід зазначити, що форма тензосигналу може бути в значній степені спотворена при наявності таких явно виражених дефектів, як вплив газу, витік в нагнітальній і приймальній частинах. Тому представляється доцільним сформувати не лише еталон нормальної роботи установки, а й еталони, що відповідають вказаним дефектам.

Аналізуючи динамограми, які характеризують різні технічні стани ШГНУ [8, 13, 16], можна зробити висновок, що на основі еталону нормальної роботи установки шляхом внесення у нього деформацій, характерних для різних технічних станів, можна отримати всі інші еталони.

Розгорнута теоретична динамограма при нормальній роботі ШГНУ має вигляд , зображений на рисунку 4.10.

Положення точок S_1, S_2 визначається наступним чином:

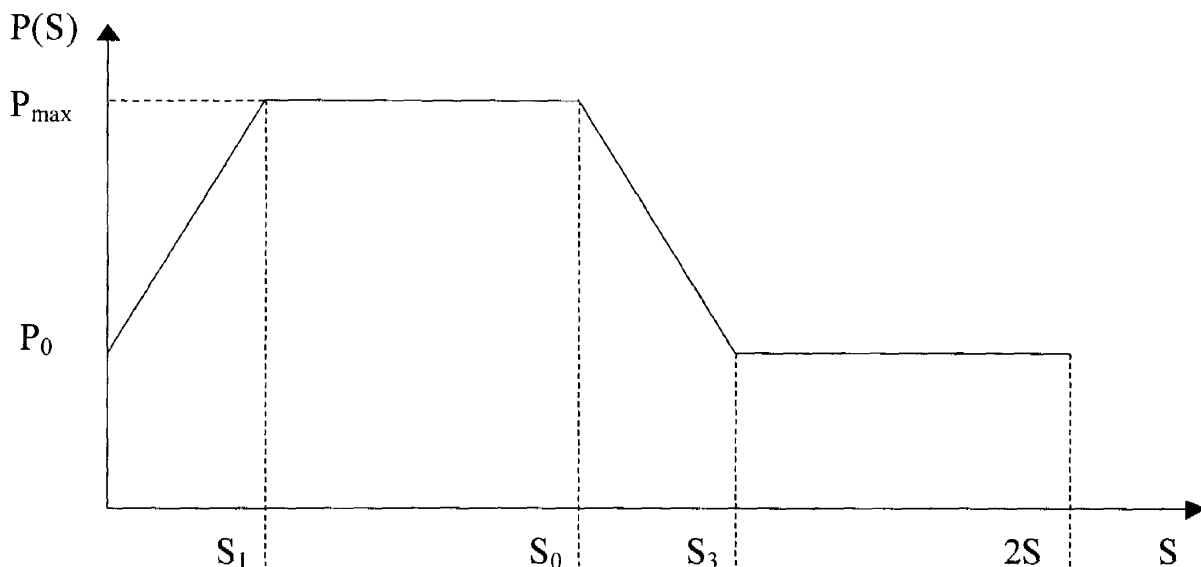


Рисунок 4.10 - Динамограма нормальної роботи ШГНУ

$$S_1 = \frac{\lambda}{S_0} \cdot \frac{N}{2},$$

$$S_3 = S_0 + S_1,$$

де $\lambda = \frac{F_n \cdot \rho_p \cdot L \cdot H}{E} \cdot \left(\sum_i \frac{l_{Ti}}{f_{Ti}} + \sum_i \frac{l_{шi}}{f_{шi}} \right)$ – втрата ходу плунжера внаслідок

деформацій штанг і труб; S_0 - довжина ходу точки підвісу; F_n - площа січення насоса; ρ_p - густина рідини; L - довжина ШК; H - динамічний рівень; E - модуль пружності матеріалу штанг; l_{Ti} , $l_{шi}$ - довжини частин колони труб і штанг з площами січення f_{Ti} і $f_{шi}$ відповідно.

Кут нахилу лінії сприйняття навантаження визначається коефіцієнтом

$$k = \frac{2S_n(P_{max} - P_0)}{\lambda N}.$$

Таким чином:

$$P_{np}(S) = \begin{cases} P_0 + k \cdot S, S < S_1; \\ P_{max}, S_1 \leq S < S_0; \\ P_{max} - k \cdot (S - S_0), S_0 \leq S < S_2; \\ P, S_2 \leq S < 2S_0. \end{cases}$$

Для стану "Вплив газу" (рисунок 4.11) з коефіцієнтом наповнення kn :

$$P_{BГ}(S) = \begin{cases} P_{np}(S), S < S_2, S > S_4; \\ P_{np}(S) + k \cdot (S - S_2), S_2 \leq S < S_0; \\ P_{np}(S) + k \cdot (S_0 - S_2), S_0 \leq S < S_3; \\ P_{np}(S) + k \cdot (S_4 - S), S_3 \leq S < S_4; \end{cases}$$

де:

$$S_2 = S_0 + \frac{P_{max} - P_0}{k};$$

$$S_3 = S_2 + (1 - kn) \cdot (S_0 - S_1);$$

$$S_4 = 2S_0 + kn \cdot (S_0 - S_1);$$

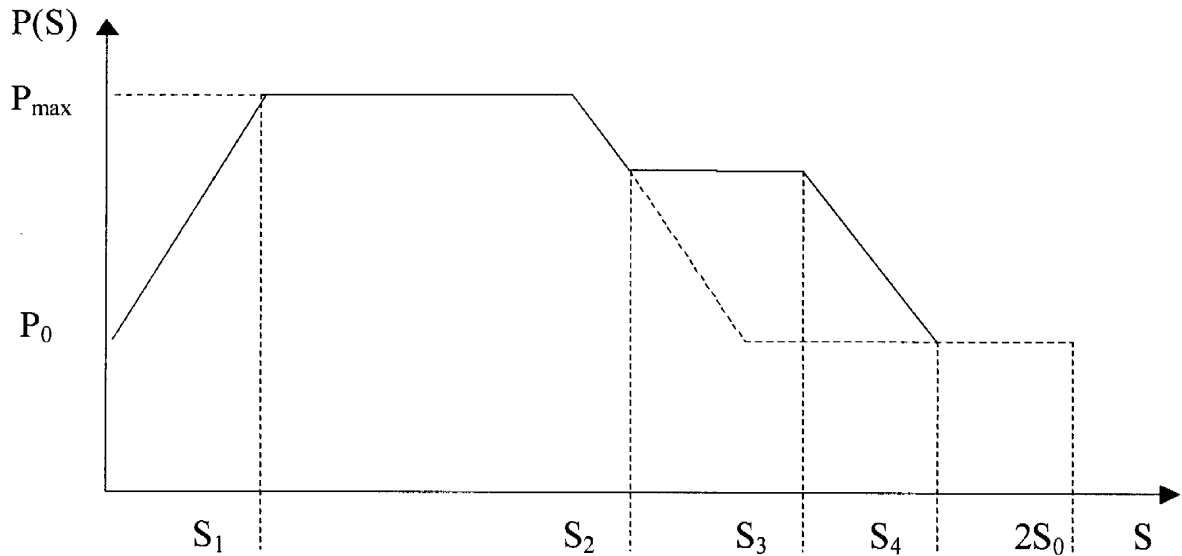


Рисунок 4.11 – Динамограма роботи ШГНУ при шкідливому впливі газу

$P_V = 0.95 \cdot P_{\max} + \mu \cdot P_0 \cdot \sin \beta$ - оцінка величини сил тертя [6];

μ - коефіцієнт тертя;

β - кут нахилу свердловини.

Для стану "Витік в нагнітальній частині" (рисунок 4.12):

$$P_{ВНЧ}(S) = \begin{cases} P_{np}(S), S_2 \leq S < S_3, S_4 \leq S < 2S_0; \\ P_0 + k \cdot kv \cdot S, S < S_2; \\ P_{np}(S + S_0 - S_3), S_3 \leq S < S_4; \end{cases}$$

де kv - величина, прийнята за характеристику степені заповнення насосу;

$$S_2 = \frac{S_1}{kv};$$

$$S_3 = S_0 - \frac{S_2 - S_1}{2};$$

$$S_4 = S_0 + S_1.$$

Для отримання еталону технічного стану "Витік в приймальній частині" можна інвертувати еталон стану "Витік в нагнітальній частині" [13]:

$$P_{ВПЧ}(S) = P_0 + P_{\max} - P_{ВНЧ}(S).$$

Обчислюючи ВКФ реальної тензограми з еталонами, що формуються згідно приведених правил, і визначаючи положення максимумів ВКФ, можна отримати значення моменту початку сприйняття навантаження. На рис. 4.12 наведено блок-схему алгоритму визначення моменту початку сприйняття навантаження, а на рис.4.13 наведено приклад застосування описаного алгоритму для експериментальної тензограми, що була зареєстрована на полірованому штоці ШГНУ свердловини № 463 (насос типу – НСВ1, діаметр насоса – 38 мм, довжина ходу – 2 м; число качань – 7, глибина спуску – 2046 м, дебіт рідини – 4,1 т/добу, неперервна відкачка рідини). Як видно з рис.4.12, ВКФ для еталонів різних технічних станів відрізняються як значенням, так і положенням максимуму. В даному випадку найбільше значення максимуму має ВКФ з еталоном "Вплив газу".

Оскільки значення максимуму ВКФ є мірою подібності між сигналом і еталоном, то, визначивши, для якого з еталонів $R_{ху\max}$ приймає найбільше значення, можна не тільки більш точно визначити потрібні нам моменти часу, а і встановити технічний стан обладнання, а саме наявність вищеописаних дефектів. В зв'язку з спрощеністю методу формування еталонів навряд чи можна говорити про достатньо високу степінь точності діагнозу (хоча для тензограм з малою динамікою отримують цілком прийнятні результати), але, по-перше, створення математичної моделі, яка б

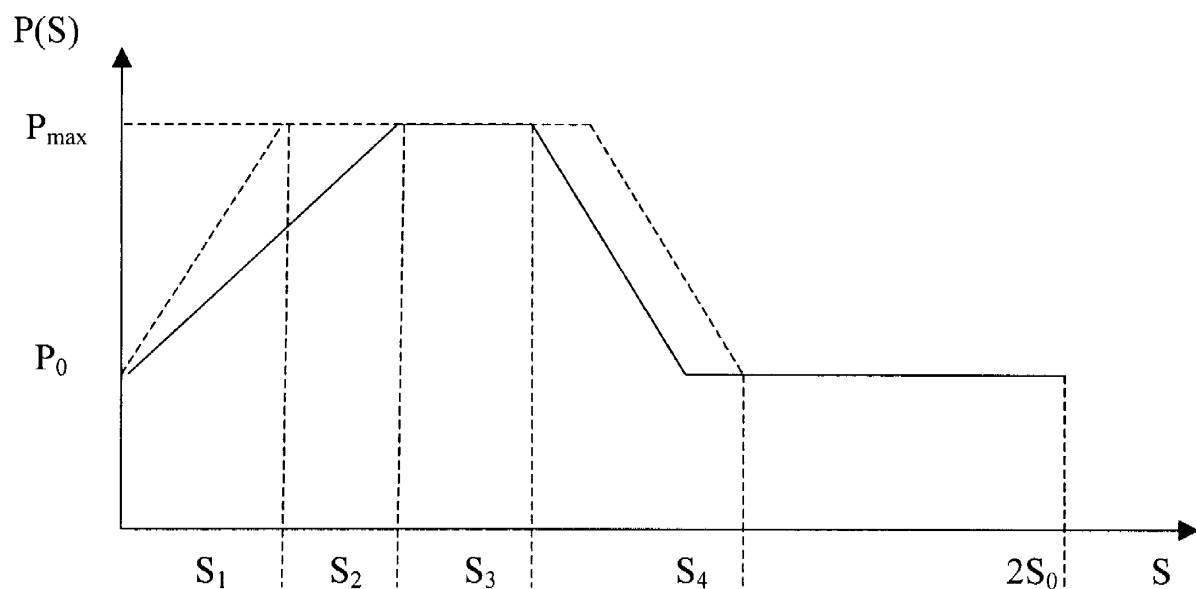


Рисунок 4.12 - Динамограма роботи ШГНУ при витокі в приймальній частині

з достатньою степенню адекватності описувала тензосигнал не лише при нормальній роботі, а й при наявності дефектів, є досить складною задачею, що сьогодні ще не розв'язана і не є метою даної роботи, а, по-друге, зміст і мета описаних досліджень полягає саме в тому, щоб за рахунок вибору інших діагностичних ознак підвищити ефективність діагностування ШГНУ порівняно з динамометричними методами.

Таким чином, за допомогою описаного методу можна визначити момент початку сприйняття навантаження t_0 . Тривалість процесу сприйняття навантаження визначається, виходячи з даних про свердловину, на підставі формул 4.2. Момент початку зняття навантаження зміщений відносно t_0 на половину періоду качання проте, як видно з рис.4.11, при наявності впливу газу зняття навантаження проходить в два етапи (ділянки $S_0 - S_2$ та $S_3 - S_4$). Крім того, що це ускладнює проведення аналізу, можна зауважити, що віброграми, зареєстровані на свердловинах з явно вираженим впливом газу (рис.1 дод.Б2, 4.8б) характеризуються значним збільшенням дисперсії ВС. При цьому досить важко встановити будь-яку закономірність в процесі зміни цієї характеристики. Найбільш ймовірно, що це явище обумовлене ударами плунжера об рідину чи іншими явищами, які виникають при вказаному дефекті. У будь-якому випадку даний дефект не є результатом деградаційних процесів у вузлах і деталях ШГНУ, а визначаються виключно умовами експлуатації – характеристикою нафтового пласта (швидкістю притоку рідини з пласта в свердловину), режимом роботи (довжина ходу, число качань), занурення насоса під динамічний рівень. Виходячи з усього вище сказаного можна зробити попередній висновок, що для аналізу інформативності ВС при дослідженні впливу технічного стану складових частин ШГНУ на її вібростан більш доцільно вибрати лише інтервал сприйняття навантаження.

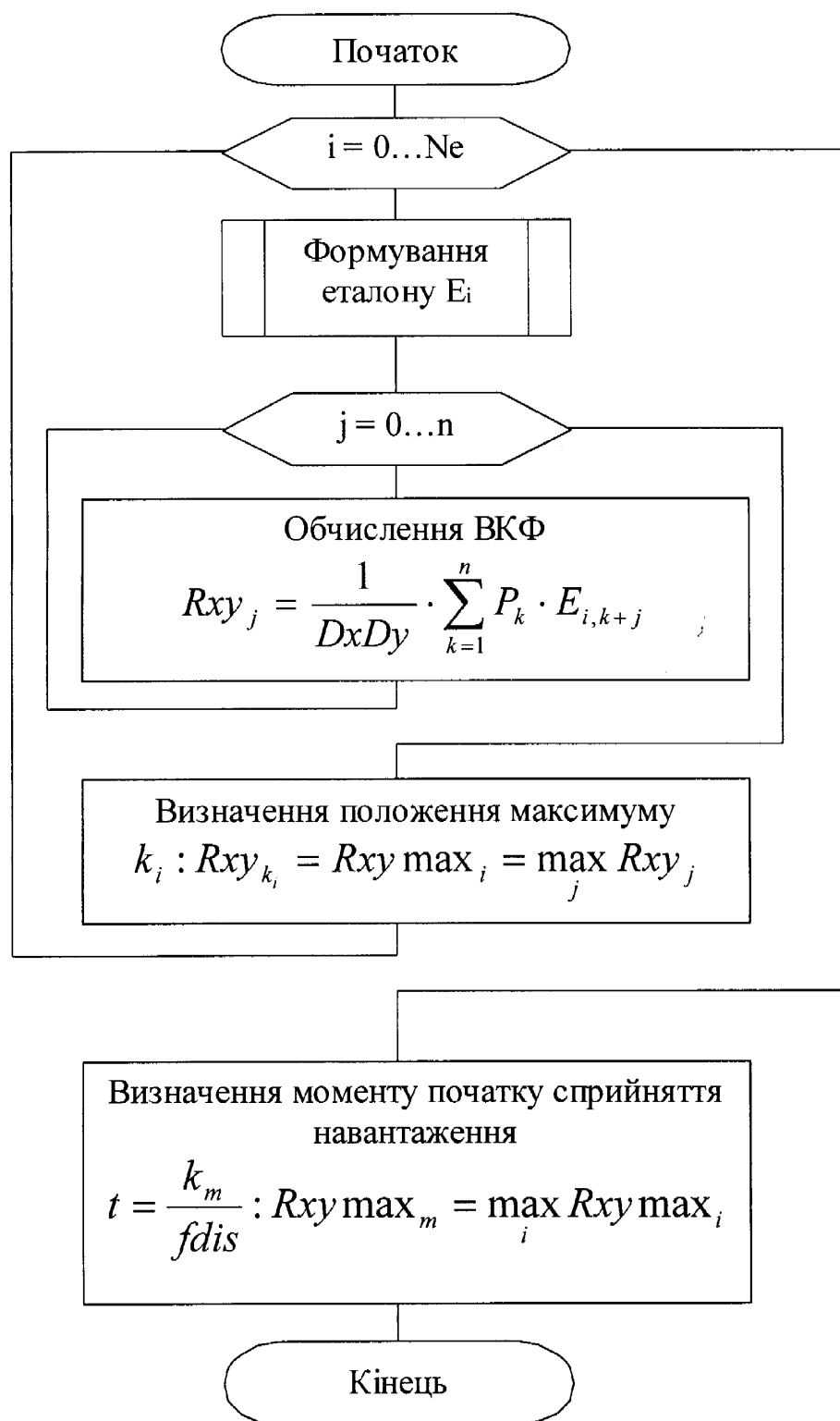


Рисунок 4.13 – Блок-схема алгоритму визначення моменту часу початку сприйняття навантаження:

Ne – кількість еталонів; n – довжина вибірки; D_x, D_y – дисперсії тензосигналу і еталону; f_{dis} – частота дискретизації тензосигналу

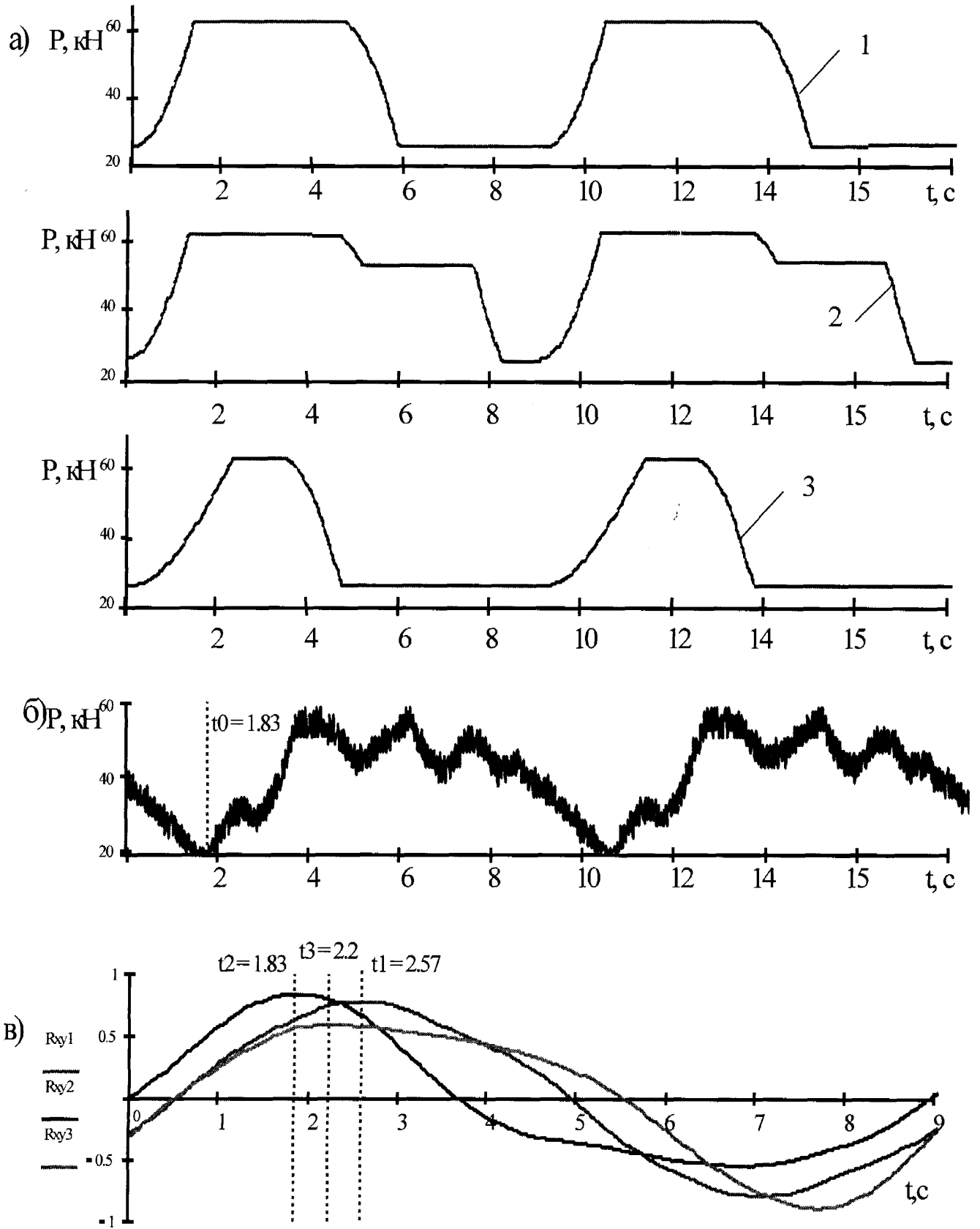


Рисунок 4.14 – До методики визначення моменту часу початку сприйняття навантаження: а – еталонні динамограми (1 – нормальна робота, 2 – вплив газу, 3 – витік в нагнітальній частині); б – експериментальна тензограма; в – ВКФ між експериментальною та еталонними тензограмами.

4.4 Моделювання вібраційних процесів в штанговій колоні

На основі математичної моделі, описаної в розділі 2, при відомих технічних характеристиках ШГНУ (глибина спуску, кількість качань за хвилину, довжина ходу точки підвісу штанг) можна отримати функцію $u(x,t)$ – залежність переміщення точок колони штанг від часу та координати точки.

При розв'язку крайової задачі (2.64) початкові умови приймалися нульовими:

$$u(x,0) = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial t}(x,0) = 0,$$

а крайові умови визначалися виходячи з режиму роботи ШГНУ наступним чином:

1) закон переміщення верхньої точки ШК є періодичною функцією часу, що наближено може бути описана залежністю

$$\mu_1(t) = A \cdot \sin(\omega t),$$

де A – амплітуда качань, що дорівнює половині довжини ходу точки підвісу штанг, ω – циклічна частота качань:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

де n – кількість качань за хвилину.

2) закон переміщення нижньої точки ШК

$$\mu_2(t) = \int_0^t x(\tau) d\tau,$$

де функція $x(t)$ визначається за допомогою обернених перетворень (2.6) розв'язку рівняння Ван-Дер-Поля (2.13) з врахуванням заміни змінної (2.9), тобто

$$x(t) = \sqrt{\frac{3B}{A}} \int_0^{\sqrt{\frac{k}{m}} t} y(\tau) d\tau$$

Оскільки експериментальні дані реєструвалися у верхній частині колони штанг (на відстані близько 2 м від її верхньої точки), то для порівняння цих даних з результатами моделювання доцільно шукати функцію

$$u_2(t) = u(x, t) \Big|_{x=2},$$

що є залежністю вібропереміщення від часу. Диференціюючи отриману функцію по часу, знаходимо віброшвидкість

$$v(t) = \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) \Big|_{x=2}.$$

Відповідно експериментальні дані – віброприскорення – необхідно проінтегрувати по часу, щоб отримати значення віброшвидкості.

Використовуючи середовище MathCad 7, згідно розрахункової схеми, описаної в розділі 2, було отримано графіки віброшвидкості поздовжніх коливань ШК для свердловин № 463 ($L = 2046$ м, $n = 6$, $S_0 = 3$ м) та для свердловини №260 ($L = 1884$ м, $n = 5$, $S_0 = 3$ м) на протязі одного періоду качання (рис. 4.15, 4.18) та на протязі невеликого інтервалу часу на початку руху колони штанг вгору (рис. 4.16, 4.19). Останнє пов'язано з тим, що виконання розрахунків вимагає значних затрат часу, які тим більші, чим більша частота дискретизації по часу. Так, для отримання результату, представленого на рис. 4.15, а, при дискретності по часу $\Delta t = 0.02$ с ($f_d = 50$ Гц) було витрачено близько 90 хв (характеристика комп'ютера: процесор Pentium S, тактова частота 150 МГц, 16Кбайт оперативної пам'яті). Зменшення частоти дискретизації f_d з метою пришвидшення розрахунків призводить до неможливості оцінки спектру в області частот $f > f_d/2$, а збільшення f_d з метою виявлення високочастотних складових призводить до значного зростання часу розрахунків. Тому більш доцільно за даних умов виконувати розрахунки для цілого періоду качань з невеликою частотою дискретизації, щоб оцінити низькочастотні процеси у ШК, та для невеликого інтервалу часу з

високою частотою дискретизації для оцінки спектру в області середніх та високих частот.

Для всіх вказаних випадків за допомогою перетворення Фур'є було побудовано амплітудні спектри віброшвидкості поздовжніх коливань ШК.

Згідно отриманих результатів, віброшвидкість є сумою двох низькочастотних складових (18.2 і 20.8 Гц для свердловини № 463 та 11.2 і 13.9 Гц для свердловини № 260). Наявна також складова на частоті, рівній частоті качань ВК (0.1 та 0.083 Гц відповідно), але її вплив незначний у порівнянні з вищезгаданими частотами (див. табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Розподіл спектральних складових віброшвидкості поздовжніх коливань ШК

Свердловина № 463 $L = 2046$ м, $n = 6$, $S_0 = 3$		Свердловина № 260 $L = 1884$ м, $n = 5$, $S_0 = 3$	
f , Гц	A , мм/с	f , Гц	A , мм/с
0.1	0.21	0.083	0.15
18.2	2.2	11.2	1.9
20.8	2.9	13.9	2.2

Для експериментальних даних складова з частотою качань не може бути виявлена в зв'язку з обмеженістю частотного діапазона акселерометра, але, як було відмічено у 4.3, у спектрі віброшвидкості наявні складові з кратними частотами. Що стосується двох інших частот, то явно виражених максимумів амплітуди на них не спостерігається, хоча на рис. 4.17, 4.19 можна побачити деяке підвищення рівня у відповідній області частот.

Більше узгодження з експериментальними даними виявляють результати моделювання в області середніх частот (рис.4.16, 4.19). У спектрі, отриманому на основі експериментальних даних, можна побачити явно виражений максимум на частотах, що з певною степінню точності співпадають з теоретичними (табл.4.4).

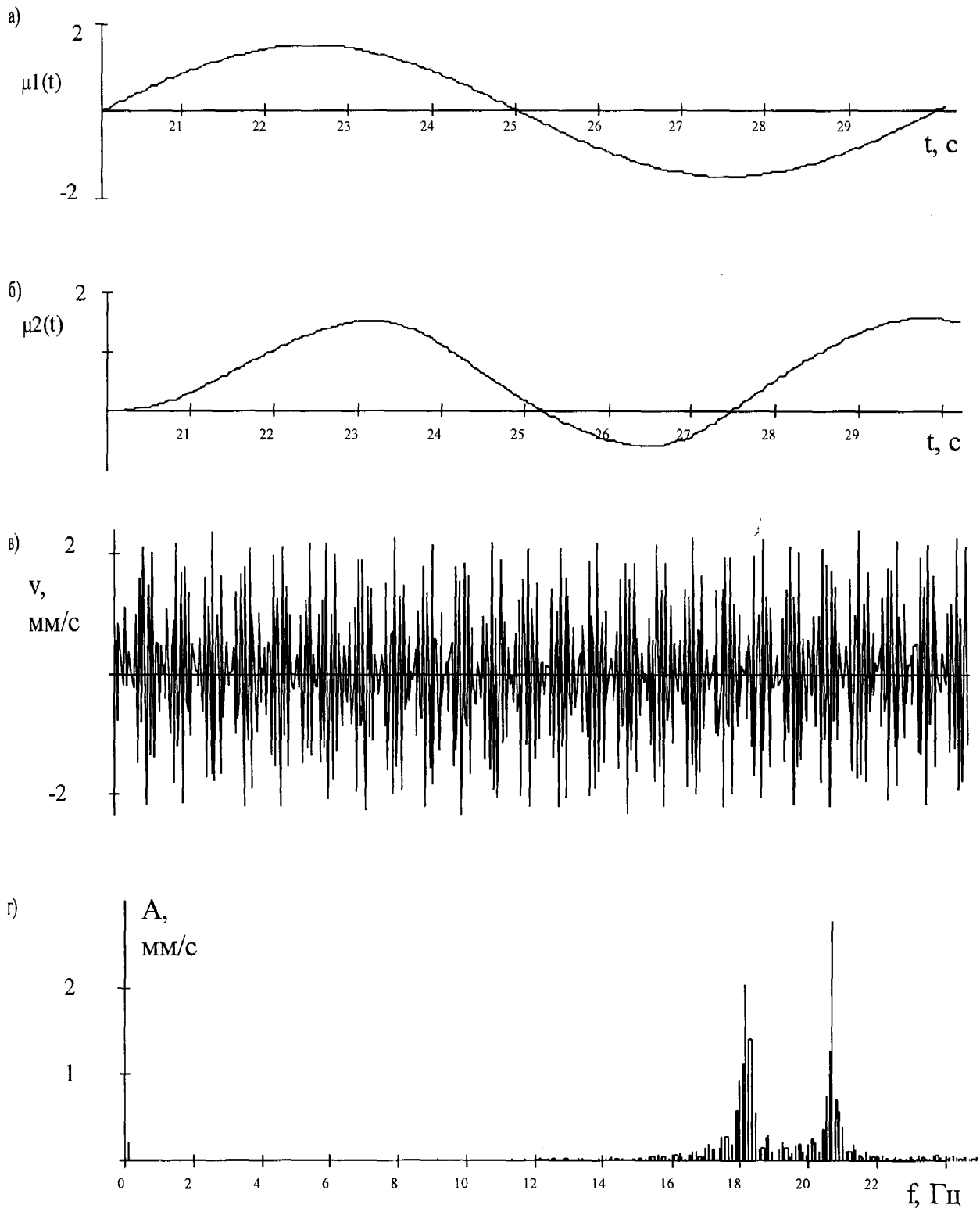


Рис 4.15. Результати моделювання коливних процесів у ШК в низькочастотному діапазоні для свердловини № 463:

а – закон руху точки підвісу штанг; б – розв’язок рівняння Ван-дер-Поля для нижньої частини ШК; в – віброшвидкість; г – спектр віброшвидкості

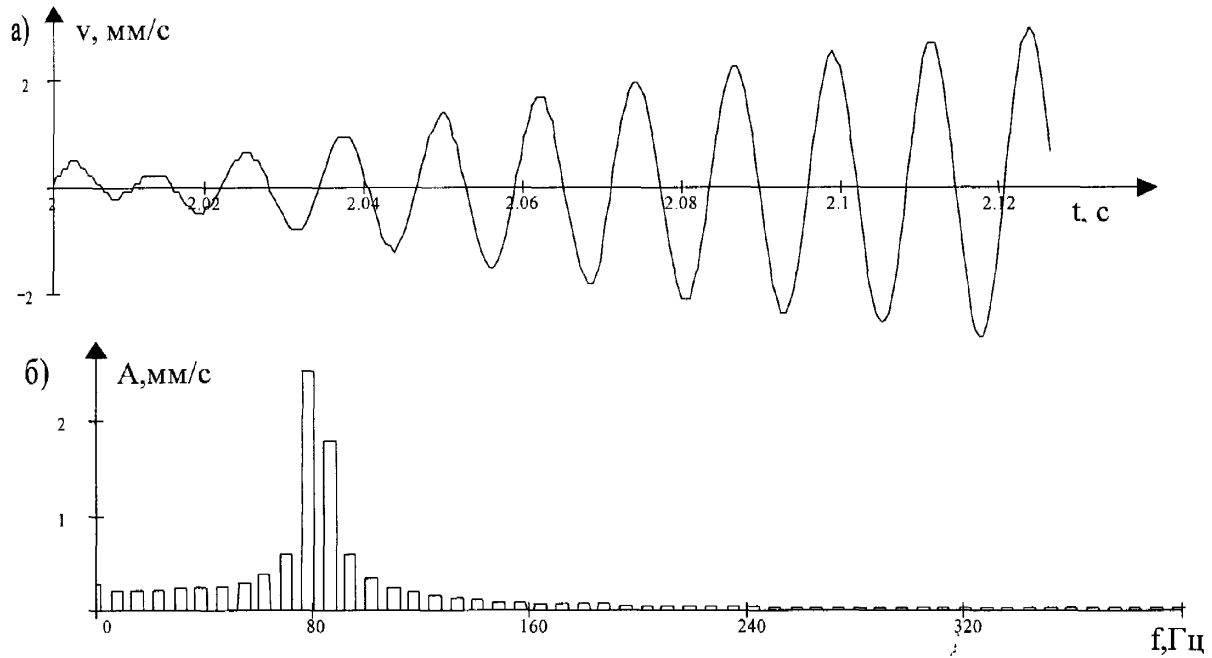


Рис. 4.16. Результати моделювання коливних процесів у ШК в середньочастотному діапазоні для свердловини №463:
а – віброшвидкість; б – спектр віброшвидкості

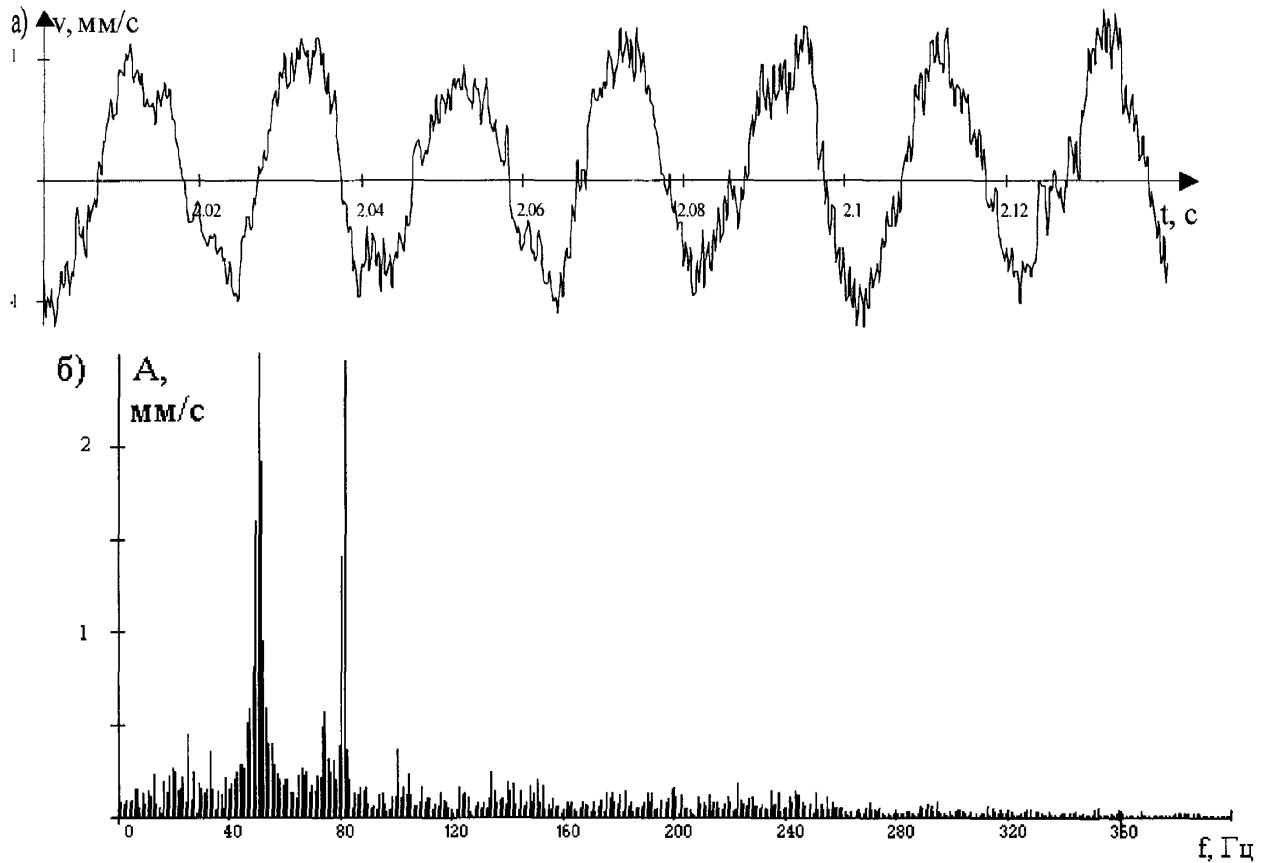


Рис. 4.17. Експериментальні дані для свердловини №463 у момент початку руху ШК вгору: а – віброшвидкість; б – спектр віброшвидкості

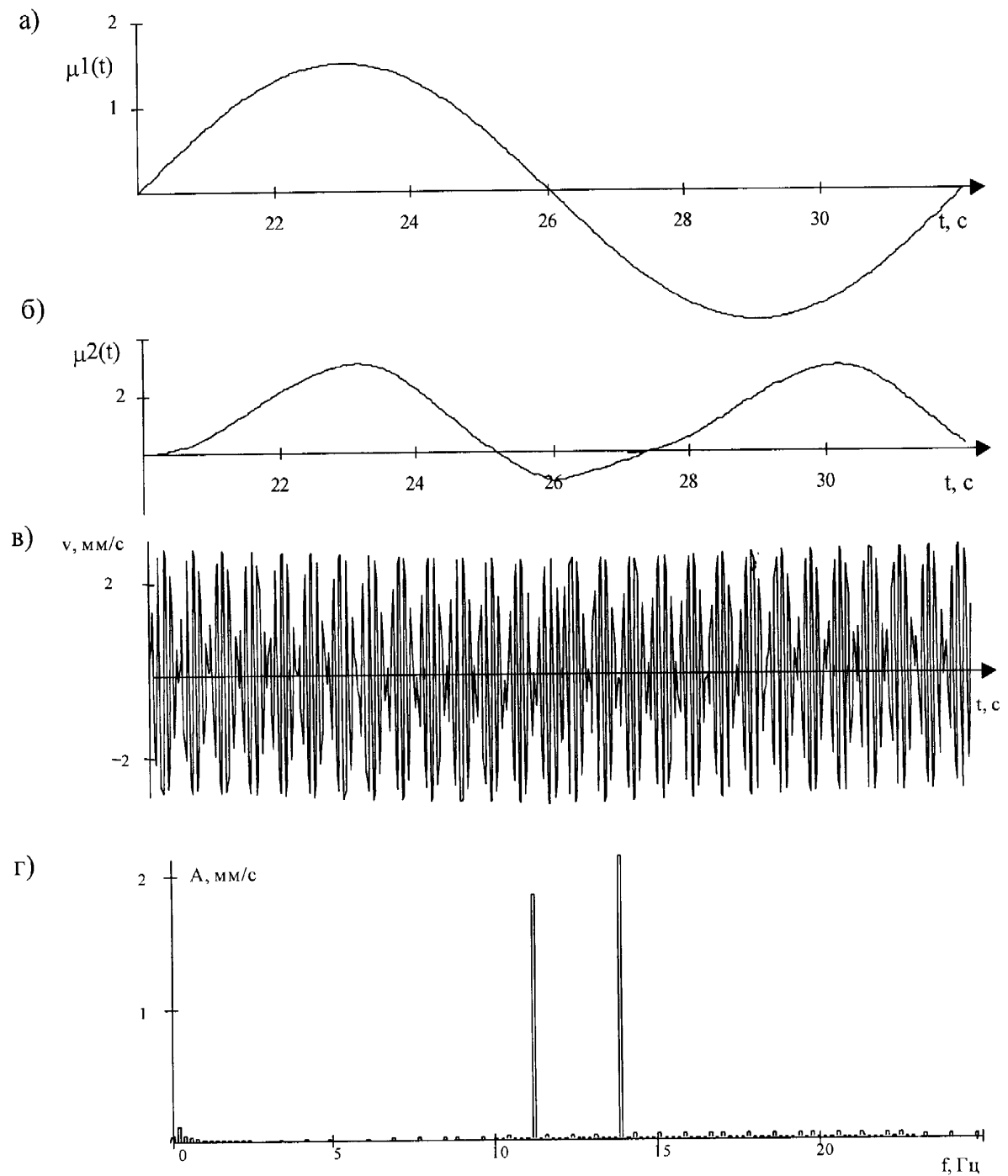


Рисунок 4.18 – Результати моделювання коливних процесів в ШК у низькочастотному діапазоні для свердловини №260: а – закон руху точки підвісу штанг; б – розв’язок рівняння Ван-дер-Поля для нижньої частини колони; в – віброшвидкість; г – спектр віброшвидкості

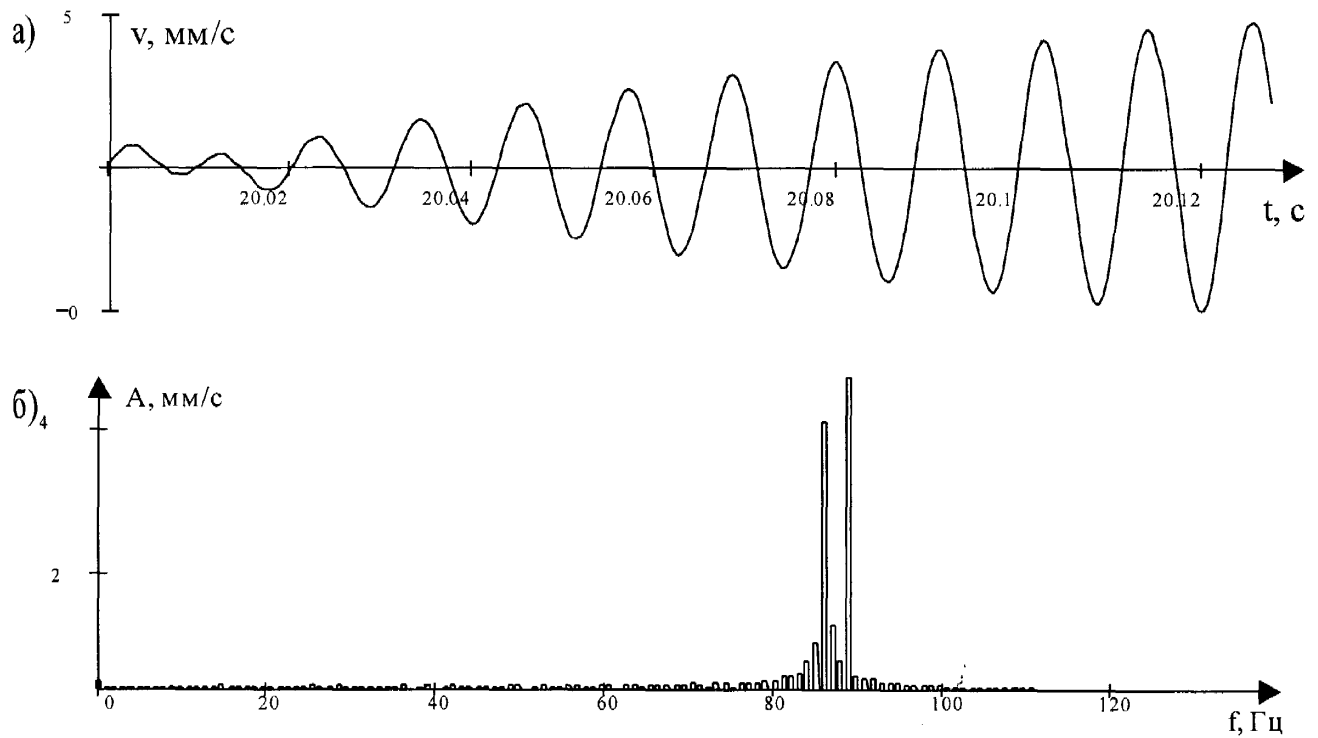


Рис. 4.21. Результати моделювання коливних процесів в ШК у середньочастотному діапазоні для свердловини №260: а – віброшвидкість; б – спектр віброшвидкості

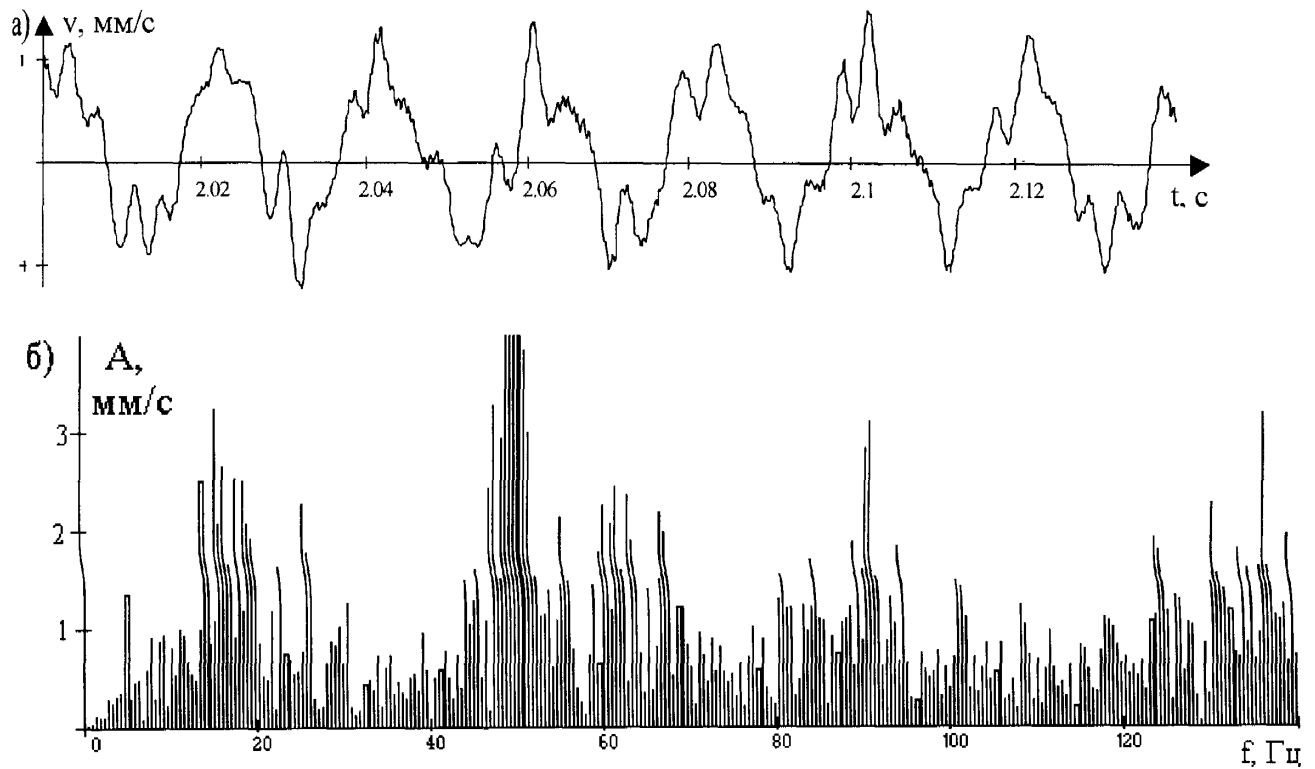


Рис. 4.20. Експериментальні дані для свердловини №260 у момент початку руху ШК вгору: а – віброшвидкість; б – спектр віброшвидкості

Таблиця 4.4

Розподіл спектральних складових віброшвидкості поздовжніх коливань ШК ,
отриманих розрахунковим і експериментальним шляхом

Свердловина № 463 $L = 2046$ м, $n = 6$, $S_0 = 3$				Свердловина № 260 $L = 1884$ м, $n = 5$, $S_0 = 3$			
Модель		Експеримент		Модель		Експеримент	
f , Гц	A , мм/с	f , Гц	A , мм/с	f , Гц	A , мм/с	f , Гц	A , мм/с
79	2.5	80	2.4	85.2	4.1		
83	1.8			88.9	4.4	90	3.1

Порівнюючи результати моделювання для свердловин з різними параметрами, можна зробити висновок, що основним параметром, який впливає на результати моделювання, є довжина ШК, оскільки складова, обумовлена частотою качань балансира, є незначною. Що стосується довжини ходу, то з метою вивчення впливу цього параметру було здійснено розрахунок для значень $L = 2046$ м, $n = 6$, $S_0 = 2$ і отримано результат, що повністю співпадає з результатом моделювання для свердловини № 463, тобто довжина ходу не впливає на вібраційні характеристики ШК.

Таким чином, створена математична модель до певної міри адекватно відображає реальні процеси у ШК. Але навіть візуальне порівняння спектрів на рис.4.19 та 4.20 говорить про те, що реальні вібраційні процеси є значно складнішими і не можуть бути зведені до суми невеликої кількості гармонічних складових. Як видно з рис.4.20а, реальний вібросигнал володіє значною стохастичністю, в той час як розглянута модель є повністю детермінованою. Дана модель може бути використана для контролю технічного стану ШГНУ, зміна якого обумовлена процесами зношення її вузлів і елементів.

4.5. Вибір діагностичної ознаки і розробка алгоритму вібраційного контролю технічного стану ШГНУ

В 4.2 було показано, що спектр ВС має складну структуру, причому вплив технічного стану установки на спектр не можна однозначно оцінити зміною амплітуд дискретних складових на визначених частотах та вибраних ділянках спектру. На відміну від класичних об'єктів вібродіагностики - роторних механізмів, вібрація яких обумовлена в основному обертанням деталей, в зв'язку з чим досить точно можуть бути визначені частоти збудження, на яких слід очікувати зміну спектральних складових, обумовлених часом їх напрацювання, тобто технічним станом, ШГНУ є більш складною системою. Ефекти, зумовлені значною протяжністю ШК, нелінійним характером залежності різних параметрів ШГНУ від часу та просторових координат, призводять до того, що спектр сигналу носить не набагато менш стохастичний характер, ніж сам ВС, а наявність дефектів впливає на форму сигналу в цілому, тому інформативними ознаками є не енергетичні характеристики віброакустичного сигналу, тобто амплітуди основних частот збудження, а ряд параметрів, слабо пов'язаних з енергетичним балансом сигналу. Враховуючи те, що спектр є широкосмуговим (мінімальна значуща частота складає 0,08 Гц, максимальна - близько 1600), і містить значущі складові у всьому діапазоні частот, причому частоти, на яких спостерігаються максимальні значення амплітуд, не можна визначити на основі діагностичної моделі ШГНУ, можна зробити висновок, що спосіб представлення діагностичної інформації за допомогою спектру не є достатньо ефективним.

Щодо вибору раціональної діагностичної ознаки можна зауважити наступне. З одного боку, розроблена математична модель не дає можливості для моделювання різних дефектів ШГНУ в тому сенсі, щоб можна було передбачити характер зміни ВС або його спектру, а, з іншого боку, на даний час відсутня достатня кількість експериментальних даних про вібраційні процеси в ШГНУ на різних стадіях деградації вузлів і деталей установки і при різних

умовах експлуатації. Отже, на даному етапі вібраційний сигнал можна використовувати лише для отримання деякої інтегральної ознаки, яка характеризує технічний стан ШГНУ в цілому, тобто дозволяє вирішити лише першу задачу діагностування – контролю роботоздатності, що є метою роботи. Наприклад, контролювати степінь зносу обладнання без локалізації найбільш зношених вузлів.

Попередньо проведені дослідження показали, що серед найбільш вживаних діагностичних ознак технічного стану різноманітних машин і механізмів [75,76,77,78] стосовно ШГНУ може бути вибрана автокореляційна функція вібраційного процесу (АКФ) [80].

Автокореляційна функція несе ту ж інформацію, що і спектральна щільність, оскільки ці функції пов'язані між собою парою перетворень Фур'є, але на практиці часто зустрічаються випадки, коли поведінка АКФ більш наочно відображає зміну стану об'єкта діагностування, наприклад, при зміні співвідношення енергії періодичної і шумової компонент сигналу. Зокрема, при явищах зносу, пов'язаних зі зміною геометрії контактуючих поверхонь, зростає роль шумової компоненти, що відображається на вигляді АКФ, зменшуючи відношення сигнал-шум і збільшуючи коефіцієнт затухання, який може служити діагностичною ознакою [79,80]. Оскільки ж саме знос у більшості випадків є первинною причиною найбільш поширених дефектів ШГНУ, використання АКФ для формування діагностичних ознак дозволить адекватно оцінити її технічний стан.

Стосовно контролю технічного стану ШГНУ, то за діагностичну ознаку було прийнято логарифмічний декремент затухання АКФ ВС. Такий вибір є правомірним, оскільки логарифмічний декремент затухання (ЛДЗ) уже використовувався для оцінки технічного стану механізмів, обумовлених їх зносними дефектами [94].

Логарифмічний декремент затухання визначається за формулою

$$\alpha = \ln \frac{R(t)}{R(t+T)} = \beta T, \quad (4.4)$$

де $R(t) = R(0) \cdot e^{-\beta t}$ – амплітуда затухаючих коливань; T – період затухаючих коливань; β – коефіцієнт затухання.

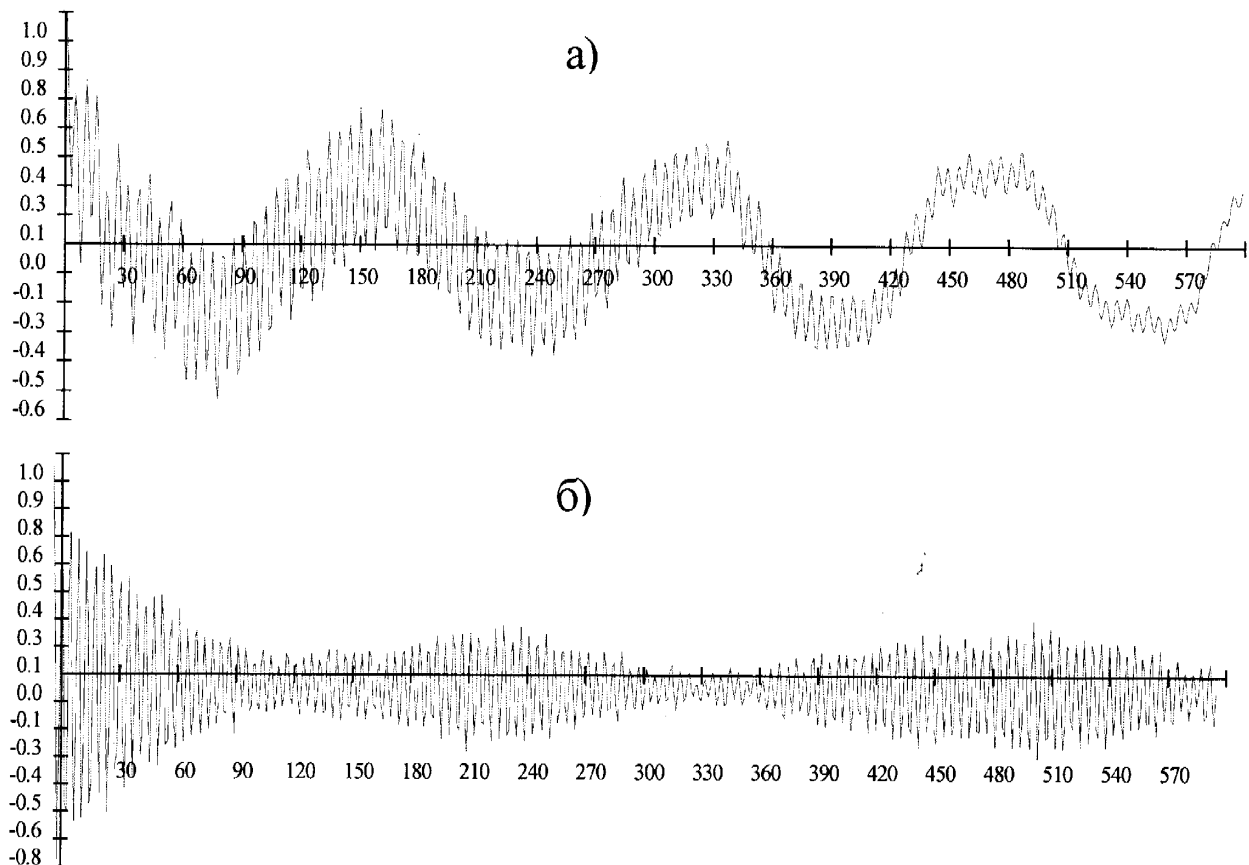


Рис. 4.21. Автокореляційні функції віброшвидкості поздовжніх коливань ШК для насоса НСВ-32, що експлуатувався на свердловині № 463:

- а - новий насос (напрацювання 1 місяць),
- б - зношений насос (напрацювання 8 місяців)

На рисунку 4.21 наведені графіки АКФ для вібраційного процесу в ШК установки, яка експлуатувалася в свердловині №463 ($L = 2046$ м, $S_0 = 2.5$ м, $n = 6$, насос – НСВ-32). Як видно з графіків, АКФ має вигляд затухаючих модульованих коливань, причому характер модуляції та степінь затухання змінюються з напрацюванням установки. Так, для АКФ на рис. 4.21,б затухання є помітно більшим (АКФ різко спадає до 0.2 - 0.3 від початкового значення), що свідчить про значну степінь зносу обладнання.

Оскільки для сигналу такої форми досить складно однозначно визначити період затухаючих коливань, при розробці програмного забезпечення було

використано алгоритм визначення ЛДЗ, який передбачає знаходження спадаючої послідовності максимумів АКФ з наступною апроксимацією цієї послідовності показниковою функцією $a \cdot e^{-bt} + c$. Значення ЛДЗ приймається рівним коефіцієнту b , який знаходиться шляхом оцінки параметрів відповідної лінійної регресійної моделі за методом найменших квадратів [81]. Отримане значення не залежить від періоду коливань, тобто відповідає коефіцієнту затухання β у формулі (4.4).

Для обчислення діагностичної ознаки з використанням описаного в розділі 4.3 алгоритму визначення моменту початку сприйняття навантаження була розроблена програма Dia. Блок-схема алгоритму визначення ДО приведена на рисунку 4.2. Програма написана на мові Borland C++Builder 3, для її запуску необхідний комп'ютер з процесором не нижче i486, операційна система Windows, не менше 1 Мбайт на жорсткому диску і не менше 8 Кбайт оперативної пам'яті, відеоадаптер VGA.

Вихідними даними для програми є :

- 1) інформація про технічні параметри свердловин, що зберігається у базі даних;
- 2) файли даних, що містять оцифровані відліки тензометричних та вібраційних сигналів, отримані за допомогою розробленої МІОС.

Результатами роботи програми є:

- 1) діагноз технічного стану по тензосигналу;
- 2) значення ЛДЗ АКФ для вибраного часового інтервалу.

У додатку М наведені екранні форми програми Dia.

При запуску програми на екран виводиться головне вікно (рис.1 дод.В1), що містить меню та список свердловин, які внесені у базу даних. Послідовність дій при роботі з програмою наступна.

1. Зі списку свердловин вибирається свердловина, для якої необхідно провести обробку даних. Якщо у БД відсутня інформація про потрібну свердловину, необхідно вибрати пункт меню "Свердловини", після чого на екрані з'явиться вікно для роботи з базою даних (рис.2 дод.В1). Користуючись

клавішами навігатора БД, можна додавати і вилучати записи в БД, здійснювати переміщення по записах та редагувати вміст полів БД.

2. Вибирається пункт меню "Файл\Вибір даних".

3. Вибирається пункт меню "Тензо". На екрані з'явиться вікно аналізу тензосигналу (рис.3 дод.В1), основним елементом якого є графік експериментальної та еталонної тензограми. У нижній частині форми міститься список еталонів, який можна редагувати, додаючи нові еталони кнопкою "+" або видаляючи кнопкою "-". На графіку відображається той еталон, який у даний момент є вибраним зі списку. Параметри еталону (мінімальне і максимальне навантаження на ШК, сумарна величина сил тертя, період качання) обраховуються автоматично на підставі даних про свердловину, зчитаних з БД. Щоб досягти максимальної подібності еталону до реального сигналу, ці параметри можна змінити за допомогою однострочних редакторів, які розташовані на формі. Натискання кнопки "Авто" призводить до відновлення автоматично обрахованих параметрів. Натискання кнопки "Перерисувати" призводить до перерисовування графіка, якщо було змінено параметри еталона, або вибрано інший еталон зі списку. Кнопка "Обрахунок" призначена для обчислення міри подібності між реальною та еталонними тензограмами, визначення технічного стану ШГНУ та визначення границь інтервалу сприйняття навантаження згідно алгоритму, описаного в 4.3. Після виконання обрахунку на екрані з'являється повідомлення про діагноз (рис. 3 дод.В1). Для завершення роботи з тензограмою слід натиснути кнопку "Ок", після чого буде видано повідомлення, де вказуються границі інтервалу сприйняття навантаження.

4. Вибирається пункт меню "Вібро". На екрані з'явиться вікно аналізу вібраційного сигналу (рис.5 дод.В1). Графік вібросигналу будується для всього файлу даних, що містить близько 140000 відліків. Для візуалізації окремих ділянок вибірки необхідно змінювати значення в однострочних редакторах "Початок" та "Інтервал". Границі інтервалу сприйняття навантаження показані на графіку жирними лініями і можуть бути модифіковані за допомогою

однострочних редакторів "t0" та "t1". Для обрахунку ЛДЗ АКФ вибраного інтервалу необхідно натиснути кнопку "Обрахунок".

Аналіз експериментальних даних і зроблені висновки (розділ 4.1) свідчать, що вібраційний процес в ШК, є нестационарним, причому зміна дисперсії явно корелює зі зміною зусилля на полірований шток на протязі періоду качання (рис. 4.23), а математичне очікування є випадковою величиною, зміна якої найбільш імовірно обумовлена дрейфом нуля вимірювального блоку МІОС.

З рисунка 4.22 видно, що дисперсія ВС зростає після закінчення процесів сприйняття і зняття навантаження. Аналогічна обробка даних з інших свердловин свідчить, що в окремих випадках різке підвищення дисперсії відбувається вже на початку сприйняття навантаження

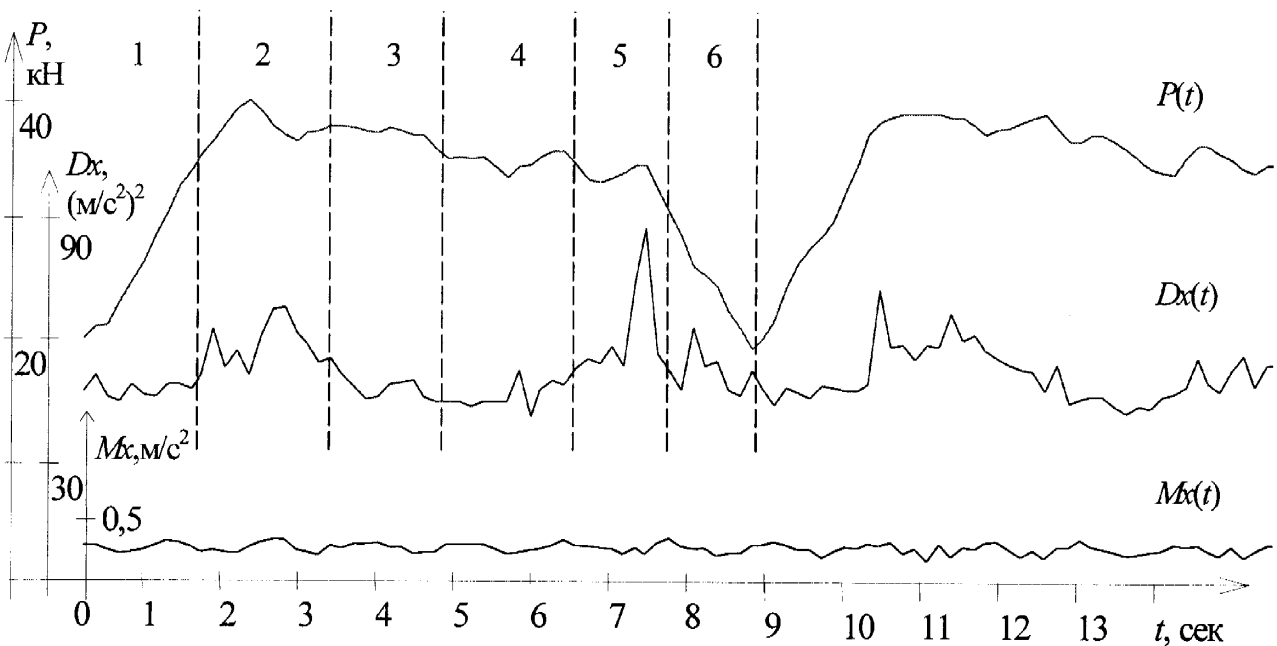


Рис. 4.22. Графіки зусилля в ШК $P(t)$, зміни математичного очікування $Mx(t)$ і дисперсії $Dx(t)$ вібраційного процесу в часі (дані з свердловини №463)

Логічно припустити, що у зв'язку з нестационарністю вібросигналу як значення, так і степінь інформативності вибраної діагностичної ознаки також змінюються на протязі періоду качання. Тому найбільш доцільно обчислювати АКФ і ДО не для всієї реалізації, а для окремих інтервалів. На рис. 4.22

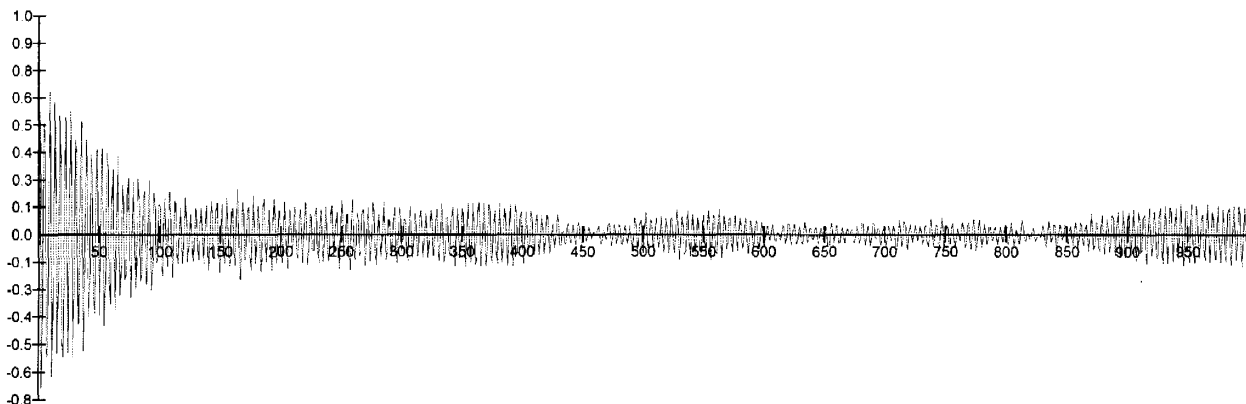
виділено інтервали, що відповідають наступним фазам періоду качання: 1 - сприйняття навантаження; 2 - початок ходу вверх; 3 - хід вверх; 4 - зняття навантаження; 5 - початок ходу вниз; 6 - хід вниз.

Щоб визначити, у які моменти часу ДО є максимально інформативною, для кожного з виділених інтервалів була побудована ЛДЗ і обчислено ДП (рисунок 4.23). Значення ДО при ході вверх (ЛДЗ = 0.828) є приблизно вдвічі меншими, ніж при ході вниз (ЛДЗ = 1.917), а максимального значення він набуває на початку ходу вниз (ЛДЗ = 3.250). АКФ при ході вверх (після закінчення сприйняття навантаження) має явно виражену модулюючу низькочастотну складову, яка практично відсутня при ході вниз (після закінчення зняття навантаження).

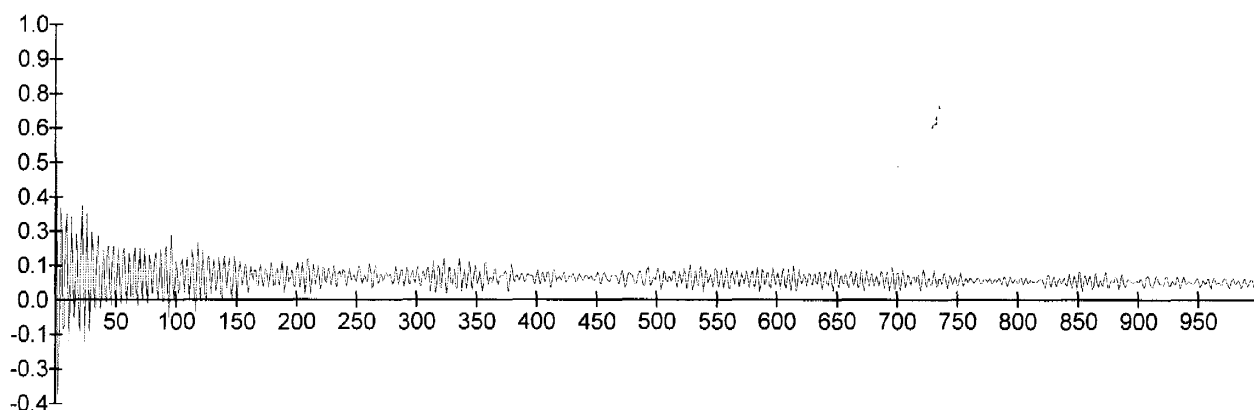
Щоб визначити, на якому з розглянутих інтервалів вибрана діагностична ознака є найбільш інформативною, було проведено обробку експериментальних даних по свердловинах № 463, 588, 260 та 320 (таблиця 4.4).

Аналізуючи таблицю, можна зробити висновок, що у більшості випадків значення ЛДЗ зростає з напрацюванням. Винятком є результати обрахунку для сильно зношеного насоса свердловини № 463, для якого діагностична ознака має менші значення, ніж для нового насосу, на який він був замінений.. Це може бути пов'язано з явищем "припрацювання" нового насосу, або з тим, що монтаж на свердловині нового насосу був виконаний менш якісно, ніж попереднього, що обумовило удари під час роботи і відповідно підвищення рівня шумової компоненти. Крім того, для свердловини № 588 значення ЛДЗ при ході вверх і ході вниз за результатами двох останніх експериментів (для часу напрацювання 4 та 5 місяців) також зменшуються з напрацюванням, але не більше ніж на 10-12%. Це можна пояснити незначною степінню залежності діагностичної ознаки на цих інтервалах від технічного стану ШГНУ, тобто ділянки ходу вверх та вниз є найменш інформативними з точки зору вибору діагностичних ознак. Найбільш вираженою є зміна ЛДЗ на ділянках сприйняття та зняття навантаження. Що стосується початку ходу вверх та вниз, то слід відмітити, що саме у ці моменти часто спостерігаються короткочасні імпульсні

Сприйняття навантаження: ЛДЗ = 1.4504



Початок ходу вверх: ЛДЗ = 1.2918



Хід вверх: ЛДЗ = 0.8275

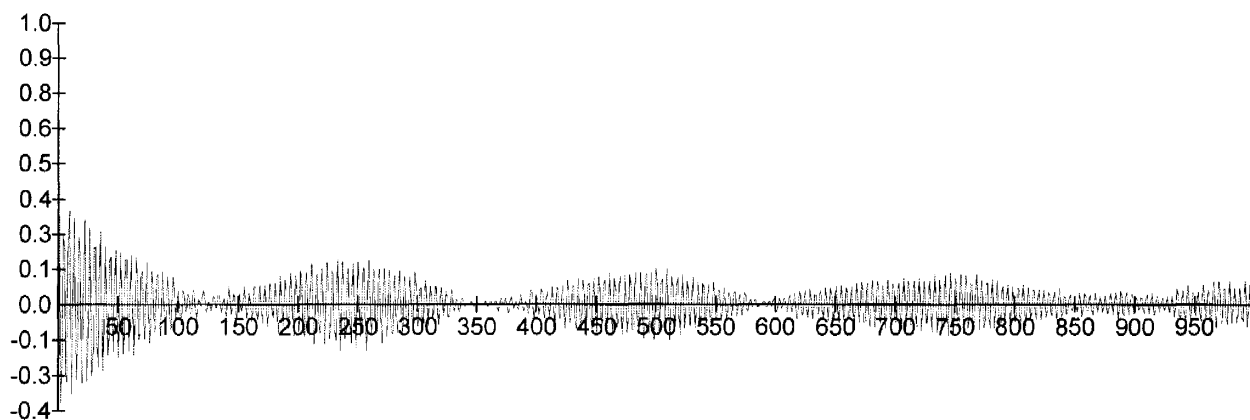
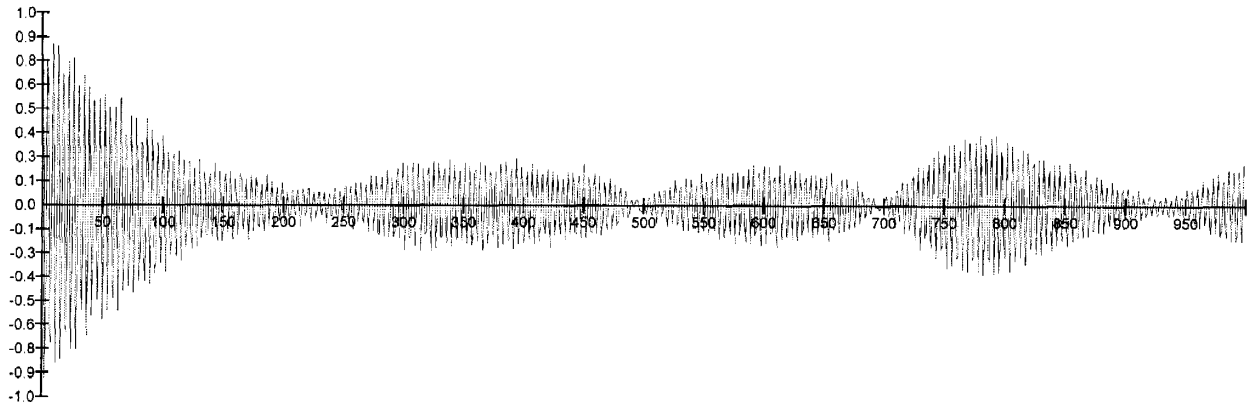
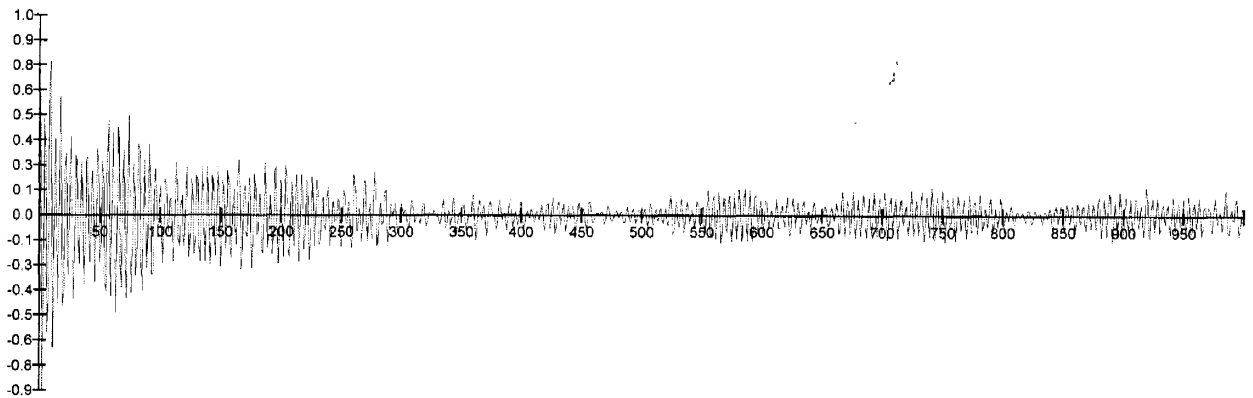


Рис. 4.23. АКФ і ДО для різних фаз періоду качання
(зношений насос)

Зняття навантаження: ЛДЗ = 2.0382



Початок ходу вниз: ЛДЗ = 3.2494



Хід вниз: ЛДЗ = 1.9167

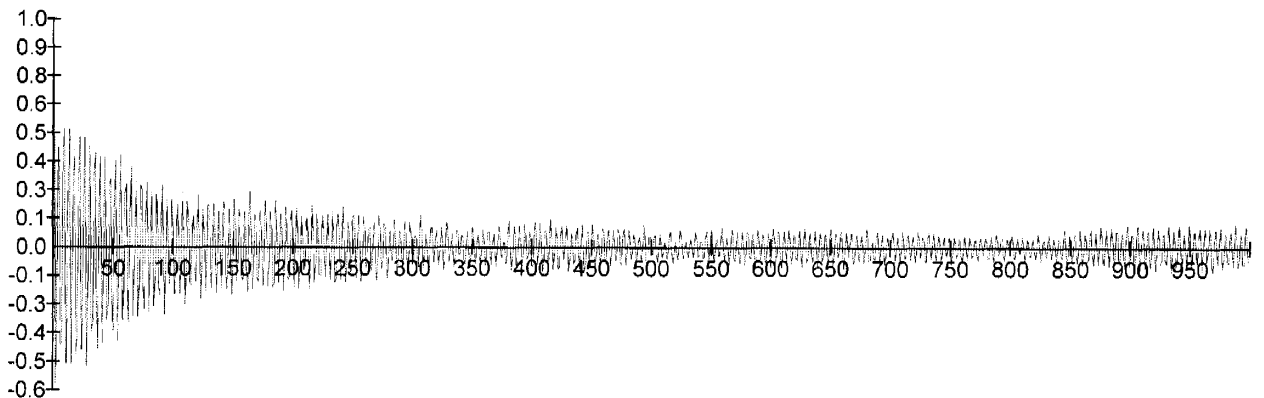


Рис. 4.23 (продовження). АКФ і ДО для різних фаз періоду качання
(зношений насос)

Таблиця 4.5

Значення ДО для насосів з різним періодом напрацювання

Напрацювання, міс.	Фаза періоду качання					
	Сприйняття навантаження	Початок ходу вверх	Хід вверх	Зняття навантаження	Початок ходу вниз	Хід вниз
Свердловина № 463						
8	1.4504	1.2918	0.8275	2.0908	3.2494	1.9167
1	1.4416	5.2938	7.27003	3.3368	7.1719	3.8226
3	1.9161	8.8987	8.2396	12.1847	33.9476	0.9961
Свердловина № 588						
3	4,579	10,278	8,6794	5,8849	14,6478	9,8722
4	6,0774	11,028	11,4355	8,2287	16,8237	22,4299
5	7,817	16,4091	10,416	18,9586	24,9846	20,9256
Свердловина № 260						
4	9,4911	6,587	3,3763	4,4702	6,0178	3,8292
6	18,5288	23,0089	8,6287	15,1774	22,5872	15,9854
Свердловина № 320						
6	18,1203	22,7987	6,7227	7,5524	21,7322	6,7244

викиди значної амплітуди (рис. 1 - 3 дод. Б1.1), які призводять до сильно вираженої нестационарності сигналу і відповідно до значної систематичної похибки при обчисленні АКФ, а, отже, і ЛДЗ. У таблицях 4.5 та 4.6 приведено результати обрахунку ЛДЗ для сигналу зі значною степінню нестационарності при різних довжинах та положеннях початку інтервалу. Порівняння результатів, наведених в таблицях 4.4, 4.5 та 4.6, свідчить, що в таких випадках варіації ДО, обумовлені вибором границь інтервалів, можуть бути порівнянними з варіаціями, обумовленими технічним станом обладнання. Тому при виборі ділянок, на яких буде обраховуватися ДО, необхідно враховувати степінь нестационарності вібросигналу.

Таблиця 4.6

Значення ДО в залежності від положення інтервалу

Номери початкового і кінцевого відліків	0...1000	1000... 2000	2000... 3000	3000... 4000	4000... 5000
Значення ДО	1.0326	1.4133	1.6607	2.1748	1.2826

Таблиця 4.7

Значення ДО в залежності від довжини інтервалу

Кількість відліків в інтервалі	5000	10000	30000	50000
Значення ДО	1.452	1.0269	1.2015	1.5234

Виходячи з усього вищесказаного, найбільш доцільно за діагностичну ознаку вибрати значення ЛДЗ під час сприйняття або зняття навантаження. З метою отримання єдиної діагностичної ознаки, яка враховує ці обидва показники прийняли відношення:

$$\Theta = \frac{\alpha_{зн}}{\alpha_{спр}},$$

де $\alpha_{зн}$ - значення ЛДЗ при знятті навантаження, $\alpha_{спр}$ - значення ЛДЗ при сприйнятті навантаження. Як видно з табл. 4.5 в усіх випадках спостерігається зростання значення вибраної ДО з часом напрацюванням, що свідчить про її інформативність з точки зору відображення технічного стану обладнання.

З метою визначення роботоздатності запропонованої ознаки у відповідності з програмою проведення експериментальних досліджень вібраційного стану ШГНУ “Надвірнанафтогаз” (Додаток Г1) проводили вимірювання КП штангової колони ШГНУ, які відрізнялися технічним станом (періодом напрацювання), глибиною спуску ГН, характеристиками нафтового пласту та режимами експлуатації установок, через визначені періоди експлуатації (як правило – через 1 місяць). Після відпрацювання ШГНУ, які досліджувалися, їх демонтували із свердловин і відправляли на ремонтну базу. В процесі розбирання ГН проводили детальний опис дефектів і вимірювали величину зносу елементів ГН. Всього було відпрацьовано ШГНУ по 26

свердловинах. Окремі результати наведені на рис. 4.24. Як видно з рис.4.24 із збільшенням періоду напрацювання, тобто з збільшенням величини зносу вузлів і елементів ГН, значення ДО зростає незалежно від глибини його спуску, числа качань та довжини ходу плунжера, а також від характеристик нафтового пласту. Оскільки в роботі розглядається питання контролю стану ШГНУ, то при встановленні відповідності граничного значення ДО величині зносу ГН визначався знос не окремих елементів і вузлів ГН, а проводилась його інтегральна оцінка в цілому по ГН.

Таким чином, контроль технічного стану ШГНУ можна проводити за діагностичною ознакою Θ , яка є відношенням ЛДЗ АКФ вібраційного сигналу на інтервалах сприйняття та зняття навантаження. Дана ознака адекватно відображає технічний стан установки і дозволяє оцінити степінь зносу її вузлів

Визначена діагностична ознака була покладена в основу розробленого методу контролю стану ШГНУ. Блок-схема програми реалізації алгоритму вібраційного контролю технічного стану ШГНУ на базі раніше розробленої програми Dia приведена на рис.4.2, сама програма в дод.Б1.1 Реалізація методу проводиться з використанням розробленої системи МІВС-01.

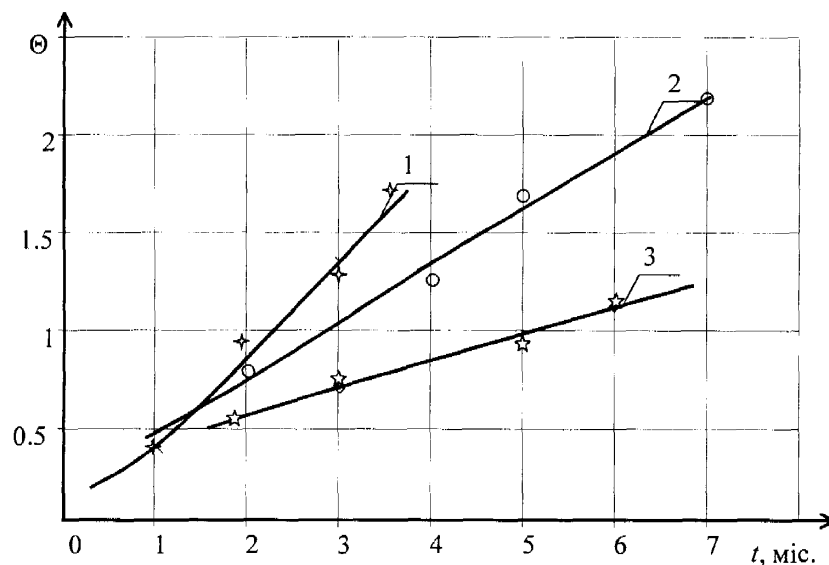


Рис. 4.24. Графік зміни ДО стану ШГНУ з часом напрацювання

- 1 – св.№463 (насос НС-38, L=2046м, S=2м, n=7), знос 58,4%;
- 2 – св.№588 (насос НС-32, L=2070м, S=2,5м, n=4), знос 69,8%;
- 3 – св.№260 (насос НС-32, L=1884м, S=3м, n=5), знос 34,3 %.

Апробація розробленого методу вібраційного контролю стану ШГНУ на нафтопромислах “Надвірнанафтогаз” показала ефективність методу, що дозволило прийняти його до впровадження на нафтопромислах НГВУ “Надвірнанафтогаз”, “Долинанафтогаз”, “Бориславнафтогаз”, “Чернігівнафтогаз” (Додаток Д).

4.6. Визначення умов роботоздатності ШГНУ і оцінювання степені її роботоздатності з врахуванням похибки вимірювання

Поняття "роботоздатність" містить деяку невизначеність, пов'язану з тим, що між абсолютною роботоздатністю, коли ДО має номінальне значення, і абсолютною роботоздатністю, коли ШГНУ нездатна функціонувати лежить кінцеве число проміжних станів, при яких установка здатна виконувати деяку роботу, але з пониженою продуктивністю, втратою надлишкових ресурсів, тощо (вплив газового фактору, низький динамічний рівень і інш.). Не завжди очевидна межа між роботоздатним і нероботоздатним станами. Не очевидно також, при яких значеннях ДО ШГНУ повинно вважатися нероботоздатною і демонтуватися з свердловини для подальшого ремонту.

Область роботоздатності ШГНУ визначається як область зміни ДО, обмежена її допустимими значеннями, в якій установка роботоздатна.

Допустимі нижні і верхні значення ДО (рис.4.25) для різних об'єктів визначають з аналізу діагностичної моделі, або користуючись наближеними розрахунками:

$$\Theta_{\text{доп}} = \Theta_{\text{гр}} \pm \Delta\Theta; \quad \Theta_{\text{доп}} = \Theta_{\text{ном}} \cdot K,$$

де $\Delta\Theta$ – запас відносного граничного значення ДО $\Theta_{\text{гр}}$;

$\Theta_{\text{ном}}$ – номінальне значення ДО;

K – коефіцієнт запаса.

Стосовно $\Theta_{\text{ном}}$, то в кожному конкретному випадку це буде значення Θ , отримане в початковий момент експлуатації ШГНУ.

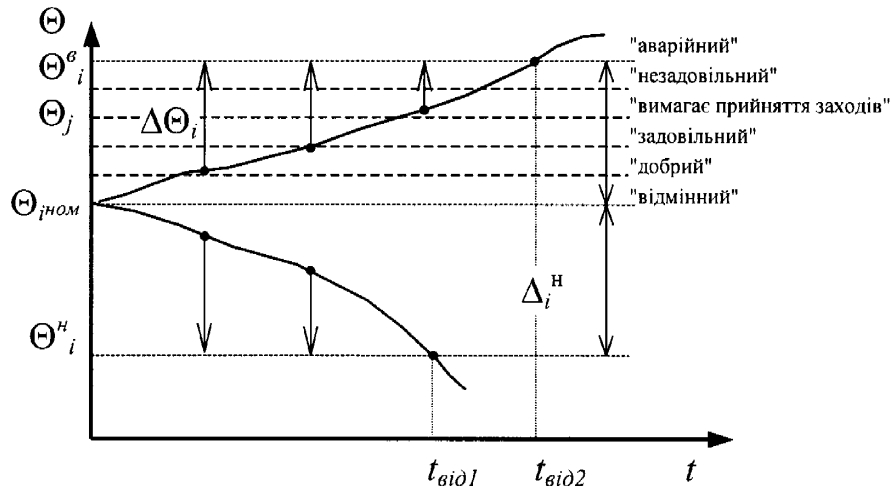


Рис. 4.25. Графік зміни запасу роботоздатності

Для визначення залишкового ресурсу ШГНУ по вібраційному стану необхідно знайти на скільки збільшується Θ при відпрацюванні установкою ресурсу, тобто визначити її граничне значення $\Theta_{гр}$. Це може бути зроблено лише на основі накопичення статистичних даних за результатом експлуатації ШГНУ, оснащених необхідними технічними засобами для реалізації розробленого алгоритму, що вимагає значного часу (1.0-1.5 років).

При відсутності статистичних даних при контролі стану об'єктів за їх вібраційним станом, задаються граничним збільшенням рівня вібрації на 6.0 Дб. Ця величина в зарубіжних стандартах [95, 97] характеризує різницю між сусідніми класами технічного стану механізмів. Наприклад, стан ШГНУ в області роботоздатності від $\Theta_{ном}$ до $\Theta_{гр}$ можна розбити на 5 станів (класів) "відмінний", "добрий", "задовільний", "потребує прийняття заходів", "незадовільний", "аварійний", де шостий стан відповідає області нероботоздатності установки. При подвоєнні рівня вібрації об'єкта рекомендується проводити його ремонт [98]. Базуючись на вказаних рекомендаціях можна для кожної ШГНУ, вимірюючи $\Theta_{ном}$ на початку її експлуатації, розрахувати $\Theta_{гр}$. Однак при експлуатації об'єктів різноманітної природи не проводиться їх відпрацювання до граничного значення ДО через можливість виникнення аварійних ситуацій. Для попередження таких ситуацій вводиться запас роботоздатності. З рис.4.25. видно, що чим далі стан ШГНУ від

границі області роботоздатності нижньої Θ_i^H чи верхньої Θ_i^B , тим менша ймовірність того, що установка втратить роботоздатність в найближчий час. Віддалення значення Θ від границі області роботоздатності збільшує запас її роботоздатності і навпаки. Запас роботоздатності $\Delta\Theta_i$ через поточне значення Θ_i і граничне (нижнє чи верхнє – для конкретного випадку це верхнє значення) визначається як $\Delta\Theta_i = |\Theta_i - \Theta_i^{гp}|$.

Якщо область роботоздатності розбити на 5 станів (класів), про які йшла мова вище, то умова належності значення Θ до j -го стану, наприклад, "задовільний", запишеться у вигляді:

$$\Theta_i \leq \Delta\Theta_{ij} = |\Theta_{ij}^B - \Theta_{ij}^H|,$$

де Θ_{ij}^B і Θ_{ij}^H – верхня і нижня границі j -го стану. Таким чином, при контролі технічного стану ШГНУ можна ставити діагноз типу "відмінно", "добре", "задовільно" і т. д., у відповідності з вище прийнятими станами.

Виходячи з результатів експериментальних досліджень для умов НГВУ "Надвірнанафтогаз" при використанні глибинних насосів НС-32 за критичне значення ДО слід прийняти $\Theta_{кр}=2.6$, а експлуатувати ШГНУ до періоду часу, при якому ДО буде становити $\Theta=2.1\div 2.2$.

Враховуючи, що розмірності і допустимі відхилення Θ можуть бути різними при технічній реалізації кількісної оцінки зміни роботоздатності, зручно користуватися поняттям "ступінь роботоздатності", яка визначається за формулою:

$$C_i(t_v) = \frac{|\Theta_i(t_v) - \Theta_i^{гp}|}{\Delta\Theta_i}, \quad (4.5)$$

де $\Delta\Theta_i$ – допуск (область роботоздатності), $t_v = t - R$, де t – час, R – режим роботи.

В цьому випадку ступінь роботоздатності змінюється в межах $[1,0]$. При перемноженні на 100 вона буде оцінюватися у відсотках (рис.4.26).

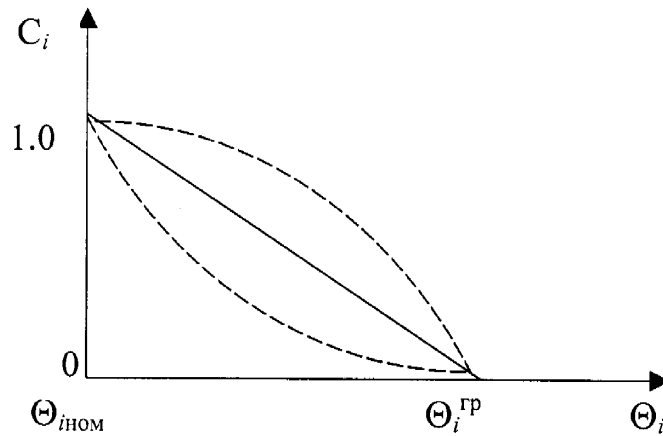


Рис. 4.26

Залежність (4.5) може бути використана при створенні технічних засобів для контролю степені роботоздатності. Однак, такий підхід можна віднести до точкового, оскільки він не враховує похибку вимірювання ε .

В дійсності значення вимірної ДО може знаходитися в деякому інтервалі

$$[\xi_i(t_v)] = [\xi_i(t_v) \pm \varepsilon_i] = [\inf \xi_i(t_v), \sup \xi_i(t_v)]$$

Можливі варіанти розташування результатів виміру в області роботоздатності $[\Theta_i^H, \Theta_i^B]$ подані на рис 4.27.

Сформулюємо загальні вимоги, яким повинна відповідати степінь роботоздатності об'єкта діагностування по окремій ДО.

1. Степінь роботоздатності повинна приймати значення з області $[0, 1]$.
2. Максимальне значення $C(t_v) = 1$ степінь роботоздатності повинна приймати при значенні ДО, рівному номінальному, тобто $\Theta_i(t_v) = \Theta_{ном}$.
3. Мінімальне значення степеня роботоздатності $C(t_v) = 0$ повинно відповідати значенню ДО рівному одному з граничних значень (верхньому або нижньому) відповідно $\Theta_i(t_v) = \Theta_i^B$ або $\Theta_i(t_v) = \Theta_i^H$.
4. Значення степеня роботоздатності повинні залежати від важливості ДО, що визначається нормуванням Ri до $\max\{Ri\}$, і від швидкості зміни ДО.
5. Зміни степеня роботоздатності повинні зберігати фізичний зміст процесу зміни ДО, що необхідно для зручності роботи людини-оператора

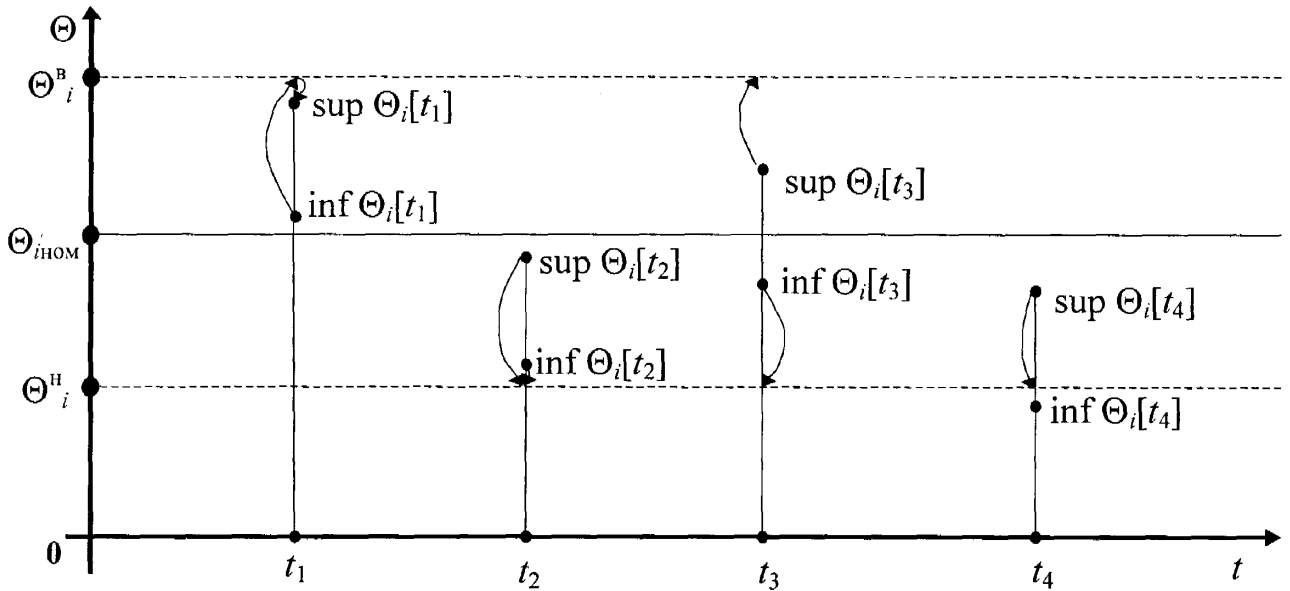


Рис. 4.27. Можливі варіанти розташування результатів вимірювань в області роботоздатності $[\Theta^B, \Theta^H]$.

системи діагностування. Під цим розуміється використання близького до лінійного перетворення відносного наближення ДО у степені роботоздатності.

З врахуванням викладеного визначимо степінь роботоздатності як значення функції, що задовольняє перерахованим вимогам і зв'язує значення відносного відхилення, важливості і швидкості зміни ДО:

$$C_i(t_v) = [\delta \Theta_i(t_v)]^{\text{пр}(t_v)}, \quad (4.6)$$

де $[\delta \Theta_i(t_v)] = [\inf[\delta \Theta_i(t_v)], \sup[\delta \Theta_i(t_v)]]$ – інтервал відносного наближення значення ДО до меж області роботоздатності; $\delta_i(t_v)$ – показник, що враховує як швидкість зміни ДО, так і його важливість у сукупності ДО.

Визначимо межі цього інтервалу. Нижня $[\inf[\delta \Theta_i(t_v)]]$ визначається по формулах:

$$[\inf_1[\delta \Theta_i(t_v)]] = \frac{\Theta_i^B - \sup[d_i(t_v)]}{\Theta_i^B - \Theta_{i\text{НОМ}}}, \quad (4.7)$$

якщо $[d_i(t_v)] \cap [\Theta_{i\text{НОМ}}, \Theta_i^B] = [d_i](t_v), \Theta_{i\text{НОМ}} \notin [d_i](t_v)$

$$[\inf_2[\delta \Theta_i(t_v)]] = \frac{\inf[d_i(t_v)] - \Theta_i^H}{\Theta_i^B - \Theta_{i\text{НОМ}}}, \quad (4.8)$$

$$[d_i(t_v)] \cap [\Theta_i^H, \Theta_{i\text{НОМ}}] = [d_i](t_v), \Theta_{i\text{НОМ}} \notin [d_i](t_v)$$

$$[\inf_3[\delta \Theta_i(t_v)]=0 \quad (4.9)$$

якщо $\Theta_i^b \cup \Theta_i^h \in [d_i(t_v)].$

Верхня $\sup[\delta \Theta_i(t_v)]$ визначається по формулах:

$$[\sup_1[\delta \Theta_i(t_v)]] = \frac{\Theta_i^b - \inf[d_i(t_v)]}{\Theta_i^b - \Theta_{iном}}, \quad (4.10)$$

якщо $[d_i(t_v)] \cap [\Theta_{iном}, \Theta_i^b] = [d_i(t_v)], \Theta_{iном} \notin [d_i(t_v)]$

$$[\sup_2[\delta \Theta_i(t_v)]] = \frac{\sup[d_i(t_v)] - \Theta_i^h}{\Theta_i^b - \Theta_{iном}}, \quad (4.11)$$

якщо $[d_i(t_v)] \cap [\Theta_i^h, \Theta_{iном}] = [d_i(t_v)], \Theta_{iном} \notin [d_i(t_v)]$

$$[\inf_3[\delta \Theta_i(t_v)]=0 \quad (4.12)$$

якщо $\Theta_{iном} \cap \Theta_i^h \in [d_i(t_v)].$

На рис.4.27 відзначеними дугами показані відстані до меж області роботоздатності, які використовуються при розрахунку $\inf[\delta \Theta_i(t_v)]$ по виразах (4.7-4.9), невідміченими при розрахунку $\sup[\delta \Theta_i(t_v)]$ по виразах (4.10-4.11).

Величину $\sup \delta(t_v)$ можна визначити наступним чином :

$$\delta(t_v) = [\gamma_i - \Delta \Theta_i^*(t_v) + 1]^{1/\Omega}, \Omega = 2,3,4 \quad (4.13)$$

де $\gamma_i = R_i / \max[R_i]$ коефіцієнт важливості ДО,

$\Delta \Theta_i^*(t_v) = \overline{\Theta_i^*}(t_v) - \overline{\Theta_i^*}(t_v - 1)$ – нормована різниця першого порядку, що відбиває швидкість зміни ДО.

При визначенні степеня роботоздатності розглядаються тільки параметри, що безперервно змінюються. Критерієм вибору Ω є метод експертних оцінок [99], що дозволяє одержати Ω при наявності мінімальної апріорної інформації.

Вимірні значення нормуються стосовно відповідної області роботоздатності,

$$\overline{\Theta_i^*}(t_v) = \left| \frac{\Theta_i^*(t_v) - \Theta_i^{гп}}{\Theta_{iном} - \Theta_i^{гп}} \right|$$

де $\Theta_i^{гп} = \Theta_i^b$, якщо $\Theta_i^*(t_v) \in [\Theta_{iном}, \Theta_i^b]$,

$\Theta_i^{гп} = \Theta_i^h$, якщо $\Theta_i^*(t_v) \in [\Theta_i^h, \Theta_{iном}]$.

Збільшення підкореневого виразу (4.13) на одиницю виконано з метою зробити розрахунок степеня роботоздатності гарантованим, тому що в цьому випадку графік залежності (4.6) розташовується нижче графіка $C_i(t_i)=f[\delta \Theta_i(t_v)]$ для $\forall[\Theta_i(t_i) \in [0,1]]$ і $\inf C_i(t_i) \leq \inf [\delta \Theta_i(t_v)]$.

4.7 Оцінка достовірності діагностування

При діагностуванні ШГНУ в процесі експлуатації виникає необхідність отримання достовірного діагнозу про її стан, що дозволяє прийняти правильне рішення про доцільність вибраного режиму експлуатації ШГНУ та застосувати необхідні засоби для її довготривалого безвідмовного функціонування. Оцінимо вірогідність правильного рішення використовуючи теорію ймовірності. Оскільки система діагностування призначена для оцінки технічного стану ОД, то якість діагностування в першу чергу визначається ймовірністю правильного діагностування D [78]. Ймовірність отримання правильного діагнозу залежить від помилок, які допускають при діагностуванні:

$$D = 1 - \sum_{\substack{l=1 \\ i \neq j}}^m P_{ij},$$

де P_{ij} – ймовірність помилок діагностування, тобто ймовірність того, що об'єкт знаходиться в i -му стані, а в результаті діагностування він визначається в j -му стані;

$m = 2$ число станів об'єкту діагностування;

$i = 1(j=2)$ – об'єкт роботоздатний, оцінюється нероботоздатним;

$j = 2(j=1)$ – об'єкт нероботоздатний, оцінюється роботоздатним;

$l = 1$ – технічні засоби (ТЗ) роботоздатні, тобто правильно оцінюють стан ОД;

$l = 2$ – ТЗ нероботоздатні.

Значення ймовірності помилок при діагностуванні залежить від стану, в якому знаходяться засоби діагностування, і обчислюється за формулою:

$$P_{ij} = \sum_{l=1}^k P_l^T \cdot P_{jl} \cdot P_{ijl},$$

$k = 2$ число станів засобів діагностування;

$$P_{12} = P_1^T \cdot P_{21} \cdot P_{121} + P_2^T \cdot P_{22} \cdot P_{122};$$

$$P_{21} = P_1^T \cdot P_{11} \cdot P_{211} + P_2^T \cdot P_{12} \cdot P_{212};$$

P_1^T – апріорна ймовірність того, що ТЗ знаходяться в роботоздатному стані (ймовірність безвідмовної роботи ТЗ);

P_2^T – апріорна ймовірність того, що ТЗ знаходяться в нероботоздатному стані (ймовірність відмови ТЗ);

P_{21} – умовна ймовірність отримання результату “ОД-нероботоздатний” при умові, що ТЗ роботоздатні;

P_{22} – умовна ймовірність отримання результату “ОД-нероботоздатний” при умові, що ТЗ нероботоздатні;

P_{11} – умовна ймовірність отримання результату “ОД-роботоздатний” при умові, що ТЗ роботоздатні;

P_{12} – умовна ймовірність отримання результату “ОД-роботоздатний” при умові, що ТЗ нероботоздатні;

P_{121} – умовна ймовірність знаходження ОД в роботоздатному стані при умові отримання результату “ОД-нероботоздатний” і ТЗ роботоздатні;

P_{122} – умовна ймовірність знаходження ОД в роботоздатному стані при умові отримання результату “ОД-нероботоздатний” і ТЗ нероботоздатні;

P_{211} – умовна ймовірність знаходження ОД в нероботоздатному стані при умові отримання результату “ОД-роботоздатний” і ТЗ роботоздатні;

P_{212} – умовна ймовірність знаходження ОД в нероботоздатному стані при умові отримання результату “ОД-роботоздатний” і ТЗ нероботоздатні.

Розглянемо всі можливі випадки проведення діагностування ШГНУ (рис. 4.28).

Помилка діагностування може бути в чотирьох випадках, а саме – 2, 3, 6, 7 (рис.4.28).

Ймовірність безвідмовної роботи ТЗ, тобто ймовірність того, що при певних умовах експлуатації і в межах заданого напрацювання відмови не буде. Результати обробки статистичних даних по відмовах ШГНУ отриманих в 1.1, показали, що ймовірність її безвідмовної роботи описується експоненціальним законом розподілу. Для цього закону розподілу інтенсивність відмови λ на періоді нормальної експлуатації (без врахування стану приробки та катастрофічного зносу) є постійною величиною:

$$P_1^T = e^{-\lambda t},$$

де $\lambda = \frac{1}{T}$, T – середнє напрацювання до відмови (250 год),

тоді $\lambda=0,004$ 1/год.

t – період діагностування ТЗ ; $t=1,5$ год (52 хв. – встановлення і настройка системи, 38 хв. – обробка даних).

$$P_1^T = 0,942$$

Ймовірність відмови ТЗ:

$$P_2^T = 1 - P_1^T = 0,058.$$

Ймовірність безвідмовної роботи ШГНУ:

$$P_{o1} = e^{-\lambda t},$$

де $\lambda = \frac{1}{T}$, T – міжремонтний період (180 діб = 4320 год),

тоді $\lambda=0,00023$ 1/год.

t – час між діагностуваннями; $t=150$ год.

ШГНУ – роботоздатна		ШГНУ – нероботоздана		ТЗ – робото- здатні
діагноз- ШГНУ ро- ботоздатна (1)	діагноз- ШГНУ неробото- здатна (2)	діагноз- ШГНУ ро- ботоздатна (3)	діагноз- ШГНУ неробото- здатна (4)	
діагноз- ШГНУ ро- ботоздатна (5)	діагноз- ШГНУ неробото- здатна (6)	діагноз- ШГНУ роботоздат- на (7)	діагноз- ШГНУ неробото- здатна (8)	ТЗ – неробо- тоздатні

Рис.4.28. Можливі випадки проведення діагностування ШГНУ

$$P_{o1}=0,966.$$

Ймовірність відмови ШГНУ:

$$P_{o2}=0,034.$$

$$P_{12} = P^T_1 \cdot P_{21} \cdot P_{121} + P^T_2 \cdot P_{22} \cdot P_{122};$$

$$P_{21} = P^T_1 \cdot P_{11} \cdot P_{211} + P^T_2 \cdot P_{12} \cdot P_{212};$$

Умовні ймовірності при умові, що об'єкти незалежні:

$$P_{21} = \frac{P(2)P(1)}{P(1)} = P(2) - \text{дорівнює ймовірності отримання результату "ОД$$

– нероботоздатний".

$$P_{22'} = \frac{P(2)P(2')}{P(2')} = P(2) - \text{дорівнює ймовірності отримання результату$$

"ОД – нероботоздатний".

$$P_{11'} = \frac{P(1)P(1')}{P(1')} = P(1) - \text{дорівнює ймовірності отримання результату "ОД$$

– роботоздатний".

$$P_{12} = \frac{P(1)P(2)}{P(1)} = P(2) - \text{дорівнює ймовірності отримання результату "ОД$$

– роботоздатний".

$$P_{121} = \frac{P(1)P(2)P(1)}{P(2)P(1)} = P(1) - \text{дорівнює ймовірності того, що об'єкт$$

роботоздатний.

$$P_{121} = \frac{P(1)P(2)P(1)}{P(2)P(1)} = P(1) - \text{дорівнює ймовірності того, що об'єкт$$

роботоздатний.

$$P_{122} = \frac{P(1)P(2)P(2)}{P(2)P(2)} = P(1) - \text{дорівнює ймовірності того, що об'єкт$$

роботоздатний;

$$P_{211} = \frac{P(2)P(1)P(1)}{P(1)P(1)} = P(2) - \text{дорівнює ймовірності того, що об'єкт}$$

нероботоздатний;

$$P_{212} = \frac{P(2)P(1)P(2)}{P(1)P(2)} = P(2) - \text{дорівнює ймовірності того, що об'єкт}$$

нероботоздатний.

$$P_{12} = P^T_1 \cdot P_{21} \cdot P_{121} + P^T_2 \cdot P_{22} \cdot P_{122};$$

$$P_{21} = P^T_1 \cdot P_{11} \cdot P_{211} + P^T_2 \cdot P_{12} \cdot P_{212};$$

$$P_{12} = 0,942 \cdot 0,034 \cdot 0,966 + 0,058 \cdot 0,5 \cdot 0,966 = 0,0589$$

$$P_{21} = 0,942 \cdot 0,95 \cdot 0,034 + 0,058 \cdot 0,5 \cdot 0,034 = 0,0319$$

Тоді

$$P_{в.к.} = 1 - 0,097 = 0,903.$$

Таким чином, розроблені технічні засоби контролю роботоздатності ШГНУ відповідають всім технічним вимогам і забезпечують високу вірогідність контролю стану ШГНУ на основі розробленого вібраційного методу.

Результати роботи, зокрема методика визначення ДО стану ШГНУ, методика визначення моменту часу сприйняття навантаження за максимальним значенням взаємкореляційної функції між реальною та еталонними наземними динамограмами, визначення умов роботоздатності з врахуванням похибки вимірювання методика розрахунку вірогідності контролю стану ШГНУ впроваджені в навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін “Основи теорії надійності та технічної діагностики” і “Проектування систем діагностування”, які читаються для студентів спеціальності 7.0914.01 – “Системи управління і автоматики”(Додаток Д).

Висновки до розділу

1. На основі дослідження вібраційного процесу (віброшвидкості повздовжніх коливань) в штанговій колоні, обумовленою як технічним станом, так і характером роботи ШГНУ, вперше встановлено:

- процес відноситься до періодично-нестационарних, оскільки його статистичні характеристики (математичне очікування, дисперсія) змінюються на протязі періоду качань;

- в інтервалах часу, що відповідають процесам сприйняття і зняття навантаження (включаючи час початку ходу вверх і вниз) у вібраційному процесі появляються додаткові складові, що характеризують інерційні процеси в ШК, пов'язані із зміною технічного стану ШГНУ;

- спектр віброшвидкості поздовжніх коливань ШК за весь період качань, в загальному, відображає зміну технічного стану ШГНУ, однак не дозволяє виявити конкретні частотні смуги і амплітуди їх спектральних складових (діагностичні ознаки), та загальні закономірності їх зміни, обумовлені технічним станом установки, що вимагає вирішення задачі вибору інформативних участків періоду качання;

- вібростан вузлів ВК, за винятком привідного електродвигуна, не здійснює вплив на вібростан ШК.

2. Розроблена методика, яка дозволяє на основі обробки реальної тензограми зусилля в ШК (реальної НД) і порівняння її з еталонними за максимальним значенням взаємкореляційної функції точно визначити момент часу початку сприйняття навантаження. Вказане дозволяє не лише відмовитися від давача переміщень ШК, призначеного для фіксації моментів її ходу вверх і вниз, але й діагностувати дефекти ШГНУ при наявності достатньо великої кількості їх еталонів.

3. На основі моделювання коливних процесів в ШК:

- встановлені закономірності зміни коливних процесів при зміні її довжини і режиму роботи ШГНУ, та їх вплив на характер зміни механічних напружень в ШК. Останнє дозволяє оцінити довговічність ШК за відомою методикою циклічного навантаження [74];

– встановлено, що основним параметром, який впливає на зміну коливних процесів в ШК є її довжина.

4. Співставленням результатів моделювання коливних процесів в ШК з експериментальними даними підтверджена адекватність створеної математичної моделі реальним процесам в ШГНУ.

5. Експериментально обгрунтовано вибір діагностичної ознаки технічного стану ШГНУ – відношення логарифмічного декременту затухання АКФ на інтервалах зняття і сприйняття навантаження ШК, яка закладена в основу методу вібраційного контролю стану ШГНУ.

6. Визначені умови роботоздатності ШГНУ з використанням вибраної діагностичної ознаки і проведено оцінювання її степені роботоздатності з врахуванням похибки вимірювання.

7. Розроблена з використанням мови Borland C++ Builder 3 програма Dia реалізації методу віброконтролю стану ШГНУ, яка дозволяє оперативно в реальному режимі часу проводити обробку експериментальних даних.

8. Проведено розрахунок вірогідності контролю стану ШГНУ, який становить $P_{в.к.} = 0.903$, що вказує на високу ефективність розробленого вібраційного методу контролю ШГНУ.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. На підставі узагальнення статистичних даних по аварійності ШГНУ на нафтопромислах Західної України визначені найбільш типові відмови та причини їх виникнення, обумовлені, в основному, так званим "динамічним режимом" свердловин, для яких загальноприйнятий динамометричний метод діагностування технічного стану ШГНУ через значну похибку є непридатним, та обґрунтована необхідність розробки вібраційного методу контролю.

2. На основі аналізу ШГНУ з точки зору об'єкту контролю, встановлено, що вона є неконтролепридатною, складною динамічною протяжливою системою з розподіленими параметрами і запропоновано при її дослідженні використовувати основні положення віброакустичної діагностики.

3. Вперше розроблено логічну і математичну діагностичні моделі ШГНУ, які дозволяють:

- встановити і класифікувати дефекти та визначити напрямки їх розвитку і взаємозв'язок з іншими елементами насосної установки;

- описати формування та розвиток коливних процесів в ШК при різних типах тертя, що супроводжує роботу ШГНУ;

4. З урахуванням особливостей ШГНУ розроблено:

- методичне забезпечення, яке дозволяє здійснити весь комплекс експериментальних досліджень вібростану ШГНУ;

- технічне забезпечення – мікропроцесорну інформаційно-обчислювальну систему, яка дозволяє проводити збір і обробку результатів експериментів в реальному масштабі часу і забезпечує їх вірогідність, та вимірювальні блоки, конструкція одного з них дозволяє оперативно встановлювати його на полірованому штоці, а оригінальна конструкція другого з магнітною системою – в будь-якому місці на корпусах вузлів ВК і проводити вимірювання параметрів вібрацій з заданою похибкою 10% та пружних деформацій – 0,8%;

– програмне забезпечення – з використанням пакетів прикладних програм, які забезпечують роботу системи, оперативну обробку; прилад і представлення даних експериментів у вигляді графіків.

5. За результатами експериментальних досліджень вперше встановлено:

– коливний процес в ШК відноситься до періодично-нестационарних (математичне очікування і дисперсія змінюються на протязі періоду качання);

– спектр віброшвидкості поздовжніх коливань ШК за період качання хоча в загальному і відображає зміну технічного стану, однак не дозволяє виявити конкретні частотні смуги і амплітуди їх спектральних складових (діагностичні ознаки), за допомогою яких можна контролювати технічний стан ШГНУ;

– вібраційний стан вузлів ВК не впливає на загальний вібростан ШК, за винятком вібростану привідного двигуна, вплив якого можна врахувати.

6. За результатами моделювання коливних процесів в ШК встановлені основні закономірності їх зміни, обумовлені параметрами і режимом роботи ШГНУ, а проведене порівняння спектрограм віброшвидкості поздовжніх коливань, отриманих експериментальним шляхом, з розрахунковими, показало адекватність створеної математичної моделі ШГНУ.

7. Розроблена методика визначення моменту часу сприйняття навантаження за максимальним значенням взаємкореляційної функції між реальною і еталонними НД, яка дозволяє відмовитися від додаткового давача переміщень ШК.

8. Експериментально обґрунтовано вибір діагностичної ознаки – відношення логарифмічного декременту затухання АКФ на інтервалах зняття і сприйняття навантаження ШК, на основі якої запропоновано метод вібраційного контролю технічного стану ШГНУ, визначені умови її роботоздатності та проведено оцінювання степені роботоздатності з врахуванням похибки вимірювання ДО.

9. Проведена промислова апробація розробленого методу вібраційного контролю стану ШГНУ на нафтопромислах НГВУ "Надвірнанафтогаз", який підтвердив свою ефективність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Калявин В.П., Мозгалеvский А.В., Галка В.Л. Надежность и техническая диагностика судового электрооборудования и автоматики: Учебник.– Элмор, 1996 – 296 с.: ил.
2. Анализ причины аварийности установок УЭЦН и перспективы развития метода их технической диагностики /Замиховский Л.М., Задков В.М., Иванов В.Н. и др.// Методы и средства виброакустической диагностики. - Ивано-Франковск, 1990.- с.18-26.
3. Замиховский Л.М., Гринив П.П., Савюк Л.А. ;Условия возникновения и развития неисправностей УЭЦН.// Методы и средства технической диагностики /Фирма "Контакт".- Ивано-Франковск, 1992 - с.19-32.
4. Бандура В.В., Заміховський Л.М. Умови виникнення і розвитку дефектів глибинно-насосної штангової установки./ Івано-Франк.ін-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 1996.– 15с. – Деп. в УкрІНТЕІ N10 Ук96.
5. Муравьев И.М., Базлов М.Н. и др. Технология и техника добычи нефти. М.: "Недра", 1971
6. Адонин А.Н. Добыча нефти штанговыми насосами. М.: "Недра",1979.
7. Молчанов А.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы. М.: "Недра", 1983.
8. Щуров В.И. Технология и техника добычи нефти. М.: "Недра", 1983.
9. Бухаленко Е.И. Монтаж, обслуживание и ремонт нефтепромышленного оборудования. М.: "Недра", 1985.
10. Замиховский Л.М. Логическая модель погружной электроустановки для добычи нефти // Вопросы оборонной техники, ДСП. Сер.3. Вып.6(265). –М.: НТЦ "Информтехника", 1994 – С.21-25.

11. Степанова И.С. Определение потерь напора в клапанах глубинных насосов. – Нефтепромысловое дело, 1969, №1.
12. Сердюк В.И., Адонин А.Н. Исследование силы трения в плунжерной паре штангового насоса. – Машины и нефтяное оборудование, 1972, №7.
13. И.Г.Белов. Исследование работы глубинных насосов динамографом. - М.: Гостехиздат, 1960.- 126 с.
14. Акульшин А.И., Бойко В.С. и др. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. М.: "Недра", 1989.
15. Бандура В.В. Сучасний стан методів діагностування ГНШУ. Деп. в ІНТІ України, 18с., №358 – Ук.-97, 6.05.97.
16. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Автоматический контроль и диагностика скважинных штанговых насосных установок.- М.: Недра, 1988. -232 с.
17. Алиев Т.М., Костянян В.Р., Тер-Хачатуров А.А. Об одном подходе к распознаванию неисправностей глубинного насоса по динамограмме, инвариантной к пространственному положению осей //Изв.вузов.Нефть и газ. - 1983. - N8.- С.60-67.
18. Касьянов В.М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов/ТНТО: Машины и оборудование нефтегаз.пром. - /ВНИИОЭНГ, 1973. - С.95.
19. Чарный И.А. Динамический расчет штанг глубоких нефтяных насосов. //Изв. АН СССР, ОТН. - 1949. - т.6.
20. Вирновский А.С. Способ вычисления величин, характеризующих работу глубиннонасосной установки, по данным наземных измерений. НХ N 5, 1952. - С.30-36.
21. Алиев Т.М., Рыскин Л.М., Тер-Хачатуров А.А. Об одном методе определения состояния глубиннонасосного штангового насоса //Изв.вузов.Нефть и газ. - 1980.- N11.-С.81-85.

22. Методы и средства контроля технического состояния глубиннонасосного оборудования /Алиев Т.М., Надеин В.А., Рыскин Л.М., Тер-Хачатуров А.А. - М., 1981. - 57 с. - (Обз.инф./ ВНИИОЭНГ. Нефт. пром. Сер."Автоматиз. и телемех.нефт.пром.").
23. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. - М.: - Машиностроение, 1987. - 288 с.
24. Composite catalog of Oil Well Equipment. Gulf Publishing/ Houston.– 1990-91.
25. Gibbs S.G., Neelen A.B. Wellsite diagnosis of pumping problems using minicomputers. – Journal of Petroleum Technology, 1973, № 11, p. 1319-1323.
26. Hunter J.D., Hubbell R.S., Reiter C.R. Denver unit well sar – Veillance and pump – off control system. – Journal of Petroleum Technology, 1978, vol.30.,№9, p.1319-1326.
27. Neely A.B. Pump – off control system boots production cuts costs. – World Oil, 1979, vol. 188, № 7, p. 129–132.
28. Замиховський Л.М., Гаркот В.С., Маряк С.Г. Підвищення експлуатаційної надійності електроустановок для видобутку нафти.//Наук.-вир.збірн."Нафт.і газов.пром-ть".№1, – Київ, 1994.
29. Замиховский Л.М., Зикратый С.В., Савюк Л.А. Исследование вибросостояния системы “УЭЦН-КНКТ” в промысловых условиях.// Деп.в ГНТБ Украины 01.06.95, №1370-Ук95.
30. Замиховський Л.М., Зікратий С.В. Система контролю технічного стану установок ЕВН в процесі експлуатації// Тез.доп. III Міжнарод. наук.-техн. конф. “Контроль і управління в технічних системах” – Вінниця, 1995.
31. Замиховський Л.М. Перспективы развития методов технической диагностики установок ЭЦН и снижение уровня их вибрации.// Деп.в ГНТБ Украины 20.12.96, №126-Ук96.

32. Замиховский Л.М., Калявин В.П. Техническая диагностика погружных электроустановок для добычи нефти.– Снятын: Прут Принт,1999–234с.
33. Leutert Precision instruments oil industry equipment. Каталог фирмы “Friedrich Leutert GmbH & Co”, 1996.
34. Оборудование и программное обеспечение для управления и контроля скважин. Каталог фирмы “Barker SAC” Printed in USA, 8800-5M-2193.,1996.
35. Экспериментальное исследование вибрации ШСН. //Р.А.Максутов, Ю.А.Махмудов, И.М.Алиев, П.А.Тагиев. - М.: 1986.(Обз.инф./ВНИИОЭНГ. Нефт. пром. Сер."Машины и нефтяное оборудование", вып.12).
36. Гейнрих Ришмюллер. Добыча нефти глубинными штанговыми насосами. Шеллер-Блекман ГмбХ, г.Терниц, Австрия, 1988г., 150с.
37. ГОСТ 23563-70. Техническая диагностика. Контролепригодность объектов диагностирования. Правила обеспечения.– М.: Изд-во стандартов, 1979.
38. Багиров М.М. Определение закона движения и усилий в колонне штанг при наличии амортизатора в точке подвеса колонны// Изв.вузов. Нефть и газ.– 1983, – №8.– с.75-77.
39. Багиров М.М. Определение критического числа качаний колонны насосных штанг // Азербайджанское нефтяное хозяйство.– 1987.–№1.– с.53-54.
40. Вирновский А.С. Теория и практика глубиннонасосной добычи нефти. – М.: Недра, 1971.–192с.
41. Кадиров Н.Б., Бабаков А.А. Определение силы, действующей на точку подвеса колонны штанг глубиннонасосной установи // Азербайджанское нефтяное хозяйство.– 1985.–№12.– с.15-18.

42. Кадиров Н.Б. К вопросу исследования вынужденного колебательного движения колонны штанг при работе глубинного насоса // Изв.вузов. Нефть и газ.– 1983.– №8.–с.25-31.

43. Кадиров Н.Б. К вопросу исследования вынужденного колебательного движения колонны штанг станка-качалки глубиннонасосной установки // Изв.вузов. Нефть и газ.– 1981.– №12.– С.23-25.

44. Coberly C.I. Problems in Modern Deep-Well Pumping/ Oil and Gas Journal, 1988.

45. Рабинович Л.М. Гидродинамические устройства в приводе глубиннонасосной установке.– М.: Гостехиздат, 1962.– 101с.

46. Расторгуев М.А., Ситдыков Г.А., Скопов Ю.Р., Сираев А.Х. Замеры осевых деформаций штанг при работе глубинного насоса// Реф.научн.техн.сб.”Машины и нефтяное оборудование”.–М.: ВНИИОЭНГ.– 1988.– №4.– с.17.

47. Малько Б.Д. Динамічні характеристики виконавчих механізмів бурових і нафтопромислових установок та їх оптимізація. Дисертація на здобуття наук. ступеня докт.техн.наук, Івано-Франківськ, 1999.

48. Адонин А.Н., Мамедов Н.Я. Расчет нагрузки на штанги с учетом тяжелого низа //Азейрбайджанское нефтяное хозяйство. – 1976, №6.–С.50-52.

49. Коловский М.З. Динамика машин.– Л.: Машиностроение, 1989.– 263с.

50. Комаров М.С. Динамика механизмов и машин.– М.: Машиностроение, 1969.–296с.

51. Harley A. Tripp Mechanical performance of fiberglass sucker – rod strings. SPE, Production Engeniring, August,1988.–P.346-350.

52. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н. Введение в нелинейную механику. Киев.: Изд-во АНУССР, 1937 г.

53. Э.Хайрер, С.Нерсетт, Г.Ваннер. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. – М.: Мир, 1990.–512с.
54. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989.–432с.
55. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнение математической физики.М.: Наука, 1977г.
56. Владимиров В.С. Уравнение математической физики. М.:Наука, 1988.– 512с.
57. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. Под ред. Р.А.Макарова.–М.: Машиностроение, 1975.– 290 с.
58. Электрические измерения неэлектрических величин.– Л.: Энергия, 1975.
59. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин: Пер. с нем.– М.: Энергоатомиздат,1987.– 192 с.
60. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах.– Л.: Энергоатомиздат, 1988.– 304 с.
61. Воробьев Н. И. Проектирование электронных устройств: Учеб. пособие для вузов по спец." Автоматика и упр. в техн. системах".–М.: Высш. шк, 1989.– 223 с.
62. Суетин В. Я. Цифровые измерительные приборы / Массовая радиобиблиотека. Вып.1073.– М.: Радио и связь, 1984.– 80 с.
63. Шило В. Л. Популярные цифровые микросхемы / Массовая радиобиблиотека. Вып. 1111: Справочник.– М.: Металлургия, 1988.– 352с.
64. Магнитные устройства для очистки скважин /Курников Ю.А., Концур М.Ф., Кобылянский М.Т., Романышин Л.М.– Львов: Вища школа.Изд-во при Львовск.ун-те, 1988.– 108 с.
65. Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов.– М.: Радио и связь, 1991.– 376 с.

66. Федорков Б. Г., Телец В. А., Дегтяренко В. П. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи / Массовая б-ка инженера. Вып.41.– М.: Радио и связь, 1984.–120 с.
67. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. С англ./Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера.– М.: Мир, 1992.– 592 с.
68. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов./Ф.Я.Балицкий, М.А.Иванова и др. М.:Наука, 1984.- 119с.
69. Цветков Э.И. Основы теории статистических измерений. Л., 1979. – 288с.
70. Мирзаджанзаде А.Х., Степанова Г.С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. М.: "Недра", 1977.–228с.
71. Бабак В.П., Хандецкий В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів: Підручник. - К.:Либідь, 1996. - 392 с.
72. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи).–Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983.–320с.
73. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М.: "Мир", 1973. – 960с.
74. Справочник по сопротивлению материалов/ Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Отв.ред.Писаренко Г.С. – 2-ое изд., перераб. и доп.– Киев: Наук.думка, 1988. – 763 с.
75. Вибрация и вибродиагностика судового оборудования / А.А.Александров, А.В.Барков, Н.А.Барков, В.А.Шефранский – Л.:Судостроение, 1986.– 273с.
76. Галлямов И.И., Крылова Г.И., Козлов Р.И. Вибродиагностика погружных электрических двигателей в ходе приемосдаточных испытаний// Тез.докл.Всес.науч.-практич.конф. "Методы и средства виброакустической диагностики машин".– Ивано-Франковск, 1988.– С.121-122.

77. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования / Под ред. И.М.Сендеева. Учеб.пособ.для вузов гражд.авиации.– М.: Транспорт, 1984.–190с.

78. Замиховский Л.М., Калявин В.П. Техническая диагностика погружных электроустановок для добычи нефти.– Снятин: Прут-принт, 1999.–234с.

79. АС СССР № 934238. Способ виброакустического диагностирования изделий / В.И.Жегас, К.М. Рагульскис и др. - Оpubл. в Б. И., 1982, № 21.

80. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. - М.: Машиностроение,1981. - Т.5. Измерения и испытания.- Под ред. М.Д.Генкина. - 1981.- 496 с.

81. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. М., 1960. – 368 с.

82. Бандура В.В. Логическая модель вставного насоса ГНШУ.// Методы и средства технической диагностики: Сборник трудов XV Международной межвузовской школы-семинара, Йошкар-Ола, МарГУ, 1998 г., 195с.

83. Бандура В.В. Дослідження вібростану глибинно-насосних штангових установок // Методи і засоби технічної діагностики: Збірник праць XVI Міжнародної міжвузівської школи-семінару, Івано-Франківськ, ІФДТУНГ, 1999р.

84. Бандура В.В., Замиховський Л.М. Аналіз причин, що обумовлюють надійність глибинно-насосної штангової установки (ГШНУ) // Методи і засоби технічної діагностики: Збірник праць XII Міжнародної міжвузівської школи-семінару, Івано-Франківськ, ІФДТУНГ, 1995р., 222с.

85. Бандура В.В., Замиховський Л.М. До питання про вібродіагностування глибинно-насосної штангової установки. – Тези наук.-тех. конф. проф.-викл. складу ун-ту. м. Івано-Франківськ, 1997р.

86. Бандура В.В., Замиховський Л.М. Діагностична модель штангової установки . – Тези наук.-тех. конф. проф.-викл. складу ун-ту. м. Івано-Франківськ, 1995р.

87. Бандура В.В., Євчук О.В., Заміховський Л.М., Шумада В.М. Використання математичного апарату кореляційних функцій для оцінки технічного стану ГНШУ// Міжвід.наук.-техн.збірка: Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу.– Івано-Франківськ, – 1999.– вип.36 (том 6).

88. Бандура В.В., Заміховський Л.М. Система контролю вібростану глибинно-насосних штангових установок (ГНШУ) // Методи і засоби технічної діагностики: Збірник праць XIV Міжнародної міжвузівської школи-семінару, Івано-Франківськ, ІФДТУНГ, 1997р., 271с.

89. Бандура В.В. Дослідження впливу дефектів ШГНУ на її експлуатаційну надійність //Міжвід.наук.-техн.збірка: Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтове обладнання.– Івано-Франківськ, – 1999.– вип.36 (том4).

90. 3.1.2. ГОСТ 13731-68. Колебания механические. Общие требования к проведению измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1968.

91. 3.1.3 ГОСТ 25865-83. Средства измерений вибрации с пьезоэлектрическими виброизмерительными преобразователями. Основные параметры и технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1983.

92. 3.1.4 Международный стандарт ИСО 5348. Механическая вибрация и удар. Крепление акселерометров.

93. 3.1.5 ФК №4032-0231 Robotron VEB. Инструкция по настройке измерительных устройств акустических и вибрационных приборов / Выставка "Наука" – М., 1983. – 32с.

94. Кибернетическая диагностика механических систем по виброакустическим признакам / Под ред. К.М.Рагульскиса. – Каунас:Каун.политех.ин-т, 1972.– 121с.

95. Коллакот Р.А. Диагностирование механического оборудования.– Л.:Судостроение, 1980.- 196с.

96. Кораблев С.С. Вибродиагностика механических систем// Вопросы динамики и прочности. – Рига, 1983.– Вып.43.– С.40-46.
97. Collacott Ralph A. Vibration monitoring and Diagnosis. Techniques for cost-effective Plant maintenance. London, New York, 1979.
98. Instruments and Control System, 1975, vol.48,№2, p.59-62.
99. Дэвид Г. Методы парных сравнений. М.: 1978.

ДОДАТКИ

Технічна характеристика

дротяного тензодавача загального призначення з одноелементною петлевою решіткою на паперовій основі 2ПКБ-20-200

1. Номінальний опір, O_m	$R=200.0$
2. Робочий діапазон температур, К	$t^{\circ}C=235-325$
3. Активна база, мм	$l = 20.0$
4. Габаритні розміри, мм	$L = 32.0$
	$B = 9.1$

Гранична деформація, що

вимірюється, тис.овд: ± 3

Повзучість при $T=295$ К і $\epsilon=1.0$ тис.овд: $0.5-2.5\%$

Тензорезистор має константанову решітку і основу з цигаркового паперу.

Рекомендуємий монтажний клей – 192-Т, такрін, карбінольний, целулоїдний

ДОДАТОК А2

Технічна характеристика акселерометра АНС 004-03

Вібродавач – акселерометр АНС 004-03 може використовуватися при дії:

- вібраційних прискорень в діапазоні частот $100 \div 20000$ Гц у двох взаємноперпендикулярних напрямках (на власній частоті прискорення не повинні перевищувати 20% від максимально вимірюваного прискорення);
- на виносні узгоджуючі пристрої вібраційних прискорень 150 м/с^2 в діапазоні частот $5..2500$ Гц;
- ударних прискорень у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, тривалістю імпульсу $1..5$ мс, з подвійною амплітудою;
- лінійних прискорень до 1000 м/с^2 у двох взаємно перпендикулярних напрямках на протязі 100 с;
- акустичних шумів, що вказані в ОСТ 92-4267-74;
- пониженого тиску, вказаного в ОСТ 92-4267-74 і тиску 0.2 ± 0.01 МПа на протязі 24 годин.

Ймовірність безвідмовної роботи за час 2 години – $P(t)=0.95$. Ймовірність безвідмовної роботи визначається при довірчій ймовірності $\alpha=0.8$.

Коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по напрузі – $0.05 \text{ мВс}^2/\text{м}$.

Верхня межа вібраційних прискорень – 5000 м/с^2 ;

Верхня межа ударних прискорень – 10000 м/с^2 ;

Робочий діапазон частот – $20 \div 4000$ Гц;

Робочий діапазон температур – від -50 до $+50$ °С;

Власна частота – 50 кГц;

Маса без кабелю – 29 г;

Опір ізоляції не менше 100 МОм;

Основна похибка – 10 % ;

Поперечна чутливість – 5 %;

Нерівномірність АЧХ – ± 1 дБ;

Ресурс роботи – 1000 годин.

Технічні характеристики підсилювача К544УД1А

Параметр	Одиниці	Значення
Максимальний коефіцієнт підсилення	K , тис.	30
Напруга живлення	U , В	$\mp 8 \div 16.5$
Струм живлення	I , мА	∓ 3.5
Напруга зміщення	U , мВ	50
Температурний дрейф	U , мВ/К	50
Вхідний опір	R , Ом	10^{12}
Різницевий вхідний струм	I , нА	0.2
Середній вхідний струм	I , нА	0.5
Допустиме значення диференційної вхідної напруги	U , В	10
Допустиме значення синфазної вхідної напруги	U , В	10
Частота одиничного підсилення	f , МГц	1
Швидкість наростання вихідної напруги	U , В/мкс	2
Найбільша амплітуда вихідної напруги	U , В	∓ 10
Найбільший опір навантаження	R , кОм	2

ДОДАТОК А4

Розробка схеми електричної принципової восьмиканального АЦП

Незважаючи на те, що для МІОС є три нормованих аналогових сигнали в діапазоні напруг ± 5 В, при розробці принципової електричної схеми (рис.1) було передбачено можливість нарощування числа каналів до восьми (згідно з числом каналів аналогового мультиплексора, який було використано в даній схемі – DD4, K561КП2). Проте в розробці використовуються лише три вхідних канали, позначених на схемі (рис. 1) як $U_{_VH0}$, $U_{_VH1}$ та $U_{_VH7}$. RC-ланки на кожному із входів призначені для запобігання впливу високочастотних завад на точність процесу аналого-цифрового перетворення.

Виставлення адреси аналогового каналу ініціюється програмно, командою out 300h (на момент виконання цієї команди адреса аналогового каналу знаходиться в молодшій тетраді регістру AL). Поточна адреса каналу надходить з системної шини ISA на виводи D1, D2 і D3 DD13 (555АП6 – шинний формувач). Виконання команди OUT 300h супроводжується виставленням адреси 300h на адресних виводах шини (при цьому на входах A0, A1, ... , A7 знаходиться “логічний нуль”, а на входах A8 і A9 – логічна “1”), сигнал \overline{IOW} (I/O Write) встановлюється в нульовий, активний стан (сигнал \overline{IOR} – I/O Read – при цьому в стані логічної “1” ; загалом, сигнали \overline{IOR} та \overline{IOW} ніколи не встановлюються одночасно в нульовий, активний стан). При такій комбінації сигналів, на вході TF DD13 буде логічний “0”, що визначить напрямок проходження сигналів через мікросхему зліва направо (за схемою), тобто, адреса аналогового каналу надійде на входи D1, D2 і D3 DD9 (тригер K561ТМ3) ; перепад сигналу з “1” в “0” на виході DD10.1 обумовить фіксацію адреси аналогового каналу в тригері DD9 і подачу цієї адреси на входи A0, A1 і A2 DD4 (мультиплексор), що спричинить комутацію відповідного каналу на вхід “IN A “ DD9 (АЦП).

Окрім сигналів адрес звертання до пристроїв A0, A1, ... , A9 та сигналів \overline{IOR} й \overline{IOW} , дешифратором обробляється і стан AEN. Останній сигнал виставляється в “1”

контролером ПДП (прямого доступу до пам'яті), блокуючи тим самим можливість спрацювання логіки дешифратора при здійсненні циклу прямого доступу до пам'яті. Це є необхідною пересторогою, щоб уникнути конфліктів з іншими пристроями, які можуть використовувати прямий доступ до пам'яті. У ПЕОМ із запланованою для використання даного АЦП конфігурацією цикли прямого доступу до пам'яті (безпосередньо під час здійснення вибірки оцифрованих відліків) виконуватись не будуть.

Незважаючи на те, що системна шина ISA працює із ТТЛ-рівнями сигналів, логічна схема дешифратора побудована на КМОП-елементах. Це було здійснено з метою зменшення навантаження на виходи системної шини (рекомендоване навантаження на кожен з таких виходів – не більше ніж два ТТЛ-входи). При передачі сигналів з елементів серії КМОП на ТТЛ, в якості буферів було використано інвертори К561ЛН2, кожен з виходів в яких може бути навантаженим на два ТТЛ-входи.

Після виставлення адреси аналогового каналу програмно ініціюється запуск процесу аналого-цифрового перетворення. Це здійснюється командою OUT 301h. При цьому на виході DD10.2 сформується фронт спаду, який запустить одновібратор DD5.1 . На виході DD5.1 утвориться одиночний імпульс з тривалістю порядку двох мк с, який, інвертуючись елементом DD6.2, надійде на вхід запуску АЦП К1113ПВ1 (DD8).

Після завершення процесу аналого-цифрового перетворення на інформаційних входах регістрів DD11, DD12 (555ИР16), які призначені для зчитування коду з АЦП, виставляється результат перетворення в додатковому двійковому коді. Сигнал готовності результату RDY запускає одновібратор DD5.2, який формує одиночний імпульс з тривалістю порядку 1 мкс , котрим тактується занесення даних до регістрів DD11 та DD12. Таке використання одновібратора DD5.2 обумовлене конструктивним недоліком К1113ПВ1, який полягає в тому, що, при формуванні фронту спаду сигналу готовності RDY, на виходах даних DD8 виникає імпульсний

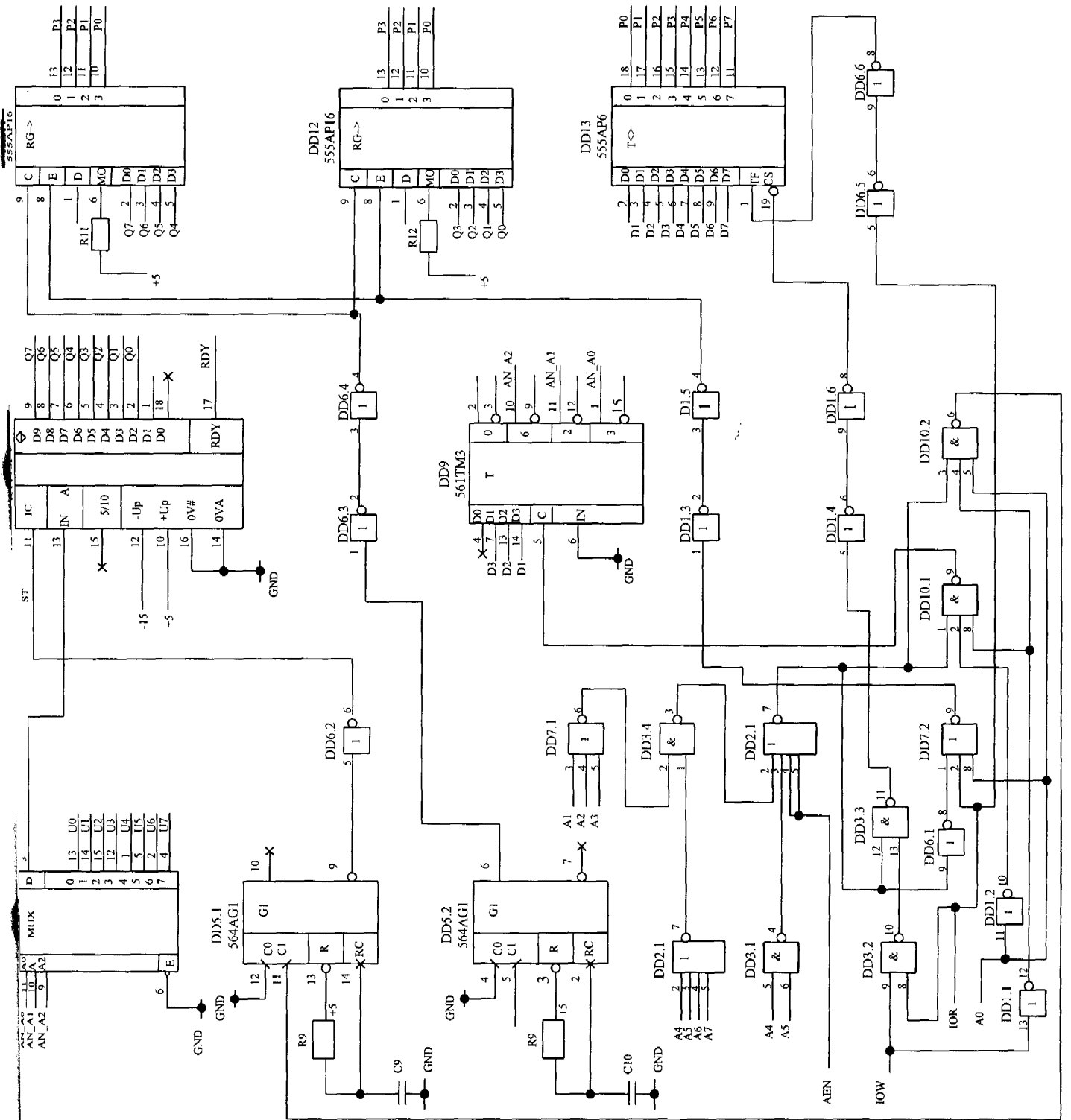
Продовження додатку А4

одиничний “викид” напруги сигналів. Тому, якщо протактувати регістри DD11 і DD12 безпосередньо сигналом RDY, то результат перетворення буде спотворено і до всіх розрядів регістрів будуть занесені одиничні значення. Цей недолік усувається зсувом у часі фронту спаду сигналу RDY за допомогою одновібратора DD5.2 .

Після виставлення адреси аналогового каналу та запуску АЦП програмним шляхом реалізується затримка на час t_3 , дещо більший від часу, необхідного АЦП для формування результату перетворення ($t_{\phi} \geq 35,5$ мкс – з врахуванням тривалостей імпульсів, які формуються одновібраторами DD5.1 і DD5.2) та занесення цього результату до регістрів для зчитування коду з АЦП (DD11, DD12; 555IP16).

Після завершення стадії очікування готовності результату аналого-цифрового перетворення, коли результат цього перетворення практично гарантовано є зафіксованим в регістрах DD11 і DD12, мікропроцесором здійснюється зчитування даного оцифрованого відліку до акумулятора (AL) – в процесі виконання команд IN 300h (старша тетрада) та IN 301h (молодша тетрада). При цьому нульовим рівнем сигналу \overline{IOR} , що передається через DD6.5 і DD6.6 на вхід TF (DD13), визначається напрямок проходження сигналів через шинний формувач DD13 справа наліво (за схемою) – від пристрою до системної шини. DD13 в цей момент, під впливом сигналів A0, A1, ... , A9, AEN та \overline{IOR} , перебуватиме у “відкритому” стані, тобто, двійковий код оцифрованого відліку потрапить на виводи даних D0, D1, ... , D7 системної шини, звідки цей код буде зчитаний мікропроцесором до акумулятора (AL), а потім – занесений до ОЗП.

Описані вище процедури інфообміну та очікування готовності будуть циклічно повторюватись до накопичення в ОЗП усієї вибірки оцифрованих відліків аналогових сигналів.

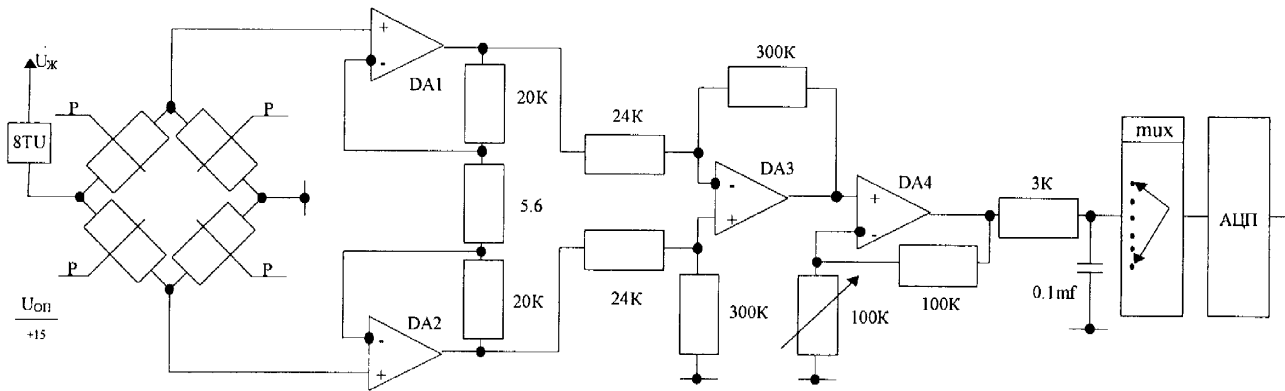


D0	9
D1	8
D2	7
D3	6
D4	5
D5	4
D6	3
D7	2
A0	31
A1	30
A2	29
A3	28
A4	27
A5	26
A6	25
A7	24
A8	23
A9	22
AEN	21
IOW	44
IOR	45
GND	32
+5	34
-5	60
	36

СУНОК 1 -
ІНЦИПОВА
ІКТРИЧНА СХЕМА АЦП

Метрологічне забезпечення МІОС

Структура вимірювального каналу тензометрії.



Приймаємо похибку перетворення тензодавачів $\sigma = 0,5\%$, оскільки вони градуйовані і частотний діапазон відомий ($f_{\max} \leq 50\text{Гц}$).

Оскільки підсилювачі DA1, DA2 одного типу К544 УД1, розташовані в одному корпусі і включені за різницевою схемою, загальною похибкою, яку вони вносять – знехтуємо.

Оскільки вимірювання здійснюються в польових умовах, можлива різниця температур $\Delta t = 40 - (-40)^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C}$. При дрейфі напруги зміщення нуля

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = 30 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}, \text{ маємо:}$$

$$\Delta U_{\text{зм}} = 30 \cdot 80 = 2400 \text{ мкВ}/^\circ\text{C} = 2.4 \text{ мВ}$$

При підсиленні диференційної ланки на ОП DA3 $K_{\text{уз}} = 300/24 = 12.5$ маємо:

$$\Delta U_{\text{вих}} = \Delta U_{\text{зм}} K_{\text{уз}} = 2.4 \cdot 12.5 = 30 \text{ мВ}$$

Відношення до вихідних напруг $\pm 10\text{В}$ становить.

$$\delta_3 \left(\frac{2 \cdot U_{\text{вих}}^{\max}}{\Delta U_{\text{вих}}} \right)^{-1} = \left(\frac{20}{30 \cdot 10^{-3}} \right)^{-1} = 1.5 \cdot 10^{-3} = 0.15\%$$

– максимальна похибка вимірювання підсилювача.

Каскад на DA4, виконаний на мікросхемі аналогічного взірця, тому $\delta_u = 0.15\%$.

Приймаючи нормальний закон розподілу маємо СКВ

Продовження додатку А5

$$\sigma_u = \sigma_3 = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.15}{\sqrt{3}} = 0.0866\%$$

Оскільки ОП знаходяться при однакових умовах, живляться від одного джерела, вони жорстко корельовані між собою, тому СКВ арифметично

$$\sigma_{3u} = \sigma_3 + \sigma_u = 0.17\%$$

Закон розподілу тензодавачів приймаємо нормальним тому,

$$\sigma_{T\theta} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.288\%$$

він слабо корельований з розподілом підсилювача, тому загальне СКВ

$$\sigma_{T3Ц} = \sqrt{\sigma_{T\theta}^2 + \sigma_{3U}^2} = \sqrt{0.17^2 + 0.288^2} = 0.335\%$$

Абсолютна похибка перетворення АЦП К1113ПВ1А – 4 молодші розряди; при використанні 8 старших розрядів – два молодші розряди:

$$\Delta_{\text{АЦП}} = 256 \pm (2 + 1) = 256 \pm 3$$

$$\text{Відносна похибка АЦП } \delta_A = \frac{3}{256} = 1.172 \cdot 10^{-2} = 1.172\%$$

Оскільки мультиплексор АЦП працює при сильних сигналах та в ключових режимах, впливом його на сигнал знехтуємо.

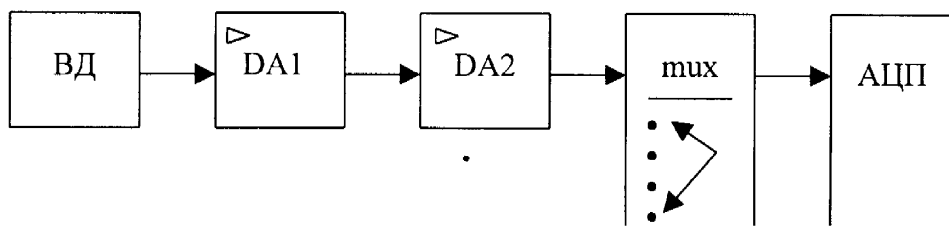
$$\text{СКВ АЦП при нормальному розподілі: } \sigma_A = \frac{\delta_A}{\sqrt{3}} = 0.677\%$$

Корельованості між АЦП і аналоговою частиною немає, тому загальна похибка

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_{T3Ц}^2} = \sqrt{0.677^2 + 0.288^2} = 0.335\%$$

Живлення, однакове для всіх вузлів схеми, стабілізоване – тому його впливом нехтуємо.

Структура вимірювального каналу віброметрії



Продовження додатку А5

Оскільки похибка вібродавача ВД $\delta_B=10\%$, видно, що вона суттєво переважає похибку аналогового тренту (з попереднього розрахунку $\delta_S\approx 1\%$), тому приймаємо похибку від віброметрії рівній похибці вібродавача.

Асемблер-програма зчитування даних з АЦП

```

        model small
        stack 100h
        dataseg
mem_size DW ?
mem_err1 DB 'Not enough main memory.$'
filename DB 'shu5',0
descript DW ?
;beg_offset DB 20
cy_count1 DB 9
        codeseg
mov word ptr bx,ds:[0002h]
        mov ax,@data
        mov ds,ax
        mov ax,bx
        sub ax,20h
        mov word ptr ds:[mem_size],ax
        mov ax,ds
        sub word ptr ds:[mem_size],ax
        cmp word ptr ds:[mem_size],4e20h
        jb mem_err
        mov ah,3Ch
        mov cx,0h
        mov dx,offset filename
        int 21h
        jc end_save
        mov ds:[descript],ax

        xor bx,bx
mov ax,ds
        add ax,0020h
        mov es,ax
        mov dx,300h
        cli

        mov si,0030h
        inc dx
cycle4: out dx,al
        mov cx,001ch
k2      : jcxz k1      ;18/6
        dec cx      ;2
        jmp short k2 ;15
k1:     dec si

```

```

jne cycle4
dec dx

mov cx,00fah
or di,0ffffh
mov si,0fa00h
jmp short cycle2
mem_err: mov ah,9h
mov dx,offset mem_err1
int 21h
end_save: jmp end_proc
cycle1 : xor bx,bx
mov ax,es
add ax,0fa0h
mov es,ax
mov si,0fa00h
cycle2 : xor di,0ffffh
mov ax,di ;3
loop set_addr ;17/5
mov cx,00fah ;4
mov al,02h ;4
xor di,0ffffh
set_addr : out dx,al
inc dx
out dx,al
dec dx

mov ax,cx
mov cx,001eh
m2 : jcxz m1 ;18/6
dec cx ;2
jmp short m2 ;15
m1 : mov cx,ax

in al,dx
rcl ax,1h
rcl ax,1h
rcl ax,1h
rcl ax,1h

inc dx
in al,dx
rcl ax,1h

```

```
rcl ax,1h
rcl ax,1h
rcl ax,1h
dec dx

mov es:[bx],ah
inc bx
dec si
jne cycle2
dec ds:[cy_count1]
jne cycle1

push ds
push es
pop ds
pop es

mov es:[cy_count1],9h

mov ax,ds
sub ax,7D00h;fa0h*4=3e80h,FA0*8=7D00h
mov ds,ax

jmp short m3
cycle3 : mov ax,ds
add ax,0fa0h
mov ds,ax
m3 : xor dx,dx
mov cx,0fa00h
mov bx,es:[descript]
mov ah,40h
int 21h

dec es:[cy_count1]
jne cycle3

sti
mov bx,es:[descript]
mov ah,3eh
int 21h

end_proc : mov ah,4ch
int 21h
end
```

ДОДАТОК А7

**Програма перетворення файлів первинної вибірки
оцифрованих відліків до формату ASCII**

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <bios.h>
#include <math.h>
#include <io.h>
#include <fcntl.h>
main(kilk,files)
int kilk; char *files[];
{
    FILE *fl1,*fl2,*fl3;
    int ch0,count=0;
    char ch2[12],ch3[12];
    long nntenzo=0,nnvibro=0;
    size_t f_name_size;
    if((fl1=fopen(files[1],"rb"))==NULL)
    {
        printf("file not found");
        bioskey(0);exit(1);
    }
    strcpy(ch2,files[1]);
    if(strchr(ch2,',')!=NULL)
    { printf("\n ЁГ«® Ў -ГЇ®J -® § □ ВЁ i-!π");
      printf(" д ©«Г Ё...‡ ħH‡ □ □ ħ...КЌИ"); exit(1);
    }
    strcpy(ch3,ch2);
    strcat(ch2, ".v");
    strcat(ch3, ".t");
    fl2=fopen(ch2,"wb");
    fl3=fopen(ch3,"wb");

    while((ch0=fgetc(fl1))!=EOF)
    { count++;
      if (count==250)
      { count=0; fprintf(fl3,"%d\n",ch0);
        nntenzo++; continue;
      }
      fprintf(fl2,"%d\n",ch0); nnvibro++;
    }
}

```


Продовження додатку А7

```
printf ("\n %s has %li discretos",ch3,nnzenzo);  
printf ("\n %s has %li discretos",ch2,nnvibro);  
fclose(fl1);  
fclose(fl2);  
fclose(fl3);  
}
```

ДОДАТОК Б1

Діаграми зміни закону розподілу в часі для віброакустичного сигналу

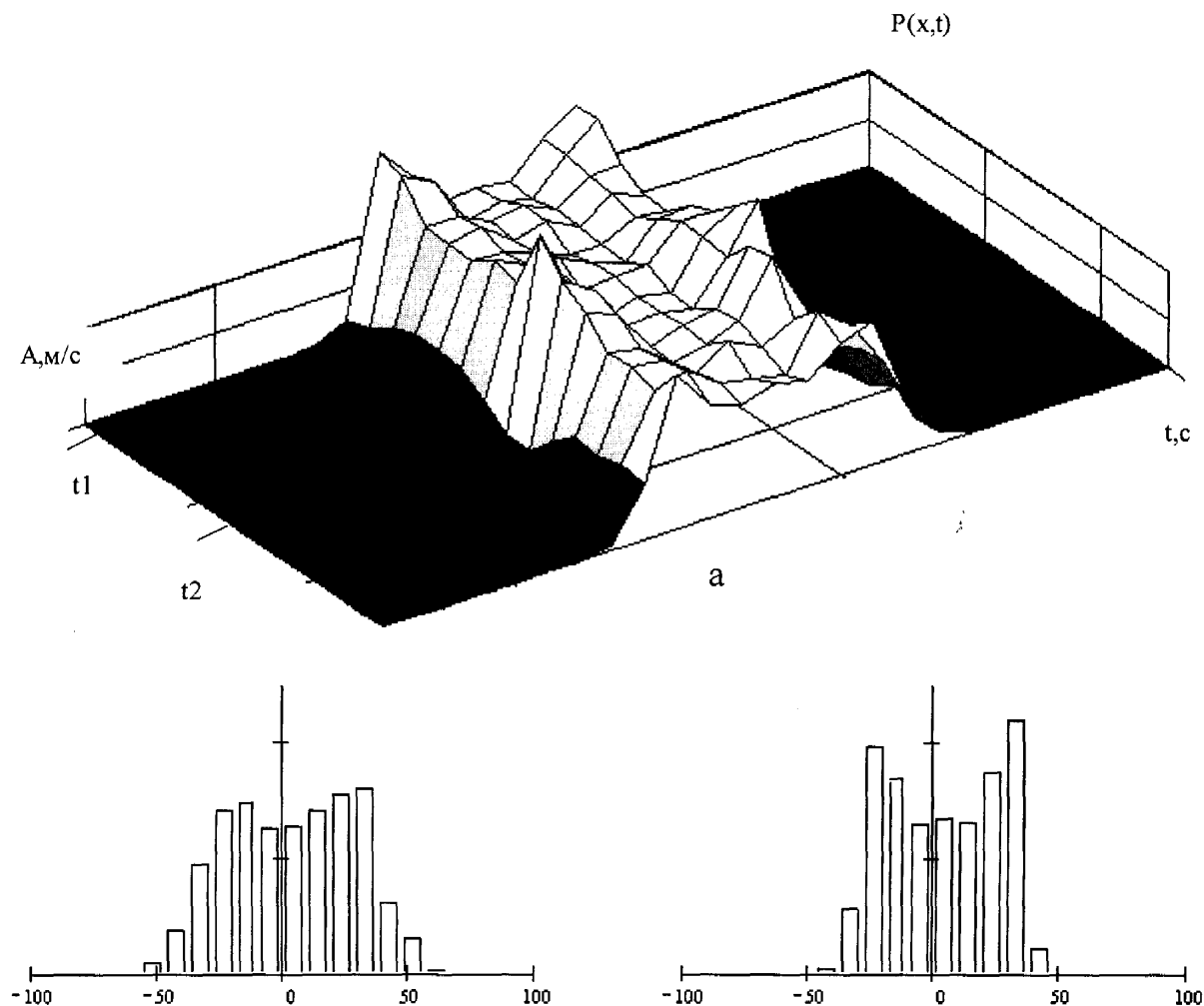


Рисунок 1 – Зміна закону розподілу віброшвидкості поздовжніх коливань колони штанг, отримана при експлуатації для св.№ 463, Битківського родовища (насос НСВ1-32, глибина спуску 2046 м, число качань – 7, довжина ходу – 2 м, період напрацювання – 3 місяці)

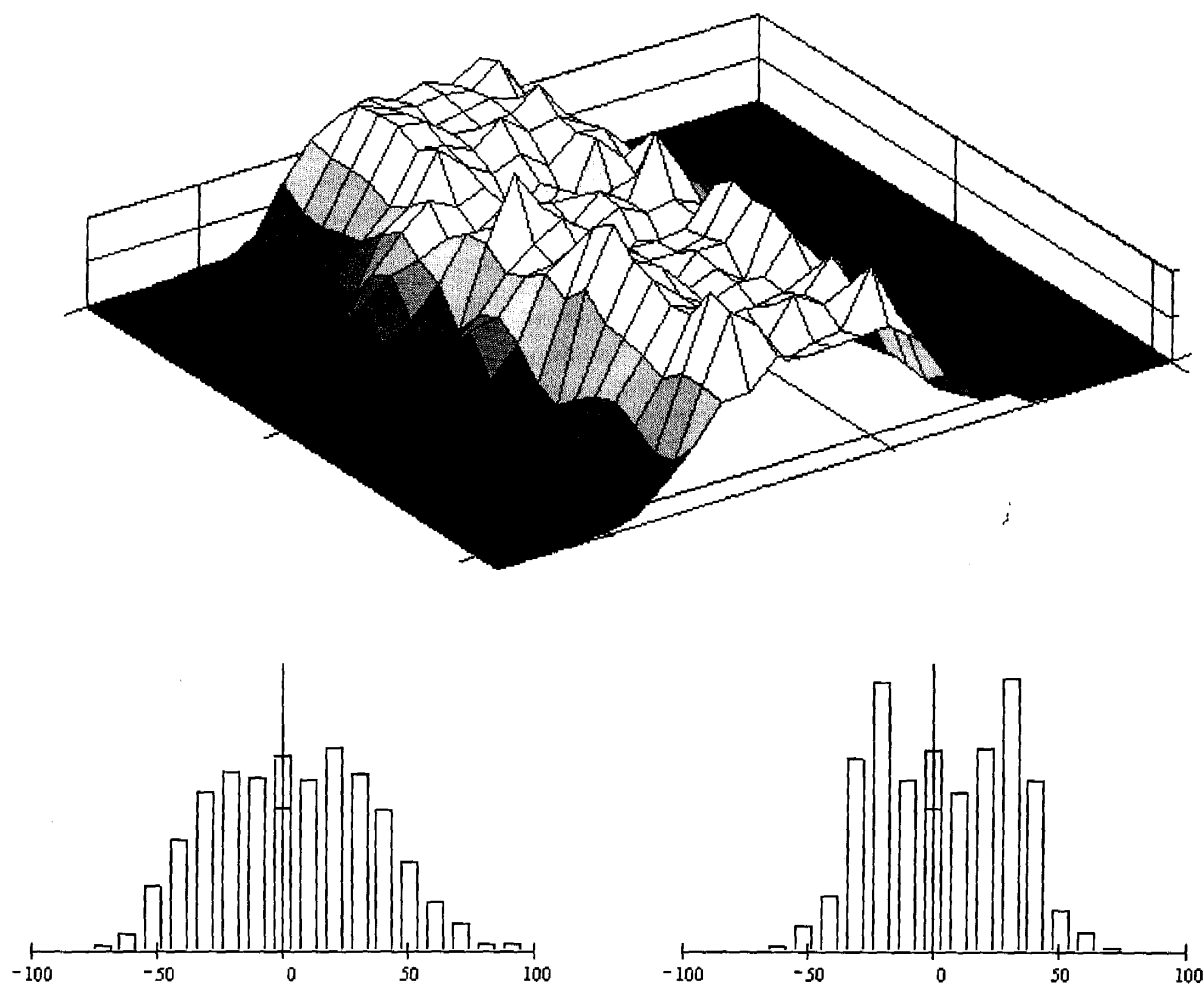


Рисунок 2 – Зміна закону розподілу віброшвидкості поздовжніх коливань колони штанг, отримана при експлуатації для св.№ 588, Битківського родовища (насос НСВ1-32, глибина спуску 2070 м, число качань – 4, довжина ходу – 2,5м, період напрацювання – 5 місяців)

Екранні форми програми діагностування ШГНУ

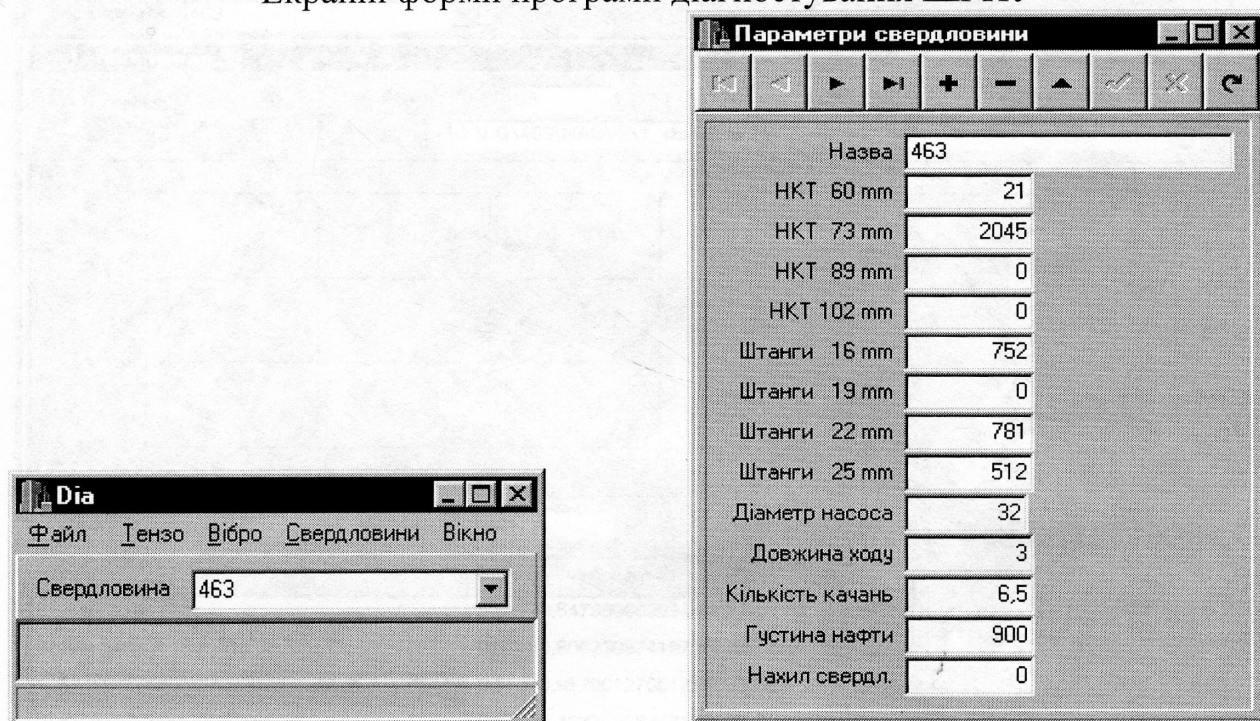


Рисунок 1 - Головне вікно

Рисунок 2 - Вікно роботи з базою даних свердловин

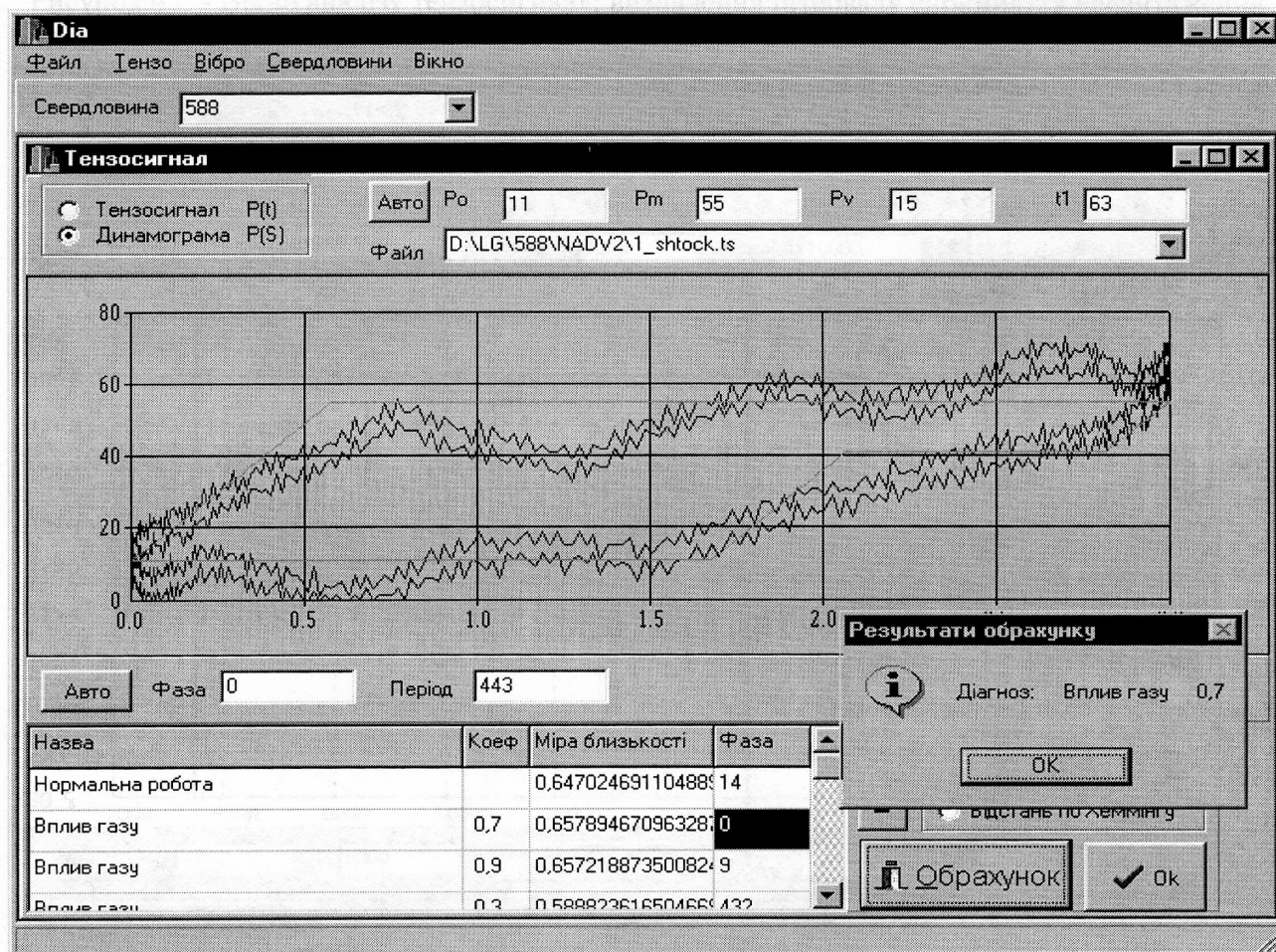


Рисунок 3 - Вікно аналізу тензосигналу: діагностування по динамограмі

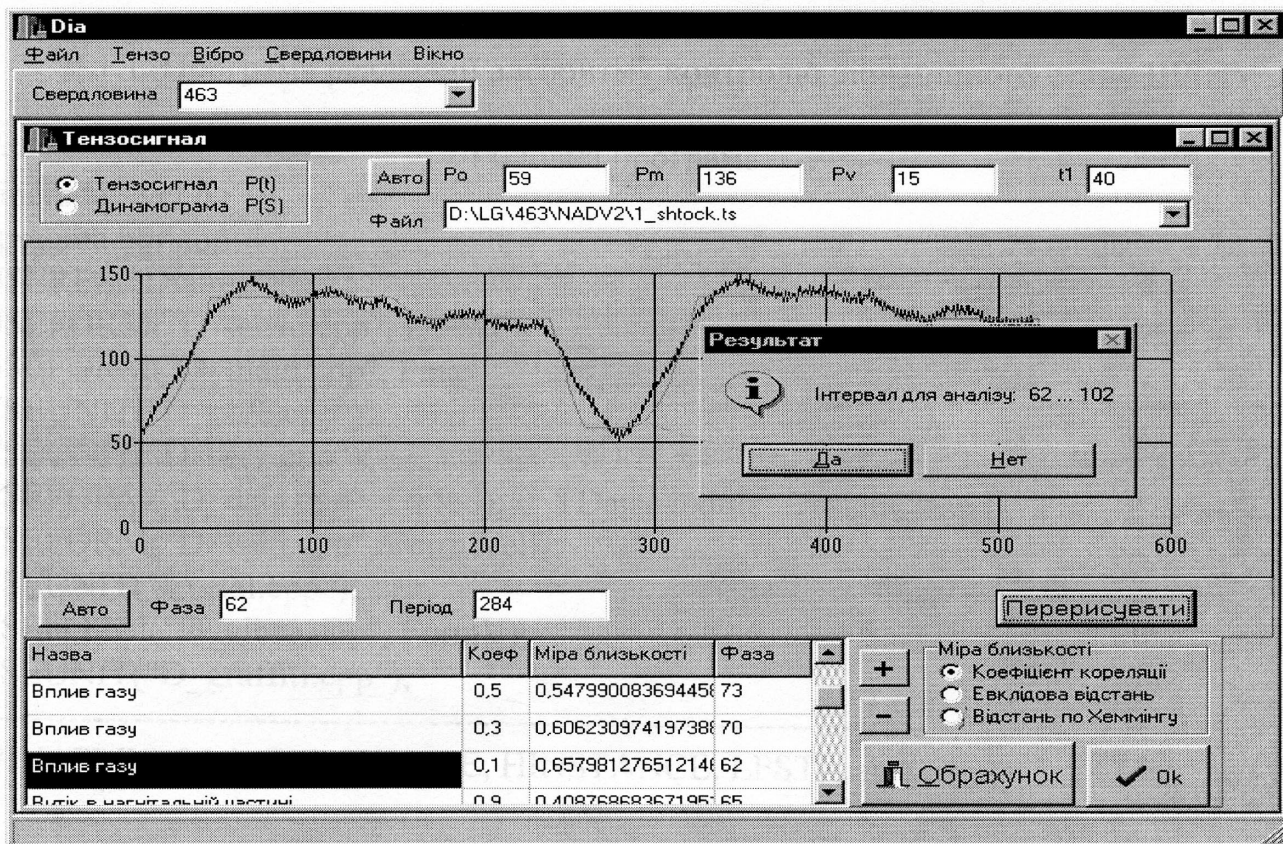


Рисунок 4 - - Вікно аналізу тензосигналу: визначення інтервалу сприйняття навантаження

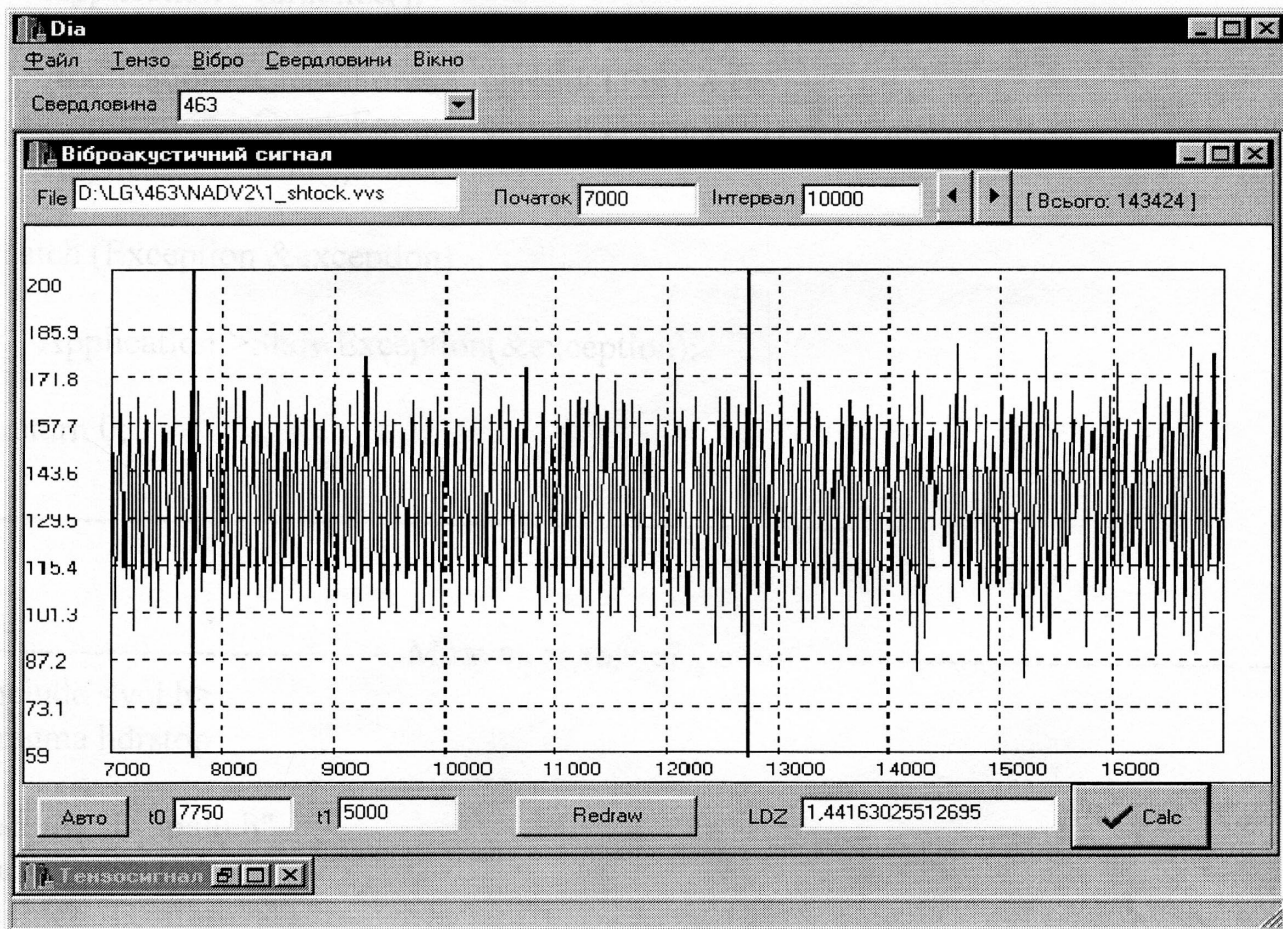


Рисунок 5 - Вікно аналізу вібраційного сигналу

В.1.1. Програма реалізації алгоритму контролю вібраційного стану ШГНУ

```

//----- Головна програма -----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
USERES("Dia.res");
USEFORM("D_tenso.cpp", FormT);
USEFORM("D_main.cpp", Fm);
USEUNIT("D_core.cpp");
USEUNIT("D_serv.cpp");
USEFORM("D_data.cpp", DMod); /* TDataModule: DesignClass */
USEFORM("D_well.cpp", FormWell);
USEUNIT("E_etal.cpp");
USEFORM("D_vibro.cpp", FormV);
USEUNIT("D_graffiti.cpp");
//-----
WINAPI WinMain(HINSTANCE, HINSTANCE, LPSTR, int)
{
    try
    {
        Application->Initialize();
        Application->CreateForm(__classid(TDMod), &DMod);
        Application->CreateForm(__classid(TFm), &Fm);
        Application->CreateForm(__classid(TFormWell), &FormWell);
        Application->Run();
    }
    catch (Exception &exception)
    {
        Application->ShowException(&exception);
    }
    return 0;
}
//-----

//----- Модуль головної форми -----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
//-----
#include "D_main.h"
#include "D_tenso.h"
#include "D_vibro.h"

```

```

//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TFm *Fm;
AnsiString Str;
//-----
void __fastcall TFm::DisplayHint(TObject *Sender)
{ StatusBar1->SimpleText = GetLongHint(Application->Hint);}
//-----
void __fastcall TFm::FormCreate(TObject *Sender)
{ Application->OnHint = DisplayHint;Fm->ShowHint=true;
  int x=(DMod->cfg->Strings[1]).LastDelimiter("=");
  OpenFileDialog1->InitialDir=(DMod->cfg->Strings[1]).Delete(1,x);
}
//-----
__fastcall TFm::TFm(TComponent* Owner) : TForm(Owner)
{int i;
  for(DMod->Table1->First(),i=0;i<DMod->Table1->RecordCount;
    i++,DMod->Table1->Next())
    Combo->Items->Add(DMod->Table1->Fields[0]->AsString);
  DMod->Table1->First(); Combo->ItemIndex=0;
}
//-----
void __fastcall TFm::TileClick(TObject *Sender){Tile();}
//-----
void __fastcall TFm::Select1Click(TObject *Sender)
{if(!Combo->Items->Count)
  {Application->MessageBox("Внесіть в базу даних дані про свердловину","Відсутні
дані про свердловини.",MB_ICONEXCLAMATION);
  WellsClick(Sender);
}
  OpenFileDialog1->Execute();
}
//-----
void __fastcall TFm::TensoClick(TObject *Sender)
{ if(!OpenDialog1->Files->Count||OpenDialog1->FilterIndex==2)
  {OpenDialog1->FilterIndex=1;Select1Click(Sender);}
  if(!OpenDialog1->Files->Count)return;
  if(MDICHildCount==0)Application->CreateForm(__classid(TFormT),&FormT);
  FormT->ComboF->Items->Assign(OpenDialog1->Files);
  FormT->ComboF->ItemIndex=0;FormT->Left=0;FormT->Top=0;
  FormT->ReadT();FormT->MakeEtalon();
}

```

```

Fm->ClientHeight=FormT->Height+Panel2->Height+StatusBar1->Height+4;
Fm->ClientWidth=680;
FormT->GraphT->Tag=1;FormT->Redraw(Sender);
}
//-----
void __fastcall TFm::VibroClick(TObject *Sender)
{ if(!MDIChildCount)
  { TensoClick(Sender);if(!OpenDialog1->Files->Count)return;
    FormT->Calc(Sender);FormT->ButOkClick(Sender);
  }
  OpenFileDialog1->Files->Clear();
  OpenFileDialog1->FilterIndex=2;Select1Click(Sender);
  if(MDIChildCount<2)
  Application->CreateForm(__classid(TFormV),&FormV);
  FormV->Left=0;FormV->Top=0;
  FormV->ComboF->Text=OpenDialog1->FileName; FormV->ReadV();
  float krat = FormV->fdis/(float)FormT->fdis;
  FormV->period=FormT->eta->N*krat;FormV->at0=FormT->eta->fase*krat;
  FormV->at1=FormT->eta->t1*krat;
  FormV->t0=FormV->at0; FormV->t1=FormV->at1;
  FormV->UpDown->Max=(FormV->nv-FormV->t1)/FormV->period;
  FormV->UpDown->Position=0;
  FormV->Edt0->Text=IntToStr(FormV->t0);FormV->Edt1->Text=IntToStr(FormV->t1);
  Fm->ClientHeight=FormV->Height+Panel2->Height+StatusBar1->Height+4;
  Fm->ClientWidth=680;
  FormV->GraphV->Tag=1;FormV->Redraw(Sender);
}
//-----
void __fastcall TFm::ComboChange(TObject *Sender)
{ TLocateOptions Opts;Opts.Clear();Opts << loPartialKey;
  DMod->Table1->Locate("Name (number)",Variant(Combo->Text),Opts);
  if(MDIChildCount)
  {if(Application->MessageBox("Вибрати нові дані?","Well
changed",MB_ICONINFORMATION+MB_YESNO)==IDYES)
    { OpenFileDialog1->FilterIndex=1; Select1Click(Sender);
      FormT->ComboF->Items->Assign(OpenDialog1->Files);
      FormT->ComboF->ItemIndex=0;
    }
  }
  FormT->ReadT(); FormT->MakeEtalon();
  FormT->GraphT->Tag=1;FormT->Redraw(Sender);
  if(MDIChildCount==2)VibroClick(Sender);
}

```



```

}
//-----
void __fastcall TFm::WellsClick(TObject *Sender)
{FormWell->ShowModal();
if(DMod->Table1->RecordCount>Combo->Items->Count)
{Combo->Items->Clear();int i;
for(DMod->Table1->First(),i=0;i<DMod->Table1->RecordCount;
i++,DMod->Table1->Next())
Combo->Items->Add(DMod->Table1->Fields[0]->AsString);
DMod->Table1->First(); Combo->ItemIndex=0;
}
}
//-----
void __fastcall TFm::Exit1Click(TObject *Sender)
{Application->Terminate();}
//-----

```

//----- Модуль форми аналізу тензосигналу -----

```

#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include "D_tenso.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TFormT *FormT;
AnsiString Str;
AnsiString eName[]={ "Нормальна робота", "Вплив газу", "Витік в нагнітальній
частині", "Витік в приймальній частині " };
//-----
__fastcall TFormT::TFormT(TComponent* Owner) : TForm(Owner)
{StrG->Cells[0][0]="Назва";StrG->Cells[1][0]="Коеф";
StrG->Cells[2][0]="Міра близькості";StrG->Cells[3][0]="Фаза";
int i,k;StrG->RowCount=DMod->cfg->Count-1;
if(StrG->RowCount>20)StrG->RowCount=20;
for(i=1;i<DMod->cfg->Count-1;i++)
{Str=DMod->cfg->Strings[i+1]; k=Str.LastDelimiter("=");
Str.Delete(1,k); k=Str.LastDelimiter("|");
StrG->Cells[0][i]=Str.SubString(1,k-1);
StrG->Cells[1][i]=Str.Delete(1,k);
}
}

```

```

FXY=Cor[0]; pt=new etalon; eta=new etalon;
}
//----- 1. Read data -----
void TFormT::ReadT(void)
{TCursor Save_Cursor = Screen->Cursor;Screen->Cursor = crHourGlass;
try
{Str=FormT->ComboF->Items->Strings[FormT->ComboF->ItemIndex];
*pt=etalon(Str.c_str(),Str.c_str(),DMod->S0->AsFloat);
if(pt->n<16){ShowMessage("No data for P(t)");pt->n=0;FormT->Release();return;}
//define fdis
if(pt->n==262){FormT->fdis=640/25.0;}
else if(pt->n==1152){FormT->fdis=7901/250.0;}
else {FormT->fdis=7901/125.0;}
int Teo=FormT->fdis*60/DMod->NK->AsFloat; // teoretical period
if(fabs(pt->N-Teo)>Teo/10)pt->N=Teo;
//add if n<Period
int i,nma=pt->N*2;
if(pt->n<nma)
{float*x=new float[nma];
for(i=0;i<pt->n;i++)x[i]=pt->v[i];
if(pt->n<pt->N) for(i=pt->n;i<pt->N;i++)x[i]=pt->v[i-1];
for(i=pt->N;i<nma;i++)x[i]=pt->v[i-pt->N];
delete[]pt->v; pt->v=x; pt->n=pt->N*2;
}
}
catch (...)
{Screen->Cursor = Save_Cursor;throw;}Screen->Cursor = Save_Cursor;
}
//-----
void TFormT::MakeEtalon(void)
{ float ss[4],nn[4]; for(int i=0;i<4;i++)
{ss[i]=DMod->Table1->Fields[i+1]->AsFloat;
nn[i]=DMod->Table1->Fields[i+5]->AsFloat;
}
*eta=etalon(pt,DMod->DiaNas->AsFloat,ss,nn,DMod->Ro->AsFloat,DMod->Beta-
>AsFloat,DMod->NK->AsFloat);
pt->sx=eta->sx;pt->t1=eta->t1;pt->K=eta->K;pt->Pv=eta->Pv;pt->Po=eta->Po;pt-
>Pm=eta->Pm;
if(!(Rx = new float[eta->n]))
Application->MessageBox("Cannot make Rx","Error",MB_ICONSTOP);
(*FXY)(eta->v,pt->v,eta->n,Rx);

```

```
float fam=max(Rx,eta->N,pt->fase); delete[]Rx;
```

```
EdFas->Text=IntToStr(pt->fase);EdP0->Text=FloatToStr(floor(pt->Po));
EdPeri->Text=IntToStr(pt->N);EdPm->Text=FloatToStr(floor(pt->Pm));
EdPv->Text=FloatToStr(floor(eta->Pv));Edl->Text=IntToStr(eta->t1);
StrG->Cells[2][1]=FloatToStr(fam);StrG->Cells[3][1]=FloatToStr(pt->fase);
}
```

```
//-----
```

```
void __fastcall TFormT::ComboFChange(TObject *Sender)
{ReadT();if(pt->N!=eta->N)MakeEtalon();Calc(Sender);
GraphT->Tag=1;Redraw(Sender);}
```

```
//-----2. Changing parameters -----
```

```
void TryVal(TEdit*E);
void __fastcall TFormT::EdP0Change(TObject *Sender){TryVal(EdP0);}
void __fastcall TFormT::EdPmChange(TObject *Sender){TryVal(EdPm);}
void __fastcall TFormT::EdPvChange(TObject *Sender){TryVal(EdPv);}
void __fastcall TFormT::EdlChange(TObject *Sender){TryVal(Edl);}
void __fastcall TFormT::EdFasChange(TObject *Sender){TryVal(EdFas);}
void __fastcall TFormT::EdPeriChange(TObject *Sender){TryVal(EdPeri);}
```

```
//-----
```

```
void TryVal(TEdit*E)
{try
  {StrToFloat(E->Text);FormT->GraphT->Tag=1;}
catch(...)
  {Application->MessageBox("A strange value","Error",MB_ICONSTOP);E->Text="0";}
return;
}
```

```
//-----
```

```
void __fastcall TFormT::AutoLines(TObject *Sender)
{ EdP0->Text=FloatToStr(floor(pt->Po)); EdPm->Text=FloatToStr(floor(pt->Pm));
EdPv->Text=FloatToStr(floor(pt->Pv)); Edl->Text=IntToStr(pt->t1);
GraphT->Tag=1;}
```

```
//-----
```

```
void __fastcall TFormT::AutoPeriod(TObject *Sender)
{EdFas->Text=IntToStr(pt->fase); EdPeri->Text=IntToStr(pt->N);
GraphT->Tag=2;}
```

```
//-----
```

```
void __fastcall TFormT::AddEta(TObject *Sender)
{ if(StrG->RowCount<20) StrG->RowCount++;
StrG->Cells[0][StrG->RowCount]=StrG->Cells[0][StrG->Row];
StrG->Cells[1][StrG->RowCount]="0,5";
```

```

}
//-----

void __fastcall TFormT::DelEta(TObject *Sender)
{if(StrG->Row<StrG->RowCount)
  for(int i=StrG->Row;i<StrG->RowCount;i++)
    for(int j=0;j<StrG->ColCount;j++)
      StrG->Cells[j][i]=StrG->Cells[j][i+1];
  StrG->RowCount--;
}
//----- 3. Drawing -----
void __fastcall TFormT::Redraw(TObject *Sender)
{ TCursor Save_Cursor=Screen->Cursor;Screen->Cursor = crHourGlass;
  try
  {if(GraphT->Tag||StrG->Row!=1)
  {GraphT->Tag=0;  int i,t;
  EdFas->Text=StrG->Cells[3][StrG->Row];
  eta->fase=StrToFloat(EdFas->Text);
  eta->N=StrToInt(EdPeri->Text); eta->t1=StrToInt(Edl->Text);
  eta->Po=StrToFloat(EdP0->Text);eta->Pm=StrToFloat(EdPm->Text);
  eta->Pv=StrToFloat(EdPv->Text);eta->n=eta->N*2;
  GraphT->NumPoints=pt->n-eta->fase<eta->n?pt->n-eta->fase:eta->n;
  GraphT->ThisSet=1;    //P(t)
  for(i=1;i<=GraphT->NumPoints;i++)
  {GraphT->ThisPoint=i; GraphT->GraphData=pt->v[i-1+eta->fase];
  GraphT->XPosData=RadioG->ItemIndex==0?i:pt->s(i);
  }
  eta->newNR();          // Eta
  if(StrG->Row!=1)
  { for(t=1,i=0;t<6;t++)if(StrG->Cells[0][StrG->Row]==eName[t]){i=t;break;}
  if(StrG->Cells[1][StrG->Row]== "")StrG->Cells[1][StrG->Row]="0,5";
  float zz=StrToFloat(StrG->Cells[1][StrG->Row]);
  eta->deform(i,zz);
  }
  GraphT->ThisSet=2;  for(i=1;i<=GraphT->NumPoints;i++)
  {GraphT->ThisPoint=i; GraphT->GraphData=eta->v[i-1];
  GraphT->XPosData=RadioG->ItemIndex==0?i:eta->s(i);
  }
  GraphT->DrawMode=3;
  }          //end if
}          // end try
catch (...)

```

```
{Screen->Cursor = Save_Cursor;throw;}Screen->Cursor = Save_Cursor;
}
//-----
```

```
void __fastcall TFormT::RadioGClick(TObject *Sender)
{ TCursor Save_Cursor=Screen->Cursor;Screen->Cursor = crHourGlass;
try
{ int i; GraphT->ThisSet=1;   for(i=1;i<=GraphT->NumPoints;i++)
  {GraphT->ThisPoint=i;
  GraphT->XPosData=RadioG->ItemIndex==0?i:pt->s(i);
  }
GraphT->ThisSet=2;           for(i=1;i<=GraphT->NumPoints;i++)
  {GraphT->ThisPoint=i;
  GraphT->XPosData=RadioG->ItemIndex==0?i:eta->s(i);
  }
GraphT->DrawMode=3;
} // end try
catch (...)
{Screen->Cursor = Save_Cursor;throw;}Screen->Cursor = Save_Cursor;
}
```

```
//----- 4. Calculating of distances -----
```

```
void __fastcall TFormT::RadioCoreClick(TObject *Sender)
{FXY=Cor[RadioCore->ItemIndex];}
//-----
void __fastcall TFormT::Calc(TObject *Sender)
{float mxx[20],zz; int fa[20],i,t;
TCursor Save_Cursor = Screen->Cursor;Screen->Cursor = crHourGlass;
try
{StrG->Row=1; if(GraphT->Tag)Redraw(Sender);
Rx=new float[eta->n];
for(i=1;i<StrG->RowCount;i++)
{for(t=0;t<6;t++)if(StrG->Cells[0][i]==eName[t])break;
eta->newNR();
if(t) {zz=StrToFloat(StrG->Cells[1][i]);eta->deform(t,zz);}
(*FXY)(eta->v,pt->v,eta->n,Rx);
if(RadioCore->ItemIndex)mxx[i-1]=min(Rx,eta->N,eta->fase);
else mxx[i-1]=max(Rx,eta->N,eta->fase);
fa[i-1]=eta->fase; StrG->Cells[3][i]=IntToStr(fa[i-1]);
StrG->Cells[2][i]=FloatToStr(mxx[i-1]);
}
}
```

```

eta->newNR();
if(RadioCore->ItemIndex)min(mxx,StrG->RowCount-1,t);
  else max(mxx,StrG->RowCount-1,t); EdFas->Text=IntToStr(fa[t]);
AnsiString Str="Діагноз:  "+StrG->Cells[0][t+1]+"  "+StrG->Cells[1][t+1];

  StrG->Row=t+1;
  Application->MessageBox(Str.c_str(),"Результати
обрахунку",MB_ICONINFORMATION);
  GraphT->Tag=1; Redraw(Sender); delete[]Rx;
}
catch (...)
{Screen->Cursor = Save_Cursor;throw;}Screen->Cursor = Save_Cursor;
}

//----- 5. Graph Popup -----
void __fastcall TFormT::GraphTMouseDown(TObject *Sender,
  TMouseButton Button, TShiftState Shift, int X, int Y)
{if(Button==mbRight)Popup1->Popup(X,Y);}
//-----
void __fastcall TFormT::PrintClick(TObject *Sender)
{GraphT->DrawMode=5;}
//-----
void __fastcall TFormT::SaveAsClick(TObject *Sender)
{ if(SavePicDial->Execute())
  {if(SavePicDial->FilterIndex==1)GraphT->DrawMode=3;
  if(SavePicDial->FilterIndex==2)GraphT->DrawMode=2;
  GraphT->ImageFile=SavePicDial->FileName;
  GraphT->DrawMode=6;
  }
}
//-----
void __fastcall TFormT::CopyClick(TObject *Sender)
{GraphT->DrawMode=4;}
//-----

//----- 6. Exit -----
void __fastcall TFormT::ButOkClick(TObject *Sender)
{AnsiString Str="Інтервал для аналізу: "+EdFas->Text+" ... "+IntToStr(eta->fase+eta-
>t1);
if(Application->MessageBox(Str.c_str(),"Результат",
  MB_ICONINFORMATION+MB_YESNO)==IDYES)FormT->Close();
}

```

```

//-----

//----- Модуль формування еталонів -----

#ifndef E_etalH

#define E_etalH
//-----
#include<math.h>
#include "D_core.h"
#define pi 3.14159265
//-----
float fs(int);
int Period(float*,const int,int*);
void extend(float*,int,int);

class etalon
{public:
float *v;
float *rxx;
float Po,Pm,Pv,sx,spl,K;
float Kv,Kn;
int N; //period
int n; //size
int t1,t3; //jt(sx)
int fase; //location of begin in file
int krat; // nvib/nten
char name[32];
int etype; //type
float s(int j){return spl*(1-cos(2*pi*j/N))/2;}
float jt(float s){return s<spl?N/2/pi*acos(1-2*s/spl):-1;}
void extend(void);
etalon(void)
{N=0;n=0;etype=0;t1=0;sx=0.5;
fase=0;krat=125;Kv=1;Kn=1;
// v=new float[0];rxx=new float[0];
}
etalon(const etalon&); //initialization
void operator=(const etalon&); //assuming
etalon(char*,char*,float); //from file
etalon(char*,char*,float,int); //from file with Teo
etalon(etalon *pt,int dn,float*st,float*nkt,float ron,

```

```

float beta,int nk);          //teoretic
etalon(etalon*,int,float);  //deform NR
~etalon(void){if(v) delete[] v; if(rxx) delete[] rxx;}
void deform(int TS,float koef);
void defvg(float,etalon*);
void defyn(float,etalon*);

void defyp(float,etalon*);
void defpn(float,etalon*);
void defpv(float,etalon*);
void newNR(void);
void Fas0(etalon);
};
#endif

//-----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "E_etal.h"
//-----
#pragma package(smart_init)

int dst[]={16,19,22,25},dkt[]={60,73,89,104};
enum eType {NR,VG,YN,YP,PV,PN,LEFT};
//-----
float fs(int d){return pi*d*d/4*(0.000001);}
//-----
int Period(float*r,const int n)
{float mex=0;int j,T=0;
for(j=2;(r[j]*r[j-1]>0)&&(j<n);j++);
for(j++;(r[j]*r[j-1]>0)&&(j<n);j++);
for(j++;(r[j]*r[j-1]>0)&&(j<n);j++)if(r[j]>mex){mex=r[j];T=j;}
if(mex<0.3)T=n;
return T;
}
//-----
etalon::etalon(char*fname,char*ename,float s0)
{if((n=makevect(&v,fname))<16)return;
if(!(rxx=new float[n]))return;
Rxx(v,n,rxx); N=Period(rxx,n);fase=0;
spl=s0; strcpy(name,ename);
}

```



```

Po=min(v,n);Pm=max(v,n);etype=0;
return;
}
//-----
etalon::etalon(char* fname,char* ename,float s0,int Teo)
{if((n=makevect(&v,fname))<16)return;
if(!(rxx=new float[n]))return;

Rxx(v,n,rxx); N=Period(rxx,n);fase=0;
spl=s0; strcpy(name,ename);
Po=min(v,n);Pm=max(v,n);etype=0;
int i,nma=N*2;
if(n<nma)
{float*x=new float[nma];
for(i=0;i<n;i++)x[i]=v[i];
if(n<N) for(i=n;i<N;i++)x[i]=v[i-1];
for(i=N;i<nma;i++)x[i]=v[i-N];
delete[]v; v=x; n=N*2;
}
return;
}
//-----
etalon::etalon(etalon *pt,int dn,
float st[4],float nkt[4],float ron,float beta,int nk)
{if (!(v = new float[pt->n]))return ;
if(!(rxx=new float[pt->n]))return;
sprintf(name,"Нормальна робота");etype=0;
int i,float L=0,kp,P,Pi,g=9.81,mst=0,mn,ww;
N=pt->N;n=pt->N*2;spl=pt->spl;fase=0;sx=0;
for(i=0;i<4;i++)
{sx+=(st[i]/fs(dst[i])+nkt[i]/fs(dkt[i]));
mst+=st[i]*fs(dst[i]);L+=st[i];}
mst*=7800;mn=L*fs(dn)*ron; sx*=(mn*g/(2.06e+11));ww=pi*nk/30.0;
Po=mst*g*(1-ron/7800.0); Pm=(mst+mn)*g; Pi=mst*ww*ww*spl*0.7;
Pv=0.05*Pm+Po*sin(beta*pi/90)+(940*dn-14)/g; P=Pm-Po+Pv+2*Pi;
kp=(pt->Pm-pt->Po)/P;Pm=pt->Pm-Pi*kp;Po=pt->Po+Pi*kp;Pv*=kp;
K=(Pm-Po)/sx; t1=jt(sx); t3=N/2+t1;
for(i=0;i<t1;i++)v[i]=Po+K*s(i);
while(i<N/2)v[i++]=Pm;
while(i<t3)v[i++]=Pm-K*(spl-s(i));
while(i<N)v[i++]=Po;
if(n>N) for(i=N;i<n;i++)v[i]=v[i-N];
}

```

```

}
//-----
void etalon::newNR(void)
{n=N*2;  int i;
sx=s(t1); K=(Pm-Po)/sx; t3=N/2+t1;
for(i=0;i<t1;i++)v[i]=Po+K*s(i);
while(i<N/2)v[i++]=Pm;
while(i<t3)v[i++]=Pm-K*(spl-s(i));

while(i<N)v[i++]=Po;
while(i<n)v[i++]=v[i-N];
}
//-----
/*
etalon::etalon(const etalon&nr)
{if (!(v=new float[nr.n])) return ;
Po=nr.Po;Pm=nr.Pm;Pv=nr.Pv;spl=nr.spl;K=nr.K;
sx=nr.sx;t1=nr.t1;t3=nr.t3;N=nr.N;n=nr.n;
for(int i=0;i<n;i++)v[i]=nr.v[i];
}
*/
//-----
void etalon::operator=(const etalon&nr)
{ if(nr.n!=n)
{delete[]v;if(!(v=new float[nr.n]))return;
}
Po=nr.Po;Pm=nr.Pm;Pv=nr.Pv;spl=nr.spl;K=nr.K;
sx=nr.sx;t1=nr.t1;t3=nr.t3;N=nr.N;n=nr.n;
for(int i=0;i<n;i++)v[i]=nr.v[i];
}
//-----
etalon::etalon(etalon* nr,int S,float koef)
{if(v)delete[]v;
if (!(v = new float[nr->n])) return ;
Po=nr->Po;Pm=nr->Pm;Pv=nr->Pv;spl=nr->spl;K=nr->K;
sx=nr->sx;t1=nr->t1;t3=nr->t3;N=nr->N;n=nr->n;
switch(S)
#define Case break;case
{case VG: defvg(koef,nr);Kv=koef;
Case YN: defyn(koef,nr);Kn=koef;
Case YP: defyp(koef,nr);Kn=koef;
Case PV: defpv(koef,nr);Case PN: defpn(koef,nr);
}
}
}

```

```

    default: for(int i=0;i<n;i++)v[i]=nr->v[i];
    }
    extend();etype=S;
    return;
}
//-----
void etalon::deform(int TS,float koef)
{int i,t2=N/2,t21,t22,t33,t4,t5;
switch(TS)

#define Case break;case
{case VG: Kn=koef;
    t3=N-jt(spl-Pv/K);    t5=N-jt((spl-sx)*Kn);
    t4=N-jt(spl-Pv/K-(spl-sx)*(1-Kn));
    for(i=t3;i<=t4;i++)v[i]=v[t3-1];
    while(i<=t5)v[i++]=v[t4]-K*(s(t4)-s(i));
Case YN: Kv=koef;
    K=(Pm-Po)/((spl-sx)*Kv+sx);
    t1=Kv<1?jt(sx+(spl-sx)*Kv):t2;
    t21=jt((spl-sx)*Kv*0.5); t22=t2-t21; t33=t3-t21;
    for(i=0;i<=t1;i++)v[i]=Po+s(i)*K;
    if(t1<t22) for(;i<=t22;i++) v[i]=v[t1];
    for(i=t22;v[i-1]>Po;i++)v[i]=v[t22]-K*(spl-s(i+t21));
    for(i--;i<t3;i++)v[i]=Po;
Case YP: Kv=koef;
    K=(Pm-Po)/((spl-sx)*Kv+sx);
    t1=Kv<1?jt(sx+(spl-sx)*Kv):t2;
    t21=jt((spl-sx)*Kv*0.5); t22=t2-t21; t33=t3-t21;
    for(i=0;i<=t1;i++)v[i+t2]=Pm-s(i)*K;
    if(t1<t22) for(;i<=t22;i++) v[i+t2]=v[t1+t2];
    for(i=t22;i<t33&&v[i-1]<Pm&&i<t2;i++)
    v[i+t2]=v[t2+t22]+K*(spl-s(i+t21));
    for(;i<t3&&v[i-1]<Pm;i++)v[i+t2-N]=Po+K*(spl-s(i+t21));
    break;
default:return;
} //end switch
for(i=N;i<n;i++)v[i]=v[i-N];
}
//-----
void etalon::defvg(float kn,etalon* nr)
{int i;int t4,t5;Kn=kn;
t3=N-jt(spl-Pv/K);

```

```

t5=N-jt((spl-sx)*kn); t4=N-jt(spl-Pv/K-(spl-sx)*(1-kn));
for(i=0;i<=t3;i++)v[i]=nr->v[i];
while(i<=t4)v[i++]=v[t3-1];
while(i<=t5)v[i++]=v[t4]-K*(s(t4)-s(i));
while(i<N)v[i++]=v[t5];
sprintf(name,"Вплив газу",kn);
}
//-----

void etalon::defyn(float kv,etalon* nr)
{int t21,t2,t22,t33,t4,t5,i; Kv=kv;

K=(Pm-Po)/((spl-sx)*kv+sx);
t1=kv<1?jt(sx+(spl-sx)*kv):N/2;
t21=jt((spl-sx)*kv*0.5); t22=N/2-t21; t33=t3+t21;
for(i=0;i<=t1;i++)v[i]=Po+s(i)*K;
for(;i<=t22;i++) v[i]=t1<t22?v[t1]:v[i];
for(;i<=t33;i++)v[i]=v[i-1]>Po?nr->v[i+t21]-nr->v[t22]+v[t22]:nr->v[N-1];
for(;i<N;i++)v[i]=nr->v[i];
sprintf(name,"Вутік в нагнітальній частині",kv);
}
//-----

void etalon::defyp(float kv,etalon* nr)
{defyn(kv,nr);Kv=kv;int i;float a;
for(i=0;i<N/2;i++)
{a=v[i];v[i]=Po+Pm-v[i+N/2];v[i+N/2]=Po+Pm-v[i];}
sprintf(name,"Вутік в приймальній частині",kv);
}
//-----

void etalon::extend(void)
{if(n>N)
for(int i=N;i<n;i++)v[i]=v[i%N];
return;
}
//-----

//----- Модуль форми аналізу вібросигналу -----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "D_vibro.h"

```

```

//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TFormV *FormV;
AnsiString St;
//-----
__fastcall TFormV::TFormV(TComponent* Owner) : TForm(Owner)
{Left=0;Top=0;Height=470;Width=645;}
//-----
void __fastcall TFormV::FormActivate(TObject *Sender)
{//t0=

}
//-----

//-- 1. Read data -----
void TFormV::ReadV(void)
{TCursor Save_Cursor = Screen->Cursor;Screen->Cursor = crHourGlass;
try
{St=ComboF->Text; nv=makevect(&v,St.c_str());
if(nv<16)
{ Screen->Cursor = Save_Cursor;
  ShowMessage("No data. Select something better. ");
  nv=0;FormV->Close(); return;}
LabAll->Caption="[ Всего: "+IntToStr(nv)+" ]";
EdBeg->Text="0";EdKus->Text=IntToStr(nv);kus=nv;
//define fdis
int x=St.LastDelimiter(".");St.Delete(1,x);
if(St=="v"){FormV->fdis=6400;}
else if(St=="vv"||St=="vp"){FormV->fdis=7901;}
else {FormV->fdis=7901*0.5;}
}
catch (...) {Screen->Cursor = Save_Cursor;throw;}
Screen->Cursor = Save_Cursor;
}
//-----

//---- 2. Draw -----
void __fastcall TFormV::Redraw(TObject *Sender)
{if(!GraphV->Tag)return;
TCursor Save_Cursor=Screen->Cursor;Screen->Cursor = crHourGlass;
try

```

```

{graf(v+beg,kus,beg,1,GraphV);
 float dxx = (GraphV->Width-70)/(float)kus;
 int x1=dxx*((t0-beg)%period)+45,x2=x1+t1*dxx;
 GraphV->Canvas->Pen->Width=2;
 GraphV->Canvas->MoveTo(x1,31);GraphV->Canvas->LineTo(x1,GraphV->Height-18);
 GraphV->Canvas->MoveTo(x2,31);GraphV->Canvas->LineTo(x2,GraphV->Height-18);
 GraphV->Canvas->Pen->Width=1;
 GraphV->Tag=0;
}
catch (...)
{Screen->Cursor = Save_Cursor;throw;}Screen->Cursor = Save_Cursor;
}

//----- 3. Change parameters -----
void TFormV::TryVal(TEdit*E,int&x)
{try
 {x=StrToFloat(E->Text);FormV->GraphV->Tag=1;}
 catch(...)
 {Application->MessageBox("A strange value","Error",MB_ICONSTOP);E->Text="0";}
 return;
}
void __fastcall TFormV::EdBegExit(TObject *Sender){TryVal(EdBeg,beg);}
void __fastcall TFormV::EdKusExit(TObject *Sender){TryVal(EdKus,kus);}
void __fastcall TFormV::Edt0Exit(TObject *Sender){TryVal(Edt0,t0);}
void __fastcall TFormV::Edt1Exit(TObject *Sender){TryVal(Edt1,t1);}
//-----
void __fastcall TFormV::AutoClick(TObject *Sender)
{Edt0->Text=IntToStr(at0); Edt1->Text=IntToStr(at1);GraphV->Tag=1;}
//-----
void __fastcall TFormV::UpDownClick(TObject *Sender, TUDBtnType Button)
{if(Button==btPrev && beg>period)
 {beg-=period;EdBeg->Text=IntToStr(beg);
 t0-=period; Edt0->Text=IntToStr(t0);
 }
 if(Button==btNext && beg<nv-period)
 {beg+=period;EdBeg->Text=IntToStr(beg);
 t0+=period; Edt0->Text=IntToStr(t0);
 if(beg+kus>nv)kus=nv-beg;EdKus->Text=IntToStr(kus);
 }
 GraphV->Tag=1;Redraw(Sender);
}

```

```

}
//-----

//----- 4. Calculation -----
void __fastcall TFormV::ButCalcClick(TObject *Sender)
{TCursor Save_Cursor=Screen->Cursor;Screen->Cursor = crHourGlass;
try
{Rx=new float[t1];
Rxx(v+t0,t1,Rx); Ldz = diag(Rx,t1/2,fdis);
delete[]Rx; EdDia->Text=FloatToStr(Ldz);
}
catch (...)
{Screen->Cursor = Save_Cursor;throw;}Screen->Cursor = Save_Cursor;
}
//-----

```

```

float diag(float*Rx,int kus,float fdis);
float linreg(float*x,int*t,float fdis,int n,float *res);
float diag(float*Rx,int kus,float fdis)
{float mex[128],res[6];int j,jm,nm=128,kk[128];
for(jm=0,j=1;j<kus;j++)
{ if(Rx[j]*Rx[j-1]<0) // if ends halfwave
{ if(Rx[j-1]<Rx[j]) // and it was negative (period ends)
mex[++jm]=0; // go to next max
else // if it was positive (max already found)
{for(;(mex[jm]>mex[jm-1])&&jm>1;)
// deleting possible false previous maxes
{jm--;mex[jm]=mex[jm+1];kk[jm]=kk[jm+1];}
if(jm==nm)break;
} //if j-1>j
} //if<0
if(Rx[j]>mex[jm]){mex[jm]=Rx[j];kk[jm]=j;}
} //for kus
for(j=0;j<jm;j++)mex[j]-=mex[jm-1];
linreg(mex,kk,fdis,jm,res);
return fabs(res[0])>1e+5?0:res[0];
}

```

```

float linreg(float*x,int*t,float fdis,int n,float *res)
{if(n<2)return 0;
double tk,lnx,st,sln,sln2,slnt,st2,qx,qy,qxy,xs,ys;
int i,nn=n;

```

```

for(i=0,st=0,st2=0,sln=0,sln2=0,slnt=0;i<n;i++)
{ tk=(double)t[i]/fdis;
  if(fabs(x[i])>MINDOUBLE*32) lnx=log(fabs(x[i]));
  else{nn--;if(nn>1)continue;else break;}
  st+=tk;st2+=tk*tk; sln+=lnx;sln2+=lnx*lnx; slnt+=lnx*tk;
}
qx=st2-st*st/nn; qy=sln2-sln*sln/nn; /* for y=a0*exp(a1*x) : */
qxy=slnt-sln*st/nn; /* ln y = ln a0 + a1*x */
xs=st/n;ys=sln/nn;
if(fabs(qx)>MINDOUBLE*2)res[0]=-qxy/qx;
  else res[0]=0; /* a1 */
//res[3]=(qy-res[0]*qxy)/(nn-2); /* Dx */
// res[1]=sqrt(res[3]/qx)*qntl(nn-2); /* delta */
// res[2]=qxy/sqrt(qx*qy); /* rxx */
//res[4]=exp(ys-res[0]*xs); /* a0 */
return(res[0]);
}

```

```

//----- 5. Graph Popup-----
void __fastcall TFormV::CaptClick(TObject *Sender){PanCap->Show();}
void __fastcall TFormV::ButTiClick(TObject *Sender)
{PanCap->Hide();AddTitle(EdTi->Text,GraphV);}
//-----

```

```

//----- Модуль обрахунку кореляційних функцій -----
#include"D_core.h"
//-----
// n/2 without norm
void RXX(float*x,const int n,float*xy)
{if(!x||!xy)return;
 int i,j;float mx=0,rx;
 for(j=0;j<n;j++)mx+=x[j];
 mx/=n; xy[0]=0;
 for(i=0;i<n;i++)xy[0]+=(x[i]-mx)*(x[i]-mx);xy[0]/=n;
 for(j=1;j<n;j++)
 {for(rx=0,i=0;i<n/2;i++) rx+=(x[i]-mx)*(x[i+j]-mx);
  xy[j]=rx*2/n;
 }
 return;
}
//-----

```



```

// n/2 norm
void Rxx(float*x,int n,float*xy)
{if(!x||!xy)return;      int i,j,nn=n/2;float mx=0,rx;
  for(j=0;j<n;j++)mx+=x[j];
  mx/=n; xy[0]=0;
  for(i=0;i<n;i++)xy[0]+=(x[i]-mx)*(x[i]-mx);xy[0]/=n;
  for(j=1;j<nn;j++)
  {for(rx=0,i=0;i<nn;i++) rx+=(x[i]-mx)*(x[i+j]-mx);
    xy[j]=rx/(nn*xy[0]);
  }
  xy[0]=1;
  return;
}

void Rxy(float*x,float*y,const int n,float*xy)
{if(!x||!y||!xy)return;
  int i,j,nn=n/2;float mx=0,my=0,dx=0,dy=0;

  for(j=0;j<n;j++){mx+=x[j];my+=y[j];}
  mx/=n;my/=n;
  for(i=0;i<n;i++){dx+=(x[i]-mx)*(x[i]-mx);dy+=(y[i]-my)*(y[i]-my);}
  dx/=n;dy/=n;
  for(j=0;j<nn;j++)
  {xy[j]=0;
    for(i=0;i<nn;i++)xy[j]+=(x[i]-mx)*(y[i+j]-my);
  }
  for(j=0;j<nn;j++)xy[j]/=(nn*sqrt(dx*dx+dy*dy));
  return;
}
//-----
void Cxy(float*x,float*y,int n,float*xy)
{if(!x||!y||!xy)return;
  int i,j,nn=n/2;float mx=0,my=0,dx=0,dy=0,dxy;
  for(j=0;j<n;j++){mx+=x[j];my+=y[j];}
  mx/=n;my/=n;
  for(i=0;i<n;i++){dx+=(x[i]-mx)*(x[i]-mx);dy+=(y[i]-my)*(y[i]-my);}
  dx/=n;dy/=n; dxy=sqrt(dx*dx+dy*dy);
  for(j=0;j<nn;j++)
  {xy[j]=0;
    for(i=0;i<nn;i++) xy[j]+=(x[i]-y[i+j])*(x[i]-y[i+j]);
    xy[j]/=(nn*dxy);
  }
}

```

```

return;
}
//-----
void Gxy(float*x,float*y,int n,float*xy)
{if(!x||!y||!xy)return;
int i,j,nn=n/2;float mx=0,my=0,dx=0,dy=0,dxy;
for(j=0;j<n;j++){mx+=x[j];my+=y[j];}
mx/=n;my/=n;
for(i=0;i<n;i++){dx+=(x[i]-mx)*(x[i]-mx);dy+=(y[i]-my)*(y[i]-my);}
dx/=n;dy/=n; dxy=sqrt(dx*dx+dy*dy);
for(j=0;j<nn;j++)
{xy[j]=0;
for(i=0;i<nn;i++) xy[j]+=fabs(x[i]-y[i+j]);
xy[j]/=(nn*sqrt(dxy));
}
return;
}
//-----

```

```

//----- Модуль побудови графіків -----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "D_graffiti.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
//-----
void graf(float*v,int n,int shift,float msx,TImage*Image)
{if((n<3)||v==NULL){Image->Visible=false;return;}else Image->Visible=true;
TCursor Save_Cursor = Screen->Cursor;Screen->Cursor = crHourGlass;
try
{char fm[10];float mn=v[0],mx=mn,dxx,dyy;
int i,beg=45,end=Image->Width-25,top=30,bot=Image->Height-20,
size=bot-top,xx,yy;
for(i=0;i<n;i++){if(v[i]>mx)mx=v[i]; if(v[i]<mn)mn=v[i];}
Image->Canvas->Brush->Color = clWhite;
Image->Canvas->FillRect(Rect(0,0,Image->Width,Image->Height));
Image->Canvas->Rectangle(0,0,Image->Width,Image->Height);
Image->Canvas->Rectangle(beg,top,end,bot);
Image->Canvas->Pen->Width=1;Image->Canvas->Pen->Style=psDot;
if(mx-mn<1e-16)return;
//y-axis

```

```

float mach=mx-mn,nrm=size/mach,y,dy; int zero=(bot+mn*nrm),
  nv=size>300?10:6,nvl=-mn*nv/mach,nvh=mx*nv/mach;
if(mn>0){nvl=0;nvh=nv;zero=bot;} if(mx<0){nvh=0;nvl=nv;zero=top;}
dyy=(float)(size/(nvl+nvh));dy=mach/(nvl+nvh);
if(nvl) for(i=1,y=(mx<0?mx:0)-dy;i<nvl;i++,y-=dy)
  {yy=zero+i*dyy;
  Image->Canvas->MoveTo(beg,yy);Image->Canvas->LineTo(end,yy);
  Image->Canvas->TextOut(Image->Left+1,yy-5,gcvt(y,5,fm));
  }
yy=zero+i*dyy;Image->Canvas->TextOut(Image->Left+1,yy-5,gcvt(y,5,fm));
if(nvh) for(i=0,y=mn>0?mn:0;i<nvh;i++,y+=dy)
  {yy=zero-i*dyy;
  if(yy<bot){Image->Canvas->MoveTo(beg,yy);Image->Canvas->LineTo(end,yy);}
  Image->Canvas->TextOut(Image->Left+1,yy-5,gcvt(y,5,fm));
  }
yy=zero-i*dyy; Image->Canvas->TextOut(Image->Left+1,yy-5,gcvt(y,5,fm));
//x-axis
int wid=end-beg,tis=wid>500?10:5,tick=ceil((float)n/tis),ntick,
dx=n/wid+1; dxx=(float)wid/(n-1); float xxtick=tick*dxx,x;

if(n<tis)ntick=n-1;else if(n<wid)ntick=n/tick+1;else ntick=tis;
Image->Canvas->TextOut(beg-4,bot+4,gcvt(shift*msx,5,fm));
for(i=1;i<ntick;i++)
  {xx=beg+i*xxtick;x=(shift+i*tick)*msx;
  if(xx<end)
    {Image->Canvas->MoveTo(xx,bot);Image->Canvas->LineTo(xx,top);
    Image->Canvas->TextOut(xx-6,bot+4,gcvt(x,5,fm));
    }
  }
//graf
Image->Canvas->Pen->Style=psSolid;
if(mx*mn<0)
  {Image->Canvas->MoveTo(beg,zero);Image->Canvas->LineTo(end,zero);}
zero=(bot+mn*nrm);yy=zero-v[0]*nrm;xx=beg;
for(i=dx;i<n;i+=dx)
  { Image->Canvas->MoveTo(xx,yy);
  xx=beg+i*dxx;yy=zero-v[i]*nrm;
  Image->Canvas->LineTo(xx,yy);
  }
}
}
catch (...) {Screen->Cursor = Save_Cursor;throw;}
Screen->Cursor = Save_Cursor;

```

```

return;
}
//-----
void AddTitle(AnsiString T,TImage*Image)
{Image->Canvas->FillRect(Rect(1,1,Image->Width-2,30));
Image->Canvas->TextOut(Image->Left+5,5,T);
return;
}
//-----

```

```

//----- Модуль допоміжних функцій -----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "D_serv.h"
//-----
#pragma package(smart_init)

```

```

int makevect(float**v,char* sname)

{int n=0;float x,*xa;FILE*src;
if((src=fopen(sname,"r"))==NULL) return -1;
fseek(src,0,0);
while(fscanf(src,"%f\n",&x)!=EOF)n++;
if (!(xa = new float[n]))return -2;
fseek(src,0,0);
for(int i=0;i<n;i++)fscanf(src,"%f\n",&(xa[i]));
fclose(src);
*v=xa;
return(n);
}
//-----
float max(float*v,int n)
{float mx=v[0];
for(int i=0;i<n;i++) if (v[i]>mx)mx=v[i];
return(mx);
}
//-----
float min(float*v,int n)
{ float mn=v[0];

```

```
    for(int i=0;i<n;i++) if (v[i]<mn)mn=v[i];
    return(mn);
}
//-----
float max(float*v,int n,int& pos)
{ float mx=v[0];pos=0;
  for(int i=0;i<n;i++) if (v[i]>mx){mx=v[i];pos=i;}
  return(mx);
}
//-----
float min(float*v,int n,int& pos)
{ float mn=v[0];pos=0;
  for(int i=0;i<n;i++) if (v[i]<mn){mn=v[i];pos=i;}
  return(mn);
}
//-----
```

Результати моделювання коливного процесу в штанговій колоні

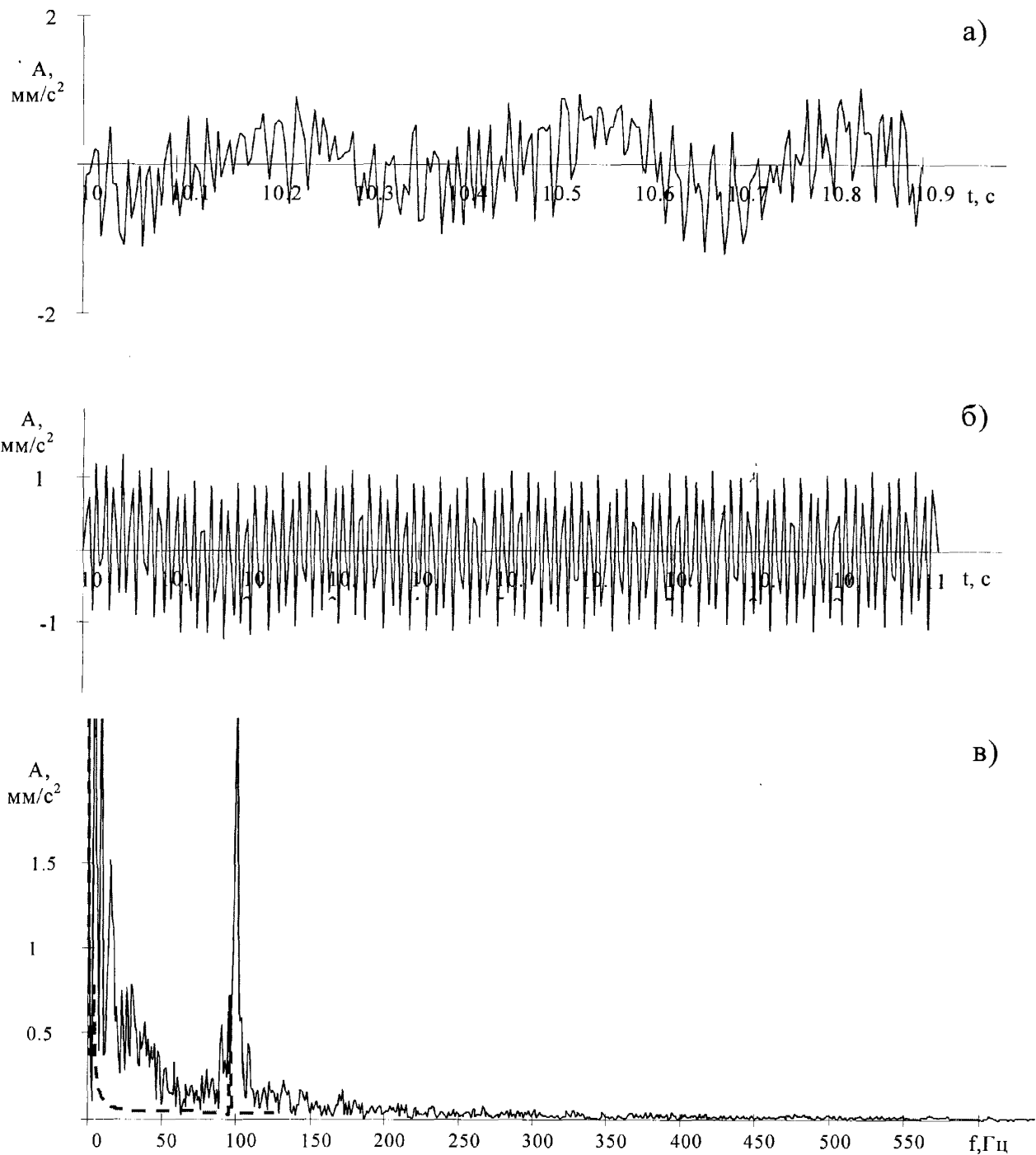


Рис. Г.1 – Експериментальний (а) і змодельований (б) віброакустичний сигнал та спектри віброшвидкості (в) експериментального (—) і змодельованого (- - -) сигналів для свердловини № 588

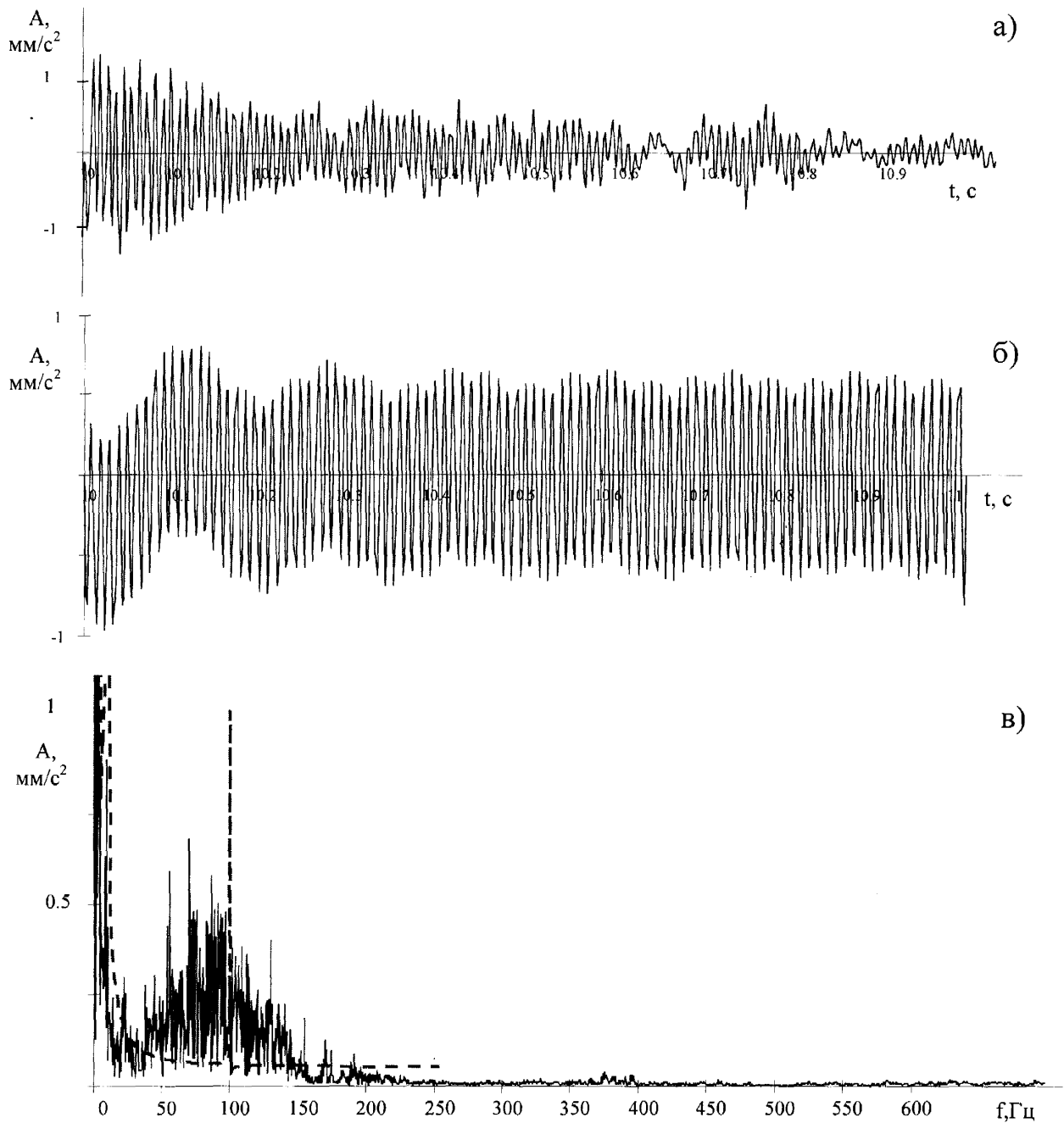


Рис. Г.2. Експериментальний (а) і змодельований (б) віброакустичний сигнал та спектри віброшвидкості (в) експериментального (—) і змодельованого (- - -) сигналів для свердловини № 320

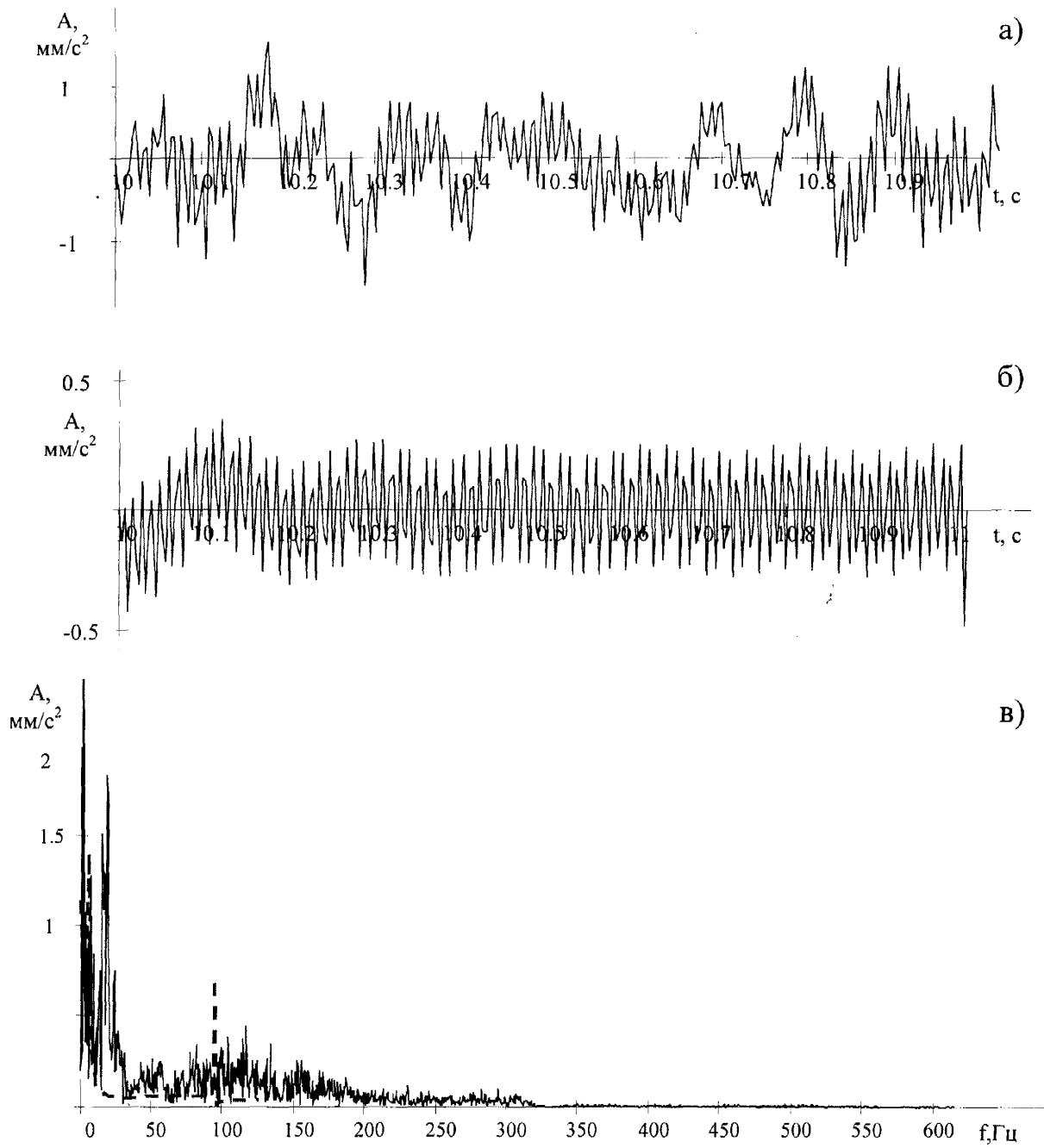


Рис. 3 – Експериментальний (а) і змодельований (б) віброакустичний сигнал та спектри віброшвидкості (в) експериментального (—) і змодельованого (- - -) сигналів для свердловини № 519

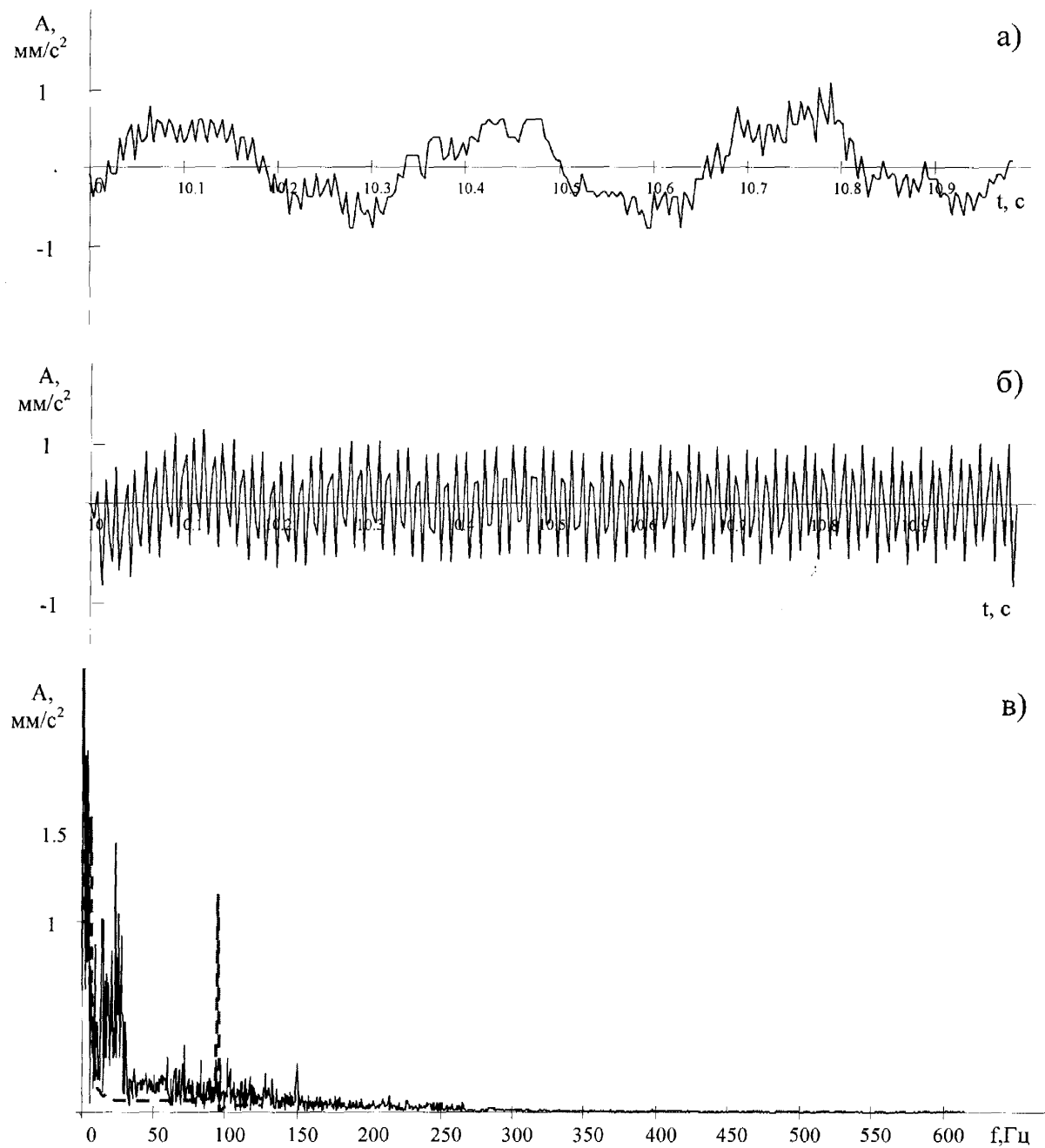


Рис. 4 – Експериментальний (а) і змодельований (б) віброакустичний сигнал та спектри віброшвидкості (в) експериментального (—) і змодельованого (- - -) сигналів для свердловини № 620

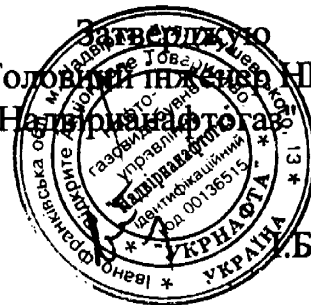
Узгоджено
Проректор з наукової
роботи ІФДТУНГ



д.т.н. професор
В. П. Кондрат

30 червня 1999р.

Затверджено
Головний інженер НГВУ
"Надвірнанафтогаз"



В. П. Бойчук

" 5 " липня 1999р.

Програма
проведення експериментальних досліджень вібраційного стану
ШГНУ на нафтопромислах НГВУ "Надвірнанафтогаз"

м.Івано-Франківськ

1999 р.

1. Мета проведення експериментальних досліджень

Програма проведення експериментальних досліджень спрямована на вирішення цілого комплексу завдань як методичного характеру – вибору кількості і місця розташування давачів, вибору контролюємого параметра вібрації, тощо, так і технологічного характеру, зумовленого впливом технологічного режиму роботи свердловини (число качань верстата-качалки (ВК), довжина ходу полірованого штока, діаметр насоса, глибина спуску насоса), вибору раціональних діагностичних ознак і інш. з метою розробки методики вібраційного контролю технічного стану ШГНУ.

2. Задачі експериментальних досліджень.

Основними завданнями експериментальних досліджень повинні бути такі:

- дослідження впливу вібрацій на технічний стан вузлів ШГНУ;
- дослідження закономірностей зміни коливних процесів в штанговій колоні (ШК), зумовлених технічним станом глибинного насоса (ГН), при його експлуатації у свердловинах, а також технологічними параметрами роботи свердловини, які характеризуються виникненням аварійного стану ШГНУ;
- дослідження впливу робочих характеристик свердловини на умови і режими відкачки флюїдів та закономірності зміни коливних процесів в ШК в свердловинах, які відрізняються глибиною спуску ГН, нафтоносного пласту та його характеристиками і режимами експлуатації ШГНУ, а також геологічними характеристиками покладу, фізико-хімічними параметрами пластових флюїдів на різних стадіях розробки;
- дослідження впливу вібростану основних механізмів наземної частини ВК на вібростан ШК.
- проведення детального опису дефектів, що мали місце в процесі експлуатації, і вимірювання величини зносу окремих елементів ГН у випадку

зупинки експлуатації ШГНУ, зумовленою її відмовою з` демонтуванням і відправкою на ремонтну базу для подальшої розборки;

– дослідження закономірностей зміни зусиль в верхній точці полірованого штока, зумовлених технічним станом ГН.

3. Технічне забезпечення експериментальних досліджень.

При проведенні експериментальних досліджень використовуються наступні технічні засоби, розроблені науково-дослідною лабораторією технічної діагностики при кафедрі автоматизованого управління (АУ) ІФДТУНГ:

– мікропроцесорна інформаційно-обчислювальна система (МІОС-01), основним вузлом якої є конструктивно завершений вимірювальний блок (ВБ), що монтується на полірованому штоці і призначений для вимірювання навантаження на штангову колону в точці підвісу, а також параметрів вібрації в поздовжньому і поперечному напрямках до осі полірованого штока;

– конструктивно завершений вимірювальний блок з магнітним вузлом кріплення, який дозволяє встановлювати ВБ в будь-якому місці на корпусі основних механізмів ВК (привідного електродвигуна, редуктора, важільного механізму, кривошипа) для дослідження їх вібростану і впливу останніх на вібростан ШК.

Фонд НГВУ "Надвірна нафтогаз" складає 155 глибинно-насосних свердловин, а середня глибина спуску насосів – 1850 м. В основному використовуються насоси типу НСВ діаметром 32 мм та числом качань рівним 6.

4. Порядок проведення експериментальних досліджень.

4.1. Дослідження впливу технічного стану вузлів установки на вібростан ШГНУ.

4.1.1. При дослідженні впливу технічного стану вузлів ГН на вібростан ШГНУ методом пасивного експерименту необхідно відібрати свердловини одного

родовища з подібними параметрами покладу, які експлуатуються ШГНУ визначеного типорозміру з оптимально визначеними параметрами режиму відкачки флюїдів. При цьому результати, отримані на початку експлуатації ШГНУ будуть характеризувати її стан, який можна оцінити як відмінний. Визначені періоди 10; 90; 220 – діб експлуатації, зумовлюються поступовим розвитком деградаційних процесів в елементах ГН, які призводять до значних змін його технічного стану, що відображається на зміні характеристик коливних процесів в ШК. Період роботи ШГНУ в 220 діб відповідає передаварійному періоду експлуатації, на протязі якого можуть мати місце як раптові відмови, зумовлені обривом ШК, так і поступові (зносіві) і був вибраний виходячи з результатів обробки статистичних даних по аварійності. Подальша експлуатація ШГНУ при цьому є не лишень економічно недоцільною, але може призвести до виникнення аварійних зупинок.

4.1.2. При знаходженні головки балансира у верхній крайній точці відключають електропривід ВК.

4.1.3. Проводять монтаж ВБ на полірованому штоці під траверсами канатної підвіски.

4.1.4. За допомогою вимірювального кабеля через роз'єми проводиться під'єднання ВБ до МІОС-01.

4.1.5. Проводять включення привідного електродвигуна ВК, вимірювання і реєстрацію параметрів вібрації та зусилля в ШК у верхній точці в файл, (вимірювання параметрів вібрації – віброприскорення, провести в повздовжньому і поперечному, до осі полірованого штока, напрямках. З метою отримання достовірної інформації, реєстрацію вказаних параметрів проводять протягом трьох циклів роботи установки.

4.2. Дослідження закономірностей зміни коливних процесів в ШК, обумовлених технічним станом ГН при його експлуатації в свердловинах, які характеризуються регулярним виникненням аварійних зупинок ШГНУ.

Експерименти проводять на свердловинах, експлуатація яких характеризується регулярним виникненням аварійних ситуацій.

Порядок проведення експериментів аналогічний проведеному в п.4.1.2.-4.1.5.

Періодичність проведення вимірювання параметрів вібрації і зусилля в ШК у верхній точці 1 раз в 15 днів.

4.3. Дослідження впливу технологічних параметрів роботи свердловини на закономірності зміни коливних процесів в ШК.

Експерименти проводяться на свердловинах, які відрізняються геологічними, технічними та технологічними параметрами.

Порядок проведення експериментів аналогічний проведеному в п.4.1.2.-4.1.5.

4.4. Дослідження впливу вібростану елементів наземної частини ВК на вібростан ШК.

4.4.1.- 4.4.2. Виконуються пункти, аналогічно п.п. 4.1.2.-4.1.3.

4.4.3. ВБ з магнітним вузлом кріплення послідовно встановлюється в найбільш віброактивних місцях на корпусах основних механізмів ВК згідно схеми, приведеної на рис.1.(на корпусі привідного електродвигуна, в місці встановлення опорних підшипників; на корпусі редуктора, на кривошипі, в місці встановлення підшипника цапфи; на шатуні, в місці встановлення підшипника шатуна; на траверсі; в місці встановлення підшипника хрестовини траверси; на балансірі, в місці встановлення підшипника балансиру).

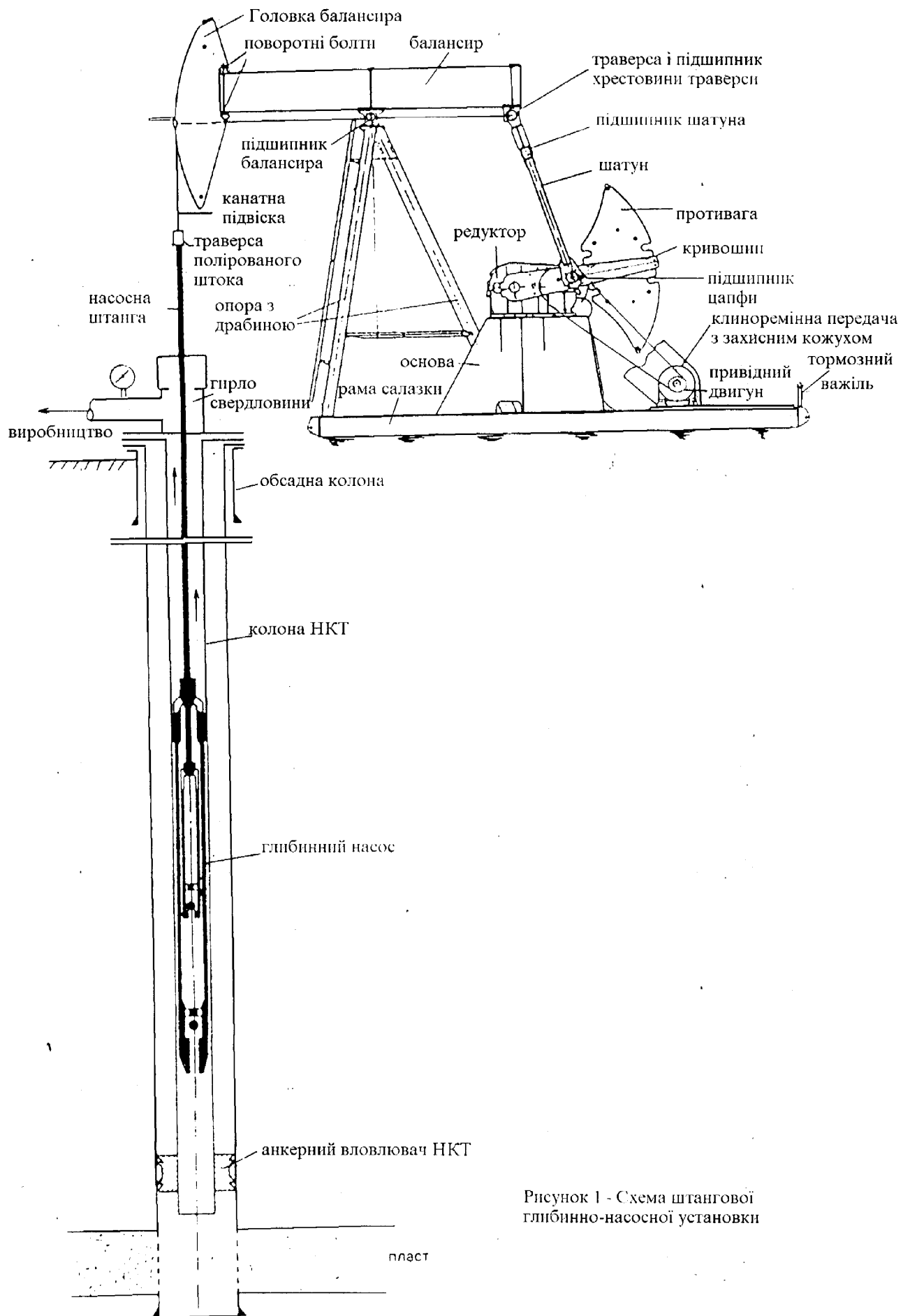


Рисунок 1 - Схема штангової глибинно-насосної установки

4.4.4. За допомогою вимірювального кабеля через роз'єми проводиться під'єднання ВБ з магнітним вузлом кріплення до МІОС-01.

4.4.5. Аналогічно п.4.1.5. проводиться вимірювання і реєстрація параметрів вібрації і зусилля у верхній точці ШК в файл.

Вимірювання параметрів вібрації основних механізмів ВК проводяться в трьох напрямках: поздовжньому, поперечному і перпендикулярному до осі механізму, вібростан якого оцінюється.

4.4.6. Проводять виключення МІОС.

4.4.7. Проводять виключення привідного електродвигуна ВК і демонтаж ВБ.

4.4.8. Включають електропривід ВК.

Представники НГВП "Надвір-
нанафтогаз"

Начальник виробничо-технічного
відділу

 Я.Яцура

Інженер виробничо-технічного
відділу

 М.Гунда

Начальник 1-го нафтопромислу

 О.Велкий

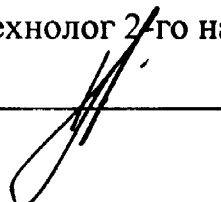
Начальник 2-го нафтопромислу

 Я.Павлюк

Технолог 1-го нафтопромислу

 В.Бойчук

Технолог 2-го нафтопромислу

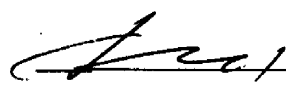
 П.Підгородецький

Представники ІФДТУНГ:


Науковий керівник робіт,
зав.кафедри АУ, д.т.н., професор


 Л.Заміховський


Відповідальний виконавець:
К.т.н., доцент кафедри АУ

 В.Шумада

Науковий співробітник

 В. Бандура
Інженер

 О. Євчук

Інженер
 В. Ровінський



А К Т

Ми, що нижче підписалися, начальник технічного відділу НГУ "Надвірнанафтогаз" Яцура Я. В., інженер виробничо-технічного відділу Гунда М.В., нач.1-го нафтопромислу – Велкий О.І., технолог 1-го нафтопромислу – Бойчук В.І. з одного боку, і представники ІФДТУНГ – зав.кафедри АУ д.т.н., проф. Заміховський Л.М., к.т.н., доцент кафедри АУ Шумада В.М., асистент кафедри АУ Бандура В.В. з другого боку, склали цей акт в тому, що розроблена на кафедрі автоматизованого управління ІФДТУНГ мікропроцесорна інформаційно-обчислювальна система (МІОС-01), яка призначена для збору інформації про вібраційний стан ШГНУ і навантаження на штангову колону в точці підвісу в реальному масштабі часу та її подальшої обробки за алгоритмами діагностування технічного стану ШГНУ в процесі експлуатації (за наземними динамограмами та віброграмами), пройшла промислову апробацію на свердловинах: Пнів-3, Битків-588, Битків-463, Битків-260, Битків-320 в період з березня 1999 року по квітень 2000 року і продовжує використовуватися при проведенні діагностування стану ШГНУ.

Начальник виробничо-технічного відділу "

Я.Яцура

Інженер виробничо-технічного відділу

М.Гунда

Начальник 1-го нафтопромислу

О.Велкий

Технолог 1-го нафтопромислу

В.Бойчук

Начальник 2-го нафтопромислу

Я.Павлюк

Технолог 2-го нафтопромислу

П.Підгородецький

Зав.кафедри АУ, д.т.н., проф.

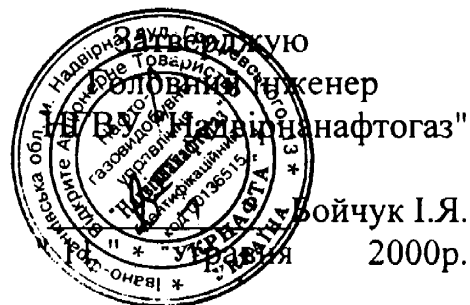
Л.Заміховський

К.т.н., доцент кафедри АУ

В.Шумада

Асистент кафедри АУ


В.Бандура



А К Т

Ми, що нижче підписалися, начальник виробничо-технічного відділу НГВУ "Надвірнанафтогаз" Яцура Я. В., інженер виробничо-технічного відділу Гунда М.В., нач.1-го нафтопромислу – Велкий О.І., технолог 1-го нафтопромислу – Бойчук В.І. з одного боку, і представники ІФДТУНГ – зав.кафедри АУ д.т.н., проф. Заміховський Л.М., к.т.н., доцент кафедри АУ Шумада В.М., асистент кафедри АУ Бандура В.В. з другого боку, склали цей акт в тому, що розроблена на кафедрі автоматизованого управління ІФДТУНГ методика вібраційного контролю технічного стану ШГНУ передана для апробації з подальшим впровадженням на свердловинах: Пнів-3, Битків-588, Битків-463, Битків-260, Битків-320.

Начальник виробничо-технічного відділу

 Я.Яцура

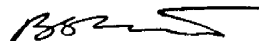
Інженер виробничо-технічного відділу

 М.Гунда


Начальник 1-го нафтопромислу

 О.Велкий

Технолог 1-го нафтопромислу

 В.Бойчук

Начальник 2-го нафтопромислу

 Я.Павлюк

Технолог 2-го нафтопромислу

 П.Підгородецький


Зав.кафедри АУ, д.т.н., проф.

 Л.Заміховський

К.т.н., доцент кафедри АУ

 В.Шумада

Асистент кафедри АУ

 В.Бандура

Затверджую
начальник НГВУ
"Долинанафтогаз"



[Signature] Гнип М.П.
"11" травня 2000р.

Ми, що нижче підписалися, начальник ЦВНГ №1 В.Дубей, Інженер-технолог ЦВНГ №1 В.Долішній, інженер І-ї категорії техн.відділу НГВУ "Долинанафтогаз" В.Ровенчак, з одного боку, і представники ІФДТУНГ – зав.кафедри АУ д.т.н., проф. Заміховський Л.М., к.т.н., доцент кафедри АУ Шумада В.М., асистент кафедри АУ Бандура В.В. з другого боку, склали цей акт в тому, що розроблена на кафедрі автоматизованого управління ІФДТУНГ методика вібраційного контролю технічного стану ШГНУ передана для апробації з подальшим впровадженням на свердловинах: №276-Д, 331-Д, 59-Д.

Начальник ЦВНГ №1

В.Дубей

Інженер-технолог ЦВНГ №1

В.Долішній

інженер І-ї категорії техн.відділу
НГВУ "Долинанафтогаз"

В.Ровенчак

Зав.кафедри АУ, д.т.н., проф.

Л.Заміховський

К.т.н., доцент кафедри АУ

В.Шумада

Асистент кафедри АУ

В.Бандура



Затверджую
начальник
НГВУ "Долинанафтогаз"
[Signature] Гніп М.П.
11 " " травня 2000р.

Ми, що нижче підписалися, начальник ЦВНГ №1 В.Дубей, Інженер-технолог ЦВНГ №1 В.Долішній, інженер І-ї категорії техн.відділу НГВУ "Долинанафтогаз" В.Ровенчак, з одного боку, і представники ІФДТУНГ – зав.кафедри АУ д.т.н., проф. Заміховський Л.М., к.т.н., доцент кафедри АУ Щумада В.М., асистент кафедри АУ Бандура В.В. з другого боку, склали цей акт в тому, що розроблена на кафедрі автоматизованого управління ІФДТУНГ мікропроцесорна інформаційно-обчислювальна система (МІОС-01), яка призначена для збору інформації про вібраційний стан ШГНУ і навантаження на штангову колону в точці підвісу в реальному масштабі часу та її подальшої обробки за алгоритмами діагностування технічного стану ШГНУ в процесі експлуатації (за наземними динамограмами та віброграмами), пройшла промислову апробацію на свердловинах №276-Д, 331-Д, 59-Д в період з березня 1999 року по квітень 2000 року і продовжує використовуватися при проведенні діагностування стану ШГНУ.

Начальник ЦВНГ №1

В.Дубей

Інженер-технолог ЦВНГ №1

В.Долішній

інженер І-ї категорії техн.відділу
НГВУ "Долинанафтогаз"

В.Ровенчак

Зав.кафедри АУ, д.т.н., проф.

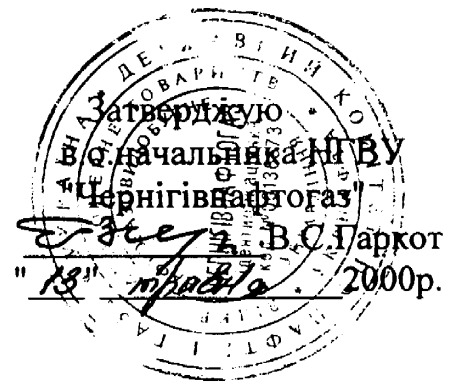
Л.Заміховський

К.т.н., доцент кафедри АУ

В.Щумада

Асистент кафедри АУ

В.Бандура

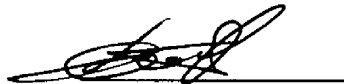



АКТ


Ми, що нижче підписалися, головний інженер Гаркот В.С., головний механік Прозур В.П., замісник начальника цеха №4 Лукачин Д.Г. від НГВУ "Чернігівнафтогаз" і від Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу зав.кафедри автоматизованого управління д.т.н., проф. Заміховський Л.М., к.т.н., доцент кафедри АУ Шумада В.М., науковий співробітник Бандура В.В. з другого боку, склали цей акт в тому, що розроблена на кафедрі автоматизованого управління "Методика вібраційного контролю технічного стану ШГНУ в процесі експлуатації", яка пройшла промислову апробацію на нафтопромислах НГВП "Надвірнанафтогаз", передана для апробації з подальшим впровадженням на свердловинах: № 2,7 Ярошівського родовища, № 14, 16 Скороходівського родовища, №9 Петрушівського родовища НГВУ "Чернігівнафтогаз".

Підпис:


 Гаркот В.С.

 Прозур В.П.

 Лукачин Д.Г.

 Заміховський Л.М.

 Шумада В.М.

 Бандура В.В.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з навчальної роботи

Івано-Франківського державного
технічного університету нафти і

газу, в.т.н., професор



В.І. Векерик

15 травня

2000р.

ДОВІДКА

про використання в навчальному процесі наукових результатів дисертаційної роботи Бандури В.В. "Розробка методу вібраційного контролю технічного стану штангових глибинно-насосних установок для видобутку нафти", представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

1. Дані про використання наукових результатів дисертаційної роботи Бандури В.В. в навчальному процесі Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу приведені в таблиці 1.

2. Як додаткова література використані такі роботи Бандури В.В.:

2.1. Бандура В.В., Заміховський Л.М. Аналіз причин, що обумовлюють надійність глибинно-насосної штангової установки // Збірник матеріалів XII Міжнародної міжвузівської школи-семінару "Методи і засоби технічної діагностики", – м. Івано-Франківськ, ІФДТУНГ, 1995 р.,- 222с.

2.2. Бандура В.В., Заміховський Л.М. Умови виникнення і розвитку дефектів глибинно-насосної штангової установки (ГНШУ) // Деп і ІНТІ України 04.10.96 р. №10 Ук96.

2.3. Бандура В.В., Заміховський Л.М. Діагностична модель штангової установки. // Тез.Наук.-техн. конф.проф.- викл. складу ун-ту.-м.Івано-Франківськ, 1996 р.

2.4. Бандура В.В. Логическая модель вставного насоса ГНШУ // Сборник трудов XV Международной межвузовской школы-семинара "Методы и средства технической диагностики". –Йошкар-Ола, МарГУ, 1998.-194с.

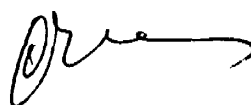
3. Наукові результати роботи Бандури В.В. використовуються в дипломному проектуванні та в студентських наукових семінарах і конференціях.

Таким чином, використання в навчальному процесі ІФДТУНГ основних результатів дисертаційної роботи Бандури В.В. дозволяє познайомити майбутніх інженерів (спеціалістів) з найсучаснішими досягненнями в галузі технічної діагностики, що підвищує рівень професійної підготовки студентів спеціальності 7.091401 – Системи управління і автоматики.

Таблиця 1

дисципліна	розділ в робочій програмі	Основні результати, які використовуються в навчальному процесі
1. Основи надійності і технічної діагностики	<ul style="list-style-type: none"> – фактори, які впливають на надійність технічних об'єктів; – контроль роботоздатності (запасу роботоздатності) 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Методика визначення моменту часу сприйняття навантаження за максимальним значенням взаємкореляційної функції між реальною і еталонними динамограмами. 2. Метод вібраційного контролю технічного стану ШГНУ
2. Проектування систем діагностування	<ul style="list-style-type: none"> – побудова і аналіз діагностичних моделей; – діагностичні моделі нафтогазового обладнання, механізмів і систем управління; – завдання умов роботоздатності автоматичних систем; – приклади аналізу діагностичних моделей. 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Логічна діагностична модель штангової установки. 2. Математична діагностична модель ШГНУ.

Декан факультету
автоматизації та електрифікації
канд.техн.наук, професор



С.А.Чеховський

Затверджую
Проректор з наукової роботи
Івано-Франківського державного
технічного університету нафти і газу
Д.А.В. проф.



Р.М.Кондрат

травня 2000р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи Бандури В.В.
"Розробка методу вібраційного контролю технічного стану штангових
глибинно-насосних установок для видобутку нафти":

Довідка видана про те, що основні результати дисертаційної роботи:
Бандури В.В. "Розробка методу вібраційного контролю технічного стану
штангових глибинно-насосних установок для видобутку нафти":

- логічна діагностична модель вставного насоса ШГНУ;
- математична діагностична модель ШГНУ;
- методика визначення моменту часу сприйняття навантаження на штангову колону;
- метод вібраційного контролю технічного стану ШГНУ,

знайшли відображення в наступних держбюджетних тематиках:

- "Розробка теоретичних та методологічних принципів діагностики обладнання нафтогазового комплексу України", частина науково-дослідної тематики Д-45/1, номер державної реєстрації в УкрНІНТІ №0196U014525;
- "Діагностування стану технічних об'єктів на основі обмеженої інформації про переміщення точок їх поверхні", частина науково-дослідної теми Д6-Ф, номер державної реєстрації в УкрНІНТІ №0198U005799;

Держбюджетні роботи виконувалися в рамках координаційного плану, що входить в координаційний план міністерства освіти України "Наукові основи розробки нових технологій видобутку нафти і газу, газопромислового обладнання, поглибленої переробки нафти і газу з метою одержання високоякісних моторних палив, мастильних матеріалів, допоміжних продуктів і нафтохімічної сировини", згідно національної програми "Нафта і газ України до 2010 року".

Директор НДІ НГТ
канд.техн.наук, доцент

В.В.Дячук