

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

На правах рукопису

Ровінський Віктор Анатолійович

УДК 622.276.53:621.671(047)

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ВАТМЕТРОГРАФІЧНИХ
МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ШТАНГОВИХ
ГЛИБИННО-НАСОСНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ
ВИДОБУТКУ НАФТИ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ
ЗАСОБІВ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ**

**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.**

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТРАДИЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ.....	10
1.1. Аналіз традиційних методів діагностування ШГНУ	10
1.2. Особливості методів діагностування ШГНУ за ватметрограмами та перспективи їх розвитку	17
1.3. Класифікація методів вимірювання споживаної електричної потужності	21
1.4. Аналіз технічних засобів контролю за споживаною потужністю електроприводів ВК	24
1.5. Постановка задачі та вибір напрямку досліджень.....	28
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ВАТМЕТРОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ	30
2.1. Аналіз відомих математичних діагностичних моделей верстатів-качалок	30
2.2. Вдосконалення статичної моделі верстата-качалки.....	33
2.3. Розробка динамічної математичної моделі верстата-качалки.....	38
2.4. Особливості визначення механічного моменту редуктора верстата-качалки за вимірюванням потужності його привідного електродвигуна	51
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВАТМЕТРОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ	55
3.1. Розробка методики проведення експериментальних досліджень ватметрографічного методу	55
3.2. Розробка методу швидкісних характеристик для діагностування ШГНУ	59
3.3. Розробка методики визначення маси зрівноважуючих вантажів	62

3.4. Розробка технічного забезпечення експериментальних досліджень	66
3.4.1 Вибір структурної схеми та вузлів інформаційно-вимірювальної системи.....	66
3.4.2 Розробка додаткових апаратних засобів експериментальних досліджень.....	68
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАТМЕТРОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ.	72
4.1. Порівняльний аналіз статичних моделей верстатів-качалок.....	72
4.2. Порівняльний аналіз характеристик розробленої динамічної моделі верстата-качалки	76
4.3. Числове моделювання методу швидкісних характеристик при діагностування ШГНУ	77
4.4. Аналіз частотних характеристик споживаної потужності електроприводу верстатів-качалок.....	80
4.5. Перевірка методики визначення мас зрівноважуючих вантажів.	84
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ ЗА ВАТМЕТРОГРАФІЧНИМ МЕТОДОМ.....	88
5.1. Обґрунтування конфігурації мікропроцесорної системи діагностування ШГНУ.....	88
5.2. Характеристика існуючих проблем та розробка алгоритму функціонування спеціалізованого вимірювача споживаної потужності привідного двигуна ВК.....	90
5.3. Розробка апаратної частини вимірювального перетворювача	96
5.3.1 Створення структурної схеми вимірювального перетворювача.	96
5.3.2 Обґрунтування та вибір елементної бази ВП.	98
5.3.3 Розробка електричної принципової схеми ВП.....	101
5.3.4 Програмна реалізація вимірювача споживаної потужності привідного двигуна ВК.....	115

5.3.5	Реалізація програми високого рівня ІВС.....	117
5.4.	Оцінка точності вимірювань.....	120
5.5.	Оцінка достовірності діагностування.....	123
ВИСНОВКИ	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		129
ДОДАТКИ		139

ВСТУП

Актуальність теми. Основою комплектації діючого фонду нафтових свердловин є штангові глибинно-насосні установки (ШГНУ), за допомогою яких видобувається близько половини всієї нафти з родовищ, що розташовані на території України. Це пояснюється експлуатаційною простотою ШГНУ, яка забезпечує зручність їх експлуатації. Відмови ШГНУ призводять до необхідності проведення ремонту свердловини, що вимагає значного часу та коштів.

Аналіз сучасного стану методів діагностування ШГНУ показав, що найбільш розповсюдженим залишається динамографічний метод, якому попри беззаперечні переваги (простота, оперативність, точність), притаманний ряд недоліків, пов'язаних із діагностуванням стану наземного обладнання та визначенням ступеня зрівноваженості верстата-качалки (ВК). Ватметрографічні методи діагностування, початок розробки яких припав на 60^{-і} роки ХХ століття, не набули свого поширення через низьку точність виділення діагностичної інформації про стан підземного устаткування та необхідність використання для цього дорогого на той час обчислювального обладнання. Водночас у ватметрограмі міститься важлива додаткова інформація про стан механізмів наземної частини ШГНУ. Виділення інформації про стан підземного та наземного обладнання вимагає підвищеної точності вимірювання ватметрограми та розрахунку з неї моментограми для привідного двигуна ШГНУ. У зв'язку з цим проблема вдосконалення ватметрографічного методу діагностування ШГНУ постає в аспекті підвищення точності вимірювання ватметрограм і є актуальною з погляду народногосподарського значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертації є частиною планових науково-дослідних програм із розвитку нафтопромислового комплексу України і базується на результатах довготривалої науково-дослідної роботи "Розробка теоретичних та методологічних принципів діагностування обладнання нафтогазового комплексу України", частина науково-дослідної теми 45/1, номер державної

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 у національну програму "Нафта і газ України".

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є подальший розвиток ватметрографічного методу діагностування ШГНУ, спрямованого на підвищення ефективності процесу діагностування шляхом удосконалення відомої та розробки нової математичної моделі верстата-качалки, методів і засобів вимірювання споживаної потужності.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Провести аналіз відомих методів діагностування ШГНУ, акцентувавши увагу на особливостях ватметрографічних методів діагностування та методах і засобах вимірювання споживаної потужності.

2. Вдосконалити існуючі безінерційні моделі і розробити нову діагностичну модель верстатів-качалок з врахуванням явища інерції рухомих мас зрівноважуючих вантажів.

3. Розробити метод визначення маси зрівноважуючих вантажів верстата-качалки.

4. Розробити методичне, технічне та програмне забезпечення експериментальних досліджень технічного стану ШГНУ та верстата-качалки в процесі експлуатації.

5. Розробити метод діагностування ШГНУ з урахуванням швидкості обертання ротора приводу верстата-качалки.

6. Розробити мікропроцесорну систему для реалізації ватметрографічного методу діагностування ШГНУ і оцінити її точність.

7. Провести промислову апробацію розроблених методу і мікропроцесорної системи діагностування ШГНУ на нафтопромислах ВАТ "Укрнафта".

Об'єктом досліджень досліджень є механічний спосіб видобутку нафти за допомогою ШГНУ, при експлуатації яких виникають різноманітні дефекти, що спричиняють аварійні ситуації та зміну стану ШГНУ, який не завжди однозначно можна визначити через технічні особливості загальноприйнятого динамографічного методу діагностування.

Предмет дослідження - методи і технічні засоби діагностування ШГНУ за ватметрограмами.

Методи дослідження. Для вирішення аналізу поставлених у роботі задач використовувалися чисельні методи математичного аналізу; методи технічної діагностики; методи системо- і схемотехніки; методи спектрального та кореляційного аналізу, методи імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вдосконалена статична діагностична модель верстата-качалки, яка дозволяє підвищити точність отримання динамограм у перерахунку з ватметрограм і тим самим збільшити вірогідність оцінки стану заглибного насоса ШГНУ.

2. Вперше створена динамічна діагностична модель верстата-качалки, яка враховує моменти інерції зрівноважувачів вантажів верстата-качалки та ротора її привідного електродвигуна, що дозволяє підвищити на 1...5 % точність оцінки стану заглибного насоса ШГНУ при роботі її в динамічному режимі.

3. Встановлений взаємозв'язок зміни ковзання ротора електроприводу верстата-качалки від дії навантаження на штангову колону, зумовленого станом заглибного насоса, на основі якого розроблено метод діагностування ШГНУ за швидкісними характеристиками.

4. Вперше розроблено непрямий метод визначення маси зрівноважувачів вантажів верстата-качалки, використання якого дозволяє підвищити точність перерахунку ватметрограми в динамограму та проводити операції зрівноваження верстата-качалки.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- розробці алгоритмів: діагностування ШГНУ за ватметрограмами, визначення мас зрівноважуючих вантажів верстата-качалки та точного вимірювання потужності у межах мінімальних значень;

- створенні первинного перетворювача споживаної потужності для електроприводу верстата-качалки, який може використовуватися і для вимірювання крутного моменту на роторах асинхронних електродвигунів електроприводів механізмів об'єктів нафтогазового комплексу;

- розробці мікропроцесорної системи діагностування ШГНУ за ватметрографічним методом, що дозволяє підвищити вірогідність постановки діагнозу про її стан;

- створенні програмного забезпечення мовами CodeVision AVR C та Delphi, системи діагностування ШГНУ, що дозволяє реалізувати розроблені алгоритми визначення стану ШГНУ і зрівноваженості верстата-качалки.

Розроблений метод і мікропроцесорна система діагностування пройшли промислову апробацію на свердловинах 557, 560, 1604 НГВУ "Бориславнафтогаз" та свердловинах Б-320, Б-588, Б-420, Б-463 НГВУ "Надвірнанафтогаз" і прийняті до подальшого впровадження.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень використано в навчальному плані – в робочих програмах дисциплін: "Основи теорії надійності і технічної діагностики систем", "Методи і засоби діагностування об'єктів нафтогазового комплексу" та "Проектування систем діагностування", які читаються для студентів спеціальності 7.091401 – "Системи управління та автоматизації".

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Проаналізовані особливості побудови вимірювачів потужності електродвигунів для діагностування ШГНУ [84]. Розроблено і досліджено вимірювач потужності приводу верстатів-качалок [80], розглянуто особливості процесу діагностування підземного нафтового обладнання [17]. В роботах, опублікованих в співавторстві, запропоновані конструкції чутливого елемента

тензометричного давача [74], та схемні рішення локальної системи діагностування ШГНУ [73]; проведено аналіз схемотехнічних рішень системи на базі ЕОМ для експериментальних досліджень [75], та проведено її макетування з АЦП на основі мікросхеми AD7714 [76]; проаналізовані способи одержання інформації при діагностуванні зрівноваженості верстатів-качалок [56], та запропоновано метод експериментального визначення мас зрівноважуючих вантажів верстатів-качалок [57], проведена мінімізація електронно-вимірювальних схем апаратної частини [60]; проведено моделювання похибки цифрових ватметричних систем [81]; вдосконалена статична модель верстата-качалки та запропоновано спосіб побудови динамографічного давача [77].

Апробація результатів досліджень. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на XVI, XVII, XVIII та XIX міжнародних міжвузівських школах-семінарах "Методи і засоби технічної діагностики" (м. Івано-Франківськ, 1999, 2001, 2003 рр. та м. Йошкар-Ола, 2000, 2002 рр.); 9-й міжнародній конференції "Сучасні методи і засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики" (м. Ялта, 2001р.); 3-й науково-технічній конференції "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання" (м. Івано-Франківськ, 2002р.); науково-технічній конференції "Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів Леотест-2003" (м. Славське, 2003р.); 4-й національній науково-технічній конференції "Неруйнівний контроль та технічна діагностика" (м. Київ, 2003р.); наукових семінарах кафедри комп'ютерних технологій в системах управління і автоматики (2000 – 2003 рр.).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 14 робіт, з них 3 одноосібних.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, викладених на 124 сторінках тексту, 48 рисунків, 1 таблиці, списку використаних джерел, який містить 99 найменувань, та 12 додатків на 44 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТРАДИЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ

1.1. Аналіз традиційних методів діагностування ШГНУ

Серед традиційних методів діагностування сьогодні широко відомим є метод контролю ШГНУ за допомогою динамограм, який відображає зміну навантаження на полірованому штоку верстата-качалки. Результати обробки динамограми дозволяють розпізнати близько тридцяти різноманітних варіантів технічного стану свердловинного насоса чи підземного обладнання [1] (характер притоку свердловинної рідини, роботу клапанів, їх стан, знос плунжера і циліндра, негерметичність колони НКТ, тощо). Принцип діагностування впливає з розподілу сил в системі. Зусилля від дії рідини на плунжер штангового свердловинного насоса передається вгору по колоні штанг і далі через полірований шток, балансир, кривошипно-шатунний механізм, редуктор, клинопасову передачу – до привідного двигуна верстата-качалки. Інформація про зусилля в точці підвісу штанг містить повні і найменш спотворені дані про стан підземного насосного обладнання. Її отримують за допомогою гідравлічних або тензометричних давачів навантаження. Основним завданням динамографування є встановлення режиму роботи глибинного насоса, який характеризується наступними показниками: довжина повного ходу плунжера, ступінь заповнення циліндра насоса при ході плунжера вгору, який залежить від рівня рідини в затрубному просторі і чіткої роботи впускного клапана, наявність або відсутність пропускання рідини через клапани плунжера, або щілину між ним і циліндром насоса. Все це однозначно визначається за значеннями зусилля на плунжері і його положенням, які є глибинними параметрами. Очевидно, що поверхневі параметри відображають глибинні з деякою похибкою, зумовленою багатьма факторами. Вирішальними з них є деформація елементів установки, які знаходяться між місцем

встановлення давачів і глибинним насосом, а також сили сухого і в'язкого тертя, що виникають при їх русі.

Враховуючи сказане, різні способи динамографування слід оцінювати під кутом зору відповідності даних, одержаних від давачів, встановлених в тій чи іншій точці кінематичної системи глибинно-насосної установки, дійсним значенням зусилля і положення плунжера глибинного насоса.

Відомі декілька основних методів діагностування ШГНУ:

1. Розпізнавання дефектів ШГНУ безпосередньо за характерними ознаками форми кривої. Такий метод дає добрі результати (достовірне розпізнавання значної кількості видів відмов) для паралелограмних ПД і НД, тому багатьма авторами вирішувалася задача автоматизації обробки динамо- та ватметрограм з використанням ЕОМ. Так, Інститутом кібернетики АН АзСРСР було розроблено алгоритм автоматичного аналізу динамограм [1] за методом Белова І.Г. [2], згідно з яким встановлюються сім характерних точок динамограми, а за результатами заданої послідовності арифметичних і логічних операцій над координатами цих точок визначається стан ШГНУ. Однак сфера його використання обмежена – через неможливість обробки динамограми без нульових ліній і встановлених масштабів.

2. Метод діагностування стану ШГНУ за вторинними ознаками НД [3] базується на аналізі спектру сигналу, що поступає з давача зусиль із використанням базису Фур'є. За діагностичну ознаку 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 у відповідне число разів. Автори статті доводять, що вибрані діагностичні ознаки інваріантні паралельним переносам осей, і зміні масштабів за осями координат, положенню нульової лінії і початку відліку.

3. Відомі і детально розглянуті аналітичні методи визначення заглибної динамограми за наземною динамометричною інформацією з подальшим перерахунком на основі відомих математичних моделей [4]. Аналітичні методи

ґрунтуються на розв'язку телеграфних рівнянь і отриманні залежностей, що необхідні для використання. При цьому отримують вирази для переміщення і зусилля в будь-якому перерізі штангової колони, які в подальшому використовують для побудови заглибної динамограми. У відомій роботі [5] використовується класичний базис Фур'є для обробки сигналів, заданий у вигляді закону зміни в часі переміщення і зусилля на кінці штангової колони, з подальшим визначенням їх амплітуд і фазових співвідношень у будь-якому перерізі штанг, після чого проводять гармонічний синтез у точці прийняття сигналу. Вказана задача була також розв'язана інтегруванням телеграфного рівняння методом Даламбера-Рімана [6], 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 у середині вказаного інтервалу часу. Аналітичні методи діагностування стану ШГНУ мають великі функціональні можливості, оскільки дозволяють здійснити більш повну діагностику насосного обладнання в цілому. За розрахованою заглибною динамограмою можна отримати цілий ряд додаткових відомостей, які неможливо взяти з наземної динамограми. Крім цього, більш правильна геометрична форма плунжерної динамограми дозволяє якісніше проаналізувати залежності, що характеризують роботу свердловинного насоса. Використання аналітичних методів доцільне не лише для дослідження обладнання свердловин, які працюють із підвищеною динамікою, але й для звичайних свердловин, динамограми котрих за своєю формою близькі до паралелограму.

4. Детерміновано-статистичний підхід до діагностування ШГНУ [1] дозволяє провести повну алгоритмізацію процесу обробки динамограми на ЕОМ. Для цього кожна динамограма за допомогою лінійної зміни масштабів вписується в орієнтований за осями зусилля квадрат заданого розміру. При цьому усувається частина динамограми, яка містить несуттєві інформаційні

ознаки про робочий стан насоса. Відмінність цього підходу, який полягає в розкладі розгорнутої в часі динамограми в ряд за заданою системою рівнянь, полягає в тому, що система функцій розкладу знаходиться в результаті визначення деякого оптимального критерію якості за статистичними властивостями навчаючої вибірки, а не задається попередньо.

5. Метод різницевої кривої [7] ШГНУ дозволяє охопити діагностикою не тільки свердловини в межах паралелограмних динамограм, але й значну частину свердловин із притаманними їм динамічними динамограмами. 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 вгору і вниз, тобто порівнянні півперіодів розгорнутої в часі динамограми. Цей метод інваріантний до форми вхідного сигналу (динамограма – ватметрограма) та 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.

6. Метод автоматизованого діагностування [8] полягає в порівнянні двох наземних динамограм: реальної динамограми нормальної роботи, знятої після чергового ремонту свердловини, яка зберігається в пам'яті ЕОМ, і другої – дослідної. За основні діагностичні ознаки при обробці динамограм, вибрані проекції векторів, що з'єднують 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 вгору і вниз і т.д. Загальне число ознак – 12. Надійність описаного методу в значній мірі залежить від точності визначення координат характерних точок. Точне визначення цих координат можливе для паралелограмних динамограм, тобто для динамограм з малою динамікою. Крім того, ознаки апроксимуючих кривих для одних і тих самих відмов у випадку динамічних і паралелограмних

динамограм будуть відрізнятися. Таким чином, виникає необхідність зберігати не лише еталонні динамограми, але й сукупність ознак кожного дефекту з усіх свердловин, що є недоліком розглянутого методу. Розглянуті загальні методи діагностування ШГНУ можуть використовуватись як для динамографічного, так і для ватметрографічного способу одержання інформації – безпосередньо або за допомогою розрахунку динамограм із вимірних ватметрографічних залежностей.

7. Існує метод діагностування ШГНУ, описаний у [9, 10, 11], який полягає в тому, що через дискретні проміжки часу вимірюють потужність установки, будують діагностичну ватметрограму, згладжують її, визначають зміну швидкості зміни потужності через ті ж дискретні проміжки часу, будують фазову криву ватметрограми. Для кожної чверті фазової площини окремо визначають значення діагностичних коефіцієнтів, пропорційних до величини споживаної потужності L_I , за такими формулами:

$$\begin{aligned}
 L_I &= \sum_{j=1}^{n_I} \sqrt{p^2(t_j) + \dot{p}^2(t_j)}, & \text{при } p > 0, \dot{p} > 0 \\
 L_{II} &= \sum_{j=1}^{n_{II}} \sqrt{p^2(t_j) + \dot{p}^2(t_j)}, & \text{при } p < 0, \dot{p} > 0 \\
 L_{III} &= \sum_{j=1}^{n_{III}} \sqrt{p^2(t_j) + \dot{p}^2(t_j)}, & \text{при } p < 0, \dot{p} < 0 \\
 L_{IV} &= \sum_{j=1}^{n_{IV}} \sqrt{p^2(t_j) + \dot{p}^2(t_j)}, & \text{при } p > 0, \dot{p} < 0,
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

де $p(t_j)$ – дискретне значення середньої активної потужності установки в j -й момент часу;

$\dot{p}(t_j)$ – дискретне значення швидкості зміни цієї ж потужності в j -й момент часу;

$n_I, n_{II}, n_{III}, n_{IV}$ – відповідна кількість відліків.

З умов, що показують відношення евклідових відстаней від центра координат фазової площини до кожної точки фазової кривої, роблять висновок про стан насосної установки. Установка вважається аварійною при виконанні умови:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{L_{II}}{L_I} > 0.2 \\ \frac{L_{III}}{L_{IV}} > 0.2 \\ \frac{L_{II} \cdot n_I}{L_I \cdot n_{II}} > 0.3 \\ \frac{L_{III} \cdot n_{IV}}{L_{IV} \cdot n_{III}} > 0.3 \end{array} \right\}, \quad (1.2)$$

для незрівноважених установок, та умови $\forall L_I = 0$ для зрівноважених установок. Інакше установка вважається такою, що працює нормально. Водночас для визначення ступеня незрівноваженості установки в кожний момент часу t_j проводять визначення знаків потужності і швидкості її зміни для знаходження кількості відліків у кожній чверті фазової площини. Далі визначають кількість відліків на періоді качання верстата-качалки

$$N = n_I + n_{II} + n_{III} + n_{IV},$$

знаходять амплітуди першої a_1 та другої a_2 гармоніки ряду Фур'є, що описують залежність зміни середньої активної потужності від числа відліків, і виявляють стан зрівноваженості за співвідношенням амплітуд цих гармонік:

$a_1 < a_2$ – установка зрівноважена;

$a_1 \geq a_2$ – установка незрівноважена.

На основі цих даних проводять діагностування технічного стану ШГНУ. Недоліком такого методу слід вважати значну дискретність станів, що свідчить про низьку чутливість методу, а значить про незначну кількість станів, що підлягають діагностуванню.

8. Вібродіагностичний метод діагностування ШГНУ. Він полягає у записі та аналізі віброакустичних сигналів в деяких наперед визначених точках ШГНУ. Аналіз часових, частотних та статистичних характеристик цих сигналів дозволяє проводити діагностування вузлів ШГНУ (редуктора, електродвигуна, заглибного насоса) [12]. Метод дозволяє оцінити технічний стан заглибного обладнання в загальному (ступінь роботоздатності) за допомогою інтегральної характеристики (узагальненої діагностичної ознаки), але не сприяє виявленню

конкретних дефектів. Щодо наземної частини обладнання (редуктор, електродвигун) – то тут використовуються відомі способи вібродіагностики.

Теоретично, ватметрографічні методи є більш універсальними, оскільки несуть більше інформації про електропривід глибинно-насосної установки та про стан складових частин верстата-качалки. Ватметрографічні методи контролю дозволяють здійснити більш просто і надійно автоматичне керування верстатами, дистанційну передачу часових діаграм, а також одержати статистичну інформацію про роботу глибинно-насосних установок для подальшої її обробки на ЕОМ. Ватметрограма відображає характер зміни тангенціальних зусиль, що діють на валу кривошипа, від ваги штанг, вантажів на кривошипі та балансири, від коливань штанг у рідині, від інерційних зусиль за рахунок вантажів на балансири та кривошипі. Основний недолік цього методу – вплив кінематичної схеми верстата-качалки на корисний сигнал (з погляду проходження корисного сигналу від глибинного насоса, кінематична схема верстата-качалки працює як низькочастотний фільтр). Цей недолік можна розглядати і як перевагу, оскільки водночас відбувається діагностування стану і самого верстата-качалки (наприклад, його збалансованості). Крім того, за відомими параметрами кінематичної схеми верстата-качалки, її вплив на форму сигналу навантаження може бути повністю компенсований. Другий важливий недолік – складність точного визначення крутного моменту двигуна за спожитою електричною енергією [13]. Складність та наближений характер розрахункових залежностей призводить до подорожчання вимірювальної апаратури і гальмує розповсюдження таких діагностичних систем, внаслідок чого на сьогоднішній день ватметрографічний метод контролю штангових глибинно-насосних установок на Україні практично відсутній. Однак такий метод, у поєднанні з динамометричним, є незамінним при побудові комплексних стаціонарних ІВС експлуатаційного контролю ШГНУ, якими в майбутньому будуть обладнані всі свердловини такого типу.

1.2. Особливості методів діагностування ШГНУ за ватметрограмами та перспективи їх розвитку

Пристрої ватметрографічного контролю не набули значного поширення внаслідок вже згаданих притаманних їм недоліків. Це зазвичай пов'язано ще й з їх незручністю при використанні у якості пересувних діагностичних систем. Мобільна система при цьому повинна передбачати постійну наявність первинних давачів струму (трансформаторів струму з шунтуючими елементами) на свердловині, оскільки їх встановлення – це достатньо тривалий процес (15-45хв), який супроводжується розривом електричного кола привідного двигуна, і, як наслідок, – зупинкою верстата-качалки. Крім того, наявність клинопасової передачі в кінематичній схемі верстата-качалки вносить додаткову похибку в тракт передачі сигналу навантаження, що ускладнює його оцінку. Паспортні дані асинхронних електродвигунів, якими обладнувались верстати-качалки в СРСР, більшість з яких експлуатується в Україні й сьогодні, не містять деяких технічних даних (наприклад, взаємоіндуктивності між статором і ротором у схемі заміщення), необхідних для точного визначення їх потужності на валу за виміряним значенням спожитої електричної енергії. Наближені формули дають похибку 5-10 % і цим негативно впливають на загальну точність вимірювання.

Крім того, в усіх роботах про ватметрографічні методи діагностування ШГНУ автори нехтують нелінійністю привідного двигуна верстата-качалки, оскільки у найбільш поширених для насосних установок короткозамкнених асинхронних двигунах серії АСП потужністю від 1,7 до 55 кВт (згідно з відомими літературними джерелами) робочі характеристики (споживана потужність – потужність на валу) практично лінійні, починаючи з навантажень, що дорівнюють 15-20% від номінального [8].

Економічність та надійність експлуатації ШГНУ також залежить від правильного балансування ВК, причому ефективне зрівноважування штангової установки безпосередньо впливає на показники роботи установки і т.д. При поганому зрівноважуванні установки в насосних штангах зростає напруження

та частота обривів. Як вказано в [14], при підвищенні ступеня незрівноваженості установки з 7 до 15% частота обривів штанг збільшується в 3 рази. Сигнал механічної природи, достатньо інформативний для вирішення задач балансування ВК, може бути одержаний з кривошипа або визначений з моменту на валу редуктора, проте такі вимірювання трудомісткі [15]. Відомі способи зрівноважування ВК, які ґрунтуються на критеріях мінімального енергоспоживання або рівномірності навантаження двигуна [16]. При проведенні операції зрівноважування ВК необхідно знати масу зрівноважуваних вантажів. Як показує досвід, внаслідок наявності комбінованих ВК з недокументованими характеристиками, постає потреба в їх експериментальному визначенні з метою вводу одержаних даних в програми діагностування ШГНУ, реалізовані за допомогою обчислювальних засобів. Якщо вимірювання геометричних розмірів не викликає особливих труднощів, то маси зрівноважуваних вантажів відомі тільки орієнтовно, і за умови втрати експлуатаційної документації постає потреба в створенні методик для їх простого експериментального визначення.

Розвиток мікропроцесорних систем і значне зниження їх вартості спонукає прогнозувати розповсюдження в подальшому систем ватметрографічного діагностування штангових глибинно-насосних установок. Способи побудови систем діагностування за ватметрограмами можуть відрізнятися у залежності від конкретних експлуатаційних умов та допустимих вимог щодо інформаційної насиченості [17]. Відома незначна кількість приладів ватметрографічного контролю вітчизняного виробництва (СРСР, СНД) [44, 45, 48, 49]. За кордоном роботи в цьому напрямку проводяться інтенсивніше, як видно зі значної кількості відомих друкованих видань [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28], проте дані щодо роботи ватметрографічних пристроїв, як правило, обмежуються лише показом екранних форм робочих комп'ютерних програм, а вибірккові аналітичні залежності, які при цьому наводяться, не дають змоги створити придатну для практичної експлуатації систему.

Діаграма (див. рис.1.1) ілюструє основні відомі методи ватметричного діагностування ШГНУ. Реалізація цих методів вимагає різних апаратних затрат і забезпечує різні можливості діагностування. З метою швидкого практичного впровадження ватметрографічних методів, доцільно в першу чергу зосередити увагу на вдосконаленні методу розрахунку наземної динамограми за ватметрографічним сигналом. Це найбільш складний метод, який для своєї реалізації потребує вирішення всіх питань побудови, вдосконалення та узагальнення математичних моделей основних вузлів ШГНУ.

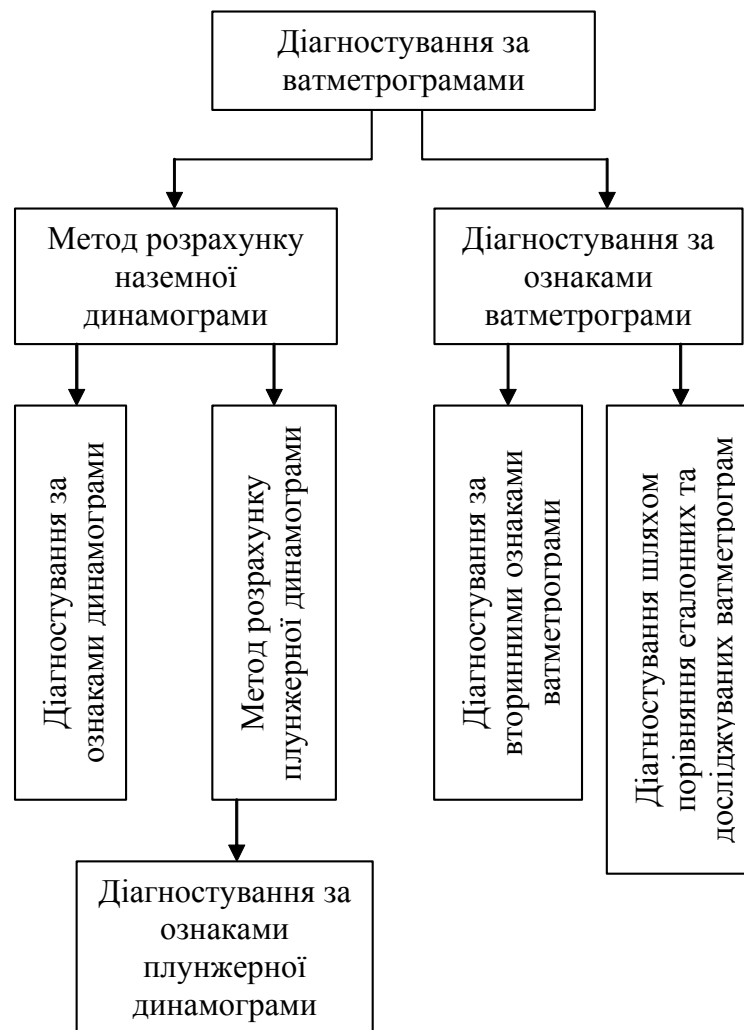


Рис. 1.1. Класифікація ватметричних методів діагностування ШГНУ

Аналіз інформаційних джерел дозволяє стверджувати, що в подальшому ВК будуть обладнуватись комбінованими контролерами діагностування та автоматизації, які включатимуть в себе як ватметрографічний, так і динамографічний методи діагностування, а також засоби регулювання

швидкості руху привідного двигуна ВК. Це викликано тим, що, як показали попередньо проведені експериментальні дослідження, ватметрографічні системи є малочутливими у випадку ударних навантажень незначної тривалості, викликаних заїданнями полірованого штока і т. п., внаслідок інерційності зрівноважуючих мас ВК, а також пружності клинопасової передачі та нежорсткої характеристики привідного електродвигуна ВК. Намагання зменшити кількість давачів на ВК [29] та застосування спрощених діагностичних моделей на даному щаблі розвитку техніки слід вважати не виправданими, оскільки такий підхід звужує можливості діагностичних систем, позбавляючи їх первинної інформації. Це означає, що, будучи в складі АСУ, така система може не тільки знижувати ризик виходу обладнання з ладу, а й збільшувати його внаслідок своєї реакції на невірно виявлений дефект. Крім того, в майбутньому привід ВК зазнаватиме змін, які будуть здійснюватись з метою підвищення ККД та збільшення рівномірності механічного навантаження на привідний двигун ВК. Такі зміни можуть виявитись в усуненні клинопасової передачі та заміні асинхронного електродвигуна на двигун постійного струму з системою стабілізації швидкості обертання. Заміна клинопасової передачі на передачі з більшим коефіцієнтом корисної дії, а саме на зубчастопасові, ланцюгові, тощо [30, 31] гальмується традиційними уявленнями конструкторів про недостатню надійність електромагнітних запобіжних пристроїв, що їх встановлюють у пускових колах привідних електродвигунів ШГНУ. Тому з метою максимального спрощення конструкції використовують клинопасові передачі, які після перевищення межі навантаження переходять у режим ковзання і, перетираючи паси, від'єднують двигун від навантаження. Однак виходячи з такої точки зору, використання більш складних механічних запобіжних муфт (обгінні муфти, муфти перевантаження [30, 31]) слід вважати доцільним для підвищення загального ККД установки та покращення точності її діагностування за допомогою ватметрографічних методів.

Узагальнюючи все вищесказане, можна зробити висновок про безсумнівну перспективність ватметрографічних методів діагностування ШГНУ та безперечну потребу розвитку таких, та подібних методів із подальшим впровадженням їх в експлуатаційну практику.

1.3. Класифікація методів вимірювання споживаної електричної потужності

Вибір принципів вимірювання споживаної електричної потужності для діагностування ШГНУ є важливим із погляду оптимальності побудови діагностичних систем. Очевидно, що для запису та відтворення ватметрограм привідних асинхронних електродвигунів ВК потрібні спеціалізовані ватметрографи, які дозволяють здійснювати безінерційне вимірювання усередненого, за період робочої частоти, значення потужності. Питання вимірювання споживаної електричної потужності різноманітних електричних машин розглядалось доволі давно [33, 34]. Відомі методи можна класифікувати наступним чином:

1. За робочою частотою напруг та струмів :
 - 1.1 Низькочастотні (з робочою частотою змінних напруг $0 \div 10^3$ Гц)
 - 1.2 Високочастотні (з робочою частотою напруг понад 10^3 Гц) [32]
2. За кількістю необхідних ліній вимірювання:
 - 2.1 Однофазні
 - 2.2 Багатофазні (три- і більше). Домінуючими є трифазні системи.
3. За способом вимірювання потужності трифазних систем [33]:
 - 3.1 Метод одного ватметра
 - 3.2 Метод двох ватметрів
 - 3.3 Метод трьох ватметрів
4. За способом одержання інформації про потужність [34]:
 - 4.1 Прямі: вимірювання напруг та струмів:
 - 4.1.1 Періодична вибірка з деякою, наперед визначеною і заздалегідь вищою від частоти робочих напруг, частотою та оцифрування значень напруг

та струмів, з подальшим перемноженням цих значень та інтегруванням на періоді робочої частоти. Застосовується в сучасних цифрових вимірювальних системах.

4.1.2 Однократне (або періодичне з низькою частотою опитувань) вимірювання амплітудних або діючих значень напруг та струмів, та постійне відслідковування зсуву фаз між ними, з подальшим обчисленням за формулою: $P = UI \cos \varphi$. Метод майже не зустрічається в цифрових системах.

4.2 Опосередковані (непрямі): вимірювання параметру, що прямо залежить від споживаної електричної потужності.

4.2.1 Вимірювання температури нагрівного елемента, включеного в досліджуване електричне коло (для вимірювання температури можуть бути використані вузли досліджуваної електричної машини).

5. За способом використаних обчислювачів:

5.1 Аналогові обчислювальні перетворювачі

5.1.1 Перемножувачі на феритових елементах. Мають значну надійність, проте точність їх низька і залежить від багатьох чинників, в першу чергу від температури ($\delta \in 1..5\%$).

5.1.2 Аналогові напівпровідникові інтегральні перемножувачі. Мають якісніші показники точності ($\delta \in 0.1..2.5\%$), однак гірші з точки зору надійності [35, 36, 37].

5.1.3 Квадратичні вентильні перетворювачі з кусково-лінійною апроксимацією параболи. Це керовані резистивні подільники напруги, коефіцієнт поділу яких залежить від величини напруги прикладеного сигналу [38].

5.2 Цифрові обчислювальні перетворювачі.

5.2.1 Обчислювачі загального призначення. Пристрої, побудовані за таким принципом роботи, як правило, містять цифрові обчислювальні перетворювачі, в якості яких можуть бути використані мікропроцесори, мікроконтролери, програмовані логічні інтегральні схеми.

5.2.2 Спеціалізовані обчислювачі. Використовуються спеціалізовані мікросхеми вимірювачів потужності [39, 40, 41].

В зв'язку з широким поширенням мікроконтролерів, широкого розвитку набувають методи, орієнтовані на використання цих пристроїв. В [42] описаний метод вимірювання електричної енергії на основі 16-розрядного мікроконтролера MSP-430, який використовує принцип зменшення кількості точок вимірювання значень напруг та струмів (Reduced Scan Principle), що дозволяє зменшити кількість вимірювань та обчислень вдвічі, використовуючи для обчислень (за наведеними формулами), попередньо вже виміряні значення. Метод безперечно заслуговує на увагу, однак він є інтелектуальною власністю Texas Instruments і може бути використаний в пристроях, які базовані виключно на мікроконтролерах цієї компанії.

Класифікація наведених методів вимірювання потужності може бути представлена наступним чином: (див. рис. 1.2)

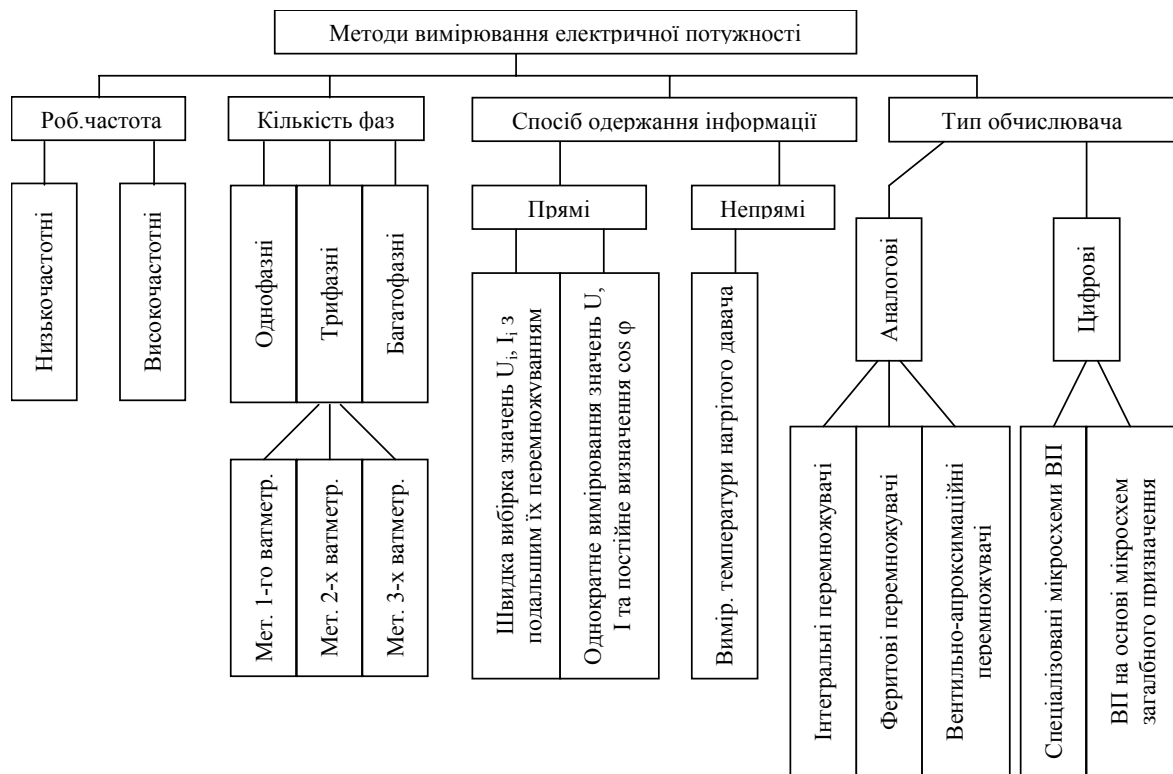


Рис. 1.2. Класифікація методів вимірювання споживаної електричної потужності

Виходячи з наведеної класифікації, можна видалити з кола придатних для діагностування ШГНУ методів непрямий (за вимірюванням температури елементів, що нагріваються) як такий, що занадто інерційний. Аналіз відомих цифрових інтегральних вимірювачів електричної енергії [39, 40, 41] виявив, що їх використання сьогодні обмежується їх параметрами (орієнтація на потужності до 10 кВт, інтегрування даних на тривалому часовому проміжку ≈ 1 сек, що зручно для вимірювачів (лічильників) спожитої електроенергії, але незручно для ватметрографів), доступністю цих елементів взагалі. Інші методи так чи інакше можуть бути використані (і використовуються) для побудови вимірювальних перетворювачів споживаної потужності приводних електродвигунів ВК. Підлягає сумніву доцільність використання феритових елементів у якості перемножувальних елементів вимірювачів – через нестабільність їх параметрів. Використання ж аналогових інтегральних перемножувачів у таких пристроях є цілком імовірним, і на даному рівні розвитку техніки вони можуть бути використані, оскільки спрощують схему та підвищують ремонтоздатність вимірювальних перетворювачів. Використання цифрових вимірювальних систем із мікросхемами загального призначення (АЦП, мікроконтролерами, програмованими логічними матрицями) є також доцільним, бо використання програмованих пристроїв дозволяє здійснити корекцію похибок різноманітного походження, присутніх у системі. Тому для розробки технічних засобів виберемо останній метод.

1.4. Аналіз технічних засобів контролю за споживаною потужністю електроприводів ВК

Дослідження доступної інформації про технічні засоби, так чи інакше пов'язаних з ватметрографічним методом діагностування ШГНУ, виявили незначну, в порівнянні з динамометричними системами, кількість таких серійних засобів. В основному це пов'язане із технологією експлуатації ШГНУ,

де, особливо для малодобітних свердловин, засоби автоматизації використовуються в обмежених формах, а діагностування здійснюється епізодично. Для такого способу експлуатації зручні динамографічні методи. Однак все більшого розповсюдження в світі набувають автоматизовані методи діагностування ШГНУ, що відображається на динаміці пропозицій виробників контролерів ШГНУ. Розглянемо деякі з відомих пристроїв.

Відомий перетворювач активної потужності [43] (СРСР), що використовується для автоматичного контролю момента на валу двигуна електробура, який, в разі під'єднання його до самописця, може бути використаний для ватметрографування ШГНУ. Пристрій повністю аналоговий з використанням феромагнітних дроселів із додатковим підмагнічуванням в якості перемножувальних вузлів.

Апаратно-програмний комплекс діагностування нафтової свердловини (КШГН) ТК-166.01 СКБ “Промавтоматика” (Росія) [44] призначений для автоматизації роботи верстата-качалки, оптимізації роботи обладнання, оперативного виявлення аварійних ситуацій та невідповідностей в режимі роботи обладнання. КШГН реалізує метод визначення параметрів та станів заглибного та наземного обладнання шляхом вимірювання та обробки діаграм активної потужності, яка витрачається електроприводом верстата-качалки на піднімання рідини (ватметрографування). Контролер ТК-166.01 є спеціалізованим мікропроцесорним пристроєм, який здійснює вимірювання струму та напруги живлення електродвигуна, обчислення в реальному часі потужності, та побудову графіка спожитої енергії протягом кожного циклу качань. Контролер містить математичний апарат для визначення стану обладнання та здійснює оперативне керування верстатом-качалкою у відповідності до результатів аналізу розрахованих параметрів та стану давачів. Комплекс дозволяє виявляти: обрив та ковзання клинопасової передачі, задири на полірованому штоці, обрив штанг, биття в редукторі, розбаланс противаг, заклинювання насоса, високу та низьку посадки плунжера, несправність клапанів насоса, незаповнення насоса, відсутність стовпа рідини. Крім того,

можливо визначити основні електричні характеристики: перевантаження за струмом, відхилення напруги від норми, перекози фаз, відхилення частоти мережі живлення від норми, визначення коефіцієнта гармонік для напруги живлення, визначення коефіцієнта реактивної потужності. Додаткові можливості включають у себе: автоматизоване балансування верстата-качалки, підрахунок спожитої електроенергії (активної та реактивної), автоматичне керування періодичною відкачкою (два режими), автоматичне виключення при аварійних ситуаціях. Одержання інформації здійснюється за допомогою триканального вимірювача напруги та триканального вимірювача струму [44].

Контролер автоматичного керування електродвигуном верстата-качалки із штанговим насосом “Таир-АК” (фірма “Виброцентр”, Росія) [45] призначений для :

- автоматичного відключення двигуна ВК при зниженні рівня рідини до приймального клапана;
- включення електродвигуна після часу технологічної паузи, яка визначається системою автоматично, виходячи з умов експлуатації системи “насос-свердловина”;
- оперативного виявлення дефектів стану установки електродвигуна, редуктора, клапанів, плунжерної пари, відкладень парафіну;
- розрахунку параметрів вантажів для зрівноважування ВК;
- математичне забезпечення контролера ґрунтується на трьох алгоритмах:
- реєстрації ватметрограми та перетворення її в аналог динамограми;
- діагностики стану та визначення ефективності роботи насосної установки;
- адаптивної експертної системи управління електродвигуном, виходячи із забезпечення максимальної ефективності роботи ШГНУ при мінімумі споживаної електроенергії;

Одержання інформації здійснюється за допомогою одноканального вимірювача напруги, одноканального вимірювача струму та безконтактного кінцевого давача положення балансира [45].

Фірма Stromag Inc., (Техас, США) [46] випускає систему Magna Speed Drives для регулювання частоти обертання роторів двигунів ВК. Вона забезпечує:

- вимірювання струму споживання електродвигунів та визначення їх крутного моменту;
- «м'який» старт електродвигуна;
- цифровий вивід швидкості качань ВК;
- контроль натягу канатної підвіски ВК;
- контроль стану заглибного обладнання ВК;
- вимірювання навантаження на полірований шток;

Робота системи базується на вимірюванні вихрових струмів. До системи можуть бути підключені двигуни 2-200 к.с. (1,5-150 кВт) [46] Слід зазначити, що діагностування електродвигунів шляхом вимірювання їх вихрових струмів є перспективним методом із погляду надійності розробленого обладнання. Його реалізація вимагає значної експериментальної бази даних сигналів [47], що характеризують відповідні режими конкретної моделі електродвигуна. Теоретичні електромагнітні моделі асинхронних двигунів є складними, тому для побудови універсальної ватметричної діагностичної системи для ШГНУ розробка такого методу вимагає проведення великої кількості дослідів зі всіма моделями електродвигунів, які використовуються в ШГНУ.

Прилад контролю стану верстатів-качалок “Тест-СК” (“Виброцентр”, Росія) [48] призначений для проведення діагностування технічного стану обладнання ВК. Він дозволяє проводити діагностування технічного стану не тільки штангового насоса, але й редуктора та привідного електродвигуна. В приладі використовується додатковий віброканал для діагностування технічного стану підшипників кочення редуктора та привідного

електродвигуна. Технічні характеристики приладу “Тест-СК” наведені в табл. А.1 (додаток А).

Типовий ряд станцій управління верстатами-качалками “Омь”, “Омь-2КС”, “Омь-1”, “Омь-2С”, “Омь-3К”, “Ангара”, що виробляються Омським електромеханічним заводом (Росія)[49], містять вимірювальні перетворювачі, призначені для одержання ватметрографічної інформації, та мікроконтролерні блоки аналізу одержаної інформації, що дозволяє також дозволяє говорити про використання в цих пристроях ватметричних методів діагностування ШГНУ.

Відсутність інформації про наявність вітчизняних технічних засобів ватметрографічного контролю ШГНУ свідчить про потребу створення таких засобів. А відсутність відкритої інформації про способи здійснення діагностування свідчить про необхідність проведення теоретичних досліджень, які б дали можливість будувати алгоритми ватметрографічного діагностування ШГНУ.

1.5. Постановка задачі та вибір напрямку досліджень

Виходячи з вищесказаного, слід визначити основні проблеми діагностування та шляхи їх можливого розв’язку. Основним напрямом роботи є модифікація та розробка методів та обладнання, придатних для діагностування ШГНУ. Базовим методом із погляду одержання інформації про стан ШГНУ є ватметрографічний – як такий, що несе додаткову інформацію про стан наземного обладнання ШГНУ, і тому потенційно більш інформативний. Основні питання, які повинні бути висвітлені в роботі :

- розробка методів розрахунку динамограм із ватметрографічних залежностей як можливий шлях швидкого впровадження ватметрографічних методів у практику діагностування ШГНУ, а також очевидного способу перевірки діагностичної достовірності цих методів;

- розробка методу визначення мас зрівноважуючих вантажів верстатів-качалок як необхідної передумови реалізації аналітично-розрахункових методів їх зрівноважування;
- визначення меж застосування розроблених методів та шлях їх розширення;
- розробка спеціалізованого вимірювального перетворювача потужності, придатного для роботи з ШГНУ. Особливістю цієї проблеми є широкий динамічний діапазон навантажень на двигун ШГНУ, що викликає необхідність більш точного вимірювання малих та від’ємних значень його споживаної електричної потужності;
- аналіз часових та частотних характеристик діагностичних сигналів на предмет додаткового виявлення дефектів ШГНУ;
- розробка апаратного забезпечення для проведення попередніх досліджень та реалізації промислового варіанту діагностичного обладнання;
- розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для проведення попередніх досліджень та для промислового варіанту розробленого методу;
- розробка модифікації методу для зменшеної, в порівнянні із базовим варіантом, кількості первинних датчиків;
- оцінка точності вимірювань для розроблених засобів вимірювання потужності.

Допускається використання елементів відомих традиційних та експериментальних методів – для покращення характеристик розроблюваного методу або обладнання.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ВАТМЕТРОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ

2.1. Аналіз відомих математичних діагностичних моделей верстатів-качалок

Суть моделювання полягає у встановленні аналітичних залежностей та алгоритмів, які б дозволяли одержувати наземні динамограми за сигналами споживаної потужності привідного асинхронного електродвигуна верстата-качалки або діагностувати стан ШГНУ за ватметрограмами безпосередньо. При цьому з погляду проходження корисного сигналу слід розглядати окремо механічний та електричний тракт ШГНУ як системи.

Аналіз відомих математичних моделей верстатів-качалок, які придатні для перетворення “ватметрограма/динамограма”, показує, що опис кінематичної схеми ВК, як правило, виконується зі спрощеннями. В [7] для ВК із комбінованим зрівноваженням визначення моменту на валу редуктора здійснюється за наступною формулою (індекси та позначення авторів статті зведені тут до прийнятої системи позначень для статичних моделей, представлених на рис.2.1:

$$M_{kr} = \frac{r_1 r_2}{\rho_1} \cdot F \sin \varphi - \frac{R_1 r_2}{\rho_1} m_1 g \left(\sqrt{1 - \left(\frac{r_2}{\rho_1} \right)^2} - \frac{R_1}{\rho_1} \cdot \frac{\omega^2 r_2}{g} \cos \varphi \right) - R_2 m_2 g \sin \varphi. \quad (2.1)$$

Тут ω – кутова швидкість обертання кривошипа (рад/сек).

При цьому вважається, що обертання кривошипа є рівномірним, швидкість та прискорення точки з'єднання балансира та кривошипа (А) підкоряються гармонічному закону, а їх рух – прямолінійний:

$$v_A = \omega r_2 \sin \varphi,$$

$$\alpha_A^\tau = \omega^2 r_2 \cos \varphi.$$

Потужність, яка споживається привідним електродвигуном ВК, визначається величиною результуючого крутного моменту сил на кривошипному валу редуктора:

$$W_{dw} = M_{kr} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \frac{1}{\eta_{dw} \eta_m \eta_{red} \eta_{kpp}}, \quad (2.2)$$

де n – частота обертання ротора електродвигуна (хв^{-1});

η_{dw} – ККД електродвигуна;

η_m – ККД передавального механізму, що враховує втрати на тертя;

η_{red} – коефіцієнт передачі редуктора (в більшості випадків $\eta_{red} = 38$);

η_{kpp} – передавальне число клинопасової передачі.

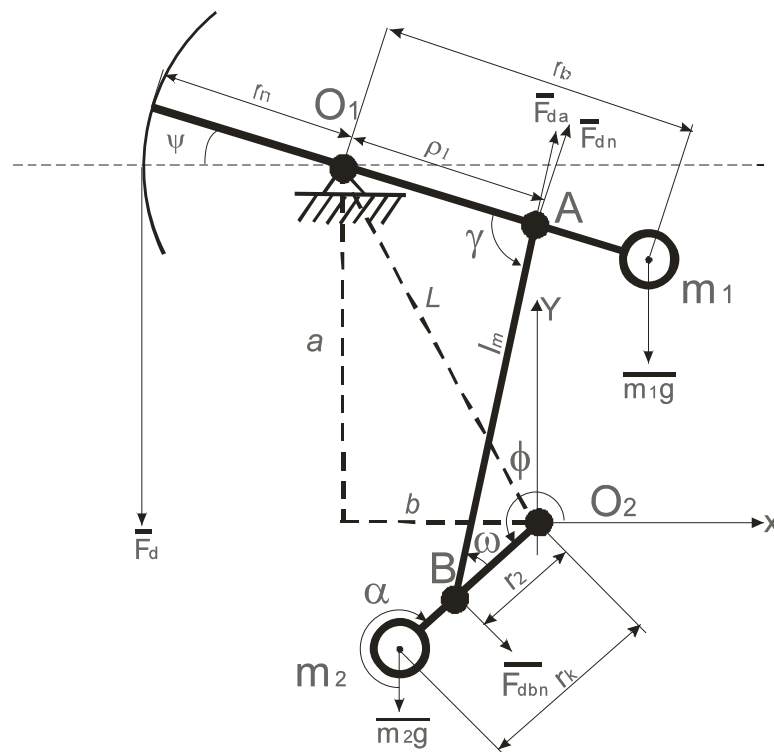


Рис. 2.1. Кінематична модель верстата-качалки

При цьому вважається, що ККД електродвигуна – постійна величина, хоча в дійсності ККД набуває свого паспортного значення тільки при його номінальному навантаженні.

В роботі [50] наведені залежності, які дають змогу отримати теоретичні діаграми потужності в функції кута повороту кривошипа або в функції переміщення точки підвісу штанг.

Для випадку функції кута повороту кривошипа:

$$N = \frac{\pi r}{75 \cdot 1.36 \cdot 30 \cdot \eta_y} \left[P_d \left(\sin \varphi \pm \frac{r_2}{2l_m} \sin 2\varphi \right) \frac{r_n}{\rho_1} - m_2 \frac{r_k}{r_2} \sin \varphi - \frac{r_b}{\rho_1} \cos(\gamma) m_1 \left(\sin \varphi \pm \frac{r_3}{2l_m} \sin 2\varphi \right) \right], \quad (2.3)$$

де знак плюс дійсний при зміні φ від 0 до 180^0 , а мінус – при зміні φ від 180 до 360^0 .

Аналогічно, для функції переміщення точки підвісу штанг:

$$N = \frac{\pi r}{75 \cdot 1.36 \cdot 30 \cdot \eta_y} \sqrt{S_A \frac{\rho_1}{r_b r_2} \left(2 - S_A \frac{\rho_1}{r_b r_2} \right)} \left(\frac{r_n}{r_1} P_d - \frac{r_b}{r_1} m_1 \cos(\gamma) - m_2 \frac{r_k}{r_2} \right), \quad (2.4)$$

де N – потужність, що споживається електродвигуном, кВт,

η_y – ККД установки,

γ – кут між напрямом руху центру мас вантажа на балансірі та вертикаллю,

S_A – переміщення точки підвісу штанг на головці балансіра, м.

Формули (2.1)-(2.4) не містять у своєму складі похідних у часі від φ або від S_A , та зведених моментів інерції механічних ланок системи “електродвигун / верстат-качалка”, що свідчить про відсутність врахування інерційних явищ у системі. Врахування цих явищ дозволить підвищити точність перетворення ватметрограми в динамограму на 1..5% в залежності від кількості качань за одиницю часу для ШГНУ. Чим більша швидкість качань, тим більший вплив інерційних явищ – тим більша похибка за умови ігнорування їхнього впливу.

В роботі [51] наведені розрахункові залежності, які враховують потужність холостого ходу електродвигуна, однак все ж побудовані у припущенні гармонічного закону руху головки балансіра. Оскільки тут спосіб використання геометричних розмірів при побудові кінематичної схеми верстата-качалки дещо відрізняється від наведених вище, в формулах наведено оригінальні позначення авторів, якщо вони відрізняються від вищеприйнятих:

Залежність зусилля від переміщення як функція від споживаної потужності:

$$P(S_A) = \frac{r_b \eta_d \eta_m \sqrt{\frac{S_A}{S_0 - S_A}}}{r_n \omega S_A} [N(\varphi) - N_0] + \frac{r_k r_b m_2 g}{r_n S_0} + \frac{m_1 g L_b r_2 \sqrt{\frac{S_A}{S_0 - S_A}}}{r_n S_A} \left[\cos \left(\frac{\delta_{\max}}{2} - \frac{S_a}{r_n} \right) - \frac{L_b \omega^2 (S_0 - 2S_A)}{2r_b g} \right], (2.5)$$

де $S_A = \begin{cases} S_A(\varphi), & \Rightarrow \text{if } 0 \leq \varphi \leq \pi \\ S_0 - S_A(\varphi), & \Rightarrow \text{if } \pi < \varphi \leq 2\pi \end{cases}$ – переміщення підвіски полірованого

штока;

N_0 – потужність споживання холостого ходу електродвигуна;

η_d – ККД двигуна;

η_m – ККД механізму;

L_b – відстань від центру тяжіння балансира до осі обертання;

δ_{\max} – повний кут максимального відхилення балансира;

ω – кутова швидкість обертання кривошипа, рад/сек.

Така залежність більш повно описує розподіл зусиль у верстаті-качалці.

Як видно з наведених моделей, електричний тракт системи ШГНУ розглядається як лінійний.

Аналіз наведених моделей показує, що їх виконання було здійснене з надмірним використанням фізичних спрощень, що може призвести до неправильного розрахунку форми динамограм, особливо це стосується свердловин із малим навантаженням.

2.2. Вдосконалення статичної моделі верстата-качалки

Виходячи з аналізу відомих моделей і враховуючи виявлені в них недоліки, доцільно здійснити вивід аналітичних залежностей, які б точніше описували кінематичну схему верстата-качалки. Для цього побудуємо більш повну статичну модель верстата-качалки [52] без застосування геометричних спрощень.

Спрощена кінематична схема верстата-качалки від точки підвісу штанг до привідного редуктора наведена на рис. 2.1. Тут точка O_2 – ведений вал редуктора, m_1 – маса компенсаційного вантажу (противаги) на балансірі (якщо

такий вантаж відсутній, то ця маса враховує різні маси плеч балансиру), m_2 – маса компенсаційного вантажу на кривошипі, F – сила, що діє на полірований шток. Кут Ψ описує відхилення балансиру від горизонтального положення, і в реальній діагностичній системі може вимірюватись. Кут φ описує обертання кривошипа відносно осі O_2 (в реальній системі також може вимірюватись). Звичайно, вимірювати обидва кути не обов'язково. Достатньо виміряти хоча б один із них, і, оскільки між ними існує однозначний зв'язок, він може бути аналітично визначений. Для цього слід визначити деякі додаткові параметри.

Відстань між точкою підвісу балансира та вихідним валом редуктора O_1O_2 визначається із залежності:

$$L = \sqrt{a^2 + b^2} . \quad (2.6)$$

Кут θ визначається відповідно:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{b}{L} . \quad (2.7)$$

Рух точки В описується в декартовій системі координатами:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= r_2 \cos \varphi \\ y_2 &= r_2 \sin \varphi \end{aligned} \right\} . \quad (2.8)$$

Аналогічно рух точки А :

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -L \cos \theta + \rho_1 \cos \psi \\ y_1 &= L \sin \theta - \rho_1 \sin \psi \end{aligned} \right\} . \quad (2.9)$$

Відстань між точками А і В (довжина шатуна незмінна) у такому разі:

$$d_{AB} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = lm . \quad (2.10)$$

Підставивши в (5) значення (3), (4) і підносячи до квадрату всі члени рівняння, одержимо:

$$\left(r_2^2 \cos^2 \varphi + L \cos \theta - \rho_1 \cos \psi \right)^2 + \left(r_2^2 \sin^2 \varphi - L \sin \theta + \rho_1 \sin \psi \right)^2 = l^2 m^2 . \quad (2.11)$$

Опускаючи громіздкі викладки, наведемо результати перетворень формули (2.11):

$$\psi(\varphi) = \arcsin \left[\frac{2r_2 L (\sin \varphi \cdot \sin \theta - \cos \varphi \cdot \cos \theta) - r_2^2 - L^2 - \rho_1^2 + l^2 m^2}{\sqrt{4\rho_1^2 ((-r_2 \cdot \cos \varphi - L \cdot \cos \theta)^2 + (r_2 \cdot \sin \varphi - L \cdot \sin \theta)^2)}} \right] - \arctan \left[\frac{r_2 \cdot \cos \varphi - L \cdot \cos \theta}{r_2 \cdot \sin \varphi - L \cdot \sin \theta} \right] . \quad (2.12)$$

Водночас:

$$\varphi(\psi) = \begin{cases} \varphi_1(\psi) + 2\pi \Rightarrow \text{if } \frac{d\psi}{dt} > 0 \\ \varphi_2(\psi) \Rightarrow \text{if } \frac{d\psi}{dt} \leq 0 \end{cases}, \quad (2.13)$$

де додаткові функції φ_1, φ_2 визначаються як:

$$\varphi_1(\psi) = \arcsin(A(\psi) + Atn(\psi)), \quad \varphi_2(\psi) = \pi - \arcsin(A(\psi) + Atn(\psi)). \quad (2.14)$$

В свою чергу :

$$A(\psi) = \frac{1}{2r_2} \cdot \left[\frac{2\rho_1 L(\cos\theta \cdot \cos\psi + \sin\theta \cdot \sin\psi) - r_2^2 - L^2 + lm^2 - \rho_1^2}{\sqrt{(L \cdot \cos\theta - \rho_1 \cdot \cos\psi)^2 + (-L \cdot \sin\theta + \rho_1 \cdot \sin\psi)^2}} \right], \quad (2.15)$$

$$Atn(\psi) = \arctan\left(\frac{L \cdot \cos\theta - \rho_1 \cdot \cos\psi}{-L \cdot \sin\theta + \rho_1 \cdot \sin\psi}\right). \quad (2.16)$$

Слід зауважити, що в загальному φ та ψ є функціями від часу ($\varphi(\psi(t)), \psi(\varphi(t))$), які для випадку застосування цифрових вимірювальних систем є табульованими величинами.

Розподіл робочих сил на кінематичній схемі також представлено на рис. 2.1. Визначимо залежність корисного гальмівного моменту на валу редуктора як функцію часової залежності навантаження на полірований шток. Оминувши припущення про рівномірну швидкість обертання кривошипа, складемо рівняння балансу сил, діючих на механізм. Корисний гальмівний момент на валу редуктора в такому разі можна представити в наступному вигляді:

$$Mr(t) = r_2 \cdot (F_{dbn}(t) + F_{am2n}(t)), \quad (2.17)$$

де додаткові функції визначені як:

- нормальна складова сили від навантаженого полірованого штока та противаги m_1 , прикладена до кривошипа в точці з'єднання з шатуном (B):

$$F_{dbn}(t) = -F_{da}(t) \sin(\omega(\varphi(t))), \quad (2.18)$$

- нормальна складова сили від зрівноважуючого вантажа m_2 , прикладена до кривошипа в точці (B):

$$F_{am2n}(t) = \frac{r_k m_2 g}{r_2} \sin(\alpha(\varphi(t))), \quad (2.19)$$

– сила, напрям якої збігається з віссю шатуна, утворена від корисного навантаження на полірований шток та зрівноважуючого вантажа m_I :

$$F_{da}(t) = \frac{g}{\sin(\gamma(\varphi(t)))} \left[\frac{F_d(t)r_n}{\rho_1} - \left(\frac{r_b m_1}{\rho} \cos(\psi(\varphi(t))) \right) \right]. \quad (2.20)$$

Виразивши зусилля в точці підвіски штанг як $F_d(t) = f(Mr(t))$, одержимо:

$$F_d(t) = \frac{1}{r_k g} \left[\frac{F_{am2n} - \frac{Mr(t)}{r_2}}{\sin(\omega(\varphi(t)))} \rho_1 \sin \gamma(\varphi(t)) + r_b m_1 g \cos \psi(\varphi(t)) \right]. \quad (2.21)$$

Для одержання кутових залежностей $\gamma(\varphi), \omega(\varphi)$ зробимо додатковий аналітико-геометричний опис кінематичної схеми. Траєкторії точок А і В описуються наступними системами рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} xA(\varphi) &= -b + \rho_1 \cos \psi(\varphi) \\ yA(\varphi) &= a - \rho_1 \sin \psi(\varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (2.22)$$

$$\left. \begin{aligned} xB(\varphi) &= r_2 \sin \varphi \\ yB(\varphi) &= r_2 \cos \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (2.23)$$

Кутові коефіцієнти прямих:

$$k_{O_2B}(\varphi) = \frac{yB(\varphi)}{xB(\varphi)}, \quad k_{O_1A}(\varphi) = \frac{a - yA(\varphi)}{-b - xA(\varphi)}, \quad k_{AB}(\varphi) = \frac{yB(\varphi) - yA(\varphi)}{xB(\varphi) - xA(\varphi)}. \quad (2.24)$$

Кут між кривошипом і шатуном:

$$\omega(\varphi) = \arctan \left(\frac{k_{AB}(\varphi) - k_{O_2B}(\varphi)}{1 + k_{O_2B}(\varphi)k_{AB}(\varphi)} \right). \quad (2.25)$$

Кут між балансиrom і шатуном:

$$\gamma(\varphi) = \begin{cases} \pi - \arctan \left(\frac{k_{O_1A}(\varphi) - k_{AB}(\varphi)}{1 + k_{O_1A}(\varphi)k_{AB}(\varphi)} \right) \Rightarrow \text{if } \arctan \left(\frac{k_{O_1A}(\varphi) - k_{AB}(\varphi)}{1 + k_{O_1A}(\varphi)k_{AB}(\varphi)} \right) > 0 \\ -\arctan \left(\frac{k_{O_1A}(\varphi) - k_{AB}(\varphi)}{1 + k_{O_1A}(\varphi)k_{AB}(\varphi)} \right) \Rightarrow \text{if } \arctan \left(\frac{k_{O_1A}(\varphi) - k_{AB}(\varphi)}{1 + k_{O_1A}(\varphi)k_{AB}(\varphi)} \right) \leq 0 \end{cases}. \quad (2.26)$$

Отримані аналітичні залежності дозволяють одержувати динамограму за вимірною ватметрографічною залежністю з дещо більшим коефіцієнтом кореляції – у стосунку до справжньої динамограми, у порівнянні з відомою залежністю (2.4.). Така модель може бути застосована для переважної більшості

свердловин, і точність її тим вища, чим більша тривалість одного качання ШГНУ. Подальше покращення характеристик кінематичної моделі може бути пов'язане із врахуванням інерції рухомих мас.

З точки зору побудови механічної моделі верстата-качалки, осторонь опису даної моделі залишились: а) можливі відхилення форми сектора головки балансира від колоподібної та б) вплив тертя в підшипниках ВК. Однак врахування пункту (а) буде незручним із погляду експлуатації, оскільки при цьому слід було б періодично вимірювати радіуси цього сектора та здійснювати його інтерполяцію. Щодо пункту (б), то прості шляхи розв'язку цієї проблеми без зупинки ВК невідомі.

2.3. Розробка динамічної математичної моделі верстата-качалки

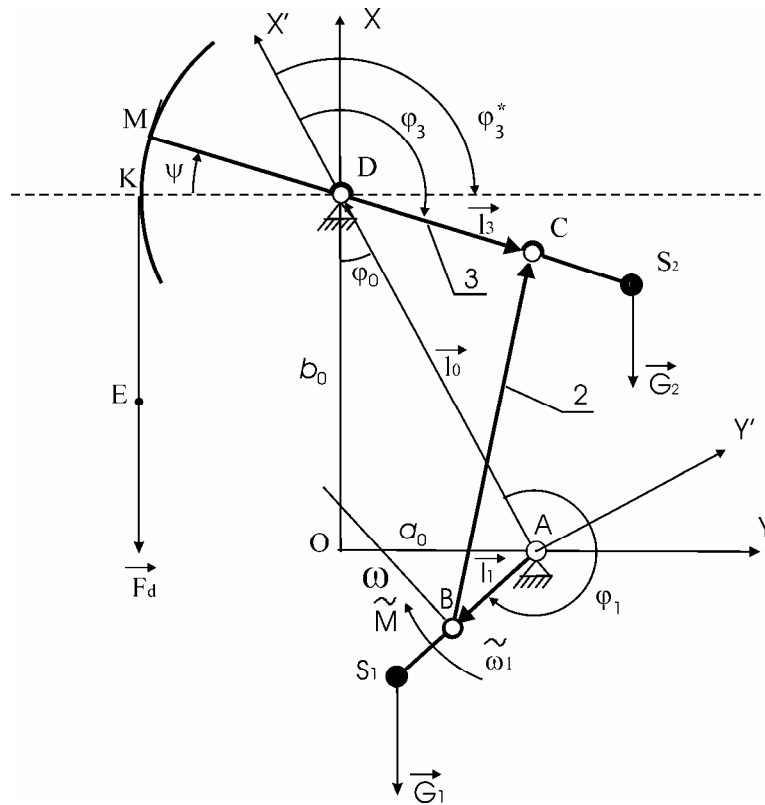


Рис. 2.2. Розрахункова кінематична модель верстата-качалки

Подальше вдосконалення математичної моделі верстата-качалки пов'язане з врахуванням моменту інерції основних рухомих мас його кінематичної схеми та рухомого ротора привідного електродвигуна. Необхідно встановити аналітичну залежність між динамічним зусиллям у точці підвісу E штанг важільного механізму верстата-качалки і моментом, що передається від електродвигуна на вал кривошипа (зрівноважувальний, або корисний гальмівний момент) (рис. 2.2), враховуючи інерцію рухомих мас. Відомі геометричні розміри механізму, маси противаг m_1 і m_2 . Масами ланок механізму в порівнянні з масами противаг можна знехтувати, а в значеннях мас противаг врахувати значення незрівноважених частин цих ланок. Оскільки за потужністю двигуна необхідно знайти динамічне зусилля F_d , то експериментально записується графік переміщення точки підвісу штанг – як функція часу ($S=f(t)$) та потужність двигуна – теж як функція часу.

Кривошип 1 обертається за годинниковою стрілкою (рис. 2.2), тому при викладках будемо використовувати ліву систему координат. Введемо наступні позначення лінійних розмірів механізму: $l_{AD}=l_0$, $l_{AB}=l_1$, $l_{BC}=l_2$, $l_{DC}=l_3$, $l_{AS1}=l_1'$, $l_{DS3}=l_3'$, $l_{OA}=a_0$, $l_{OD}=b_0$, $l_{DM}=l_3''$.

Відомо, що алгебраїчна сума потужностей всіх прикладених сил і моментів, а також сил інерції і моментів сил інерції будь-якої механічної системи, для будь-якого моменту часу, дорівнює нулю. Застосовуючи це рівняння до нашої механічної системи, будемо мати:

$$F_d v_E \cos\alpha + G_2 v_{S2} \cos\alpha_2 + G_1 v_{S1} \cos\alpha_1 + M\omega_1 + \phi_2 v_{S2} \cos\alpha_2' + \phi_1 v_{S1} \cos\alpha_1' + M_{\phi_1} \omega_1 \cos\alpha_1'' = 0, \quad (2.27)$$

де:

v_E, v_{S2}, v_{S1} – швидкості точок E, S_2, S_1 ;

G_1, G_2 – ваги противаг. $G_1 = m_1 g$, $G_2 = m_2 g$;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

M – зрівноважуючий момент, прикладений до кривошипа 1 зі сторони електродвигуна;

ϕ_1, ϕ_2 – сили інерції мас m_1 та m_2 ;

ω_1 – кутова швидкість обертання кривошипа;

$\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ – кути відповідно між векторами \vec{F}_d і \vec{v}_E , \vec{G}_1 і \vec{v}_{S1} , \vec{G}_2 і \vec{v}_{S2} ;

$\alpha_1', \alpha_1'', \alpha_2'$ – кути відповідно між векторами $\vec{\phi}_1$ і \vec{v}_{S1} ;

M_{ϕ_1} – момент сил інерції всіх рухомих мас, що знаходяться між кривошипом і двигуном, включаючи і масу ротора двигуна ($\vec{M}_{\phi_1} = -\vec{\varepsilon}_1 J_{zv}^*$, ε_1 – кутове прискорення кривошипа; J_{zv}^* – зведений момент інерції всіх рухомих мас між кривошипом і електродвигуном при зведенні до кривошипного вала).

Рівняння (2.27) можна записати у наступному вигляді:

$$F_d = -G_2 \frac{v_{S2} \cos\alpha_2}{v_E \cos\alpha} - G_1 \frac{v_{S1} \cos\alpha_1}{v_E \cos\alpha} - \frac{M}{(v_E \cos\alpha)/\omega_1} - \phi_2 \frac{v_{S2} \cos\alpha_2'}{v_E \cos\alpha} - \phi_1 \frac{v_{S1} \cos\alpha_1'}{v_E \cos\alpha} - \frac{(v_{S2} \cos\alpha_1'') M_{\phi_1}}{(v_E \cos\alpha)/\omega_1}. \quad (2.28)$$

Розділимо чисельник і знаменник доданків 1,2,4,5 в рівнянні (2.28) справа на ω_1 і отримаємо:

$$\begin{aligned}
F_d = & -G_2 \frac{\left(\frac{v_{S2} \cos \alpha_2}{\omega_1} \right)}{\left(\frac{v_E \cos \alpha}{\omega_1} \right)} - G_1 \frac{\left(\frac{v_{S1} \cos \alpha_1}{\omega_1} \right)}{\left(\frac{v_E \cos \alpha}{\omega_1} \right)} - \frac{M}{(v_E \cos \alpha) / \omega_1} - \\
& - \phi_2 \frac{\left(\frac{v_{S2} \cos \alpha_2'}{\omega_1} \right)}{\left(\frac{v_E \cos \alpha}{\omega_1} \right)} - \phi_1 \frac{\left(\frac{v_{S1} \cos \alpha_1'}{\omega_1} \right)}{\left(\frac{v_E \cos \alpha}{\omega_1} \right)} - \frac{(v_{S2} \cos \alpha_1'') M_{\phi_1}}{(v_E \cos \alpha) / \omega_1}, \quad (2.29)
\end{aligned}$$

де :

$\frac{v_E}{\omega_1}, \frac{v_{S2}}{\omega_1}, \frac{v_{S1}}{\omega_1}$ – модулі векторів перших передавальних функцій точок E, S_2, S_1

відповідно. Ці величини залежать лише від положення механізму (воно визначається кутом ϕ_1) і його геометричних розмірів. Невідомими в рівнянні (2.29) є сили інерції $\vec{\phi}_1, \vec{\phi}_2$, момент сил інерції M_{ϕ_1} , а також кути $\alpha, \alpha_1, \alpha_1', \alpha_1'', \alpha_2, \alpha_2''$. Визначимо перші передавальні функції. Використовуючи рис.2.2, можна записати наступне векторне рівняння:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_0 + \vec{l}_3. \quad (2.30)$$

Зробимо проекції складових рівняння (2.30) на осі декартової системи координат $X'Y'$ і отримаємо:

$$\begin{cases} l_1 \cos \phi_1 + l_2 \cos \phi_2 = l_0 + l_3 \cos \phi_3 \\ l_1 \sin \phi_1 + l_2 \sin \phi_2 = l_3 \sin \phi_3 \end{cases}. \quad (2.31)$$

Введемо позначення: $x = l_1 \cos \phi_1 - l_0$ та $y = l_1 \sin \phi_1$;

Тоді:

$$\begin{cases} (l_2 \cos \phi_2)^2 = (l_3 \cos \phi_3 - x)^2 \\ (l_2 \sin \phi_2)^2 = (l_3 \sin \phi_3 - y)^2 \end{cases}. \quad (2.32)$$

Складаючи рівняння (2.32), одержимо:

$$a = x \cos \phi_3 + y \sin \phi_3, \quad (2.33)$$

де

$$a = \frac{1}{2l_3} (l_3^2 + x^2 + y^2 - l_2^2). \quad (2.34)$$

Рівняння (2.34) приводиться до вигляду: $a = A \sin(\phi_3 + \phi_{30})$,

де

$$\sin \varphi_3 = \frac{x}{A}, \quad \cos \varphi_3 = \frac{y}{A}, \quad A = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Розв'язуючи рівняння (2.34), одержимо:

$$\varphi_3 = \arcsin\left(\frac{a}{A}\right) + \arccos\left(\frac{y}{A}\right). \quad (2.35)$$

Диференціюємо функцію φ_3 за φ_1 :

$$\frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - y^2}}, \quad (2.36)$$

$$\text{де } x' = -l_1 \sin \varphi_1; \quad y' = l_1 \cos \varphi_1; \quad a' = \frac{1}{l_3}(xx' + yy'); \quad A' = \frac{1}{A}(xx' + yy').$$

При цьому слід пам'ятати, що у випадку, коли балансир 3 (рис. 2.2) повертається за годинниковою стрілкою, то $\omega_3 > 0$ і $\frac{\omega_3}{\omega_1} > 0$. У протилежному разі $\omega_3 < 0$.

Модуль $\frac{v_{S2}}{\omega_1}$ буде дорівнювати:

$$\frac{v_{S2}}{\omega_1} = \left| \frac{\omega_3}{\omega_1} \right| \cdot l_3' = \left| \frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - y^2}} \right| \cdot l_3'. \quad (2.37)$$

Модуль вектора $\frac{\vec{v}_E}{\omega_1}$:

$$\frac{v_E}{\omega_1} = \left| \frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - y^2}} \right| \cdot l_3''. \quad (2.38)$$

Передавальна функція:

$$\frac{v_{S1}}{\omega_1} = \frac{\omega_1 l_1'}{\omega_1} = l_1'.$$

Необхідно визначити $\frac{v_E \cos \alpha}{\omega_1}$. При підйомі головки балансира $\alpha = 180^\circ$ (робочий хід “вверх” – підйом нафти), а при його опусканні $\alpha = 0^\circ$ (робочий хід – “вниз”). Враховуючи це, можна записати наступну рівність:

$$\frac{v_E \cos \alpha}{\omega_1} = \left(-\frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} + \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} \right) \cdot l_3'' . \quad (2.39)$$

Знайдемо аналітичний вираз для $\frac{v_{S2}}{\omega_1} \cos \alpha_2$. Як видно з рис. 2.3,

$$\frac{v_{S2}}{\omega_1} \cos \alpha_2 = -\frac{v_{S2}^{(x)}}{\omega_1} , \quad (2.40)$$

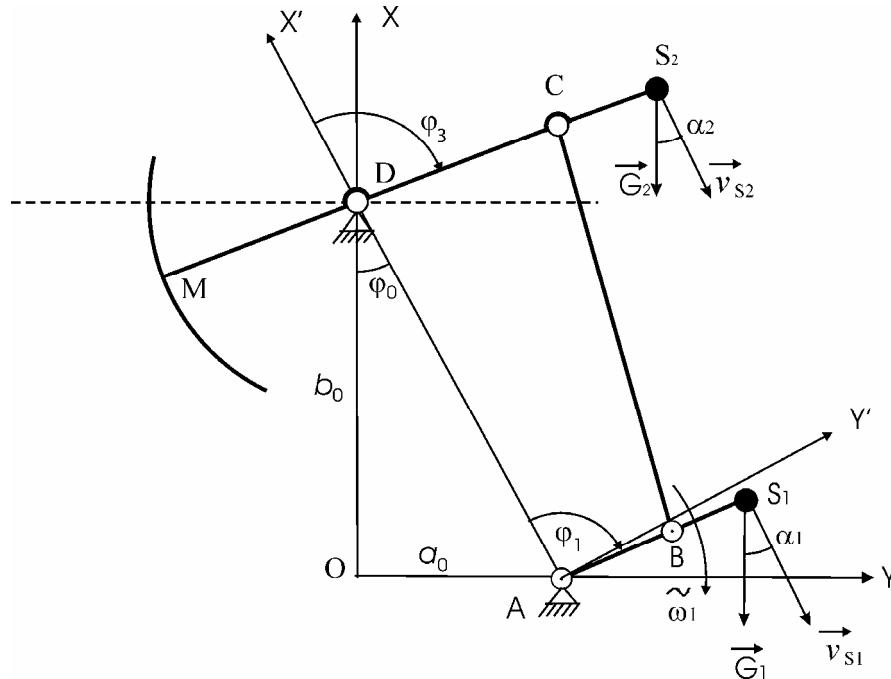


Рис. 2.3. Фрагмент кінематичної схеми для розрахунку $\frac{v_{S2}}{\omega_1} \cos \alpha_2$.

де $v_{S2}^{(x)}$ – проекція вектора швидкості точки S_2 на вісь X системи координат XOY . Проекція положення точки S_2 на вісь OX :

$$x_{S2} = b_0 + l_3' \cos(\varphi_3 - \varphi_0) . \quad (2.41)$$

Тоді:

$$\frac{v_{S2}^{(x)}}{\omega_1} = \frac{dx_{S2}}{d\varphi_1} = -l_3' \frac{\omega_3}{\omega_1} \sin(\varphi_3 - \varphi_0) . \quad (2.42)$$

Таким чином:

$$\frac{v_{S2}}{\omega_1} \cos \alpha_2 = l_3' \frac{\omega_3}{\omega_1} \sin(\varphi_3 - \varphi_0) . \quad (2.43)$$

Функція $\frac{\omega_3}{\omega_1}$ визначається за формулою (2.36). Аналогічно знаходимо:

$$\frac{v_{S1} \cos \alpha_1}{\omega_1} = -\frac{v_{S1}^{(X)}}{\omega_1}. \quad (2.44)$$

Проекція точки S_1 на вісь OX :

$$x_{S1} = l_1' \cos(\varphi_1 - \varphi_0), \quad \frac{v_{S1}^{(X)}}{\omega_1} = -l_1' \sin(\varphi_1 - \varphi_0). \quad (2.45)$$

$$\frac{v_{S1} \cos \alpha_1}{\omega_1} = l_1' \sin(\varphi_1 - \varphi_0). \quad (2.46)$$

Визначимо вираз $\phi_1 \frac{v_{S1} \cos \alpha_1'}{\omega_1}$. Для цього розглянемо рис. 2.4.

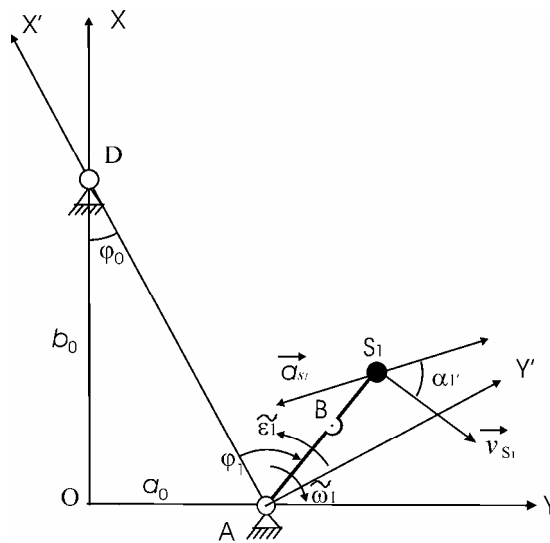


Рис. 2.4. Фрагмент кінематичної схеми для визначення $\phi_1 \frac{v_{S1} \cos \alpha_1'}{\omega_1}$.

Проекції положення точки S_1 на осі системи координат $X'AY'$ будуть мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} x_{S1}' &= l_1' \cos \varphi_1 \\ y_{S1}' &= l_1' \sin \varphi_1 \end{aligned}$$

Перші і другі передавальні функції в цій точці:

$$\begin{aligned} \frac{dx_{S1}'}{d\varphi_1} &= -l_1' \sin \varphi_1; & \frac{dy_{S1}'}{d\varphi_1} &= l_1' \cos \varphi_1; \\ \frac{d^2 x_{S1}'}{d\varphi_1^2} &= -l_1' \cos \varphi_1; & \frac{d^2 y_{S1}'}{d\varphi_1^2} &= -l_1' \sin \varphi_1. \end{aligned}$$

Проекції сили інерції маси m_1 на осі AX' і AY' :

$$\begin{aligned}\phi_{1(x)} &= -m_1 a_{S1}^{(x')}, \\ \phi_{1(y)} &= -m_1 a_{S1}^{(y')},\end{aligned}$$

де $a_{S1}^{(x')}, a_{S1}^{(y')}$ – проекції прискорення точки S_1 на осі Ax' і Ay' , які визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}a_{S1}^{(x')} &= \frac{d^2 x_{S1}}{d\varphi_1'^2} \omega_1^2 + \frac{dx_{S1}}{d\varphi_1'} \varepsilon_1 = -l'(\omega_1^2 \cos \varphi_1 + \varepsilon_1 \sin \varphi_1), \\ a_{S1}^{(y')} &= \frac{d^2 y_{S1}}{d\varphi_1'^2} \omega_1^2 + \frac{dy_{S1}}{d\varphi_1'} \varepsilon_1 = -l'(\omega_1^2 \sin \varphi_1 - \varepsilon_1 \cos \varphi_1).\end{aligned}$$

Проекції сили інерції $\vec{\phi}_1$ на осі Ax' і Ay' :

$$\begin{aligned}\phi_{1(x')} &= m_1 l_1' (\omega_1^2 \cos \varphi_1 + \varepsilon_1 \sin \varphi_1), \\ \phi_{1(y')} &= m_1 l_1' (\omega_1^2 \sin \varphi_1 - \varepsilon_1 \cos \varphi_1).\end{aligned}$$

Модуль вектора сили інерції $\vec{\phi}_1$:

$$\phi_1 = \sqrt{\phi_{1(x')}^2 + \phi_{1(y')}^2} = m_1 l_1' \sqrt{(\omega_1^2 \cos \varphi_1 + \varepsilon_1 \sin \varphi_1)^2 + (\omega_1^2 \sin \varphi_1 - \varepsilon_1 \cos \varphi_1)^2} = m_1 l_1' \sqrt{\omega_1^4 + \varepsilon_1^2}.$$

Аналізуючи рис. 2.4, можна зробити висновок, що кут α_1' як при прискореному, так і при сповільненому обертанні кривошипа, буде набувати значень, які можна розрахувати наступним чином:

$$\alpha_1' = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{\varepsilon_1}{\omega_1^2}\right). \quad (2.47)$$

Таким чином:

$$\phi_1 \frac{v_{S1} \cos \alpha_1'}{\omega_1} = m_1 l_1'^2 \sqrt{\omega_1^4 + \varepsilon_1^2} \cos\left[\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{\varepsilon_1}{\omega_1^2}\right)\right]. \quad (2.48)$$

Після спрощень отримаємо:

$$\phi_1 \frac{v_{S1} \cos \alpha_1'}{\omega_1} = -m_1 l_1'^2 \varepsilon_1. \quad (2.49)$$

Далі потрібно встановити вираз для $\phi_3 \frac{v_{S2} \cos \alpha_2'}{\omega_1}$ (див. рис. 2.5):

$\phi_2 = m_2 a_{S2}$ – модуль сили інерції маси m_2 ;

a_{S2} – прискорення точки S_2 , яке знаходиться за формулою:

$$a_{S2} = l_3' \sqrt{\omega_3^4 + \varepsilon_3^2},$$

де

$$\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} \omega_1 = \left(\frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} \right) \omega_1. \quad (2.50)$$

Кутові прискорення

$$\varepsilon_3 = \frac{d^2\varphi_2}{d\varphi_1^2} \omega_1^2 + \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} \varepsilon_1, \quad (2.51)$$

$$\frac{d^2\varphi_3}{d\varphi_1^2} = \frac{d}{d\varphi_1} \left(\frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - y^2}} \right).$$

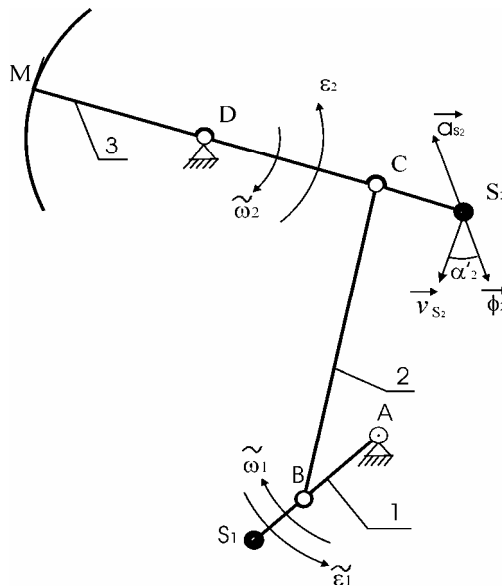


Рис. 2.5. Фрагмент кінематичної схеми ВК для визначення $\phi_3 \frac{v_{S2} \cos \alpha_2}{\omega_1}$

З метою зменшення громіздкості формул уведемо наступні позначення:

$$b = a'A - aA'; \quad c = A\sqrt{A^2 - a^2};$$

$$d = y'A - yA'; \quad e = A\sqrt{A^2 - y^2};$$

тоді

$$\frac{d^2\varphi_3}{d\varphi_1^2} = \frac{d}{d\varphi_1} \left(\frac{b}{c} - \frac{d}{e} \right) = \frac{b'c - bc'}{c^2} - \frac{d'e - de'}{e^2},$$

причому

$$b' = \frac{db}{d\varphi_1} = a''A - aA''; \quad c' = A'\sqrt{A^2 - a^2} + A \frac{AA' - aa'}{\sqrt{A^2 - a^2}};$$

$$d' = y''A - yA''; \quad e' = A'\sqrt{A^2 - y^2} + A \frac{AA' - yy'}{\sqrt{A^2 - y^2}};$$

Водночас:

$$a'' = \frac{1}{l_3} [(x')^2 + xx'' + (y')^2 + yy'']; \quad x'' = \frac{d^2x}{d\varphi_1^2} = -l_1 \cos \varphi_1$$

$$y'' = \frac{d^2y}{d\varphi_1^2} = -l_1 \sin \varphi_1; \quad (x')^2 + (y')^2 = l_1^2.$$

Після виконання спрощень отримуємо:

$$a'' = \frac{l_1 l_0}{l_3} \cos \varphi_1. \quad (2.52)$$

Знаходимо величину A'' :

$$A'' = \frac{dA'}{d\varphi_1} = \frac{(xx'' + yy'' + (x')^2 + (y')^2)A - (xx' + yy')A'}{A^2}.$$

Після виконання перетворень отримаємо:

$$A'' = \frac{l_0 l_1 [(l_1^2 + l_0^2) \cos \varphi_1 - l_0 l_1 (1 + \cos^2 \varphi_1)]}{A^3}. \quad (2.53)$$

Модуль швидкості точки S_2 :

$$v_{S_2} = |\omega_3| l_3'. \quad (2.54)$$

Аналогічно, як і кут α_1' :

$$\alpha_2' = \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{\varepsilon_3}{\omega_3'^2} \right). \quad (2.55)$$

Модуль сили інерції:

$$\phi_2 = m_2 l_3' \sqrt{\omega_3'^4 + \varepsilon_3'^2}.$$

Тоді можна записати остаточно:

$$\phi_2 \frac{v_{S_2} \cos \alpha_2'}{\omega_1} = m_2 l_3' \frac{|\omega_3|}{\omega_1} \sqrt{\omega_3'^4 + \varepsilon_3'^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{\varepsilon_3}{\omega_3'^2} \cdot \frac{\omega_3}{|\omega_3|} \right) \right]. \quad (2.56)$$

У формулі (2.56) під знаком \arctan стоїть відношення $\frac{\omega_3}{|\omega_3|}$, яке дорівнює 1 при підйомі головки балансира і -1 при його опусканні. Це зроблено тому, що формула (2.55) для α_2' справедлива тільки при підйомі головки балансира, а при його опусканні α_2' визначається так:

$$\alpha_2' = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(-\frac{\varepsilon_3}{\omega_3}\right). \quad (2.57)$$

Це співвідношення можна перевірити. Спростуючи (2.56) і враховуючи те, що $\frac{\omega_3}{|\omega_3|} > 0$ при підйомі головки балансира, а при його опусканні $\frac{\omega_3}{|\omega_3|} < 0$, отримаємо:

$$\phi_2 \frac{v_{S2} \cos \alpha_3'}{\omega_1} = \pm m_2 l_3^2 \frac{|\omega_3|}{\omega_1} \varepsilon_3. \quad (2.58)$$

В формулі (2.58) знак “-” необхідно брати при підйомі головки балансира і знак “+” при її опусканні.

Знайдемо $M_{\phi_1} \cos \alpha''$. M_{ϕ_1} – модуль моменту сил інерції всіх мас, що розміщені за кривошипом, включаючи і ротор електродвигуна, який приводить у рух верстат-качалку. Цей момент визначається за формулою:

$$M_{\phi_1} = J_{zv}^* |\varepsilon_1|, \quad (2.59)$$

де J_{zv}^* – зведений момент інерції всіх мас, що розміщені між кривошипом і двигуном, включаючи ротор електродвигуна.

$$M_{\phi_1} \cos \alpha_1'' = J_{zv}^* |\varepsilon_1| \cos \alpha_1'' = -J_{zv}^* \varepsilon_1. \quad (2.60)$$

Зрівноважувальний момент:

$$M = P\eta / \omega_1, \quad (2.61)$$

де:

P – потужність на валу електродвигуна;

η – загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) приводу верстата-качалки.

Для того, щоб обчислити F_d за формулою (2.29), необхідно знати часові залежності (значення в кожний момент часу) $\omega_1, \varepsilon_1, \phi_1, M$. У випадку вимірювання переміщення точки E від її нижнього положення (що найзручніше виконувати практично), знаючи її швидкість та прискорення, можна знайти невідомі $\omega_1, \varepsilon_1, \phi_1$. Це можна зробити таким чином.

Нехай маємо функцію $S_E(t)$, де S_E – переміщення точки E від її нижнього положення; t – час руху ($t=0$ відповідає нижньому положенню точки E). Величина кута ψ може бути визначена з наступної залежності:

$$\psi = [S_E(t) - h_E] / l_3'' , \quad (2.62)$$

де h_E – віддаль між нижнім положенням точки E і положенням, при якому балансір розміщений горизонтально. Оскільки $\psi = \varphi_2 - \varphi_2^*$ (див. рис. 2.2), то

$$\frac{[S_E(t) - h_E]}{l_3''} = \arcsin\left(\frac{a}{A}\right) + \arccos\left(\frac{y}{A}\right) - \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{a_0}{b_0}\right). \quad (2.63)$$

Величина h_E знаходиться з $\triangle ADC_0$ з (рис. 2.6, а). За теоремою косинусів маємо:

$$(l_1 + l_2)^2 = l_3^2 + l_0^2 - 2l_0l_3 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_0 + \psi_{\max}^*\right).$$

З цього рівняння

$$\psi_{\max}^* = \arccos\left(\frac{l_3^2 + l_0^2 - (l_1 + l_2)^2}{2l_0l_3}\right) + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}. \quad (2.64)$$

Звідси $h_E = (\psi_{\max}^*) \cdot l_3''$.

Рівняння (2.63) є трансцендентним рівнянням, з якого для кожного значення $S_E(t)$ можна знайти φ_1 . Проте слід зауважити, що функція $S_E(t)$ двічі за період роботи механізму приймає одне і те ж значення. Одне з них відповідає підйому головки балансіра, а друге її опусканню. При підйомі головки балансіра кут φ_1 змінюватиметься від φ_n^0 до φ_n (див. рис. 2.6), а при опусканні від φ_n до $\varphi_n^0 + 2\pi$. Це означає, що при підйомі головки балансіра корені рівняння необхідно шукати в діапазоні $[\varphi_n^0, \varphi_n]$, а при опусканні $-\varphi_n, \varphi_n + 2\pi]$. Кути φ_n^0 і φ_n знаходимо, користуючись рис. 2.6:

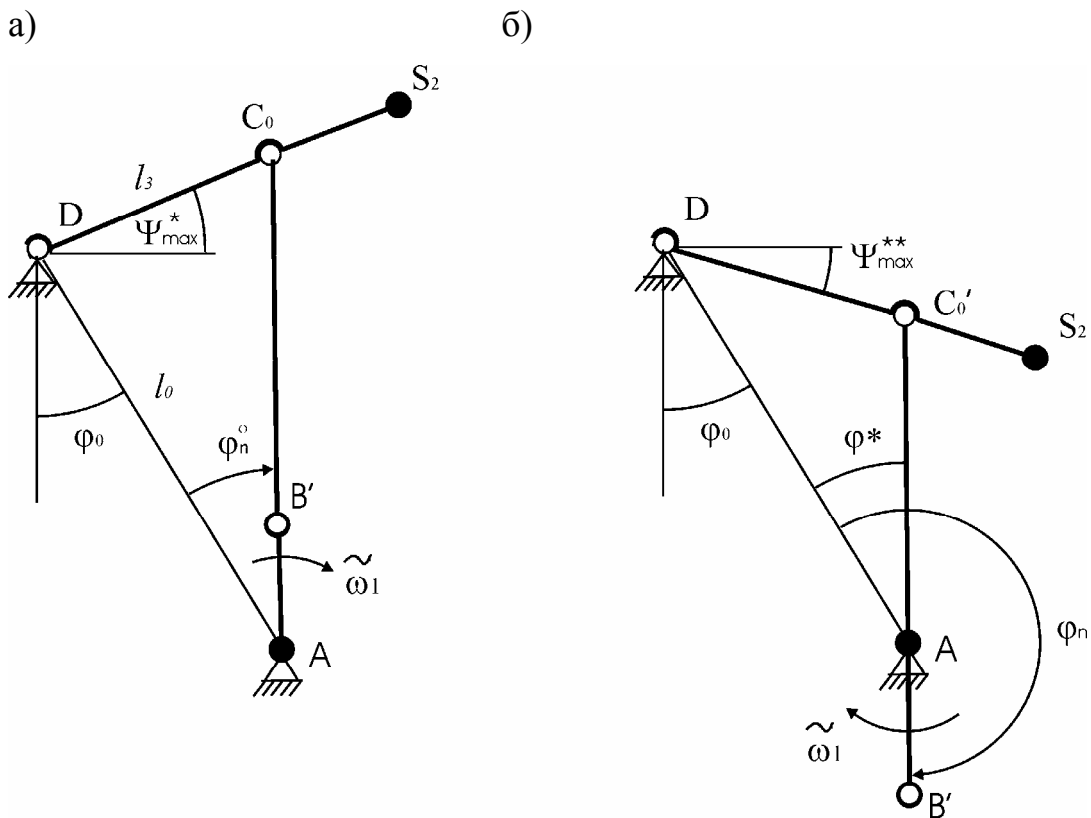


Рис. 2.6. Фрагменти кінематичної схеми для визначення кутів φ_n^0 і φ_n

а) за теоремою косинусів (рис. 2.6, а)

$$l_3^2 = l_0^2 + (l_1 + l_2)^2 - 2l_0(l_1 + l_2)\cos(\varphi_n^0),$$

$$\varphi_n^0 = \arccos\left[\frac{l_0^2 + (l_1 + l_2)^2 - l_3^2}{2l_0(l_1 + l_2)}\right]; \quad (2.65)$$

б) за теоремою косинусів (рис. 2.6, б)

$$l_3^2 = l_0^2 + (l_2 + l_1)^2 - 2l_0(l_2 + l_1)\cos(\varphi^*),$$

$$\varphi_n = \pi + \arccos\left[\frac{l_0^2 + (l_2 - l_1)^2 - l_3^2}{2l_0(l_2 - l_1)}\right]. \quad (2.66)$$

Швидкість точки E за модулем можна записати так:

$$v_E(t) = |\omega_3| l_3'' = \left| \frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - y^2}} \right| \omega_1 \cdot l_3'' \quad (2.67)$$

З цього рівняння ω_1 буде визначатись як:

$$\omega_1 = \frac{v_E(t)}{\left| \frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - y^2}} \right| \cdot l_3''} \quad (2.68)$$

Для того, щоб знайти кутову швидкість ω_1 кривошипа, спочатку за відомим значенням функції $S_E(t)$ потрібно з рівняння (2.63) знайти кут φ_1 , після цього за формулою (2.68) обчислюється ω_1 .

Прискорення точки E (див. рис. 2.2) дорівнює тангенціальному прискоренню точки K відносно точки D .

$$a_E(t) = {}_D a_K^{\tau} = \varepsilon_3 l_3'' = \left[\left(\frac{b'c - bc'}{c^2} - \frac{d'e - de'}{e^2} \right) \omega_1^2 + \left(\frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - y^2}} \right) \varepsilon_1 \right] \cdot l_3'' . \quad (2.69)$$

З рівняння (2.69) обчислюємо кутове прискорення кривошипа:

$$\varepsilon_1 = \frac{a_E(t) - \left(\frac{b'c - bc'}{c^2} - \frac{d'e - de'}{e^2} \right) \omega_1^2 l_3''}{\left(\frac{a'A - aA'}{A\sqrt{A^2 - a^2}} - \frac{y'A - yA'}{A\sqrt{A^2 - y^2}} \right) \cdot l_3''} . \quad (2.70)$$

Маючи величини $\omega_1, \varepsilon_1, \varphi_1$, можна знайти всі доданки правої частини рівняння (2.29), а, отже, визначити динамічну силу, яка діє в точці підвісу штанг.

Врешті для розв'язання поставленого завдання необхідно знати для одного і того ж моменту часу $S_E(t), v_E(t), a_E(t), P(t)$. Функція $S_E(t)$ приймає тільки додатні значення, а функція $v_E(t)$ є додатньою при підйомі головки балансира, а при його опусканні – від'ємна. Прискорення $a_E(t) > 0$, якщо вектор $\vec{a}_E(t)$ спрямований вгору, а в протилежному разі – від'ємне.

Підсумково слід зауважити, що розроблена математична модель, яка описує роботу ШГНУ в динамічному режимі, з погляду програмної реалізації може бути рекомендованою для використання в поєднанні з високошвидкісними (16-ти і більше розрядними) обчислювальними системами при потребі побудови діагностичних систем реального часу. Це зумовлено значною кількістю необхідних обчислень та потребою проведення чисельного диференціювання, і в більшості випадків така модель виявиться нереалізованою для 8-розрядних діагностичних систем реального часу.

2.4. Особливості визначення механічного моменту редуктора верстата-качалки за вимірюванням потужності його привідного електродвигуна

Як показують дослідження, при експлуатації ШГНУ можливі режими суттєво нерівномірного навантаження на електродвигун, що призводить до його роботи не тільки у межах, менших 15-20% від номінального навантаження, але й в генераторному режимі. Ці режими можуть виникати при зміні умов відкачки нафти, внаслідок виходу з ладу елементів насосного обладнання або відсутності достатнього припливу нафти. Крім того, існують випадки використання електродвигунів завищеної потужності (наприклад двигун 30 кВт, який працює в режимі з максимальним навантаженням 14 кВт – свердловина Б-320 Надвірнянського НГВУ). Тому використання будь-яких безпосередніх формул перетворення ватметрограм у динамограми призводить до неточних результатів, якщо не враховувати характеристики привідних двигунів.

Як показано в [53, 54], повна споживана потужність асинхронного електродвигуна:

$$P_1 = P_{EM} + p_{M1} + p_c, \quad (2.71)$$

де P_{EM} – потужність обертового електромагнітного потоку;

p_M – частина потужності, що втрачається в міді статора;

p_c – частина потужності, що втрачається в сталі статора.

Крім того, потужність обертового електромагнітного потоку передається з втратами через зазор на ротор. Якби втрат не існувало, то ця потужність цілком би перетворювалась у механічну, однак при протіканні струму в обмотці ротора в ній виникають втрати провідності в залежності від матеріалу обмотки. Повна механічна потужність, що розвивається на валу:

$$P_{MX} = P_{EM} - p_{M2}. \quad (2.72)$$

Однак корисна механічна потужність двигуна P_2 менша за повну потужність P_{MX} на величину механічних втрат p_{MX} та додаткових втрат p_d :

$$P_2 = P_{MX} - p_{MX} - p_d \cdot \quad (2.73)$$

Величини механічних та додаткових втрат теоретично розрахувати для кожного конкретного верстата-качалки – з необхідною для сучасних вимог точністю – досить важко. Тому слід шукати такі способи корекції цих втрат, які б дозволили розширити діапазон використання формул розрахунку динамограм із ватметрографічних залежностей, що автоматично означатиме покращення достовірності діагностування підземного обладнання. Це можна зробити тільки за умови нормальної роботи двигуна, оскільки постійний контроль робочих параметрів за схемою заміщення асинхронного електродвигуна – доволі складне завдання.

Величина корисного гальмівного моменту електродвигуна визначається відомим співвідношенням [55]:

$$M_2 = \frac{P_2}{2\pi \cdot n} \cdot \quad (2.74)$$

де n – швидкість обертання ротора електродвигуна. Видно, що, знаючи частоту обертання ротора досліджуваного електродвигуна, можна визначити величину його корисного гальмівного моменту. З метою спрощення розрахунків та конструкції технічних засобів вважають, що частота обертання ротора – постійна. Однак насправді частота обертів двигуна змінюється в залежності від навантаження так, як показано на рис. 2.7. Врахування швидкості обертання ротора електродвигуна – це наступний крок на шляху підвищення точності виділення механічної інформації з електричних сигналів, одержаних в результаті вимірювання ватметрограми. Зміна швидкості обертання ротора, наприклад, для електродвигуна потужністю 50 кВт, складає 2% у діапазоні зміни корисної механічної потужності від 0 до $P_{ном}$. Для двигунів меншої потужності значення ковзання s збільшується ще більше. Крім того, характер зміни швидкості обертання ротора є слабо нелінійним (див. рис. 2.7), що дозволяє врахувати його шляхом аналізу енергетичних втрат при процесі передачі зусилля від двигуна до канатної підвіски штангової колони.

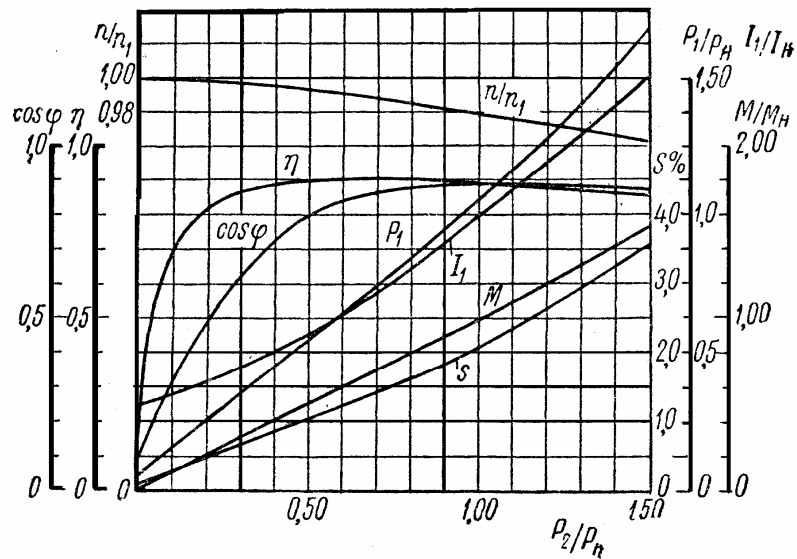


Рис. 2.7. Нормовані робочі характеристики типового асинхронного електродвигуна: P_1 – повна електрична потужність електродвигуна, η – ККД електродвигуна, I_1 – струм споживання, M – механічний момент електродвигуна, n – швидкість обертання ротора електродвигуна. Індекси «н» в позначеннях I_n , M_n , n_n , P_n – означають номінальні значення цих величин.

Клинопасова передача, яка міститься в кінематичній схемі ВК, теж є ланкою спотворення інформації на шляху “канатна підвіска – електродвигун”. Типові характеристики клинопасової передачі наведені на рис. 2.8. [31]

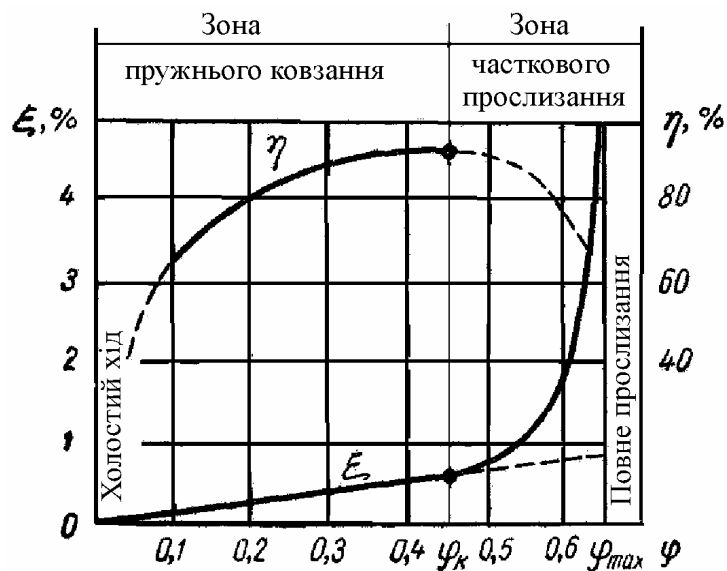


Рис. 2.8. Залежність ковзання та ККД від навантаження для клинопасової передачі: η – ККД, ε – ковзання, φ – навантаження.

З наведеного рисунку видно, що в робочому режимі передавальні швидкісні характеристики клинопасової передачі можуть розглядатись як лінійні. Однак ігнорування цих характеристик призводить до появи додаткової похибки порядку 0,6% для повного робочого діапазону навантажень. Із погляду енергетичних функцій, клинопасова передача є суттєво нелінійним елементом, що і вимагає введення поправки, величина якої (як видно з графіка) залежить від ковзання. Врахування цих явищ вимагає збільшення кількості первинних давачів на ВК та використання програмованих засобів, які найбільш просто можуть бути реалізованими за допомогою мікропроцесорів.

Висновки до розділу

1. Проаналізовані відомі моделі верстата-качалки. Виявлено, що всі вони є статичні, тобто не враховують явища інерції противаг верстата-качалки. Крім того, більшість із них побудована з використанням фізичних спрощень кінематики верстата-качалки (припущення про гармонійність закону руху верстата-качалки, заміна концентричної траєкторії на лінійну, тощо) – з метою зменшення громіздкості аналітичних залежностей.
2. Розроблена статична модель верстата-качалки, яка відрізняється від відомих більш детальним описом кінематичної схеми.
3. Розроблена динамічна модель верстата-качалки, яка враховує явища інерції рухомих зрівноважуваних вантажів ВК.
4. Розглянуті робочі характеристики асинхронних двигунів та клинопасових передач. Вказано на необхідність експериментально-алгоритмічного їх врахування при розрахунку динамограм із ватметричних залежностей.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВАТМЕТРОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ

3.1. Розробка методики проведення експериментальних досліджень ватметрографічного методу

Для перевірки правильності вищенаведених припущень слід провести їх експериментальну перевірку з використанням дослідів, проведених на реально діючих свердловинах, або з використанням комп'ютерного моделювання у випадку неможливості проведення прямих дослідів.

Попередні експериментальні дослідження, проведені на діючих свердловинах, а також аналіз теоретичних джерел (див. розділ 1.2) доводять, що при роботі ШГНУ доволі часто має місце нерівномірність руху ВК, викликана його незбалансованістю та ковзанням клинопасової передачі та ротора привідного асинхронного електродвигуна ВК. Тому при проведенні експериментальних досліджень слід визначити :

- достатню для одержання розрахованої динамограми ступінь точності вимірювання ватметричних залежностей;
- можливу ступінь відхилення закону руху точки підвісу колони штанг від теоретично розрахованого – для оцінки реального впливу явищ ковзання;
- зв'язок частотних характеристик ватметричного сигналу із наявними дефектами електродвигуна та редуктора ШГНУ.

Для цього виглядає доцільною наступна схема проведення експериментальних досліджень:

1. Прогрів обладнання протягом 25-30хв. для виходу його характеристик на усталений режим. Це стосується електронного тензометричного динамографа та іншого вимірювального обладнання.

2. Вимірювання геометричних характеристик ВК у випадку, якщо цієї інформації немає в базі даних ВК.
3. У випадку зупиненого ВК, привести його в робочий режим та впевнитись у наявності подачі нафти. При відсутності подачі протягом більш ніж 60 хв, перейти до вимірювання іншої свердловини.
4. Одночасне динамографування та ватметрографування ШГНУ. Операція виконується з використанням стандартного гідравлічного динамографа, електронного динамографа ТД-1 та розробленої дослідної системи ватметрування ШГНУ. Тривалість запису даних ватметром та електронним динамографом – не менша 2-х циклів качання ШГНУ. Запис динамограми гідравлічним динамографом здійснювати під час другого періоду запису даних за допомогою електронної апаратури.
5. Повторити пункт (4) один раз через інтервал 1 хв.
6. Повторювати пп.(4-5) з інтервалом 10 хв протягом 3 год.

Проблема забезпечення точності вимірювання корисного гальмівного моменту на роторі двигуна особливо важлива при діагностуванні ШГНУ через сильне спотворення корисного діагностичного сигналу від підземного обладнання під час проходження ним наземного тракту установки. В першому наближенні ці втрати можуть бути описані шляхом введення деякої постійної складової. Постійна складова похибки вимірювання – це сумарна похибка, що складається з додаткових втрат потужності двигуна (<10%), похибки трансформатора струму (<0,5%), похибок температурного дрейфу підсилювальних каскадів вимірювальних схем (<0,1%), та температурного дрейфу аналогово-цифрових перетворювачів (<0,2%). Нехтуючи постійним зміщенням при перетворенні ватметрограм у динамограми, можна одержати результат, який сильно відрізняється від істинного. Щоб довести це, проведемо числове моделювання прямого та зворотного перетворення “динамограма/ватметрограма”, скориставшись для цього формулою (2.17), хоча можуть бути використані будь-які статичні моделі ВК. Початкова динамограма в нормальному вигляді (залежність навантаження від переміщення),

представлена на рис. 3.1. , після відповідних обчислень перетворюється в ватметрограму, зображену на рис. 3.2. . Для розрахунку в формулу підставлені геометричні розміри, маси та діапазон навантажень, що відповідає реально діючій установці (свердловина Б-320 Надвірнянського НГВУ).

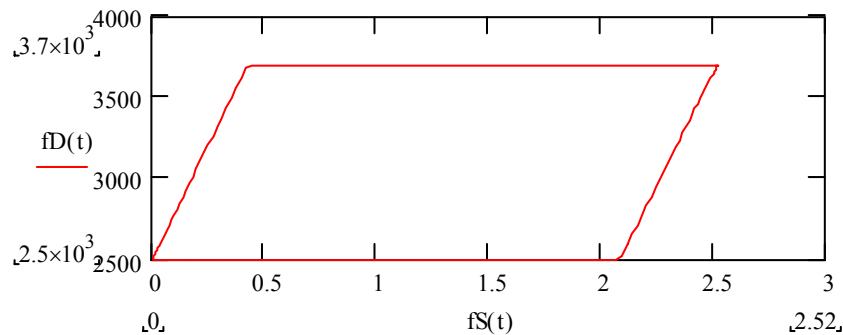


Рис. 3.1. Теоретична динамограма нормальної роботи ШГНУ

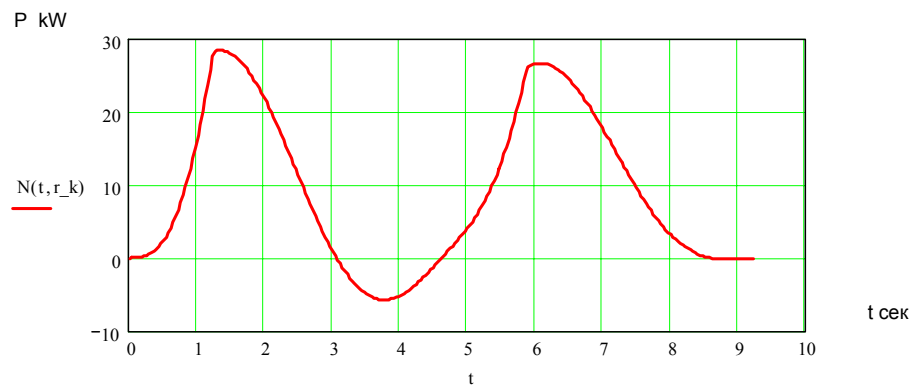


Рис 3.2. Теоретична ватметрограма нормальної роботи ШГНУ

Тепер дослідимо вплив постійного зміщення на зворотне перетворення “ватметрограма–динамограма”. Для цього використаємо формулу прямого перетворення (2.21), записану у вигляді $P_d = f(N)$, з можливістю додавати постійну складову до сигналу потужності $P_d = f(N + dN)$. Зробимо розрахунок для цієї ж динамограми за умов нульового зміщення, зміщення в додатній і від’ємний бік на 1 кВт, що для діапазону вимірювання 0...50кВт складає 2%. Одержані в результаті розрахунку динамограми для кращої візуалізації представлені в часі (на рис. 3.3.). Виклик функції перетворення ватметрограми в динамограму на рисунках зображений у вигляді $fD2(t, dN)$, де t – час, dN – постійне зміщення в кіловатах. На рисунку чітко видно появу розривів функції

в початковій та кінцевій точках циклу (мертвих точках ходу полірованого штока верстата-качалки).

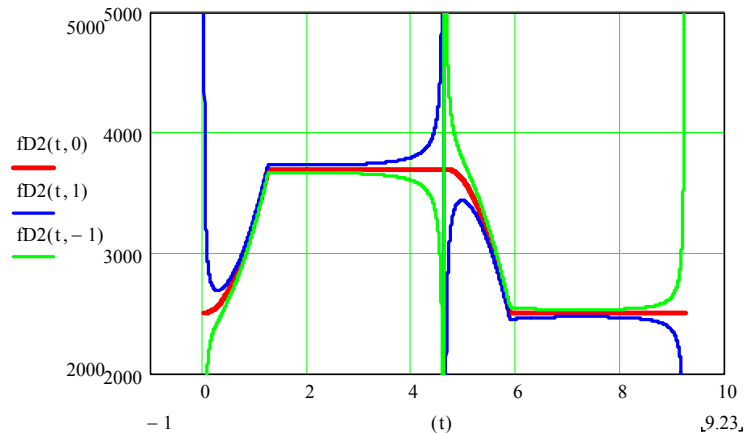


Рис. 3.3. Результати перетворення “ватметра/динамограма” за наявності постійного зміщення ± 1 кВт та без зміщення

Наявність похибки зміщення вимірної потужності 2% зумовлює суттєву деформацію протягом $\approx 25\%$ тривалості динамограми.

Аналогічні залежності одержані при перетвореннях динамограм з іншими дефектами (див. додаток Б). З наведених графіків видно, що незалежно від форми початкової динамограми перетворення ватметра/динамограми в динамограму відбувається з похибкою, яка залежить тільки від значення початкового зміщення. Причому при надмірно збільшеній потужності знятої ватметра/динамограми відносно істинних значень, послідовність напрямку розривів $+\infty, -\infty$, а при зменшеній $-\infty, +\infty$. Очевидно, що враховуючи це, можна реалізувати ітераційний алгоритм компенсації постійного зміщення, циклічно обчислюючи функцію динамограми в межах робочих мертвих точок верстата-качалки. При цьому слід зауважити, що при зменшенні похибки вимірювання ватметра/динамограми до рівня 0,6%, суттєвої деформації зазнає тільки $\approx 8\%$ тривалості динамограми, що можна вважати достатнім для ефективного виявлення більшості дефектів насосного обладнання.

3.2. Розробка методу швидкісних характеристик для діагностування ШГНУ

Метод діагностування ШГНУ шляхом вимірювання швидкості обертання ротора привідного двигуна верстата-качалки, або *метод швидкісних характеристик*, можливий на основі аналізу характеристик асинхронних електродвигунів (див. розділ 2.4, рис. 2.7) привідного електродвигуна ШГНУ. При цьому приймаються наступні положення:

- 1) клинопасова передача повністю роботоздатна;
- 2) явища ковзання відсутні;
- 3) підведена електроенергія відповідає всім технічним вимогам за рівнем напруги та значенню частоти;
- 4) привідний електродвигун працездатний.

Такий метод може бути доповнюючим до ватметрографічного, оскільки дані від датчика обертів електродвигуна використовуються для збільшення точності розрахунку моментограми із ватметрограми. У випадку відмови ватметрографа, розрахунок моментограми може здійснюватися без вимірювання електричної потужності, що дозволяє збільшити надійність системи діагностування. Алгоритм діагностування ШГНУ шляхом вимірювання швидкості обертання ротора привідного двигуна верстата-качалки полягає в наступному:

1. Початок етапу калібрування, під час якого одночасно вимірюються швидкість обертання ротора двигуна $\omega(t)$ та динамограма $F_d(t)$ за цикл качання ШГНУ. Запис $\omega(t)$ здійснюється за допомогою стаціонарно закріпленого за верстатом-качалкою контролера спостереження, а запис сигналу навантаження $F_d(t)$ – за допомогою переносного електронного динамографа, під'єднаного до додаткового входу цього контролера.
2. За відомою математичною моделлю верстата-качалки, наприклад, за (2.4), обчислюється значення корисного гальмівного моменту на валу двигуна $M_2(t) = f_1(F_d(t))$, $t=0 \dots T$, де T – період качання.

3. Обчислюються коефіцієнти функції, що апроксимує співвідношення між швидкістю обертання ротора ω та корисним гальмівним моменту на валу двигуна M_2 . Як впливає із рис. 2.7 та як буде показано в розділі 4.3, залежність між цими величинами є близькою до лінійної і з достатньою степінню точності може бути апроксимована поліномом другого порядку. Для визначення коефіцієнтів доцільно використати метод найменших квадратів. Обчислені коефіцієнти запам'ятовуються в енергонезалежній пам'яті ЕОМ з можливістю подальшого багатократного зчитування. На цьому етап калібрування слід вважати завершеним.
4. Етап вимірювань. Обчислення часової залежності корисного гальмівного моменту на валу двигуна $M_2(t)$ здійснюється стаціонарно і автономно шляхом розрахунку $M_2(t) = a_0 + a_1 \cdot \omega(t) + a_2 \cdot \omega^2(t)$, де $t = 0 \dots T$, без застосування прямого динамометрування. В залежності від типу операції виводиться або моментограма $M_2(t)$, або розрахована з неї динамограма $F_d(t) = f_2(M_2(t))$, де f_2 – функція, обернена до f_1 . Далі аналіз даних може бути здійснений оператором візуально. При цьому за моментограмою оцінюється зрівноважування ВК, а за динамограмою – стан заглибного обладнання. Графічно цей алгоритм представлений на рис. 3.4.

Вимірювання швидкості обертання ротора привідного електродвигуна – технічно нескладна задача, яка може бути вирішена до точності 0,1% за допомогою оптичних вимірювальних перетворювачів. Реалізацію всіх обчислень доцільно здійснити засобами стаціонарного контролера спостереження, встановленого на верстаті-качалці. Основною перевагою такого методу діагностування є принципова відсутність погіршення метрологічних характеристик у часі – внаслідок відсутності механічних мірних вузлів, які сприймають велике циклічне навантаження, як це відбувається при динамографуванні.

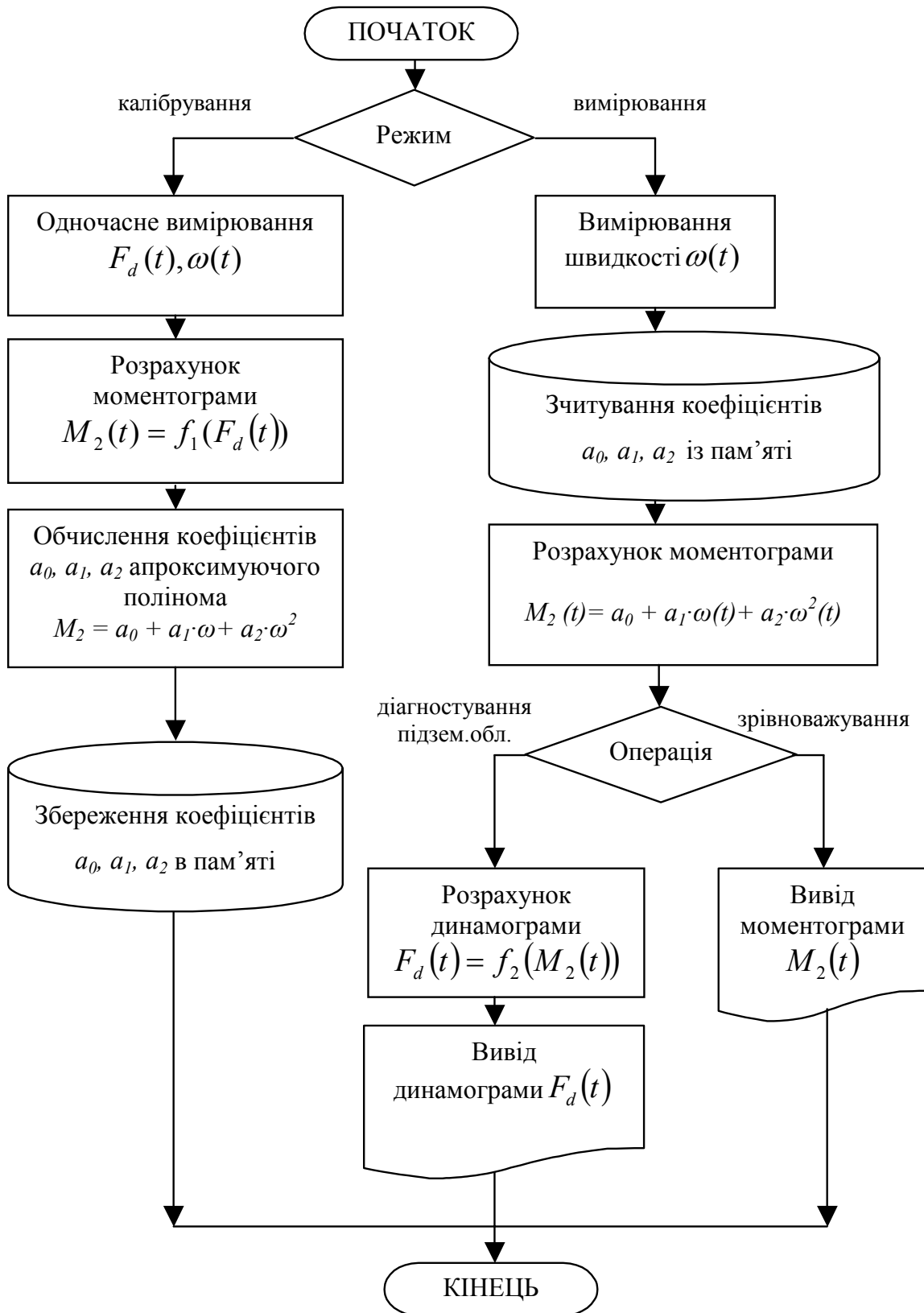


Рис. 3.4. Алгоритм діагностування ШГНУ методом швидкісних характеристик

3.3. Розробка методики визначення маси зрівноважуючих вантажів

Визначення мас вантажів для кінематичної схеми заміщення верстата-качалки (ВК) є важливою проблемою при розв'язанні завдання аналітичного розрахунку динамограм за ватметрограмами та проведенні процедури балансування верстата-качалки [56]. Завдання балансування верстата-качалки полягає в правильному виборі моментів зрівноважуючих вантажів з таким розрахунком, щоб забезпечити якомога рівномірніший розподіл навантаження та мінімізувати середню потужність споживання ШГНУ. Балансування (зрівноважування) на етапі початкового запуску свердловини полягає в правильному виборі схеми балансування (кривошипне, балансірне, комбіноване) та мас вантажів. При подальшій експлуатації свердловини балансування здійснюється за допомогою пересування вантажів по важелю (балансир, кривошип), на якому вони розміщені. За винятком верстатів-качалок румунського виробництва ("Vulcan"), які містять вбудовані ручні домкрати, процес балансування є доволі трудомістким, і тому швидко може бути виконаний тільки дуже наближено. Основна мета автоматизації цього процесу полягає в зменшенні кількості операцій пересування вантажів до однієї-двох. Тобто, знаючи позицію та масу вантажів перед балансуванням, слід, провівши деякі вимірювання та розрахунки, вказати їх правильне положення для збалансованого стану ВК. Суть проблеми впливає з наступних передумов:

1. Реальні маси компенсаційних вантажів для експлуатаційних підприємств невідомі – внаслідок відсутності технічної документації на ВК та поширення практики зрівноважування ВК методом підбору місцерозташування вантажів інтуїтивно, без попередніх розрахунків (вимірювання амперкліщами, зрівноважування "на слух", тощо.)

2. У залежності від типу та конструкції ВК, до значень маси компенсуючих вантажів, навіть за умови точно відомої їх величини, слід додати (або відняти) маси незрівноважених у вільному стані несучих конструкцій – головки балансира, кривошипа та шатуна.

Тому для практичного впровадження ватметрографічних методів доцільно визначити маси зрівноважуючих вантажів для кінематичної схеми заміщення верстата-качалки. Розв'язок цього завдання може бути здійснений трьома методами [57]:

1. *Безпосереднє зважування вантажів.* Недоліком такого методу є проведення вантажних операцій та не врахування мас незрівноважених несучих конструкцій ВК.
2. *Розрахунково-аналітичний метод.* При цьому визначаються геометричні розміри вантажів шляхом проведення вимірювань з подальшою їх сплайн-інтерполяцією. Інтерполяція викликана неправильною геометричною формою цих вантажів. Обчислення об'єму за чисельною моделлю вантажу дозволяє знайти його масу шляхом домноження розрахованого об'єму цього вантажа на його густину. Густина вантажу може бути визначена експериментально для зразка матеріалу, з якого він виготовлений. Недоліком такого методу є потреба проведення точних вимірювань геометричних розмірів вантажу, які займають багато часу і від якості яких залежить точність визначення мас. Крім того, такий метод не враховує можливу наявність невидимих порожнин у досліджуваному об'єкті та маси незрівноважених несучих конструкцій ВК.
3. *Експериментально-аналітичний метод.* Суть його полягає в чисельному підборі маси вантажів за відомими експериментальними одночасно знятими динамо- та ватметрографічними залежностями. Для кожного значення пробної маси здійснюється розрахунок ватметрограми за динамографічними даними і порівнюється із експериментальною ватметрографічною залежністю – шляхом знаходження коефіцієнта кореляції. Коефіцієнт кореляції обчислюється за формулою [58]:

$$r_{xy} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (x_i - Mx)(y_i - My)}{Dx \cdot Dy},$$

де Mx , My – математичні очікування, Dx , Dy – дисперсії відповідно величин x та y .

Вибирається те значення маси, для якого значення коефіцієнта кореляції максимальне. Такий метод видається найбільш доцільним, тому і потребує програмної розробки. Недоліком цього методу можна вважати потребу в електронній ватметро-динамографічній вимірювальній системі, яка дозволяє проводити одночасні вимірювання динамограм та ватметрограм. Однак сучасні засоби діагностування для ШГНУ, які поступово набувають все більшого розповсюдження, дозволяють проводити такі вимірювання.

Виходячи з цього, можна реалізувати алгоритмічно метод знаходження невідомих мас зрівноважуючих вантажів ВК за допомогою числових методів пошуку екстремуму функції. Слід зауважити, що для випадку комбінованого типу зрівноважування ВК коефіцієнт кореляції буде залежати від мас двох вантажів m_1, m_2 , а графічно ця залежність може бути представлена у вигляді поверхні. Для пошуку екстремуму в цьому випадку можна використати, наприклад, метод повного перебору [59]. На блок-схемі (рис.3.5) представлено алгоритм його реалізації.

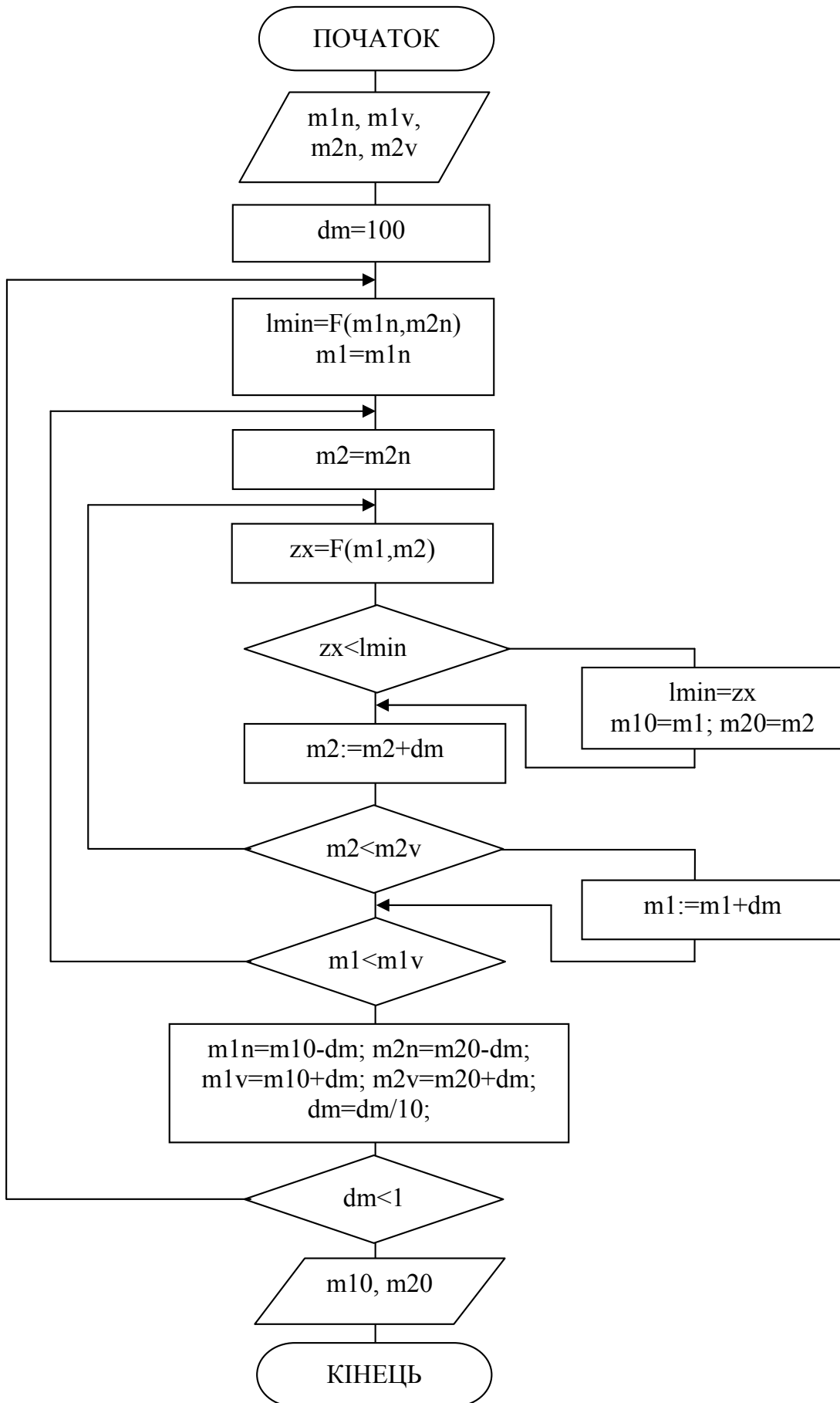


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму визначення мас зрівноважуючих вантажів

3.4. Розробка технічного забезпечення експериментальних досліджень

3.4.1. Вибір структурної схеми та вузлів інформаційно-вимірювальної системи

Технічне забезпечення експериментальних досліджень має забезпечувати одержання всіх даних, необхідних для реалізації ватметрографічних методів контролю ШГНУ. Базові первинні блоки технічного забезпечення повинні бути придатними для використання в стаціонарних контролерах ІВС діагностування ШГНУ. Апаратна частина технічного забезпечення експериментальних досліджень має надавати можливість реалізації різних методів діагностування ШГНУ та бути простою з погляду виготовлення апаратної частини, максимально використовуючи при цьому стандартні засоби сучасної обчислювальної техніки [60]. Виходячи з цього загальну структуру апаратної частини системи збору і обробки даних можна представити так (рис. 3.6):

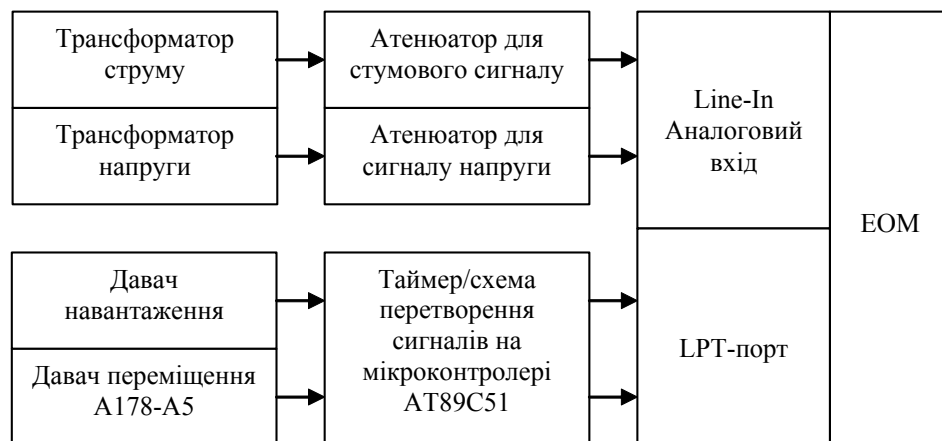


Рис. 3.6. Загальна структура апаратної частини системи збору і обробки даних

Первинні давачі струму – стандартні трансформатори струму 100/5А з класом точності не гіршим 0,5, давачі напруги – трансформатори напруги, які забезпечують перетворення сигналу та гальванічну розв’язку верстата від ЕОМ. Практично важко знайти вимірювальні прилади з класом точності 0,1 і кращим,

тому зупинимось на широкодоступних приладах класу 0,5. Використання шунтів замість трансформаторів струму призводить до великого виділення теплоти, що незручно та нераціонально з точки зору енергозбереження. Крім того промисловість не випускає шунтів з номінальним струмом більшим 30 А [34]. Інша причина, яка заважає використанню шунтів – утворення міжшунтового короткого замикання при використанні в якості вимірювальної, схеми двох ватметрів.

Для апаратної реалізації даної системи можна використати персональний комп'ютер типу IBM PC, який, будучи виконаним у конфігурації “NoteBook”, зручно використовувати в мобільних діагностичних лабораторіях.

Використання ЕОМ надає можливість проведення попередньої лінеаризації первинних давачів струму і цим самим підвищує точність вимірювання струму в 1,5-3 рази. При виконанні робіт не в реальному масштабі часу, за допомогою стандартного (MathCAD[61], MathLab[62], Steinberg WaveLab, CoolEdit Pro, Spectrum MicroCAP-7[63]) та нестандартного програмного забезпечення, можна здійснювати корекцію одержаних даних у широких межах, та реалізовувати необхідні робочі алгоритми (розклад у ряд Фур'є, вейвлет-перетворення, графічне відображення результатів).

В якості давача переміщення доцільно використати механічний перетворювач, подібний до тих, що використовуються до сьогодні в складі поширених гідравлічних динамографів, – з можливістю вводу інформації до ЕОМ в цифровому вигляді. [73] Для перетворення механічних величин переміщення доцільно використати перетворювач А178-А5, який здійснює перетворення кута повороту вимірювального ротора в послідовність зсунутих по фазі на 90^0 імпульсів, кількість яких на один оберт ротора складає 1024. Фазовий зсув двох вихідних коливань необхідний для можливості визначення напрямку обертання вимірювального ротора, а отже, і напрямку руху балансира верстата-качалки.

3.4.2. Розробка додаткових апаратних засобів експериментальних досліджень

Додатковий мікроконтролерний перетворювач коду (див. рис. 3.7) призначений для підрахунку кількості імпульсів за одиницю часу та перетворення числа цих імпульсів в код, зручний для передачі через LPT-порт ЕОМ. Крім того, мікроконтролерний перетворювач коду виконує роль системного таймера, який дозволяє задавати інтервали часу з точністю до 1 мс, на відміну від таймера ЕОМ, де, як відомо, мінімальний період оновлення часу за нормальних умов складає 55мс [64, 65]. Цим самим, виконуючи циклічну та неперервну роботу, мікроконтролерний перетворювач значно розвантажує основну ЕОМ і надає можливість прикладній програмі реалізувати додаткові функції обробки сигналів та забезпечити точний інтервал дискретизації між кожною інформаційною точкою вимірювання переміщення, навантаження, напруги та струму. Коло початкового запуску мікроконтролера виконане на елементах R1C1VD1. RC-ланка призначена для утримання на час порядку 0,5сек високий рівень напруги на вході перезапуску RST контролера AT89C51. Оскільки така ланка є диференціюючою, під час перехідних процесів можливе утворення імпульсів від'ємної напруги, які можуть вивести з ладу мікросхему контролера [66]. Для обмеження від'ємних імпульсів на рівні $-0,6 \div -0,7$ В. використаний імпульсний кремнієвий діод VD1 типу КД521. Розрахунок RC-ланки здійснюється, виходячи з відомої залежності: $\tau = R_1 C_1$ де τ – постійна часу (наближено дорівнює величині затримки). Приймемо $R=10$ кОм, тоді для значення $\tau = 0,5$ сек одержимо: $C_1 = \frac{\tau}{R_1} = \frac{0,5}{10 \cdot 10^3} = 50 \cdot 10^{-6}$ Ф. Із стандартного ряду конденсаторів вибираємо найближче значення 47 мкФ. Робоча напруга конденсатора $U_{C1} \geq 6$ В. Виходячи з розрахованих значень, вибираємо електролітичний тип конденсатора: К50-16-47мкФ $\pm 20\%$ -16В. Максимальна потужність, що розсіюється на резисторі R_1 , визначається наступним чином:

$$P_{R1} = \frac{\Delta U_{R1}^2}{R_1} = \frac{5^2}{10 \cdot 10^3} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт,}$$
 де ΔU_{R1} – максимальний спад напруги на резисторі R_1 (рівний напрузі живлення +5В.) Виходячи з розрахованого значення, вибираємо стандартне значення та тип резистора МЛТ-0.125-10кОм \pm 5%. Конденсатори C_2 , C_3 призначені для усунення можливості запуску тактового генератора мікроконтролера на вищих гармоніках робочої частоти кварцового резонатора. Значення ємності цих конденсаторів стандартне і регламентується виробником як значення 30 пФ. [67] Тип конденсаторів – керамічні: К10-17-30пФ \pm 20%. Резистори R_2 , R_3 призначені для покращення фронтів імпульсів, що надходять від оптичного давача переміщень А178-А5, і їх тип та значення регламентоване виробником як МЛТ-0.25-1.5кОм \pm 5%.

Під'єднання до LPT-порта ЕОМ здійснюється безпосередньо. Оскільки швидкість передачі даних є незначною – 10÷30 відліків/сек, з метою економії вхідних ліній LPT-порта вибрано послідовний і синхронний спосіб передачі даних.

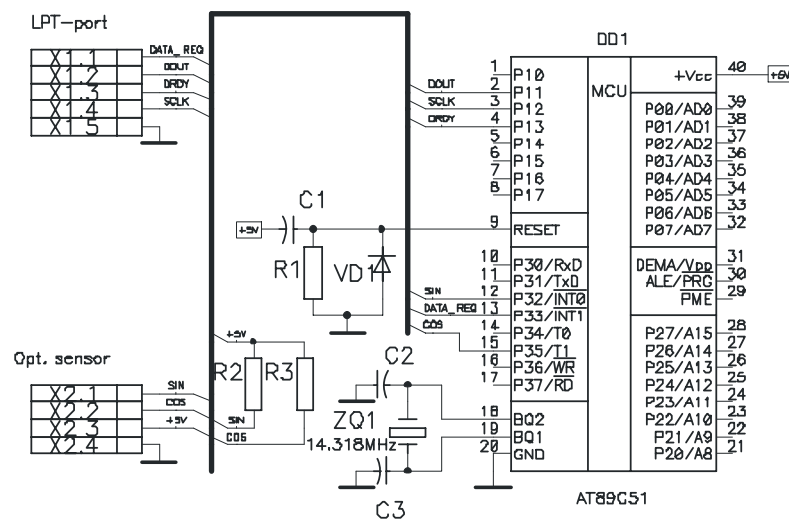


Рис. 3.7. Принципова схема мікроконтролерного перетворювача коду

Запит на передачу даних здійснюється від ЕОМ по лінії DATA_REQ. Під'єднання цієї лінії до входу переривання INT1 забезпечує економію програмних ресурсів мікроконтролера та спрощує алгоритм роботи програми, звільняючи його від необхідності постійного опитування цього виводу. Лінія

DOUT використовується для послідовної передачі даних до EOM. Лінія DRDY – для видачі сигналу підтвердження готовності даних. Лінія SCLK – для тактування переданих бітів даних. Текст програми написаний мовою асемблера Intel MCS-51, наведений в додатку В.

Використання непрямих вимірювань, поширених в сучасних динамографах [68, 69, 70, 71], – наприклад, вимірювання прискорення руху точки підвісу полірованого штока з подвійним інтегруванням цього прискорення (з метою одержання переміщення), – слід вважати недоцільним через низьку точність вимірювання прискорення, яка погіршується із зменшенням частоти качань верстата-качалки (відносна похибка такого вимірювання $\delta \geq 5\%$). Інший метод вимірювання переміщення – розрахунковий, з використанням кінцевих вимикачів в якості давачів початку робочого циклу верстата-качалки [29] він може використовуватись тільки за умови абсолютної справності клинопасової передачі та рівномірності ходу верстата, що не завжди справджується. Крім того, за допомогою порівняння форми теоретично розрахованої та експериментально одержаної функції переміщення від часу $S_A(t)$ можна діагностувати стан клинопасової передачі верстата-качалки.

Динамограф реалізовано на тензомостовому перетворювачі та мікросхемі AD7714 (“Analog Devices”[72]), яка має послідовний SPI-інтерфейс, придатний для безпосереднього під’єднання до LPT-порту EOM. Детально з питаннями щодо його функціонування та особливостей його побудови можна ознайомитись у [73, 74, 75, 76, 77].

Плати вводу аналогового сигналу, якими обладнані сучасні ПЕОМ, містять в своєму складі 16-розрядні здвоєні АЦП, з частотою дискретизації вхідного сигналу, яка може вибиратись з ряду 6,0; 8,0; 11,025; 22,050; 32,0; 32,075; 44,1; 48,0 кГц. В деяких моделях цей ряд має продовження до 96,0 кГц. Це дозволяє з високою точністю оцифровувати дані ватметрограм. Смуга пропускання більшості з цих пристроїв обмежена знизу частотою 20 Гц (реально складає 15.7 Гц), а зверху – значенням половини частоти дискретизації (згідно з теоремою Котельникова). Максимальна амплітуда вхідного сигналу

складає від $1\div 5В$ у залежності від типу використаного пристрою вводу аналогового сигналу.

Висновки до розділу

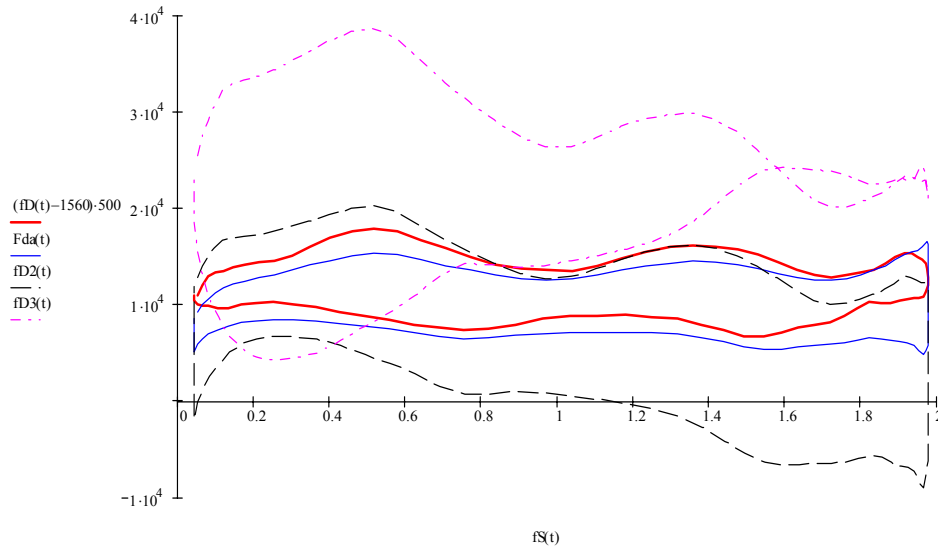
1. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень ШГНУ.
2. Розроблений метод швидкісних характеристик для діагностування ШГНУ шляхом вимірювання частоти обертання ротора привідного двигуна верстата-качалки, придатний для одержання діагностичної інформації у випадку зменшеної кількості давачів, та може бути використаний для покращення точності основного ватметричного методу.
3. Розроблена методика визначення мас зрівноважуючих вантажів верстатів-качалок, необхідних для розв'язання розрахунково-аналітичних задач зрівноважування ВК.
4. Розроблена структурна схема експериментальної системи проведення досліджень ШГНУ.
5. Розроблені додаткові засоби для вимірювання переміщення ВК та більш точного відслідковування часових інтервалів.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАТМЕТРОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ.

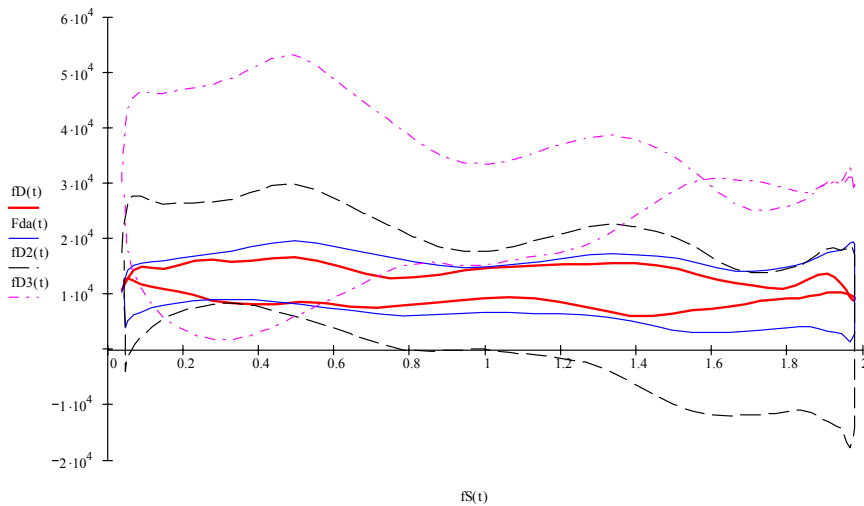
4.1. Порівняльний аналіз статичних моделей верстатів-качалок

На основі дослідних даних, одержаних з діючих свердловин Надвірнянського та Бориславського НГВУ, проведено перерахунок динамограм із ватметрографічних залежностей, використовуючи всі описані вище аналітичні залежності. При проведенні експериментів одночасно здійснювався запис динамограми за допомогою гідравлічного динамографа та ватметрограми за допомогою розробленої ІВС [78]. Аналіз даних здійснений в середовищі MathCAD, де після зчитування цифрових ватметрографічних показників, збережених у текстовому файлі, здійснене перетворення до динамограм, їх відображення у вигляді графіків та розрахунок коефіцієнта кореляції (коефіцієнта подібності) між одержаними динамограмами та динамограмами, знятими динамографом. Файли експериментальних даних містять відліки (числові значення) споживаної електричної потужності, переміщення точки підвісу верстата-качалки та оцифровані значення динамограми, знятої динамографом. Результати обробки даних представлені на рис.4.1, рис.4.2 ÷ рис.4.6 та в додатку Г. Як видно з наведених рисунків, для переважної більшості експериментальних даних (8 з 9) коефіцієнт кореляції динамограм, розрахованих за запропонованою статичною моделлю верстата-качалки, вищий, ніж у загальновідомих моделях. Це узгоджується із результатами візуального порівняння форм динамограм, одержаних за допомогою різних методів. Виходячи з цього, з достатнім ступенем впевненості можна говорити про переваги використання запропонованої математичної моделі для верстатів-качалок у практиці побудови діагностичних ватметрографічних систем діагностування ШГНУ.



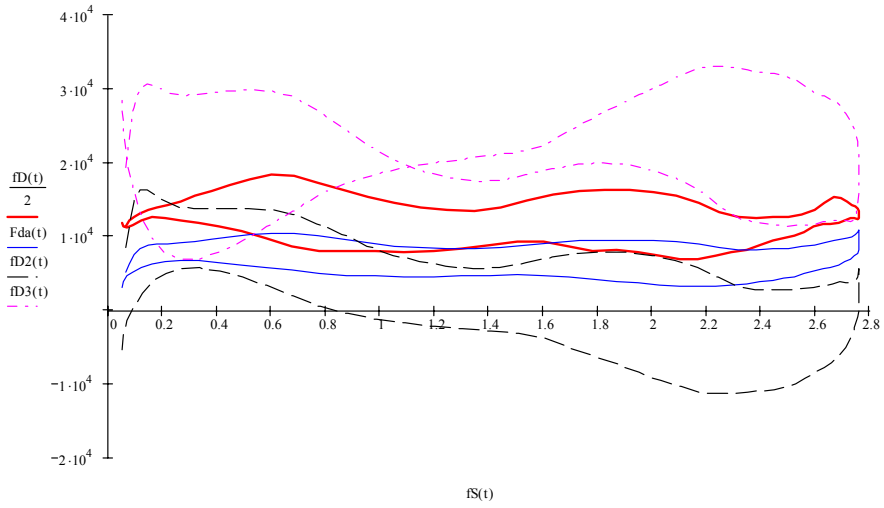
$N_n := 500$ $i := 0.. N_n - 1$ $dt := \frac{\text{period}}{N_n}$ $tt_i := i \cdot dt$ $fDd_i := fD(tt_i)$ $Fdad_i := Fda(tt_i)$ $rxrR := \text{corr}(Fdad, fDd)$ $rxrR = 0.9$
 $Fd2d_i := fD2(tt_i)$ $rxrK := \text{corr}(Fd2d, fDd)$ $rxrK = 0.838$
 $Fd3d_i := fD3(tt_i)$ $rxrA := \text{corr}(Fd3d, fDd)$ $rxrA = 0.701$

Рис. 4.1. Результати обробки динамограм із ватметрограми для свердловини Б-320 НГВУ “Надвірнанафтогаз” (дата проведення експерименту – 05.06.02):
 - - - - - за ф-люю (2.3); _ . _ . _ - за ф-люю (2.5); _____ - за ф-люю (2.21).



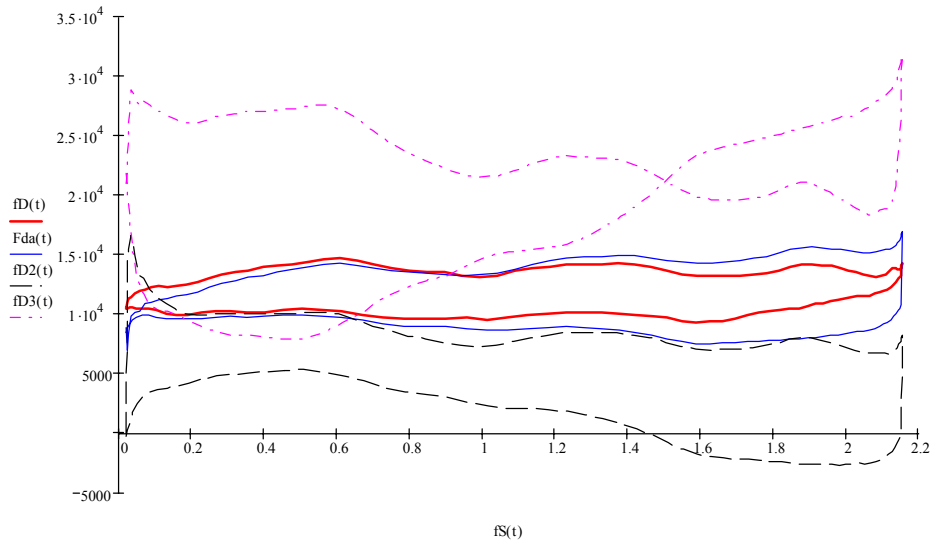
$N_n := 500$ $i := 0.. N_n - 1$ $dt := \frac{\text{period}}{N_n}$ $tt_i := i \cdot dt$ $fDd_i := fD(tt_i)$ $Fdad_i := Fdad(tt_i)$ $rxrR := \text{corr}(Fdad, fDd)$ $rxrR = 0.751$
 $Fd2d_i := fD2(tt_i)$ $rxrK := \text{corr}(Fd2d, fDd)$ $rxrK = 0.778$
 $Fd3d_i := fD3(tt_i)$ $rxrA := \text{corr}(Fd3d, fDd)$ $rxrA = 0.687$

Рис. 4.2. Б-320 НГВУ “Надвірнанафтогаз” (дата проведення експерименту – 13.06.02)



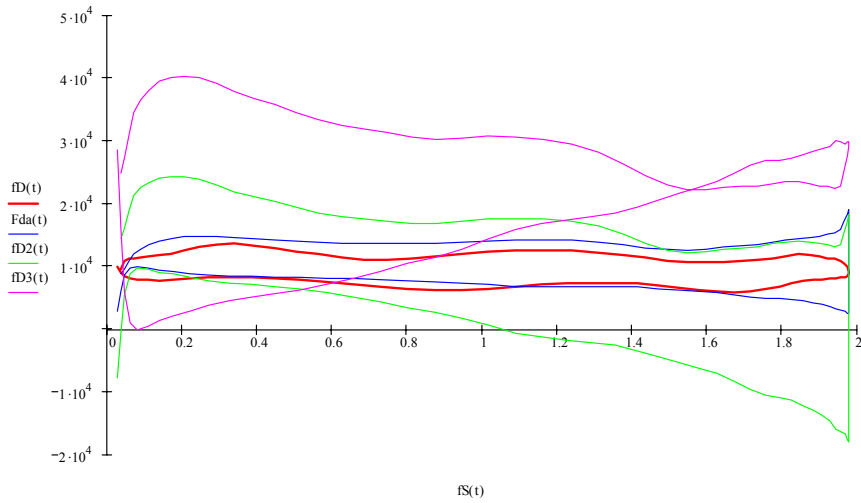
$Nn := 500$ $i := 0.. Nn - 1$ $dt := \frac{\text{period}}{Nn}$ $tt_i := i \cdot dt$ $fDd_i := fD(tt_i)$ $Fdad_i := Fda(tt_i)$ $rxrR := \text{corr}(Fdad, fDd)$ $rxrR = 0.926$
 $Fd2d_i := fD2(tt_i)$ $rxrK := \text{corr}(Fd2d, fDd)$ $rxrK = 0.781$
 $Fd3d_i := fD3(tt_i)$ $rxrA := \text{corr}(Fd3d, fDd)$ $rxrA = -0.16$

Рис. 4.3. Результати обрахунку динамограми із ватметрограми для свердловини Б-420 НГВУ “Надвірнанафтогаз” (дата проведення експерименту – 24.12.03):
 - - - - - за ф-люю (2.3); _ . _ . _ . - за ф-люю (2.5); _____ за ф-люю (2.21).



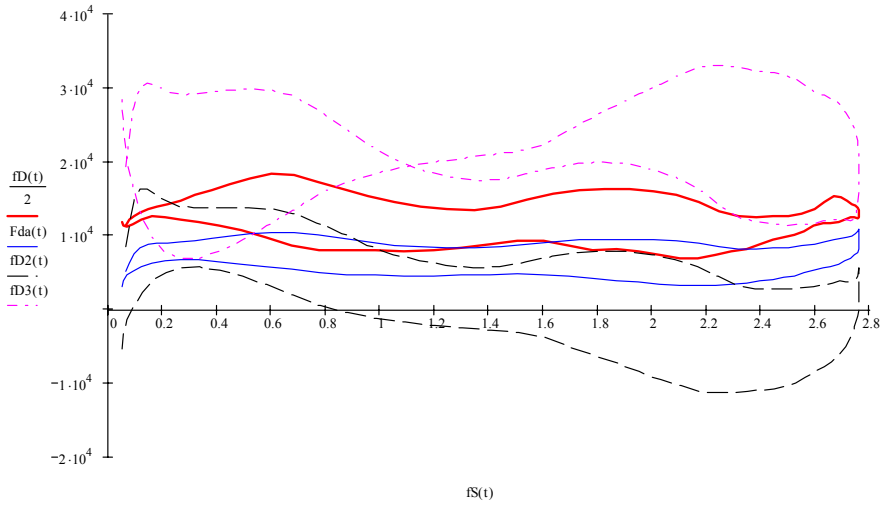
$Nn := 500$ $i := 0.. Nn - 1$ $dt := \frac{\text{period}}{Nn \cdot 1.01}$ $tt_i := i \cdot dt$ $fDd_i := fD(tt_i)$ $Fdad_i := Fda(tt_i)$ $rxrR := \text{corr}(Fdad, fDd)$ $rxrR = 0.888$
 $Fd2d_i := fD2(tt_i)$ $rxrK := \text{corr}(Fd2d, fDd)$ $rxrK = 0.568$
 $Fd3d_i := fD3(tt_i)$ $rxrA := \text{corr}(Fd3d, fDd)$ $rxrA = 0.483$

Рис. 4.4. Б-588 НГВУ “Надвірнанафтогаз” (дата проведення експерименту – 19.06.02)



$N_n := 500$ $i := 0.. N_n - 1$ $dt := \frac{\text{period}}{N_n}$ $tt_i := i \cdot dt$ $fDd_i := fD(tt_i)$ $Fdad_i := Fda(tt_i)$ $rxrR := \text{corr}(Fdad, fDd)$ $rxrR = 0.815$
 $Fd2d_i := fD2(tt_i)$ $rxrK := \text{corr}(Fd2d, fDd)$ $rxrK = 0.797$
 $Fd3d_i := fD3(tt_i)$ $rxrA := \text{corr}(Fd3d, fDd)$ $rxrA = 0.617$

Рис. 4.5. Результати обрахунку динамограми із ватметрограми для свердловини Б-320 НГВУ “Надвірнанафтогаз” (дата проведення експерименту – 07.11.01):
 - - - - - за ф-люю (2.3); _ . _ . _ . _ за ф-люю (2.5); _____ за ф-люю (2.21).



$N_n := 500$ $i := 0.. N_n - 1$ $dt := \frac{\text{period}}{N_n}$ $tt_i := i \cdot dt$ $fDd_i := fD(tt_i)$ $Fdad_i := Fda(tt_i)$ $rxrR := \text{corr}(Fdad, fDd)$ $rxrR = 0.926$
 $Fd2d_i := fD2(tt_i)$ $rxrK := \text{corr}(Fd2d, fDd)$ $rxrK = 0.781$
 $Fd3d_i := fD3(tt_i)$ $rxrA := \text{corr}(Fd3d, fDd)$ $rxrA = -0.16$

Рис. 4.6. Б-420 НГВУ “Надвірнанафтогаз” (дата проведення експерименту – 25.12.03)

4.2. Порівняльний аналіз характеристик розробленої динамічної моделі верстата-качалки

Аналогічно до розділу 4.1, на основі дослідних даних, одержаних із діючих свердловин Надвірнянського та Бориславського НГВУ, проведено перерахунок динамограм із ватметрографічних залежностей, використовуючи для розрахунку розроблену в розділі 2.3 динамічну модель верстата-качалки. При проведенні експериментів одночасно здійснювався запис динамограми за допомогою гідравлічного динамографа та ватметрограми за допомогою контрольної ІВС.

Таблиця 4.1

Свердловина, дата проведення експерименту	Значення коефіцієнта кореляції між динамограмами, знятими динамографом та обрахованими за формулами:			
	формула Л.Ф.Куліковського та В.О.Крічке [50]	формула Н.Т.Абдулаєва та ін. [51]	статична модель (2.21)	динамічна модель (2.29)
Свердловини НГВУ «Надвірнанафтогаз»				
Б-320 (07.11.01)	0,797	0,617	0,815	0,924
Б-320 (05.06.02)	0,838	0,701	0,9	0,95
Б-320 (13.06.02)	0,778	0,687	0,751	0,851
Б-420 (24.12.03)	0,781	0,16	0,926	0,944
Б-588 (19.06.02)	0,568	0,483	0,888	0,903
Б-588 (27.03.03)	0,715	0,616	0,715	0,767
Свердловини НГВУ «Бориславнафтогаз»				
560 (15.03.02)	0,18	-0,327	0,825	0,864
557 (15.03.02)	0,28	-0,277	0,693	0,711
1604 (04.04.02)	0,725	0,726	0,78	0,812

Аналіз даних здійснений в середовищі MathCAD, де після зчитування цифрових ватметрографічних даних, збережених в текстовому файлі, здійснене

перетворення до динамограм, їх відображення у вигляді графіків та розрахунок коефіцієнта кореляції (коефіцієнта подібності) між одержаними динамограмами та динамограмами, знятими динамографом. Результати обробки даних представлені в додатку Д та таблиці 4.1. Отримані результати порівняння вказують на те, що застосування динамічної моделі дозволяє підвищити точність обрахунку динамограм в середньому на $1 \div 5\%$ порівняно зі статичними моделями, що підтверджує доцільність її застосування при реалізації методів діагностування ШГНУ.

4.3. Числове моделювання методу швидкісних характеристик при діагностування ШГНУ

В розділі 3.2 здійснена розробка методики діагностування ШГНУ методом швидкісних характеристик, теоретично обґрунтованим на основі робочих характеристик асинхронних електродвигунів, про які йшлося в розділі 1.2. Як уже стверджувалося вище, такий метод є зручним у випадку побудови стаціонарних систем контролю за технічним станом ШГНУ, оскільки не містить елементів, деформація яких призводить до втрати точності вимірювань навантаження. Основним положенням цього методу є виділення діагностичної інформації про момент на роторі привідного двигуна з функції його частоти обертання. Стверджується, що швидкість обертання ротора електродвигуна обернено-пропорційно залежить від його навантаження. Перевірка цього твердження практично вимагає конструювання складних механічних кріплень давача А178-А5 з компенсацією зміщення центрів осей ротора та пристрою. Вона доцільна тільки при конструюванні стаціонарної системи діагностування. Виявлення ж можливості виділення моменту навантаження із швидкісних характеристик ротора привідного електродвигуна можливо здійснити, провівши числове моделювання за допомогою стандартного програмного забезпечення. Для цього вибрано програму MathLAB – як таку, що має широкі можливості щодо розрахунку трифазних мереж та асинхронних електродвигунів. При цьому (згідно вбудованої довідково-інформаційної документації) модель

асинхронного двигуна в MathLAB-і не враховує тільки явища перемагнічування в сталі, вплив якого на загальну динаміку процесів дуже незначний. Для уникнення можливих помилок при описі електродвигуна (оскільки повна модель заміщення вимагає відомих параметрів, які не наводяться в каталожних даних на електродвигуни), використано одну із стандартних моделей, яка найбільш підходить за структурою та своєю потужністю. Проведення моделювання цього процесу в середовищі MathLAB (Simulink) дозволить виявити, чи дійсно сигнал, пропорційний до швидкості обертання ротора, може бути використаний у якості діагностичної ознаки при діагностуванні ШГНУ. Схема (див. рис. 4.7) ілюструє спосіб проведення експерименту.

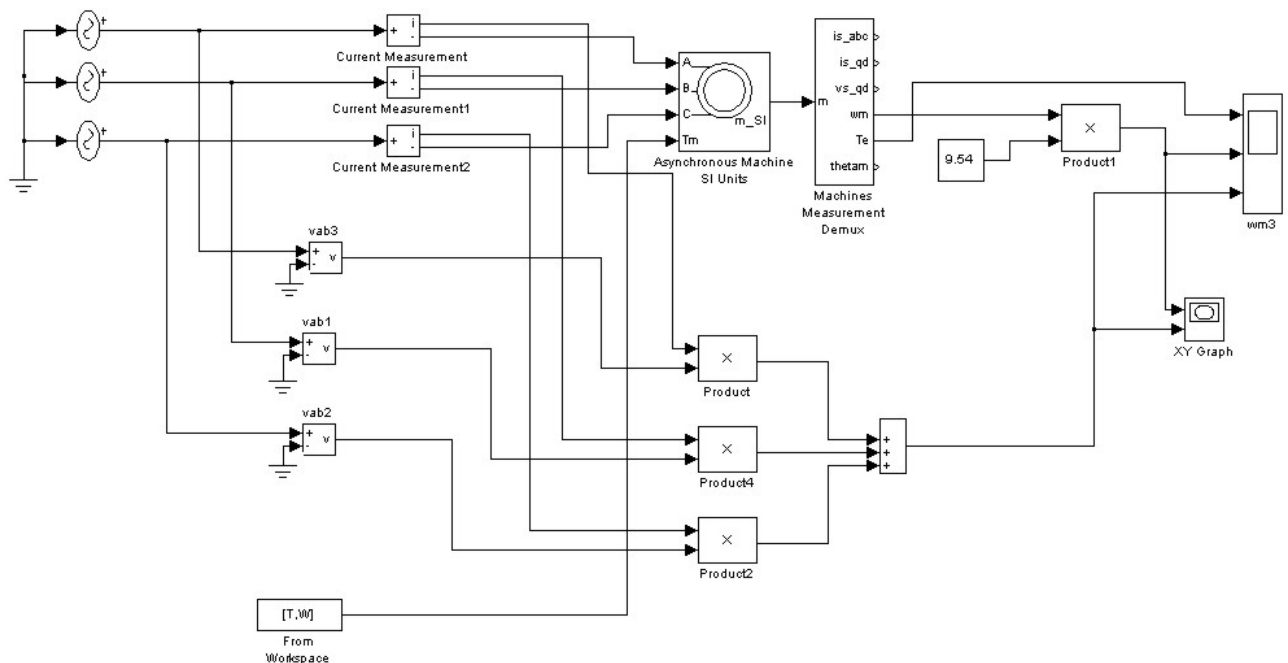


Рис. 4.7. Схема проведення імітаційного експерименту

Слід зауважити, що в такий спосіб моделюється винятково електродвигун, до ротора якого прикладається змінний момент деякої форми. Форма вхідної функції моменту одержана розрахунково з експериментально вимірної на свердловині Б-320 динамограми. Величина моменту є як позитивна, так і негативна, що дозволяє імітувати роботу двигуна в нормальному та генераторному режимах. На рис. 4.8. наведені графічні

результати такого моделювання. Модель електродвигуна вибрана зі стандартної бібліотеки MathLAB [13].

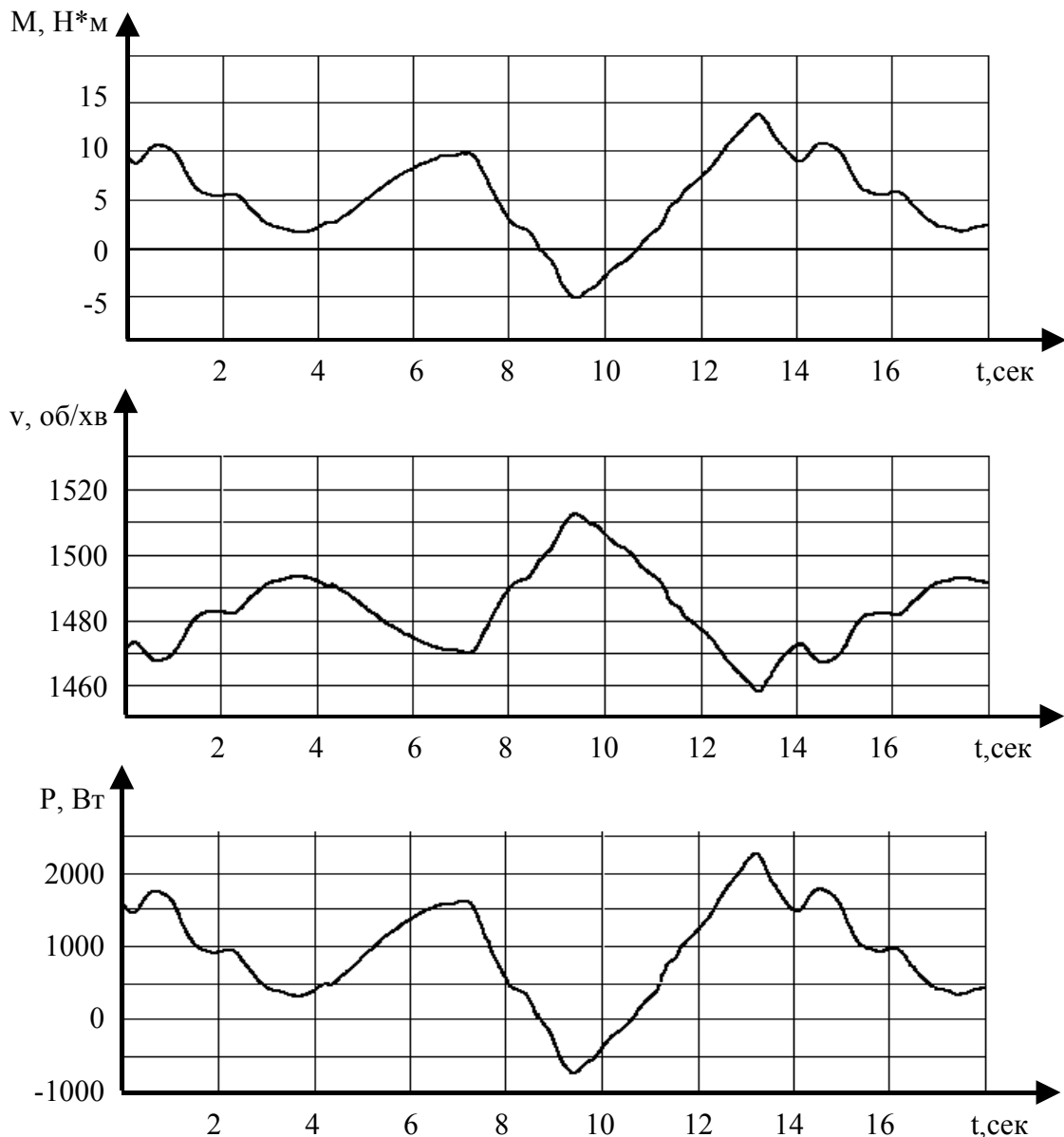


Рис. 4.8. Результати моделювання асинхронного електродвигуна в середовищі MathLab: V – швидкість обертання ротора, M – крутний момент на валу двигуна, P – споживана потужність

Потужність модельованого асинхронного двигуна $\approx 2,2$ кВт. Як видно, форма кривої швидкості обертання ротора, форма кривої навантаження, та форма кривої потужності споживання збігаються. Використовуючи відомий різницевий метод діагностування [8], за формою кривої швидкості обертання ротора електродвигуна можна оцінювати стан обладнання ШГНУ. Інший і більш доцільний варіант використання одержаних даних швидкості обертання

привідного електродвигуна – покращення точності вимірювання механічної потужності на валу за значенням споживаної електричної потужності.

4.4. Аналіз частотних характеристик споживаної потужності електроприводу верстатів-качалок

Дослідження ватметрограм, розгорнутих у часі, дозволяє легко візуально досліджувати незрівноваженість верстатів-качалок. Однак вже для діагностування заглибного обладнання ШГНУ зручніше мати справу з динамограмами, для яких вже відпрацьовані методи роботи та за якими можна встановити діагноз для стану насосного обладнання також візуально. Крім того, в сигналі ватметрограми містяться дані про технічний стан редуктора верстата-качалки, які однак суттєво не впливають на форму часової розгортки сигналу.

Дефекти редуктора. Технічний стан будь-якої зубчастої пари може бути оцінений у процесі її роботи за допомогою аналізу вібросигналів – це загальноприйнятий метод. Втрати енергії, наявні при співударі зубців коліс, зумовлюють виникнення теплових та віброакустичних процесів. Крім того, якщо приводом зубчастої пари є електричний двигун (що ми і спостерігаємо в ШГНУ), то наявність неоднорідностей навантаження призводить до адекватної зміни його потужності споживання. Аналіз споживаної потужності електродвигуна дозволяє виявити наявні дефекти зубчастої пари, за аналогією з методами вібродіагностики. При цьому найбільш ефективно використати для діагностування зубчастих пар розклад ватметрограми в ряд Фур'є. Тут, як показує практика, справедливі наступні закономірності:

1. Гармоніки, що відповідають за зубозчеплення, мають невисокий енергетичний рівень, оскільки енергія, що виділяється в процесі кочення зубців, сама по собі незначна. Значна маса ротора електродвигуна і значний момент інерції діють як фільтр низьких частот для сигналу такого типу.

2. Амплітуда гармонік у спектрі, що викликані вібраціями зубчастих пар, у великій мірі залежить від переданого зубчастою парою навантаження. При мінімальному навантаженні редуктора гармоніки від зубозчеплення не реєструються.
3. Сигнали, які залежать від зубозчеплення, є нестационарними з того погляду, що мають в своєму складі декілька фаз “обкочування”, або “проковзування” зуба по зубу, що відмінні для різних типів зубчастих зчеплень. Кожна із цих фаз змінює навантаження з різною частотою, яка, однак, близька до частоти зубозчеплення. Все це призводить до появи у ватметрографічному сигналі неоднорідного “білого шуму” – поблизу частоти зубозчеплення.
4. Іноді підняття спектра від “білого шуму” відбувається не тільки на частоті зубозчеплення, але і на частоті власних резонансів редуктора.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлені деякі закономірності при аналізі спектрів ватметрографічних залежностей, які дозволяють діагностувати стан редуктора ШГНУ.

Для прикладу розглянемо реальну ватметрограму, одержану для свердловини Б-320 Надвірнянського НГВУ, записану 13.06.02 (рис. 4.9).

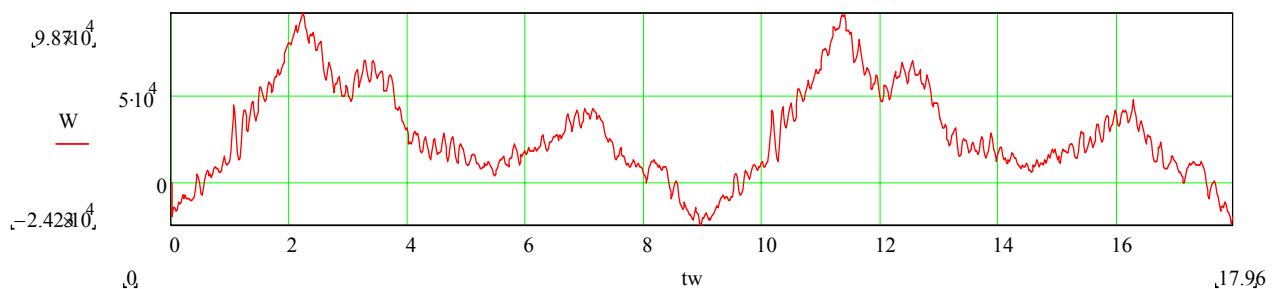


Рис. 4.9. Ватметрограма для свердловини Б-320 (13.06.02)

Видно, що протягом всього часу запису сигналу на формі динамограми присутні коливання деяких частот, амплітуди яких є малими в порівнянні з загальною зміною потужності. На спектрі ватметрограми (рис. 4.9) присутній підвищений рівень коливань у діапазоні від 4 до 7 Гц, причому на частоті 7 Гц існує яскраво виражений пік (див. рис. 4.10).

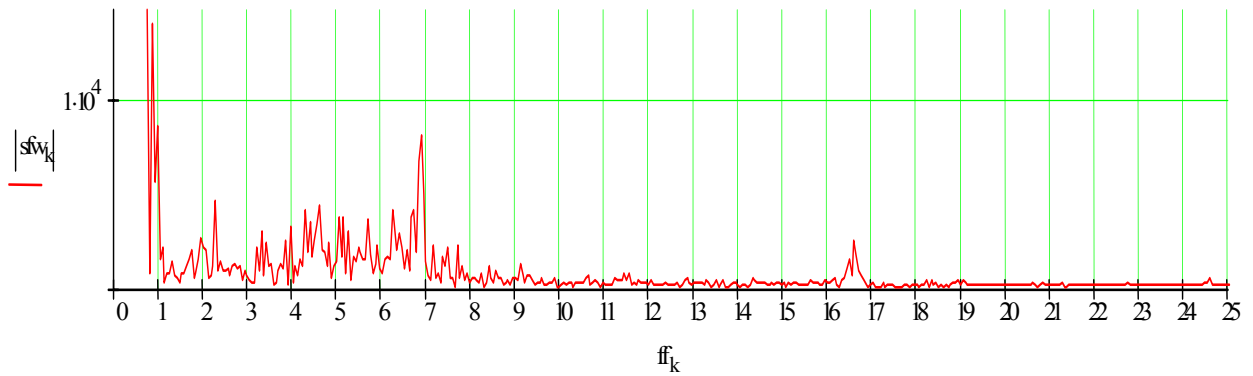


Рис. 4.10. Спектральний розклад ватметрограми

Ці частоти відповідають коливальним процесам після динамічних ударів у приводі. Частоти коливань залежать від фази взаємного розташування елементів верстата в даний момент робочого циклу. Пік на частоті близькій до 16,5 Гц відповідає частоті зубозчеплення. Для більшості типів редукторів верстатів-качалок ця частота орієнтовно може бути визначена наступною формулою:

$$f_z = \frac{148,5}{T},$$

де T -період одного робочого циклу качань [сек].

Низький рівень цієї частоти у стосунку до складових більш низькочастотного діапазону свідчить про відсутність зносу зубчастих пар та про якісну змазку редуктора. У випадку наявності зносу зубчастих пар або підвищеного тертя в них, відносний рівень цієї складової буде зростати. Найбільш відомим діагностичним і першим показником прояву загального зносу зубчастих пар є поява в спектрі ватметрографічного сигналу спочатку однієї пари, а потім цілого ряду дрібних бокових гармонік, інтервали між якими, у великій мірі, заповнюються рівнем “білого шуму”. При подальшому зносі буде зростати рівень білого шуму, який, при подальшому розвитку дефекта, може зрівнятись по амплітуді з частотою зубозчеплення та з бічними гармоніками. Для прикладу розглянемо рис.4.11, де наведена ватметрограма та її спектральне представлення. Яскраво видно різке збільшення шумових явищ та появи великого числа виражених спектральних ліній, що підтверджує

вищесказане. Слід зауважити, що при проведенні експериментів відзначена наявність підвищеного рівня акустовібраційних процесів для цієї свердловини.

У випадку підвищення рівня основної частоти зубозчеплення та наявності гармонічних складових від неї, слід говорити про наявність підвищеного люфта в елементах кріплення, що свідчить про знос опорних підшипників, які відносяться до того валу, зубчасті колеса якого створюють гармоніки від основної частоти.

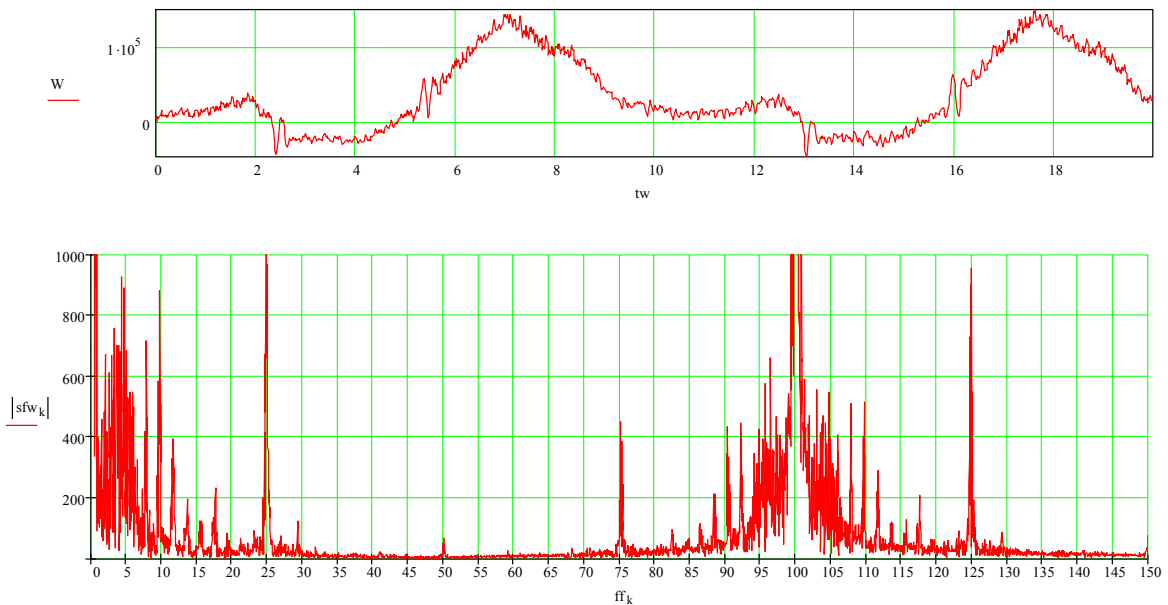


Рис. 4.11. Ватметрограма та її спектр для випадку зносу редуктора

Дефекти електромагнітного обладнання. Під цими дефектами слід розуміти дефекти асинхронного двигуна, як головної електричної складової приводу верстатів-качалок, оскільки вплив знижувального трансформатора живлення двигуна зводиться до спотворення синусоїдності форми напруги в мережі, внаслідок дефектів магнітопроводу трансформатора, і є дуже повільнозмінним процесом за нормальних умов. Згідно з відомими паразитними явищами в електричних машинах, зміни споживаної потужності електродвигунів можуть бути викликані наступними явищами:

- резонанс на основній частоті 50 Гц;
- електромагнітні процеси в міді та сталі електричної машини які мають пік 100Гц, що спричинюють додатково

віброакустичні коливання осердя та обмоток всіх машин змінного струму;

- силою, що виникає в зазорі електричної машини, і пов'язана з частотою обертання електромагнітного поля, вона є часткою від ділення частоти мережі живлення на кількість пар полюсів статора $F_0 = \frac{F_1}{P}$;
- силою, пов'язаною з ковзанням ротора асинхронної машини, частота якої відрізняється від 50 Гц на величину ковзання;
- наявністю зубчасто-пазової структури в зазорі електричної машини. Останній фактор для двигунів типорозмірів до 50 кВт не суттєвий;

Слід зауважити, що аналіз таких явищ вимагає розкладу в спектр не ватметрограми, а струмових сигналів, оцифрованих із частотою не нижчою 200Гц, оскільки операція усереднення потужності на періоді 50Гц обмежує цим самим верхню достовірну межу одержаного спектру. При проведенні експериментальних досліджень протягом 2000-2003 років на свердловинах Надвірнянського та Бориславського НГВУ яскраво виражених відхилень від нормальної роботи привідних асинхронних електродвигунів, які б могли бути додатково засвідчені якимось іншим способом, виявлено не було.

4.5. Перевірка методики визначення мас зрівноважуючих вантажів

Експериментальні дослідження, проведені на свердловинах Надвірнянського НГВУ, дозволяють перевірити наведені вище міркування щодо можливості автоматизованого визначення мас зрівноважуючих вантажів – на основі одночасного запису динамографічних і ватметрографічних даних .

Для свердловини Б-320, обладнаної верстатом-качалкою типу СКН-10-3312, в результаті проведених розрахунків, одержані наступні залежності (наведені на рис. 4.12).

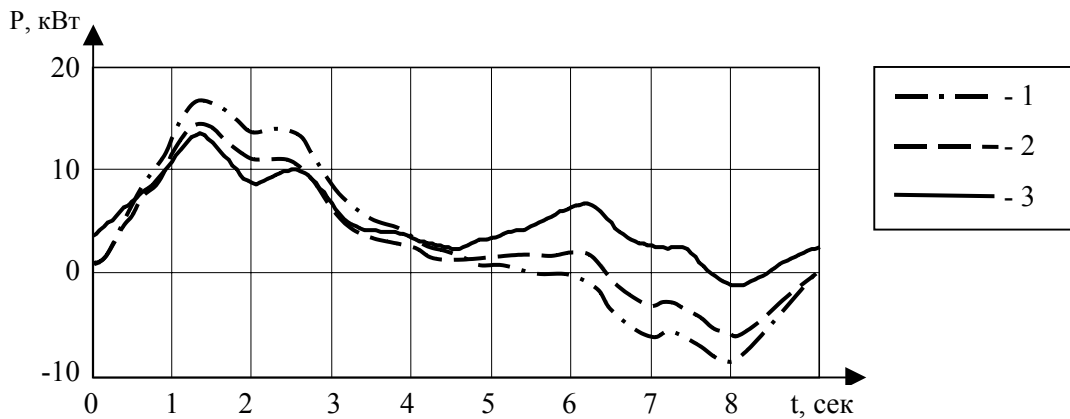


Рис. 4.12. Ватметриграми: 1 - виміряна експериментально, 2 - розрахована для маси 2400 кг, 3 - розрахована для маси 2340 кг

У цьому випадку коефіцієнт кореляції становить $K_k=0.902$ при масі вантажу на кривошипі 2340 кг. Розрахунок ватметриграми здійснений за залежностями $W(t)=f(Fd(t))$ вираженої з (2.4), (2.5) з сигналу динамограми знятої синхронно з ватметриграмою. Здійснивши обчислення для випадку маси вантажу 2400 кг (номінальна маса згідно технічної документації), одержано коефіцієнт кореляції, що становить $K_k=0.878$, при цьому візуально помітні відмінності в графічних залежностях на рис.4.12. Проведений розрахунок коефіцієнта кореляції для деякого діапазону мас вантажів, представлений на рис. 4.13.

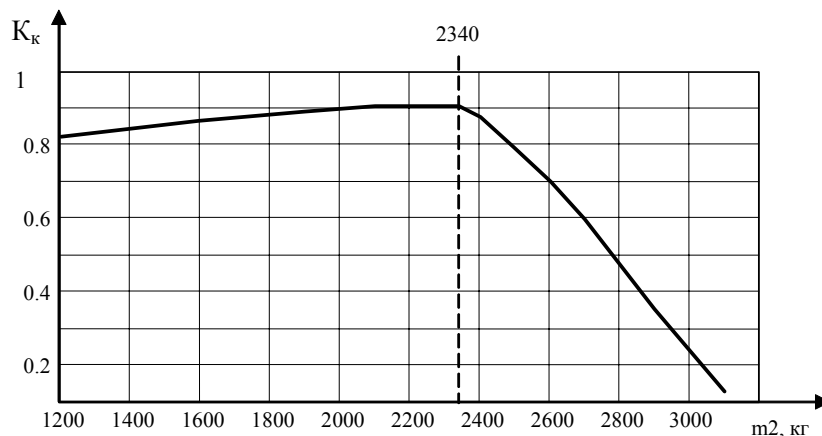


Рис. 4.13. Графік залежності коефіцієнту кореляції K_k від маси вантажу на кривошипі m_2 для свердловини Б-320

Аналогічні результати було отримано і для інших свердловин, що підтверджує можливість застосування запропонованого методу для визначення невідомих мас зрівноважуючих вантажів.

Слід зауважити, що визначена в такий спосіб маса вантажа є не абсолютна, (тобто така, яка буде одержана в результаті контрольного зважування, оскільки точно невідомий центр мас вантажа), а відносна, яка буде правильна тільки за умови використання в системі прийнятого центру мас, та з врахуванням мас інших масивних елементів ВК, які впливають на співвідношення моментів в механічній системі.

Висновки до розділу.

1. Здійснено порівняльний аналіз характеристик розроблених та основних відомих моделей ВК. Аналіз результатів порівняння (таблиця 4.1) коефіцієнтів кореляції відомих та розроблених моделей свідчить про кращі властивості останніх щодо опису механічних характеристик верстатів-качалок. Виходячи з цього, слід вважати доцільним використання розроблених моделей при побудові технічних засобів діагностування ШГНУ. При розробці програмних обчислювальних засобів слід враховувати той факт, що при використанні динамічної моделі для розрахунку необхідно використати в 2-4 рази більшу кількість математичних операцій в порівнянні зі статичною.
2. Проведено числове моделювання методу швидкісних характеристик; доведено можливість його використання для діагностування ШГНУ, а також у ролі джерела додаткової інформації для вдосконаленого ватметрографічного методу, що сприяє підвищенню діагностичної достовірності останнього.
3. Проведено частотний аналіз експериментальних ватметрографічних залежностей і виявлена можливість його використання для діагностування стану наземної частини ШГНУ – редуктора верстата-качалки та привідного електродвигуна.
4. Здійснена перевірка методики визначення невідомих мас зрівноважуючих вантажів верстата-качалки і доведена працездатність цієї методики. Рекомендовано використання цієї методики для автоматизації процесу зрівноважування верстатів-качалок.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ ЗА ВАТМЕТРОГРАФІЧНИМ МЕТОДОМ

5.1. Обґрунтування конфігурації мікропроцесорної системи діагностування ШГНУ

Мікропроцесорна система діагностування ШГНУ, розроблювана з урахуванням теоретичних досліджень та результатів обробки експериментальних даних, повинна відповідати наступним вимогам:

- забезпечення можливості вимірювання електричної потужності привідного двигуна верстата-качалки за методом двох ватметрів, або одного ватметра – в залежності від апаратно-програмної конфігурації;
- забезпечення можливості вимірювання швидкості обертання обертальних частин ВК у двох каналах із використанням оптичного давача кута повороту з кількістю імпульсів на оберт ≥ 1024 ;
- забезпечення можливості передачі вимірних даних до ЕОМ або контролера збору інформації через послідовний канал в стандарті RS-232C;
- кількість відліків усередненої на періоді потужності за одиницю часу $n \geq 10$ вимірів /сек;
- приведена похибка вимірювання потужності $\leq \pm 0,6\%$ при повному діапазоні зміни температур оточуючого середовища;
- забезпечення можливості збереження, відтворення та аналізу одержаних даних;
- робочий температурний діапазон $-40^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$.

Виходячи з індивідуальних технічних характеристик кожного ВК – таких, як маса зрівноважуючих вантажів, потужність асинхронного двигуна, тип редуктора та клинопасової передачі, геометричні розміри вузлів, доцільно розбити мікропроцесорну систему діагностування на дві частини – стаціонарну і мобільну. Стаціонарна частина розміщується в шафі електрообладнання ВК і

разом із первинними давачами становить інтелектуальний перетворювач потужності та вимірювач швидкісних характеристик ВК. Швидкісні характеристики можуть вимірюватись або ні – в залежності від ступеня точності діагностування ШГНУ (в спрощеному варіанті їх вимірювання може не проводитись). Стаціонарна частина, в такій концепції побудови, містить лінеаризаційно-перетворювальне обчислювальне ядро, яке за відомими інтерполяційними залежностями, одержаними після калібрування первинних перетворювачів, здійснює лінеаризацію сигналів на виході трансформаторів струму, їх оцифровку разом із сигналами напруги, корекцію похибки несинфазності дискретизації, обчислення значення миттєвої потужності та усереднення цих значень на періоді робочої частоти напруги живлення привідного двигуна ВК.

Мобільна частина системи діагностування може комплектуватись у залежності від технологічних потреб експлуатаційної організації:

- збір інформації за допомогою контролера збору і обробки інформації (з подальшим зчитуванням та обробкою за допомогою ЕОМ);
- безпосередньою обробкою даних за допомогою ЕОМ.

Контролер збору та обробки інформації призначений для накопичення інформації щодо свердловин у процесі їх досліджень, і дозволяє здійснювати тільки відображення ватметрограм в часовій та частотних формах та зберігати дані в енергонезалежній пам'яті. Це дозволяє здійснювати балансування ВК та виявляти дефекти редуктора та електроприводу ВК. Внаслідок спрощеного інтерфейсу (одна програма + шість клавiш управління), такий пристрій доступний персоналу без спеціального рівня кваліфікації та зручний в умовах підвищеної забрудненості важкими фракціями нафти прилеглої зони ВК. Глибокий аналіз одержаних даних у цьому випадку здійснюється в умовах управління за допомогою передачі даних на ЕОМ. Безпосередня обробка одержаних показників може виконуватись за допомогою ЕОМ типу NoteBook із відповідним програмним забезпеченням на ньому. Перевага такого методу – в оперативному діагностуванні ВК “на місці”, недоліки – необхідність

кваліфікованого персоналу, незручність роботи з ЕОМ в забрудненій зоні. Однак, як показала практика проведення вимірювальних експериментів на базі Надвірнянського НГВУ, за умов гірських ландшафтів, при наявності пересувної лабораторії безпосереднє під'єднання вимірювача потужності до ЕОМ є абсолютно можливим. Мобільна частина системи повинна забезпечувати можливість під'єднання електронного динамографа для проведення всіх етапів діагностування та балансування ШГНУ.

У подальшому блок аналізу даних та діагностування ШГНУ може бути виконаним стаціонарний і містити в собі функції управління ШГНУ.

5.2. Характеристика існуючих проблем та розробка алгоритму функціонування спеціалізованого вимірювача споживаної потужності привідного двигуна ВК

Відомі цифрові трифазні вимірювачі спожитої електроенергії [39, 40, 41] мають типову структуру (рис. 5.1).

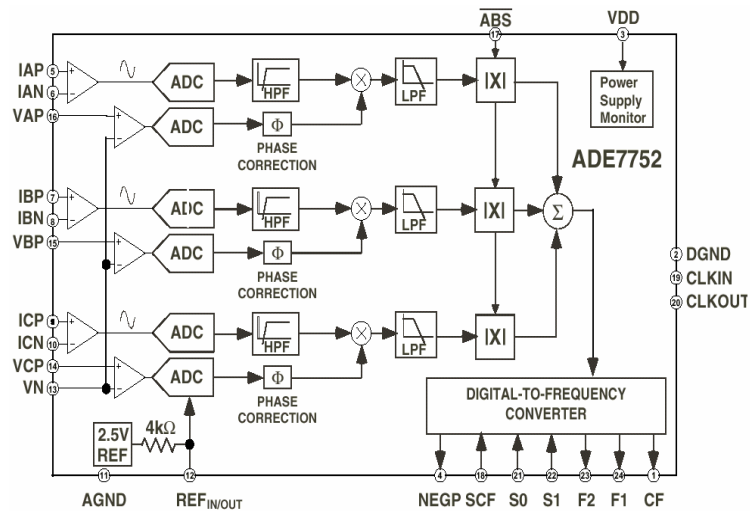


Рис. 5.1. Структура трифазного вимірювача потужності ADE7752

Загальна структура типового модуля вимірювання потужності трифазної системи ADE7752 (за Analog Devices) включає в себе всі основні необхідні вузли: ADC – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), HPF – фільтр високих частот (ФВЧ), phase correction – лінія затримки для усунення паразитних

фазових зсувів, Digital to frequency converter – цифро-частотний перетворювач. 2.5V REF – прецизійне джерело опорної напруги 2,5 В, power supply monitor – монітор системи живлення. Наявність ФВЧ викликана необхідністю усунення постійної складової в сигналі напруги та струму, яка може бути присутня внаслідок паразитних випрямлювальних явищ у системі електропостачання. Внаслідок інтегральної реалізації всього пристрою, ФВЧ – цифровий і потребує додаткової корекції фазових спотворень сигналу за допомогою лінії затримки. Вихід такого пристрою – частотний і призначений для роботи з електромеханічними лічильниками спожитої електроенергії. Високочастотний вихід CF – обмежений частотою 5 кГц. Період вихідних імпульсів, як показують власні експериментальні дослідження, приладу аналогічної серії (ADE7751) – нестабільний. Тому точність вимірювань із використанням такого роду пристроїв та комбінованих методів перетворення інформації (вимірювання періоду вихідної послідовності CF з подальшим усередненням щодо декількох значень) для випадку ШГНУ не перевищить $0,65 \pm 0,8$ %, що в сумі з похибкою трансформаторів струму 0,5% складе неприпустимі значення з погляду діагностування. Проте вимірювання швидкості обертання ротора привідного електродвигуна ШГНУ – завдання, яке потребує використання додаткових апаратних засобів. Виходячи з цього, реалізовано необхідний засіб вимірювання за допомогою мікроконтролера – як найбільш простого способу реалізації поставленої мети. Типова структура модуля вимірювання потужності трифазної системи (рис. 5.1) є економічно вигідною тільки за умови її інтегрального виконання у вигляді великої інтегральної схеми (ВІС). У випадку використання дискретних елементів собівартість приладу виходить надмірною, тому деякі автори пропонують використовувати спрощену схему з одним АЦП та ключовою послідовною комутацією каналів [79]. У такому вимірювачі наявний один АЦП та аналоговий мультиплексор, який по чергово перемикає канали вимірювання. Посилаючись на відомий світовий досвід проектування ватметрографів для діагностування ШГНУ та враховуючи симетричність асинхронного електродвигуна як навантаження, доцільно використати метод

двох ватметрів (рис.5.2) для зменшення кількості первинних перетворювачів з 6 до 4 [80]. Такий вибір є компромісним рішенням, оскільки покращує точність вимірювання в порівнянні з методом одного ватметра.

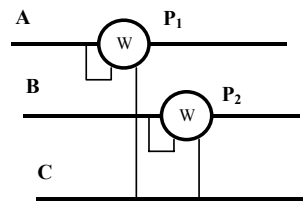


Рис. 5.2. Схема вимірювання потужності методом двох ватметрів

Розглянутий вимірювач потужності діє за методом двох ватметрів; при цьому сигнали u_1, i_1, u_2, i_2 відповідають значенню напруг та струмів, виміряних між фазами АС та ВС. Несинфазність дискретизації у чотирьох каналах вимірювання u_1, i_1, u_2, i_2 призводить до появи похибки, значення якої різко збільшується в межах мінімальних потужностей [81]. Причому це відбувається навіть у тому випадку, коли ця потужність визначається тільки зсувом фаз між напругами та струмами ($\cos \varphi$), а амплітудні значення напруг та струмів – максимальні. У додатку Е наведені розрахункові залежності та результати розрахунків, виконані в середовищі MathCAD для випадку одного АЦП та мультиплексора. З результатів моделювання видно, що відносна похибка вимірювання виходить за допустимі межі. Вихід із ситуації можливий за рахунок забезпечення одночасності вимірювань при використанні відповідної кількості схем вибірки-зберігання чи АЦП або програмної корекції похибки за допомогою інтерполяційного алгоритму. Використання схем вибірки-зберігання для таких частот виглядає нераціональним через додаткові апаратні витрати. Крім того, на сучасному етапі спостерігається використання схем вибірки-зберігання тільки для діапазонів ВЧ (відеотехніка, ультразвук), а для НЧ-діапазону такі мікросхеми не використовують. Тому доцільно розглянути можливість програмної корекції похибки несинфазності дискретизації сигналів. Блок-схема такої системи виглядатиме так, як наведено на рис. 5.3.

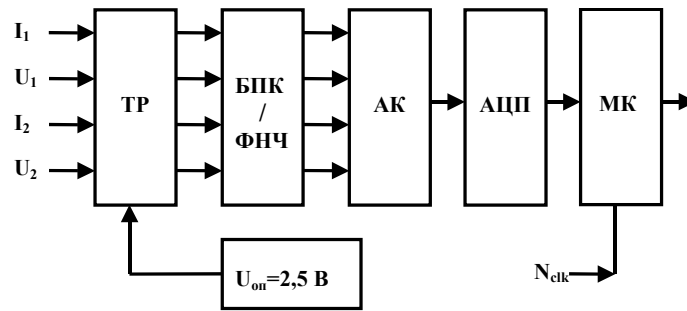


Рис. 5.3. Блок-схема цифрового вимірювача електричної потужності з одним АЦП: ТР – транслятор рівня; БПК – буферний підсилювальний каскад; АК – аналоговий комутатор; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; МК – мікроконтролер; $U_{оп}$ – джерело опорної напруги; ФНЧ – фільтр низьких частот (протишумовий фільтр); I_1, U_1, I_2, U_2 – сигнали вимірюваних струмів та напруг; N_{clk} – імпульси з давача обертів електродвигуна

Вибір типу алгоритму корекції обмежується обчислювальними можливостями мікроконтролерних засобів. Враховуючи це, для восьмирозрядних систем рекомендований алгоритм з квадратичною інтерполяцією вхідних даних [82].

Аналітично він може бути описаний формулою

$$y_i = a(t_i - dd)^2 + b(t_i - dd) + c,$$

де y_i – скоректоване значення i -го відліку сигналу, t_i – поточний час (сек),

dd – час між сусідніми вимірами однієї вибірки сигналів (сек), а додаткові розрахункові коефіцієнти a, b, c визначаються як:

$$a = \frac{y_{i-2} - 2y_{i-1} + y_i}{2dt^2},$$

$$b = \frac{y_i - y_{i-2}}{2dt} - 2at_{i-1},$$

$$c = y_{i-1} - ay_{i-1}^2 - bt_{i-1},$$

де dt – інтервал дискретизації між вибірками.

Проведене моделювання (додаток Ж) показує, що відносна похибка при цьому зменшується до 0,52%. Використання ж лінійної інтерполяції зменшує цю похибку до 12%, що недостатньо для практичного використання. Орієнтуючись на застосування 8-розрядних мікроконтролерів без зовнішньої оперативної пам'яті (для зменшення загальної кількості корпусів мікросхем) і

враховуючи, що об'єм внутрішньої пам'яті таких контролерів складає $\approx 0,5$ кБайт, приходимо до висновку про необхідність використання 2 каналів вимірювання з двома ідентичними мікроконтролерними обчислювачами, двома АЦП, кожен з яких вимірює свій струм та напругу. При цьому кількість дискретизованих даних збільшується вдвічі, а зсув фаз між першим і останнім оцифрованим значенням однієї часової точки вимірювання – зменшується вчетверо. Крім того, в два рази зростає обчислювальна потужність пристрою. Моделювання такого способу вимірювання потужності наведено в додатку 3 і свідчить, що похибка при цьому зменшується до 0,1%.

Інша причина виникнення похибок – можлива нестабільність промислової частоти живлення електродвигуна (50Гц). Підставивши у функцію обрахунку потужності деякі можливі частоти, відмінні від 50 Гц, одержимо відповідну графічну залежність, (див. рис. 5.4)

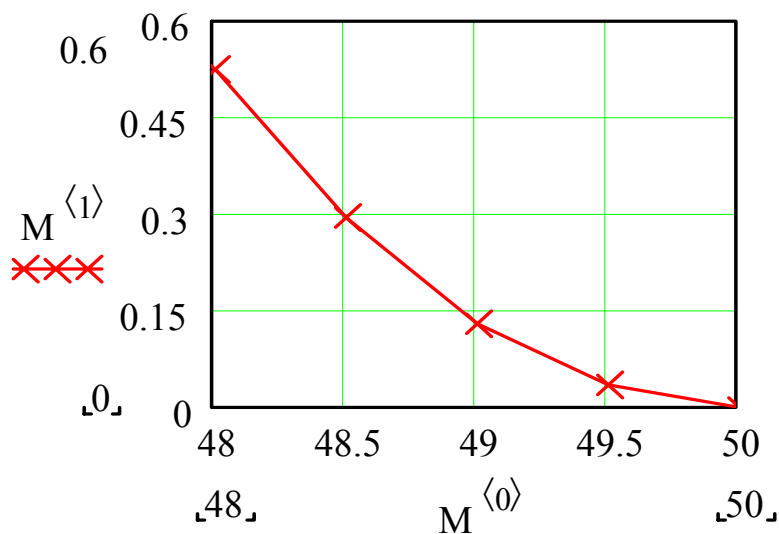


Рис. 5.4. Похибка обчислення потужності при відхиленні частоти мережі від номінальної:
 $M^{(1)}$ – відносна похибка (%); $M^{(0)}$ – частота мережі (Гц)

Грунтовних даних щодо імовірності виникнення частотних відхилень в електромережах живлення привідних двигунів ШГНУ для України немає, проте вибіркові дослідження, проведені на 5 нафтовидобувних свердловинах Західної України протягом 2001-2002 рр., не зареєстрували відхилення робочої частоти

нижче 49,9 Гц. Для такого значення частоти, відносна похибка складає $1,259 \cdot 10^{-3} \%$. Проте дослідження, проведені раніше, [83] свідчать про можливість зниження частоти до 48,9 Гц. (похибка 0,15%). Виходячи з цього, можливе застосування відповідного компенсаційного алгоритму для корекції і цієї похибки. Остаточний алгоритм функціонування первинного вимірювального перетворювача електричної потужності виглядатиме наступним чином:

- 1) очікування приходу сигналу START, що свідчить про початок циклу ВК;
- 2) початкова ініціалізація даних;
- 3) калібрування вимірювального тракту протягом першого періоду робочої частоти вимірюваної напруги. Сюди входить вимірювання робочої частоти 50 Гц, напруги постійного зміщення +2,5В та опорної напруги +5В. У такий спосіб одержуються коефіцієнти, необхідні для корекції розглянутих вище похибок;
- 4) обнулення змінних вимірювання швидкості обертання давачів А178-А5. Запуск відлікових таймерів/лічильників;
- 5) запис оцифрованих даних i_1, u_1, i_2, u_2 в ОЗП мікроконтролерів протягом другого періоду робочої частоти вимірюваної напруги;
- 6) лінеаризація первинних перетворювачів, шляхом домноження одержаних даних на відомі калібраційні функції;
- 7) визначення потужності усередненої на періоді робочої частоти в кожному ватметрі, з корекцією похибок. Останні два пункти виконуються в кожному мікроконтролері незалежно один від одного протягом третього періоду робочої частоти;
- 8) визначення повної потужності шляхом алгебраїчного додавання значень одержаних в двох ватметрах. Обчислення здійснюється в ведучому мікроконтролері;
- 9) початок передачі значення вимірюваної потужності по RS-232C;
- 10) у випадку початку п'ятого періоду робочої частоти зупинка відліку таймерів/лічильників, визначення швидкості обертання давачів А178-А5;
- 11) початок передачі значень швидкості обертання по RS-232C;

- 12) якщо робочий цикл ВК не закінчено, перехід до п.2;
- 13) перехід до п.1.

5.3. Розробка апаратної частини вимірювального перетворювача

5.3.1. Створення структурної схеми вимірювального перетворювача.

З урахуванням наведеного алгоритму п. 5.2, структурна схема вимірювального ватметрографічного перетворювача може бути представлена так (рис. 5.5):

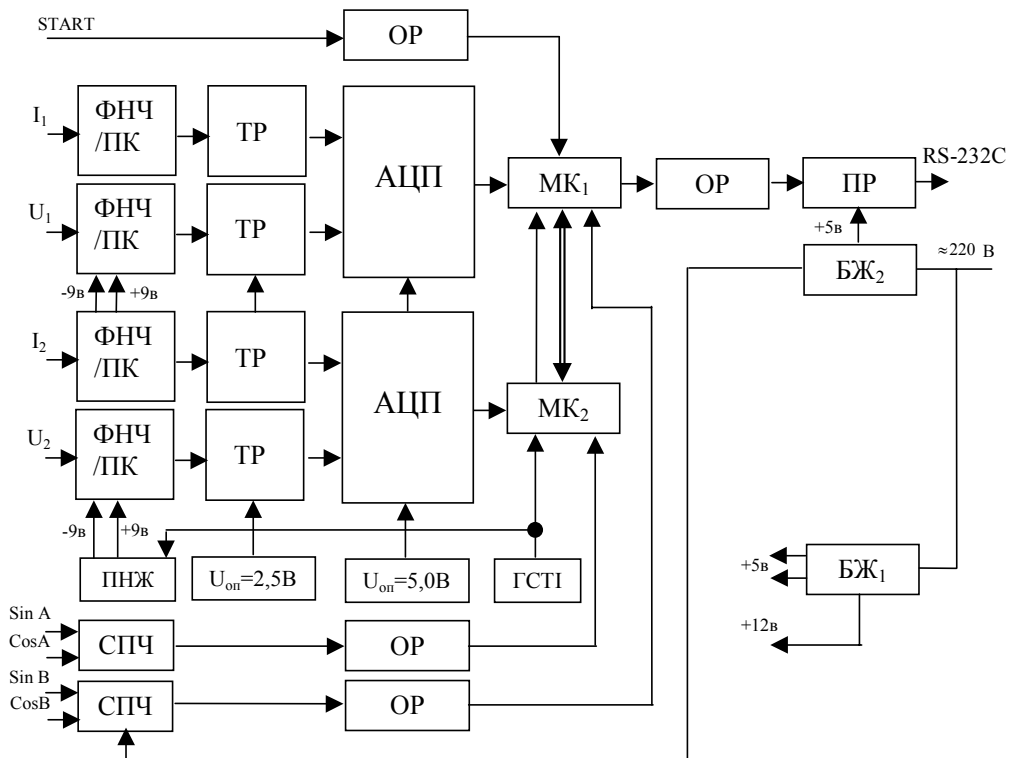


Рис. 5.5. Структурна схема ватметрографічного вимірювального перетворювача

Тут ФНЧ/ЛПК – фільтр низьких частот/підсилювальний каскад, призначений для підсилення вхідного сигналу та зменшення рівня вхідних високочастотних завад; ТР – транслятор рівня вхідного сигналу, призначений для переносу його рівня у межі додатніх значень; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; МК₁ – ведучий мікроконтролер; МК₂ – ведений мікроконтролер; ОП – оптико-гальванічна розв'язка; ПР – перетворювач рівня TTL/RS-232C;

БЖ₁ – блок живлення внутрішніх кіл схеми, БЖ₂ – блок живлення інтерфейсних частин схеми (обидва блоки живлення гальванічно розв'язані); ГСТІ – генератор синхронізуючих тактових імпульсів; ПНЖ – перетворювач напруги живлення призначений для одержання від'ємної напруги необхідної для нормального функціонування підсилювальних каскадів; U_{оп} – джерело опорної напруги; СПЧ – схема перетворення частоти; Сигнал START одержується від кінцевого вимикача (геркона) і свідчить про початок робочого циклу ВК. Розглянута схема в апаратній реалізації придатна також для функціонування в згорнутих варіантах – без вимірювання:

- кутових швидкостей ротора ведучого шківів;
- веденого шківів;
- потужності одним ватметром.

Режим роботи визначається тільки програмним забезпеченням.

Загальна схема вимірювальної системи, побудованої з використанням цієї схеми вимірювального ватметрографічного перетворювача може бути такою як представлено на рисунку (рис.5.6). Така схема включення апаратних засобів дозволяє здійснювати повне діагностування ШГНУ. Слід зауважити, що для досягнення абсолютно повного автоматизованого (або напівавтоматизованого) виявлення дефектів, до схеми (рис.5.6) слід включити канал вимірювання вібрації, що дозволить більш повно діагностувати стан підшипників та зубчастих пар редуктора та електродвигуна ВК.

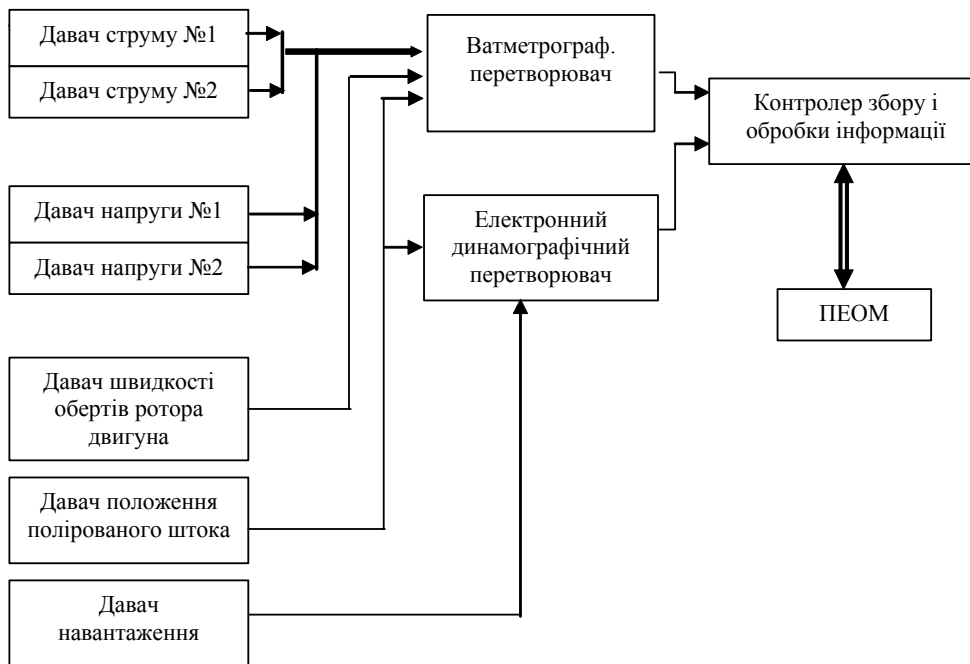


Рис. 5.6. Структурна схема системи діагностування ШГНУ

5.3.2. Обґрунтування та вибір елементної бази ВП.

Однією з важливих проблем щодо створення апаратного забезпечення ватметричних систем діагностування ШГНУ є відсутність спеціалізованих інтегральних схем – вимірювачів електричної енергії із швидкісним виходом. Відомі взірці [39, 40, 41] призначені для використання в лічильниках спожитої електроенергії і мають швидкість видачі даних, меншу за необхідну. (<10 відліків/сек). У пристроях, які мають імпульсний вихід, швидкість видачі імпульсів є недостатня для побудови ватметрограм тривалістю 6...20 сек. Тривалість імпульсів є ненормованою величиною і, як показали проведені дослідження [84], має здатність до випадкових флуктуацій. Тому за допомогою комбінаційних алгоритмів, які враховують як частоту видачі імпульсів, так і їх тривалість, можна досягнути відносної похибки вимірювання $\geq \pm 0,6\%$, що не відповідає вимогам побудови ватметрографів для ШГНУ. Виходячи з цього, побудову ВП доцільно здійснити за схемною реалізацією на дискретних компонентах (АЦП, підсилювачі, оптико-гальванічні розв'язки, мікроконтролери, тощо). При виборі інтегральних компонентів було вирішено орієнтуватись на виробників, які мають широку інфраструктуру на ринку

України, мінімізувавши можливість втрати комплектації у випадку зникнення торгової мережі постачальників. У такий спосіб були вибрані інтегральні компоненти виробництва “Analog Devices”, “Atmel”, “Maxim” та “Burr-Brown”. Нижче наведені технічні характеристики основних елементів необхідні для проведення розрахунків принципової схеми та її метрологічних характеристик.

У ролі джерела опорної напруги 2,5В, необхідного для перетворення з біполярного вхідного сигналу в уніполярний, використано прецизійний інтегральний стабілізатор AD780 (“Analog Devices” [85]), призначений для роботи з 16-розрядними аналогово-цифровими вимірювальними системами. Основні технічні характеристики мікросхеми AD780 наведені в табл. К.1 (додаток К). Стабілізатор AD780 містить довготривалий захист від короткого замикання на землю. Допустимі також короткочасні закорочування напруги виходу мікросхеми до вхідної напруги живлення [85].

В якості джерела опорної напруги 5В, який застосовується для зменшення рівня можливих завад, що передаються по живленню, використано прецизійний інтегральний стабілізатор REF02 [86]. Основні технічні характеристики мікросхеми REF02 наведені в табл. К.2 (додаток К). Стабілізатор REF02 також, як і AD780, містить довготривалий захист від короткого замикання на землю. Допустимі також короткочасні закорочування напруги виходу мікросхеми до вхідної напруги живлення. Мікросхема рекомендована до використання в цифрових вольтметрах, прецизійних регуляторах, перетворювачах “напруга/частота”, АЦП та ЦАП, контрольно-вимірювальній апаратурі [86].

У ролі аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) вибрано чотириканальну мікросхему ADS7841 (“Burr-Brown” [87]), призначену для побудови систем збору та обробки інформації з мінімальним енергоспоживанням. Основні технічні характеристики мікросхеми наведені в табл. К.2 (додаток К). Мікросхема потребує тільки додаткового джерела опорної напруги. Тактування аналогово-цифрового перетворення відбувається від тактових синхроімпульсів зчитування даних і не потребує додаткових

генераторів. Мікросхема є рекомендованою для використання в системах збору і обробки інформації, контрольно-вимірювальній апаратурі, приладах промислово-технологічного контролю, мобільних цифрових приладах та приладах автономного живлення.

У ролі інструментального підсилювача вибрана мікросхема INA141 (“Burr-Brown” [86]). Це прецизійний інструментальний підсилювач, який у своїй схемі включення не потребує додаткових елементів і має два фіксовані коефіцієнти підсилення $G=10$ і 100 , що вибираються в залежності від включення інтегральної схеми. Основні технічні характеристики INA141 наведені в табл. К.4 (додаток К). Мікросхема побудована за класичною для такого класу приладів схемою – на трьох операційних підсилювачах з використанням технології лазерного підстроювання експлуатаційних параметрів; рекомендована для використання в мостових тензорезистивних підсилювачах, підсилювачах термопар, медичній апаратурі та в системах збору й обробки інформації.

У ролі обчислювача вибраний 8-розрядний мікроконтролер AT90S8535 (“Atmel” [88]) – як такий, що відповідає наступним вимогам :

- розповсюдженість мікросхеми;
- наявність компіляторів з мов високого рівня (Сі, Паскаль);
- достатня швидкодія (4-12 МГц системної частоти виконання команд без додаткового поділу частоти);
- розширена RISC-архітектура з широким набором команд, що дозволяє виконувати майже кожну з 118 можливих команд за один такт;
- можливість багаторазового електричного стирання/перезапису програм у процесі відлагоджування системи (до 1000 разів);
- наявність 16-розрядного лічильника та двох 8-розрядних таймерів, придатних для вимірювання швидкісних характеристик верстата-качалки;
- наявність апаратно реалізованих послідовних інтерфейсів SPI та UART, що дозволяє обробляти дані під час процесу передачі вже оброблених;

– УАПІ (UART)-інтерфейс, який може бути узгоджений із стандартом RS-232C, що забезпечує під'єднання контролера до ЕОМ типу ІВМ РС.

Основні технічні характеристики AVR контролера АТ90S8535 наведені в табл. К.5 (додаток К).

Для оптико-гальванічної розв'язки використана мікросхема Н11L1, рекомендована Analog Devices для використання в пристроях – лічильниках електричної енергії [39, 89]. Мікросхема містить вихідний логічний елемент з тригером Шміта та відкритим колектором. Основні технічні характеристики мікросхеми наведені в табл. К.6 (додаток К).

5.3.3. Розробка електричної принципової схеми ВП.

Використовуючи структурну схему (рис. 5.5), можна перейти до створення принципової схеми. Для цього слід максимально використати стандартні схеми включення використаних компонентів, рекомендовані виробником [86, 87, 85], та провести розрахунок аналогових кіл пристрою.

Розрахунок вхідного кола каналу вимірювання струму. Первинним перетворювачем струмового сигналу є трансформатор струму. Для роботи з двигуном, потужністю $P_{дв}=55$ кВт ($I_{л}=83.3$ А) виберемо трансформатор струму з коефіцієнтом трансформації $K_{тр}=I_1/I_2=100/5$ А, номінальною потужністю $P_{тр}=5$ ВА та класом 0,5 (тип трансформатора: ТК-20).

Номінальне навантаження для такого трансформатора :

$$R_H = \frac{P_{TP}}{I_2^2} = \frac{5}{5^2} = 0.2 \text{ Ом},$$

що не відрізняється від стандартного значення.

Максимальний спад напруги на резисторі навантаження R_H при вхідному струмі $I_{л}=83,3$ А буде складати:

$$\Delta U_R = \frac{I_{л}}{K_{TP}} \cdot R_H = \frac{83,3}{20} \cdot 0,2 = 0,833 \text{ В}.$$

Амплітудне значення цієї напруги:

$$\Delta U_{Rm} = \Delta U_R \cdot \sqrt{2} = 0,833 \cdot \sqrt{2} = 1,179 \text{ В}.$$

Повний діапазон вимірювання для АЦП ADS7841 за постійною напругою складає $U_{\min} \dots U_{\max} = 0 \div +5\text{В}$. З урахуванням запасу щодо перевантаження, цей діапазон слід звужити на 10%. Тоді він складатиме $U_{\min} \dots 0,9 \cdot U_{\max} = 0 \div 4,5\text{В}$. Після переносу змінної складової сигналу в межі додатніх значень, вимірювальний діапазон АЦП включатиме в себе повний розмах сигналу, рівний подвійному амплітудному значенню. Виходячи з цього, амплітуда змінної складової сигналу, яка повинна надійти на вхід АЦП у випадку максимального вхідного сигналу (без перевантаження), що відповідає потужності двигуна $P_{\text{дв}}=55\text{ кВт}$, складе:

$$U_{sm} = \frac{0,9 \cdot U_{\max}}{2} = 2,25\text{ В.}$$

При цьому коефіцієнт підсилення вхідного підсилювача становитиме:

$$K_p = \frac{U_{sm}}{\Delta U_{Rm}} = \frac{2,25}{1,179} = 1,908,$$

або в логарифмічних одиницях:

$$K_{pL} = 20 \cdot \lg \frac{U_{sm}}{\Delta U_{Rm}} = 20 \cdot \lg \frac{2,25}{1,179} = 5,613\text{ дБ.}$$

Оскільки коефіцієнт підсилення інструментального підсилювача $G=10$ – фіксована величина, для його зменшення слід ввести додатково подільник напруги на резисторах та RC-ланку (ФНЧ) для зменшення величини вхідних ВЧ-завад. Схема такого кола наведена на рисунку. (рис. 5.7)

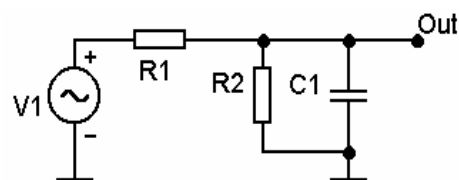


Рис. 5.7. Схема вхідного кола

Коефіцієнт передачі такої ланки на частоті 50Гц повинен складати:

$$K_{R1R2i} = \frac{U_{sm}}{G \cdot \Delta U_{RM}} = \frac{2,25}{10 \cdot 1,179} = 1,908 \cdot 10^{-1}.$$

Джерелом вхідного сигналу V_1 для такого кола є опір навантаження трансформатора струму $R_H=0,2$ Ом з максимальним протікаючим

струмом: $I_{2\max} = \frac{I_\Lambda}{K_{TP}} = \frac{83,3}{20} = 4,166$ А. Для мінімізації впливу вимірюючого кола

подільника напруги повинна виконуватись умова $I_{2\max} \gg I_{R1R2}$ [90], тобто слід вибрати $I_{R1R2} \leq 40$ мА. Нехай $I_{R1R2} = 0,7$ мА. Тоді сумарний імпеданс подільника складатиме:

$$Z_{R1R2C1} = \frac{U_{Rm}}{I_{R1R2}} = \frac{1,179}{7 \cdot 10^{-4}} = 1,684 \text{ кОм.}$$

Опір резистора R_2 в першому наближенні можна визначити так:

$$R_2 = \frac{U_{sm} / G}{I_{R1R2}} = \frac{2,25 / 10}{7 \cdot 10^{-4}} = 321,43 \text{ Ом,}$$

відповідно опір резистора R_1 визначається наступним чином:

$$R_1 = Z_{R1R2C1} - R_2 = 1684 - 321,43 = 1,363 \text{ кОм.}$$

Виберемо стандартні значення резисторів: $R_1=1,37$ кОм, $R_2=320$ Ом. Тип резисторів повинен відповідати вимогам високої термостабільності (значення ТКО), високої точності номінального опору, а також низькою ЕРС шумів. Електрична потужність, що розсіюється на резисторах у такому режимі, є мізерно мала, її значенням можна знехтувати. Остаточо вибираємо тип резисторів [92]:

$$R_1: \text{C2-14-0.125Вт-1,37кОм} \pm 0.1\% \text{ С ,}$$

$$R_2: \text{C2-14-0.125Вт-320Ом} \pm 0.1\% \text{ С .}$$

Діапазон значень ТКО для резисторів типу С2-14 складає $\pm(0,0015 \dots 0,01) \% / ^\circ\text{C}$ для повного температурного діапазону. ЕРС шумів складає 1 мкВ/В, максимальна робоча температура $+155$ $^\circ\text{C}$.

Реальний коефіцієнт резистивного подільника напруги, утвореного резисторами R_1R_2 :

$$K_{12i} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{320}{320 + 1370} = 0,189 .$$

Антипаразитний ФНЧ, утворений ланкою R_1C_1 , повинен забезпечувати фільтрацію частот, що вищі половини частоти дискретизації АЦП (за теоремою

Котельникова). Враховуючи орієнтовну частоту дискретизації системи, обмежену швидкістю тактування АЦП мікроконтролером через канал SPI як

$$f_d = 125 \text{ кГц}, \text{ одержимо максимальну частоту зрізу ФНЧ } f_o \leq \frac{f_d}{2} = \frac{125}{2} = 62,5 \text{ кГц}.$$

Виберемо $f_0 = 50 \text{ кГц}$. Коефіцієнт передачі подільника напруги на цій частоті

$$\text{повинен складати } K_0 = \frac{K_{12i}}{\sqrt{2}} = \frac{0,189}{\sqrt{2}} = 0,134 \text{ (за означенням смуги пропускання}$$

фільтрів [58]) Визначимо ємність конденсатора C_1 . Для цього виразимо повний опір $Z_2 = R_2 \parallel Z_{C1}$ з формули коефіцієнта передачі резистивного подільника:

$$Z_2 = \frac{R_1}{\frac{1}{K_0} - 1} = \frac{1,37 \cdot 10^3}{\frac{1}{0,134} - 1} = 211,986 \text{ Ом}.$$

З відомої формули загального опору при паралельному з'єднанні опорів,

оскільки $Z_2 = R_2 \parallel Z_{C1}$, і, знаючи, що $Z_c = \frac{1}{2\pi f_0 C_1}$, виразимо C_1 :

$$C_1 = \frac{\left(\frac{1}{Z_2} - \frac{1}{R_1}\right)}{2\pi f_0} = \frac{\left(\frac{1}{211,79} - \frac{1}{1,37 \cdot 10^3}\right)}{2\pi \cdot 50 \cdot 10^3} = 1,27 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}.$$

Тип конденсатора вибираємо з умов стабільності його параметрів. Тип конденсатора КСО-5-250 В $-10000\text{пФ} \pm 2\%\Gamma$. [91] Чисельний розрахунок АЧХ та ФЧХ ланки (рис. 5.7), проведений в MicroCAP-7 свідчить про її працездатність (рис.5.8.).

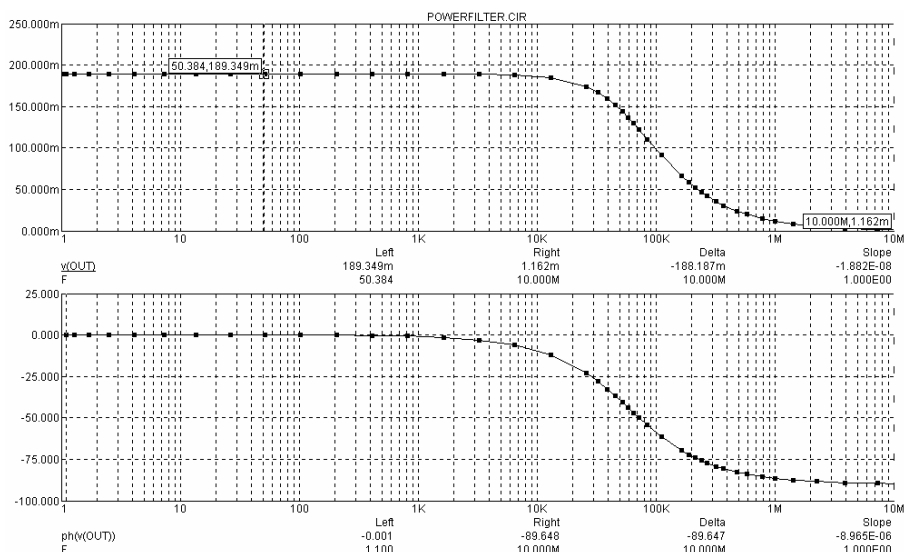


Рис. 5.8. АЧХ – (v(Out)) та ФЧХ – (ph(v(Out))) вхідного струмового кола системи

Враховуючи, що ТКЄ вибраного конденсатора становить $\pm 0,005\%/^{\circ}\text{C}$ зміна ємності в залежності від температури складатиме $\pm 0,5$ пФ для температурного діапазону $-50\dots+50$ $^{\circ}\text{C}$. Значення коефіцієнта передачі за напругою вхідного струмового кола системи для мінімального та максимального значення робочої температури навколишнього середовища становитиме:

$$K_{iT} = \frac{Z_2}{Z_2 + R_1} = \frac{R_2 \frac{1}{2\pi f(C \pm \Delta C)} / \left(R_2 \frac{1}{2\pi f(C \pm \Delta C)} \right)}{R_2 \frac{1}{2\pi f(C \pm \Delta C)} / \left(R_2 \frac{1}{2\pi f(C \pm \Delta C)} \right) + R_1} . \quad (5.1)$$

Підставивши в формулу 5.1 значення температурної зміни ємності $\Delta C = \pm 0,5$ пФ, одержимо: $K_{iT \max} = 0,18919415$, $K_{iT \min} = 0,18919569$. Коефіцієнт передачі для номінального значення ємності одержимо при $\Delta C = 0$: $K_i = 0,18919492$. Відносна температурна похибка пасивного струмового вхідного кола в такому разі складає: $\delta_{Ki} = \frac{K_i - K_{iT \max}}{K_i} \cdot 100\% = 0,0004\%$. Очевидно, що впливом такої похибки можна знехтувати.

Розрахунок вхідного кола каналу вимірювання напруги. Канал вимірювання напруги, на відміну від каналу вимірювання струму можна виконати з резистивним подільником напруги на вході. Перевагою такого методу є відсутність фазових спотворень сигналу, що залежить від частоти, та відсутність додаткових похибок, пов'язаних із розсіюванням магнітного потоку при використанні трансформаторів напруги. Крім того, при цьому не використовуються великогабаритні трансформатори напруги. Недоліком є наявність гальванічного зв'язку між апаратною частиною приладу та лінією вимірювання, що зумовлює необхідність використання оптико-гальванічної розв'язки. Принципова схема вхідного кола каналу вимірювання напруги співпадає зі схемою (рис.5.7), однак номінали елементів суттєво відрізняються і тому потребують додаткового розрахунку.

Коефіцієнт передачі резистивного подільника напруги в такому випадку визначається так:

$$K_{R1R2u} = \frac{U_2}{GU_1\sqrt{2}} = \frac{2,25}{10 \cdot 380\sqrt{2}} = 4,187 \cdot 10^{-4}.$$

Як і для випадку струмовимірювального каналу для розрахунку ФНЧ каналу вимірювання напруги виберемо частоту зрізу $f_0 = 50$ кГц. Коефіцієнт передачі подільника напруги на цій частоті повинен складати

$$K_0 = \frac{K_{12i}}{\sqrt{2}} = \frac{4,187 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2}} = 2,961 \cdot 10^{-4}. \text{ Виберемо ємність конденсатора } C_1 = 10000 \text{ пФ,}$$

як максимальну з ряду термостабільних керамічних конденсаторів. Тип конденсатора К-10-17-3мкФ $\pm 5\%$ -250 В [91]. Коефіцієнт передачі за напругою

на частоті зрізу може бути записаний як: $K_0 \approx \frac{Z_c}{Z_c + R_1}$, звідки

$$R_1 = \frac{Z_c - K_0 Z_c}{K_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 10^3} \frac{2,961 \cdot 10^{-4}}{2,961 \cdot 10^{-4}} = 1,07 \text{ МОм. Водночас на основній робочій}$$

частоті визначальну роль гратиме резистивний подільник напруги з

коефіцієнтом передачі: $K_{R1R2} = \frac{R_2}{R_2 + R_1}$, звідки можна визначити R_2 :

$$R_2 = \frac{-R_1}{\left(1 - \frac{1}{K}\right)} = \frac{-1,07 \cdot 10^6}{\left(1 - \frac{1}{4,187 \cdot 10^{-4}}\right)} = 448,2 \text{ Ом. Амплітудне значення струму, що буде}$$

протікати по ньому: $I_{R1R2m} \approx \frac{U_1\sqrt{2}}{R_1 + R_2} = \frac{380\sqrt{2}}{1,0704 \cdot 10^6} = 0,502 \cdot 10^{-3} \text{ [A]} \approx 0,5 \text{ мА.}$

Вибираємо із стандартного ряду $R_2 = 448$ Ом та $R_1 = 1,1$ МОм.

Потужність, що розсіюється на резисторах:

$$P_{R2} = I_{R1R2}^2 \cdot R_1 = (0,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 448 = 112 \cdot 10^{-6} \text{ Вт,}$$

$$P_{R1} = I_{R1R2}^2 \cdot R_1 = (0,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,1 \cdot 10^6 = 0,275 \text{ Вт.}$$

Вибираємо тип резисторів [92]:

$$R_1: \text{C2-14-0.5Вт-1,1МОм} \pm 0,1\% \text{ C,}$$

$$R_2: \text{C2-14-0.125Вт-448Ом} \pm 0,1\% \text{ C.}$$

Реальний коефіцієнт резистивного подільника напруги, утвореного резисторами $R_1 R_2$:

$$K_{12i} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{121}{121 + 287 \cdot 10^3} = 4,214 \cdot 10^{-4}.$$

Чисельний розрахунок АЧХ та ФЧХ ланки (рис. 5.7) проведений в MicroCAP-7 для значень ємності C_1 50, 100, 150 % від номіналу, свідчить про її працездатність у повному діапазоні робочих температур (рис. 5.9):

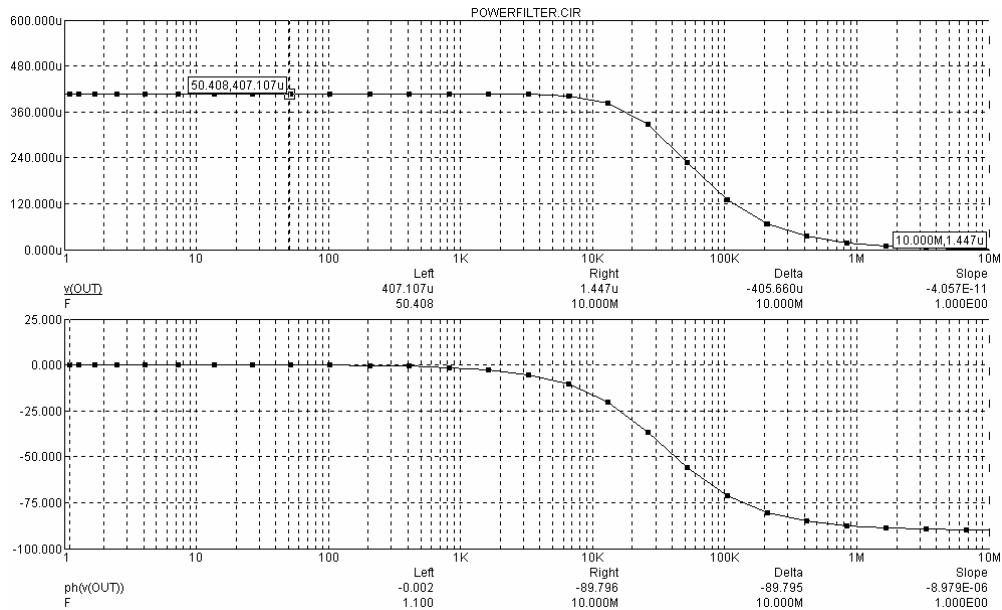


Рис. 5.9. АЧХ ($v(\text{Out})$) та ФЧХ ($\text{ph}(v(\text{Out}))$) вхідного кола вимірювання напруг

Значення коефіцієнта передачі за напругою вхідного струмового кола системи для мінімального та максимального значення робочої температури навколишнього середовища становитиме:

$$K_{UT} = \frac{Z_2}{Z_2 + R_1} = \frac{R_2 \frac{1}{2\pi f(C \pm \Delta C)} \left(R_2 \frac{1}{2\pi f(C \pm \Delta C)} \right)}{R_2 \frac{1}{2\pi f(C \pm \Delta C)} \left(R_2 \frac{1}{2\pi f(C \pm \Delta C)} \right) + R_1}. \quad (5.2)$$

Підставивши в формулу (5.2) значення температурної зміни ємності $\Delta C = \pm 0,5$ пФ, одержимо: $K_{iT_{\max}} = 4,065378 \cdot 10^{-4}$, $K_{iT_{\min}} = 4,06532 \cdot 10^{-4}$. Коефіцієнт передачі для номінального значення ємності одержимо при $\Delta C = 0$: $K_i = 4,06534 \cdot 10^{-4}$. Відносна температурна похибка пасивного струмового

вхідного кола, в такому разі складає: $\delta_{K_i} = \frac{K_i - K_{iT \max}}{K_i} \cdot 100\% = 0,0004\%$. Очевидно,

що впливом такої похибки можна знехтувати.

Разом із інструментальним підсилювачем схема вхідного кола каналу вимірювання напруги або струму набуде вигляду (рис.5.10):

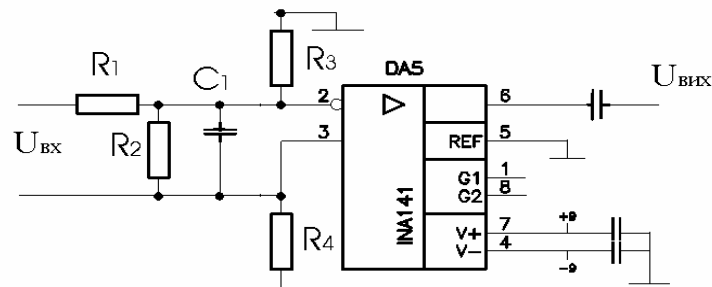


Рис. 5.10. Схема вхідних кіл вимірювача потужності

Резистори R_3 , R_4 з опором 1МОм служать для гальванічної прив'язки вихідної обмотки трансформатора струму до потенціалу “землі” і для каналу вимірювання напруги не використовуються.

Аналогічно проводиться розрахунок для інших типорозмірів електродвигунів та трансформаторів струму, які використовуються в ШГНУ.

Включення аналогово-цифрового перетворювача.

Включення АЦП здійснене за схемою, рекомендованою виробником, проте з метою зменшення шумових завад включення живлення здійснюється за допомогою стабілізатора опорної напруги REF02. Транслятор рівнів напруги вхідного сигналу необхідний для перенесення сигналу в межі позитивних значень шляхом додавання до вхідного сигналу фіксованого постійного зміщення (+2,5 В), яке формується від додаткового стабілізатора опорної напруги AD780. Рішення диктується міркуваннями зниження собівартості пристрою, оскільки вартість мікросхеми однополярного АЦП ADS7841 та стабілізатора опорної напруги AD780 менша, ніж вартість аналогічного двополярного АЦП (мікросхеми такого типу значного поширення не набули).

Для забезпечення максимальної кількості розрядів вихідного коду АЦП до процедури трасування друкованих провідників висувається вимога

особливої топології спільного провідника (шини “землі”). У такій концепції спільні провідники всіх аналогових елементів повинні окремо підводитись до виводу “GND” АЦП і з’єднуватись в одну точку в геометричній близькості до цього виводу. В протилежному випадку завади електромагнітного та електричного характеру, які утворюються внаслідок роботи різноманітних цифрових компонентів, присутніх на платі, будуть викликати флуктуації потенціалу “GND” АЦП, що призведе до надлишкових шумів вихідного цифрового коду. Як показують проведені дослідження, при неправильній топології друкованих провідників ефективна розрядність пристрою може зменшитись від 12 до 8,5 біт.

Формувач від’ємної напруги живлення.

Формувач від’ємної напруги живлення створює стабілізовану напругу – 9В, необхідну для роботи мікросхем інструментальних підсилювачів INA141, які працюють із вхідним двополярним сигналом. Попри те, що названі підсилювачі можуть працювати з низькими напругами живлення ($\pm 2,5$ В), при збільшенні цих напруг покращуються робочі характеристики мікросхем INA141[86]. Формувач виконаний на диференціюючій RC-ланці за схемою (див. рис. 5.11). На вхід транзисторного ключа VT1 надходять прямокутні імпульси амплітуди +5В від генератора тактових імпульсів ГТІ. Внаслідок того, що живлення ключа здійснюється від напруги +12 В, на виході ключа одержуються прямокутні імпульси амплітуди +12 В.

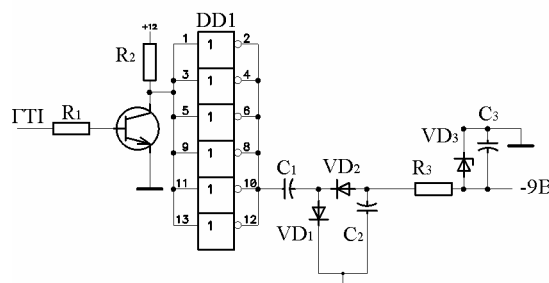


Рис. 5.11. Формувач напруги живлення

З колектора транзисторного ключа сигнал надходить до мікросхеми DD1 типу K561ЛН2 – шість КМОН-інверторів із підвищеною навантажувальною здатністю [93]. Живлення цієї мікросхеми здійснюється від напруги +12 В.

Використання цієї мікросхеми пов'язане з особливістю внутрішньої схемотехніки її вихідних ключів, де має місце парафазне каскодне включення польових транзисторів, що призводить до мінімальних втрат енергії на нагрівання, на відміну від TTL-подібних технологій [94, 95]. Оскільки один інвертор мікросхеми розрахований на навантаження 20 мА, для збільшення навантажувальної здатності використані всі шість елементів “HE”. Навантаженням мікросхеми є конденсатор C_1 , на якому відбувається диференціювання вихідного сигналу мікросхеми. Додатній імпульс при цьому усувається шляхом замикання конденсатора C_1 на “землю” через діод VD_1 , а від'ємний пропускається до згладжуючого конденсатора C_2 , на виході якого одержується напруга -12 В. Ланка R_3 VD_3 C_3 дозволяє одержати стабілізовану напругу -9 В. В якості стабілітрона VD_3 використаний Д814Б. Оскільки перетворювач живлення практично не впливає на похибку вимірювання, розрахунок параметрів його елементів тут не наводиться.

Генератор синхронізуючих тактових імпульсів. ГТІ виконує функції синхронізації роботи мікроконтролерів у схемі та забезпечує функціонування формувача від'ємної напруги живлення. Синхронізація роботи мікроконтролерів необхідна для забезпечення одночасності початку процесу оцифровування даних двома АЦП. Частотна стабільність генератора визначається використанням кварцового резонатора на рівні ($\delta \leq 1 \cdot 10^{-5}$). Резонансна частота кварцу $f_0 = 32768$ Гц. Такий вибір гарантує розповсюдженість цього резонатора (стандартна частота для всіх електронних годинників) та дозволяє уникнути використання великої кількості корпусів мікросхем двійкових лічильників для створення необхідного подільника частоти. Схемотехніка ГТІ особливостей не має [96]. Принципова схема ГТІ наведена на рис. 5.12. Вона дозволяє одержувати імпульси частоти 32768 Гц на виході “Pwclk” та 4096 Гц на виході “int0”. Використання виводу апаратного переривання дозволяє асинхронно реалізувати програмний алгоритм оцифровки даних для двох мікроконтролерів, полегшуючи його написання та дещо збільшуючи швидкість його роботи.

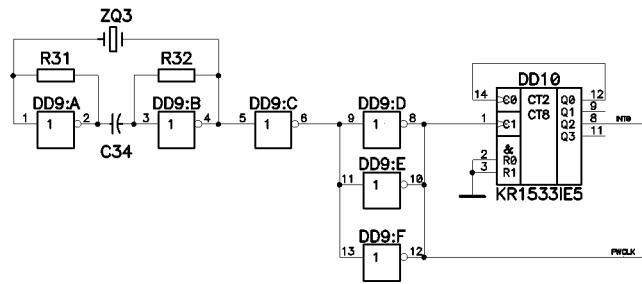


Рис. 5.12. Генератор тактових імпульсів вимірювального перетворювача

Вимірювач швидкості обертювих вузлів ШГНУ. Вимірювач швидкості ведучого та веденого шківів клинопасової передачі ВК доцільно виконати з використанням оптичного перетворювача кута А178-А5, який видає два зсунуті на 90° сигнали з кількістю імпульсів на оберт 1024 імп./об. для кожного. Для покращення роздільної здатності при визначенні швидкості доцільно збільшити кількість імпульсів на оберт. Це можна зробити за рахунок втрати можливості визначати напрямок руху вузлів, що обертаються. У даному випадку ціна такої втрати дорівнює нулю, оскільки напрям руху шківів клинопасової передачі відомий заздалегідь і ніколи не змінюється. У такому разі кількість імпульсів можна збільшити за рахунок використання логічної функції “Виключне АБО” (“XOR”) апаратно виконаної в вигляді мікросхеми К1553ЛП5. Подавши зсунуті по фазі імпульси на входи елемента “Виключне АБО” одержимо вихідну частоту вищу в два рази, що дорівнює кількості імпульсів на оберт 2048: (рис.5.13 симуляція схеми в “MicroCAP-7”).

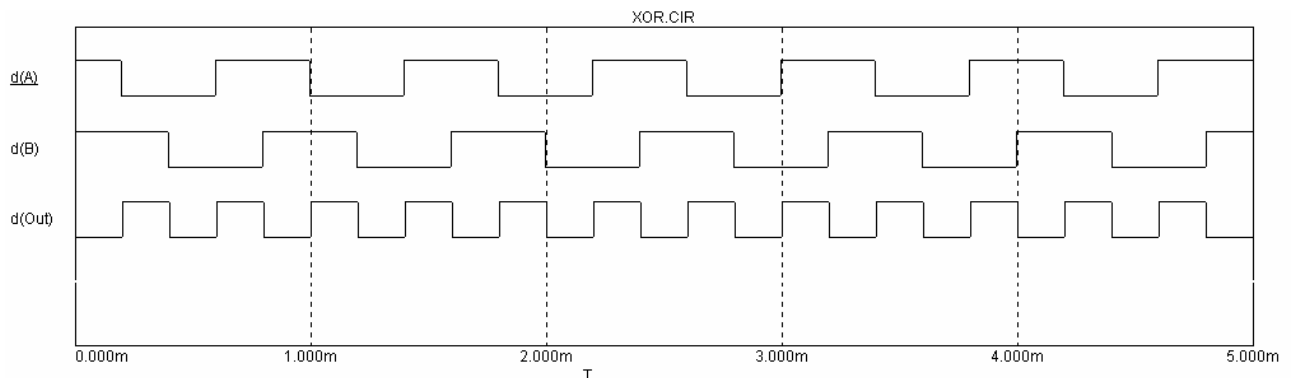


Рис. 5.13. Збільшення частоти вихідних імпульсів схемою “Виключне АБО”:

$d(A), d(B)$ – вхідні імпульси, $d(Out)$ – імпульси на виході схеми.

З урахуванням необхідності здійснення гальванічної розв'язки вхідних цифрових сигналів, схема підключення датчика A178-A5 із збільшенням частоти набуде вигляду: (див. рис.5.14)

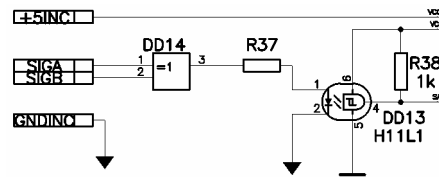


Рис. 5.14. Схема підключення датчика A178-A5

На представленому рисунку SigA, SigB – вихідні сигнали датчика A178-A5, SA – вихідний сигнал подвійної частоти, +5VINC – напруга живлення датчика A178-A5, гальванічно від'єднана від +VCC основної схеми.

Остаточно повна принципова схема перетворювача представлена на рис.5.15.

Трасування провідників виконано з використанням програмного комплексу PCAD-2001 та Cadence Spectra v.10. При проведенні трасування дотримана зіркоподібна топологія друкованих провідників шини “землі” для кожного з двох АЦП. Особливістю трасування є також жорстка необхідність просторового відділення частин схеми, які працюють під нульовим потенціалом шини землі, від частин, які працюють під потенціалом робочої фази С. До першої частини належать інтерфейсні вузли схеми та елементи, що працюють із датчиками обертів A178-A5. До другої частини належать більшість вузлів, включаючи мікроконтролерні обчислювачі. Передача інформації та гальванічна розв'язка вузлів схеми здійснюється за допомогою мікросхем оптико-гальванічної розв'язки H11L1, що просторово містяться на межі зон розташування різнопотенціальних компонентів і утворюють для цих частин схеми ізоляційний бар'єр. При цьому змішування напрямів трасування для провідників, що належать до різнопотенціальних груп, недопустимі з міркувань безпеки.

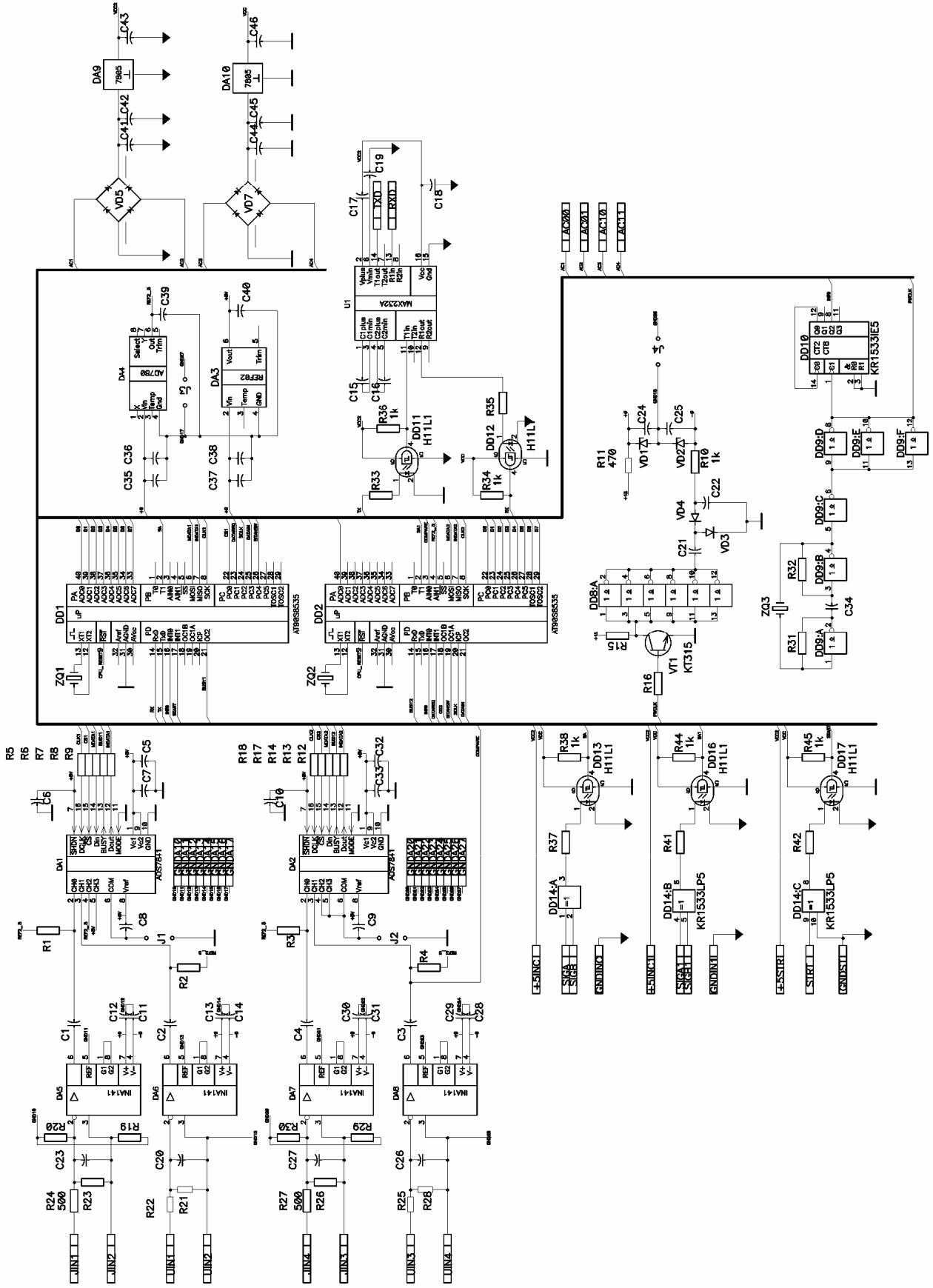


Рис. 5.15. Принципова схема вимірювача електричної потужності В-3

Для реалізації друкованої плати вибраний режим із максимальним залишком на робочій поверхні друкованої плати провідного покриття, під'єднаного до дозволеної для даної зони шини “землі”. Така технологія дозволяє зменшити витрату травного розчину при виготовленні друкованої плати субтрактивним методом, та покращити електричні сигнальні характеристики пристрою. Результати трасування друкованої плати вимірювального перетворювача потужності наведені в додатку Л. Зовнішній вигляд ватметрографічного вимірювального перетворювача В-3 наведений на рис.5.16.

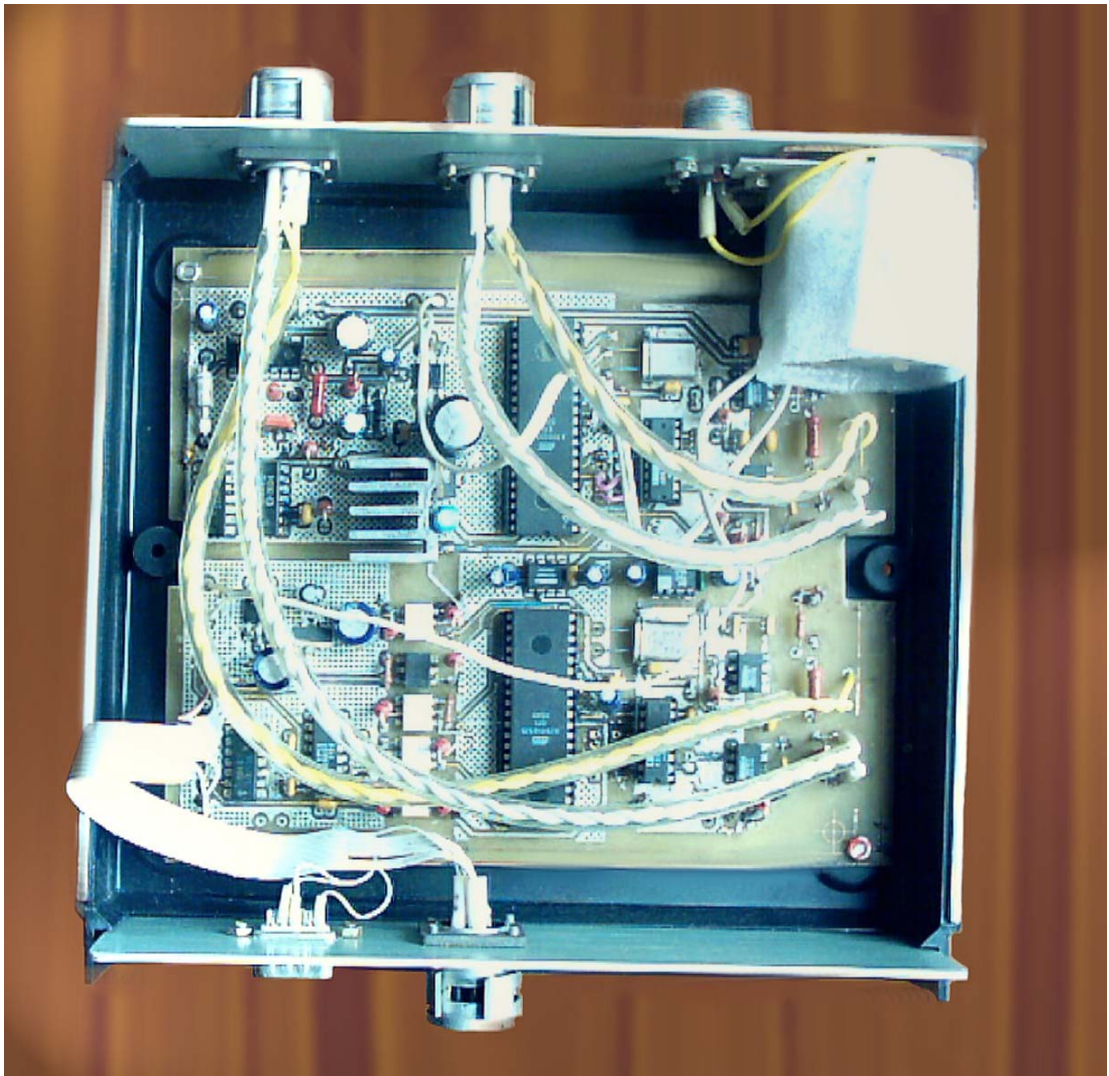


Рис. 5.16. Ватметрографічний перетворювач В-3. Вигляд зі знятою кришкою

5.3.4. Програмна реалізація вимірювача споживаної потужності привідного двигуна ВК.

Для реалізації вимірювача потужності вибрана мова Сі – як така, що забезпечує максимальну швидкість виконання програм серед мов високого рівня та дозволяє безпосередньо використовувати фрагменти асемблерного тексту при написанні програми [97]. Такий підхід при програмуванні дозволяє значно зменшити час на створення програмного забезпечення. У випадку необхідності критичні за швидкістю виконання фрагменти програми можна записати мовою асемблера. Недоліком такого підходу є деяке (в 1,5-2 рази) зростання об'єму відкомпільованого виконавчого коду програми – у порівнянні з програмою написаною мовою асемблера.

При написанні програми мовою Сі для досягнення максимальної швидкодії при обчисленнях використана цілочисельна арифметика, замість операцій із числами з плаваючою комою, які виконуються в 1,5-5 разів повільніше на 8-ми розрядних ЕОМ [98]. Подальші ж обчислення здійснюються в ЕОМ вищого рівня. В якості компілятора з мови Сі для мікроконтролера АТ89С8535 було використано “CodeVision С” – як такий, що забезпечує максимальну швидкодію виконання програм.

Програми для ведучого та веденого мікроконтролерів реалізовані окремо. Алгоритм роботи програми ведучого мікроконтролера базується на обробці визначених системних подій.

Підпрограма обробки переривань від універсального асинхронного приймача-передавача (УАПП, англ. UART) мікроконтролера в синтаксисі CodeVision С, описується як **interrupt [UART_RXC] void uart_rx_isr(void)**. Підпрограма здійснює прийом команди від ЕОМ вищого рівня та її аналіз.

Команда “0” являє собою запит перевірки каналу RS232C, у відповідь на який відбувається видача сигнатури "RS232Ok". У випадку прийому ненульового коду команди в підпрограмі обробки переривання здійснюється вимірювання нуля шкали U_{nul} , а також двох миттєвих значень напруги (останнє необхідно для коректної роботи алгоритму квадратичної інтерполяції). При

необхідності вимірювань потужності або частоти обертання відбувається очікування переривання від геркона, яке сигналізує про початок циклу качання ВК (тобто момент, коли головка балансира знаходиться в крайньому нижньому положенні). Значення U_{nul} , яке використовується при обрахунку миттєвих значень потужності, передається до веденого мікроконтролера. Після цього мікроконтролер переходить в режим вимірювань – дозволяються переривання **int0** від тактового генератора, що задає частоту дискретизації АЦП, та переривання від геркона **int1**.

Підпрограма обробки переривання **int0**, яке здійснюється від зовнішнього генератора тактових імпульсів із частотою 4096 Гц, описане як: **interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)**. Підпрограма здійснює зчитування даних з АЦП, їх корекцію згідно алгоритму квадратичної інтерполяції та обрахунок миттєвої потужності. Обмін даними з АЦП здійснюється за допомогою інтерфейсу SPI (з використанням стандартної бібліотечної функції `spi()` CodeVision C). У випадку досягнення кінця масиву (тобто завершення періоду частоти мережі 50Гц), в залежності від режиму роботи, виконуються наступні дії:

1) при наявності запиту на передачу миттєвих значень струмів і напруг – передача до ЕОМ двох масивів оцифрованих значень і перехід в енергозберігаючий режим;

2) при наявності запиту на передачу потужності:

- зчитування результату обчислень середньої потужності веденого контролера;
- розрахунок споживаної електричної потужності та передача отриманого значення до ЕОМ вищого рівня.

3) при наявності запиту на передачу частоти обертів ведучого вала – зчитування з наступним обнуленням регістрів таймера 1, який працює в режимі підрахунку зовнішніх імпульсів, що надходять від давача обертів A178-A5;

4) при наявності запиту на передачу частоти обертів веденого валу – зчитування її з веденого контролера та передача до ЕОМ.

Підпрограма обробки переривання **int1**, яке відбувається на початку циклу качання ВК, описана як: **interrupt [EXT_INT1] void ext_int1_isr(void)**. Сигнал одержується від електричного вимикача (геркона), закріпленого на механізмі ВК. Якщо закінчився час передачі даних (кількість періодів), вказаний у команді від ЕОМ вищого рівня, відбувається перехід в енергозберігаючий режим і заборона зовнішніх переривань **int0** та **int1**.

Ведений мікроконтролер, як і ведучий, в основному циклі програми перебуває в режимі зменшеного енергоспоживання. Переривання **int1** ініціалізується ведучим контролером з метою переключення між режимом вимірювання та режимом очікування або зчитування щойно обчисленого значення середньої споживаної потужності та частоти обертання веденого валу. Дані між контролерами передаються в паралельному форматі з використанням наступних керуючих сигналів:

DATAREQ – запит на передачу даних / переключення режимів (виставляється ведучим контролером);

VALTYPE – тип величини для передачі (задається ведучим контролером):
0 – потужність, 1 – частота обертання;

STOP – ініціалізація ведучим контролером переходу веденого контролера в режим очікування;

BITANSW – підтвердження веденим контролером отримання запиту від ведучого.

Визначення потужності та частоти обертання у веденому контролері відбувається аналогічно до ведучого.

Повний текст програми для ведучого мікроконтролера наведено в додатку В.

5.3.5. Реалізація програми високого рівня ІВС.

Програма високого рівня реалізована для ЕОМ типу ІВМ РС і призначена для проведення оперативного діагностування ШГНУ на основі вдосконаленого

ватметрографічного методу. Програма написана мовою Object Pascal в середовищі Borland Delphi 7 і дозволяє проводити наступні операції:

- запис та візуалізацію даних споживаної електричної потужності, одержаних від розробленого вимірювального перетворювача В-3;
- запис динамометричних даних одержаних від електронного динамографа ТД-1;
- визначення мас зрівноважуючих вантажів верстата-качалки;
- зрівноважування верстатів-качалок (здійснюється оператором шляхом візуального аналізу форми ватметрограми);
- розрахунку динамограм із записаних ватметрографічних залежностей;
- виявлення несправностей заглибного та наземного обладнання ШГНУ (в ручному режимі – шляхом аналізу форм ватметрограм та динамограм, а в автоматичному режимі – шляхом вибору максимального коефіцієнта кореляції між розрахованою динамограмою та еталонними динамограмами які відображають множину дефектів ШГНУ);

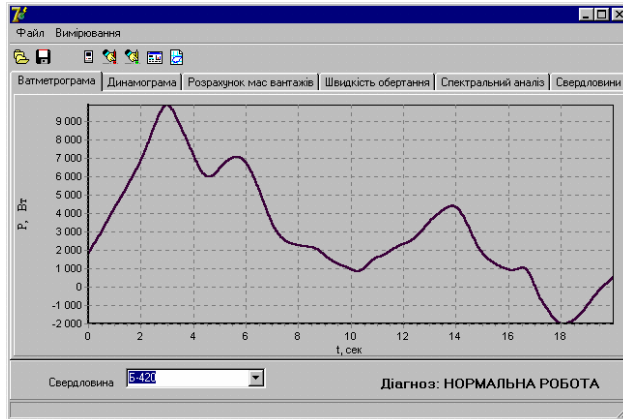
Програма дозволяє здійснювати експорт даних у текстовому ASCII форматі, придатному для аналізу за допомогою стандартного програмного забезпечення (MathCAD, MathLAB), тощо. Несправності підземного обладнання можуть бути виявлені за допомогою :

- візуального аналізу одержаних динамограм;
- порівнянням експериментальних ватметрограм із розрахованими еталонними ватметрограмами.

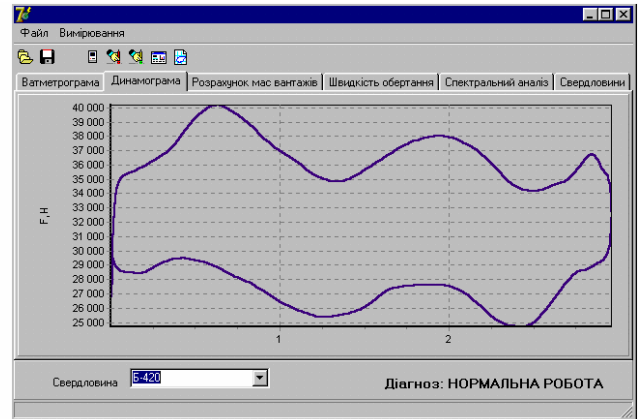
Несправності наземного обладнання можуть бути виявлені:

- аналізом ватметрограми на предмет збалансованості верстата-качалки;
- аналізом спектра ватметрограми на предмет наявності дефектів редуктора та підшипників електродвигуна;
- порівнянням форм розрахованої та експериментальної функції переміщення точки підвісу колони штанг на предмет підвищеного ковзання клинопасової передачі.

Програма написана з використанням модульного принципу програмування та розрахована на використання з переносними комп'ютерами типу NoteBook. Фрагменти програми високого рівня наведені в додатку В. Типові екранні форми програми високого рівня наведені на рис.5.17.



а)



б)

Назва свердловини	Діаметр насоса	Кількість качань	Глибина спуску насоса	НКТ60	НКТ73	НКТ89
Б-420	32	5		3		2000
Б-711	32	5		3		1688
Б-736	32	6		3	18	1931
N_1606	32	3,1		2,3	0	2008
metan1317	32	6		2,3	1300	
Viana_950	32	3,2		1		1274
bernard774	43	3,55		2,38	0	1329
test	32	15		1		100
Б-463	44	6,5		3	21	1982
Б-588	32	4		2,5	0	2070
Б-320	32	6,5		2	0	1895

в)

г)

Рис. 5.17. Програма високого рівня:

а – відображення ватметрограм;

б – відображення динамограм;

в – база даних (параметри ШГНУ свердловин);

г – розрахунок зрівноважуючих вантажів.

5.4. Оцінка точності вимірювань

Аналіз похибок засобів вимірювання споживаної електричної потужності слід здійснювати на основі технічних даних компонентів, які використовуються в пристрої, а також із урахуванням алгоритмів обчислення необхідних величин.

Похибка каналів вимірювання напруги і струму включає наступні складові:

1) похибка первинного перетворювача δ_{pn} – резистивного подільника для каналу напруги ($\delta_{pn} = 0,1$) та трансформатора струму для каналу струму ($\delta_{тр}=0,5$, однак за рахунок програмної лінеаризації похибка зменшується до $\delta_{тр}=0,16$);

2) похибка підсилювача: похибка коефіцієнту підсилення $\delta_{кп}=0,01\%$ та температурна похибка $\delta_{пт} = 0,01\%$;

3) похибка АЦП: адитивна $\pm 1,5$ біт та мультиплікативна ± 2 біт, що у відносних значеннях складає відповідно $\delta_{ацп1} = 0,05\%$ та $\delta_{ацп2} = 0,037\%$. Відмінність цих значень від вказаних у специфікації АЦП (таблиця Г.3 додатку Г) пояснюється тим, що приведені в таблиці значення відповідають опорній напрузі 2.5В, а в [87] вказано, що обидві похибки обернено пропорційно залежать від опорної напруги, яка для проектованого пристрою складає 5В.

Таким чином, похибка вимірювання у каналі напруги

$$\delta_U = \sqrt{\delta_{pn}^2 + \delta_{кп}^2 + \delta_{пт}^2 + \delta_{ацп1}^2 + \delta_{ацп2}^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,05^2 + 0,037^2} = 0,119\%,$$

а у каналі струму

$$\delta_I = \sqrt{\delta_{mp}^2 + \delta_{кп}^2 + \delta_{пт}^2 + \delta_{ацп1}^2 + \delta_{ацп2}^2} = \sqrt{0,16^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,05^2 + 0,037^2} = 0,178\%.$$

Похибка визначення миттєвої потужності

$$\delta_p = \sqrt{\delta_{I1}^2 + \delta_{U1}^2 + \delta_{I2}^2 + \delta_{U2}^2} = \sqrt{0,119^2 + 0,178^2 + 0,119^2 + 0,178^2} = 0,303\%.$$

Результат вимірювання – потужність, усереднена на одному періоді частоти мережі, – отримується шляхом інтегрування миттєвої потужності методом трапецій з уведенням корекції на похибку несинфазності дискретизації відліків струму і напруги $\delta_{нс}$, алгоритм якої описано в 5.2, внаслідок чого

максимальне значення δ_{nc} зменшується до 0,1%. Крім цієї похибки, сумарна похибка методу включатиме похибку вибраного методу інтегрування та похибку, зумовлену можливим відхиленням промислової частоти від 50Гц.

Для оцінки вказаних похибок припустимо, що струм і напруга мають синусоїдальну форму, тобто дійсне значення потужності в одній фазі за період частоти мережі становить

$$p_{\partial} = \frac{1}{T} \int_0^T i_m \sin(\omega t) \cdot u_m \sin(\omega t + \varphi) dt = p_m \cos \varphi,$$

де $T = \frac{1}{f}$, $\omega = 2\pi f$, f – частота мережі, φ – зсув фаз між струмом і напругою, $p_m = \frac{i_m \cdot u_m}{2}$.

Похибку інтегрування методом трапецій оцінимо за остаточною членом [99]:

$$R = \max_{[0,T]} |p''(t)| \frac{h^3}{12}.$$

Оскільки $p''(t) = p_m \cdot 4\omega^2 \cos(2\omega t + \varphi)$, то $R = p_m \frac{\omega^2 h^3}{3}$, то відносна похибка

$$\delta_{mm} = \frac{\omega^2 h^3}{3 \cos \varphi} \cdot 100\%.$$

При вибраній кількості точок $n = 82$ ця похибка в залежності від кута φ набуває значень в межах 0,00005%...0,003%, тобто є достатньо малою для того, щоб нею знехтувати.

В розділі 5.2 було розглянуто відносну похибку, зумовлену нестабільністю частоти. Слід зауважити, що оскільки вибрана кількість точок на період $n = \frac{f_d}{f}$ (де f_d – частота дискретизації) заокруглюється до найближчого цілого числа, точність періоду інтегрування буде забезпечуватись тільки для частоти $f_d / n = 49,95$ Гц. В іншому випадку інтегрування для визначення усередненої за період потужності здійснюється на проміжку $T_1 = nh = T + \Delta T$ (де

T – тривалість одного періоду частоти 49,95Гц).

Тоді обраховане значення усередненої за період потужності буде складати:

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} p(t) dt = \frac{1}{T_1} \left[\int_0^T p(t) dt + \int_T^{T+\Delta T} p(t) dt \right] = \\ &= \frac{T}{T+\Delta T} P_d + \frac{1}{T+\Delta T} \left(\Delta T \cdot P_d + \frac{P_m}{2\omega} [\sin(2\omega\Delta T + \varphi) - \sin \varphi] \right) = \\ &= p_d + \frac{P_m}{2\omega} [\sin(2\omega\Delta T + \varphi) - \sin \varphi] = p_d + \frac{P_m}{2\omega} [\sin 2\omega\Delta T \cos \varphi + (\cos 2\omega\Delta T - 1) \sin \varphi] = \\ &= p_d \left(1 + \frac{\sin 2\omega\Delta T}{2\omega} + (\cos 2\omega\Delta T - 1) \operatorname{tg} \varphi \right). \end{aligned}$$

Вважаючи, що при малих ΔT $\sin 2\omega\Delta T \approx 2\omega\Delta T$, $\cos 2\omega\Delta T \approx 1$, отримаємо $p = p_d + \Delta T \cdot p_d$, тобто шукана похибка пропорційна похибці періоду інтегрування. Відповідно, якщо відомий дійсний період частоти мережі – T , то дійсне значення середньої потужності пов'язане зі значенням обрахованого інтегралу – залежністю $p_d = \frac{P}{1+T-T_1}$, що можна використати для компенсації цієї похибки.

При частоті дискретизації $f_1 = 4096$ Гц і частоті мережі $f = 49...50$ Гц максимальна похибка періоду інтегрування не перевищує $0,02T$ і в усьому діапазоні ΔT похибка $\delta_{f1} = \frac{\sin 2\omega\Delta T}{2\omega}$ не перевищує $0,04\%$, що в порівнянні з похибкою каналу вимірювання є незначною величиною і її компенсація не обов'язкова. Друга складова $\delta_{f2} = \frac{\cos 2\omega\Delta T - 1}{2\omega} \cdot \operatorname{tg} \varphi$ залежить від зсуву фаз між струмом і напругою і прямує до нескінченості при $\varphi \rightarrow 90^\circ$. Однак, як показують проведені обчислення (див. додаток М), значення цієї похибки не перевищує $0,3\%$ у всьому діапазоні значень ΔT при $|\varphi - 90^\circ| < 1^\circ$.

Прийнявши для розрахунку значення $\delta_f = 0,3\%$, отримаємо похибку вимірювання потужності

$$\delta = \sqrt{\delta_p^2 + \delta_{nc}^2 + \delta_f^2} = \sqrt{0,303^2 + 0,1^2 + 0,3^2} = 0,438\%.$$

Розроблена система успішно пройшла випробування на свердловинах Бориславського та Надвірнянського НГВУ і рекомендована до впровадження у

виробництво, що засвідчено відповідними документами, наведеними в додатку Н.

5.5. Оцінка достовірності діагностування

Ватметрографічний метод діагностування передбачає два режими – візуальний та автоматизований. У першому випадку здійснюється розрахунок динамограми із вимірної ватметрограми на основі розробленої моделі з наступним діагностуванням оператором по формі динамограми. Автоматизоване діагностування ШГНУ ватметрографічним методом відбувається шляхом порівняння вимірної ватметрограми із еталонними ватметрограмами. Еталонні ватметрограми розраховуються із еталонних динамограм на основі динамічної моделі верстата-качалки та записуються в енергонезалежну пам'ять стаціонарно встановленого на свердловині ватметрографічного пристрою. Оскільки дослідження динамографічного методу діагностування проводяться досить давно, вигляд еталонних динамограм для різного роду дефектів відомий. Крім інформації, наведеної в літературі [1], при формуванні еталонів використовувались журнали динамограм НГВУ "Надвірнанафтогаз" та "Бориславнафтогаз". Визначення типу дефекту проводиться шляхом обчислення коефіцієнта кореляції між знятою ватметрограмою та еталонними ватметрограмами із вибором того типу дефекту, для якого коефіцієнт кореляції максимальний.

Оскільки перший із вказаних методів базується на суб'єктивній оцінці оператора, для визначення достовірності ватметрографічного методу діагностування було проведено розрахунки коефіцієнтів кореляції з 10 еталонними ватметрограмами для 20 ватметрограм, знятих на свердловинах НГВУ "Надвірнанафтогаз" та "Бориславнафтогаз" за допомогою розробленої системи. На основі аналізу експериментальних даних прийнято, що у випадку, якщо максимальний коефіцієнт кореляції в серії порівнянь $K_k \leq 0,5$, то результат експерименту – недостовірний. Приклад розрахунку для одного стану ШГНУ свердловини Б-588 (експериментальна динамограма наведена на

рис.5.18, відповідна до неї ватметрограма – на рис. 5.19) представлений на рис.5.20.

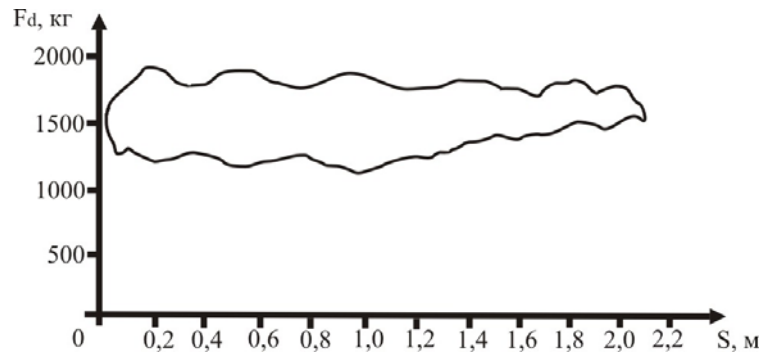


Рис. 5.18 . Експериментальна динамограма для свердловини Б-588

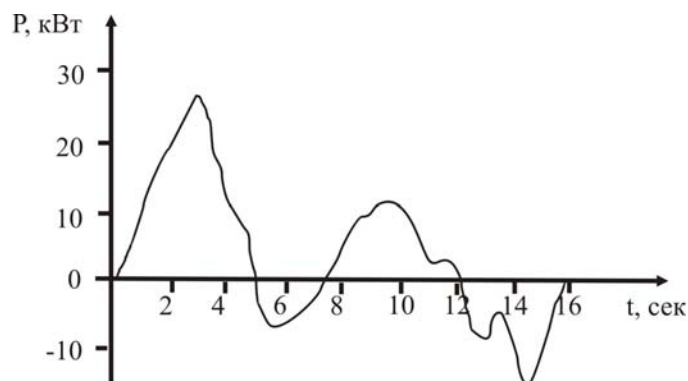


Рисунок 5.19. Експериментальна ватметрограма, що відповідає динамограмі, представлений на рис.5.18

В даному випадку було продіагностовано стан "Витік в приймальній частині". В результаті проведеної серії розрахунків було отримано 19 правильних діагнозів. Таким чином, достовірність діагностування можна вважати рівною $D_d=1-1/20=0,95$.

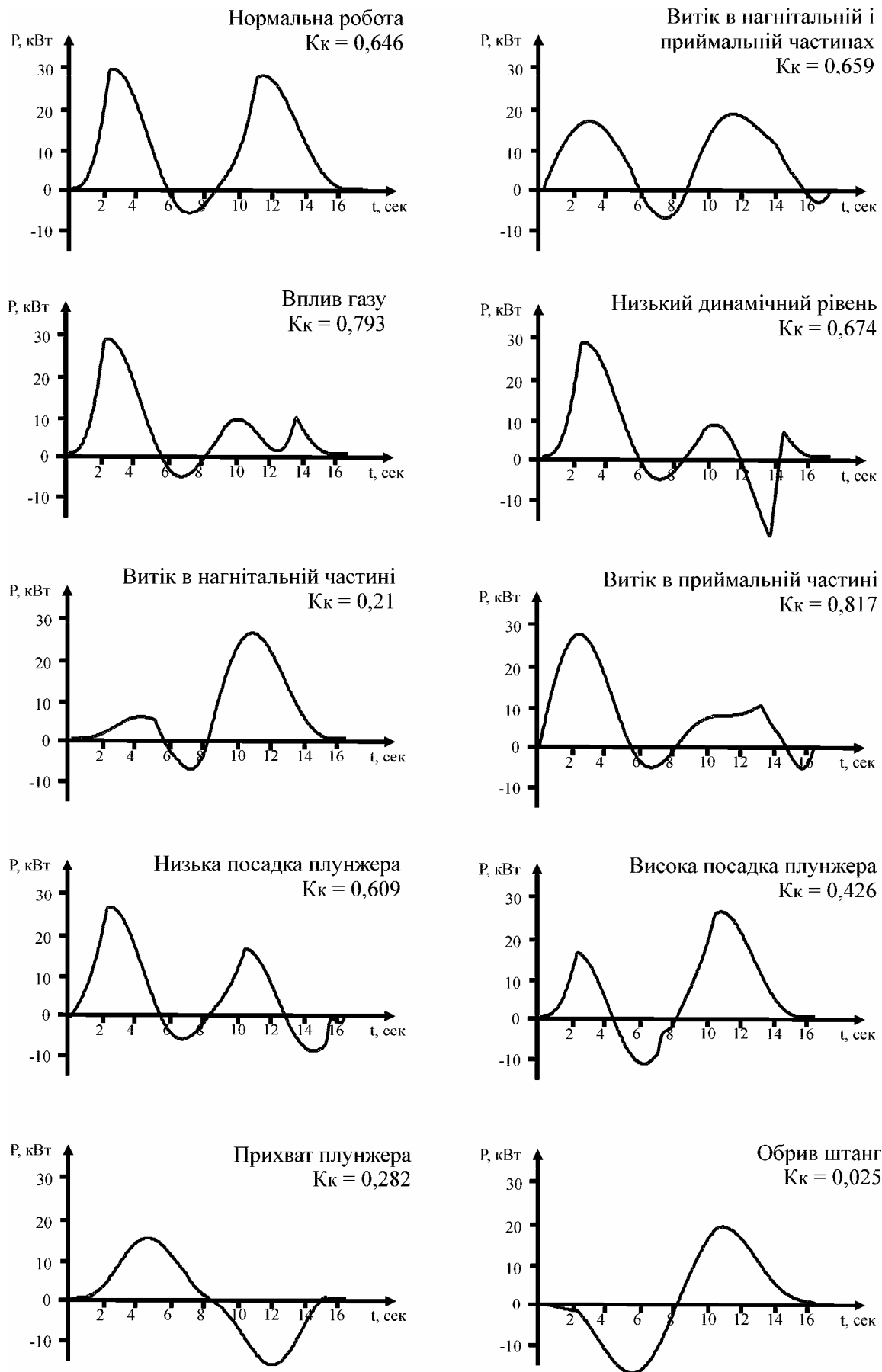


Рис. 5.20. Результати розрахунку коефіцієнта кореляції між експериментальною ватметрограмою та десяти типовими ватметрограмами дефектів ШГНУ

Висновки до розділу

1. Обґрунтована та визначена конфігурація мікропроцесорної системи діагностування ШГНУ.
2. Здійснено аналіз існуючих проблем при вимірюванні електричної потужності привідного двигуна ВК та розроблений алгоритм функціонування вимірювача потужності.
3. Розроблена принципова схема вимірювального перетворювача потужності. Використання оптико-гальванічної розв'язки дозволило при цьому зменшити кількість використаних вимірювальних трансформаторів із 4-х до 2-х.
4. Розроблені програми низького та високого рівня для роботи системи діагностування ШГНУ.
5. Визначена точність вимірювального перетворювача споживаної потужності привідного електродвигуна, яка складає $\approx 0,5\%$.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу вдосконалення ватметрографічного методу діагностування штангових глибинно-насосних установок (ШГНУ). Вирішення цієї проблеми має важливе народногосподарське значення у галузі нафтовидобування, яке підтверджується підвищенням ефективності використання ШГНУ та подовженням терміну їх експлуатації.

1. На основі проведеного аналізу відомих методів і засобів діагностування ШГНУ сформульовані задачі, які потребують вирішення. Виявлено, що використання існуючих методик не забезпечує достатньої вірогідності виділення інформації про стан підземного обладнання насосної установки на основі обробки ватметрографічних залежностей. Розглянуті відомі засоби діагностування ШГНУ, побудовані за методикою ватметрографування, і виявлені обмежені їх можливості щодо кількості дефектів, які розпізнаються. Встановлено відсутність новітніх вітчизняних розробок у цьому напрямку.
2. Розроблені математичні діагностичні моделі верстата-качалки, які дозволяють описати функцію передачі верстата-качалки без урахування та з урахуванням явищ інерції зрівноважувачих вантажів ВК.
3. Здійснена розробка та алгоритмічна реалізація методу визначення мас зрівноважувачих вантажів ВК, використання якого не вимагає застосування складних розрахункових методів та, на відміну від них, дозволяє враховувати масу інших вузлів ВК.
4. Розроблено метод діагностування ШГНУ за швидкісними характеристиками приводу верстата-качалки, використання якого дозволяє підвищити точність експериментального визначення корисного гальмівного моменту на роторі привідного електродвигуна ШГНУ і тим самим підвищити точність

відтворення динамограми. Проведено числове моделювання методу діагностування за швидкісними характеристиками, результати якого підтвердили його принципову придатність для діагностування ШГНУ.

5. Проведено аналіз особливостей використання цифрової реалізації методу двох ватметрів для вимірювання потужності споживання ШГНУ та вказані шляхи компенсації систематичних похибок неодночасності вимірювання, що виникають при цьому.
6. Створена мікропроцесорна система діагностування ШГНУ, в основу якої покладені розроблені методи та спеціалізований вимірювальний перетворювач споживаної потужності приводу ВК. Проведений метрологічний аналіз системи діагностування, який показав, що сумарна похибка визначення потужності складає 0,438%.
7. Розроблене діагностичне програмне забезпечення, призначене для автоматизації діагностування ШГНУ та для проведення процесу зрівноважування ВК, яке в складі мікропроцесорної системи діагностування пройшло промислову апробацію на нафтопромислах НГВУ "Бориславнафтогаз", результати якого підтвердили їх ефективність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 И.Г.Белов. Исследование работы глубинных насосов динамографом. - М.: Гостехиздат, 1960.- 126 с.
- 2 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.
- 3 Касьянов В.М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов/ТНТО: Машины и оборудование нефтегаз.пром. - /ВНИИОЭНГ, 1973. - С.95.
- 4 Чарный И.А. Динамический расчет штанг глубоких нефтяных насосов. //Изв. АН СССР, ОТН. - 1949. - т.6.
- 5 Вирновский А.С. Способ вычисления величин, характеризующих работу глубиннонасосной установки, по данным наземных измерений. Нефтяное хозяйство. -, 1952. – № 5. - С.30-36.
- 6 Алиев Т.М., Рыскин Л.М., Тер-Хачатуров А.А. Об одном методе определения состояния глубиннонасосного штангового насоса //Изв.вузов.Нефть и газ. - 1980.- №11.-С.81-85.
- 7 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.").
- 8 Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. Автоматический контроль и диагностика скважинных штанговых насосных установок. – М.: «Недра»,1988. – 232С
- 9 Пат.95106555 России, МКИ G 05 В 23/02. Способ диагностики штанговых насосных установок: Пат.95106555 России, МКИ G 05 В 23/02. / Гольдштейн Е.И., Серебрякова И.В. – Заявл. 24.04.95, Оpubл. 27.01.97;

10 Пат.2001106786 России, МКИ G 05 В 23/02. Способ диагностики штанговых насосных установок (его варианты): Пат.2001106786 России, МКИ G 05 В 23/02. / Гольдштейн Е.И.,Цапко И.В.,Даниленко Т.Г. Заявл 21.02..2001, Оpubл. 20.01.2003;

11 Пат.2190126 России, МКИ F 04 В 51/00. Способ диагностики штанговых насосных установок с известным состоянием уравниваемости: Пат.2190126 России, МКИ F 04 В 51/00. / Гольдштейн Е.И., Цапко И.В., Иванов Д.В., Заявл 21.02.2001, Оpubл. 27.09.2002;

12 Бандура В.В., Євчук О.В., Заміховський Л.М., Шумада В.М. Використання математичного апарату кореляційних функцій для оцінки технічного стану ГНШУ// Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу.– Івано-Франківськ, – 1999.– вип.36 (том 6).- С.184-194.

13 Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320с.

14 Смородов Е.А. Оперативный контроль сбалансированности станка-качалки на основе динамометрирования// Нефтяное хозяйство. – 2001. - №7. – с.57-58

15 Исаченко И.Н., Гольдштейн Е.И., Налимов Г.П. Методы контроля сбалансированности станка-качалки на основе измерения электрических параметров. “Нефтепромысловое оборудование”. 2002. №1

16 Климов М.М., Налимов Г.П., Лавров В.В. Мобильный диагностический комплекс “Сиаммастер - 3” – эффективный инструмент для исследования скважин” // Нефтяное хозяйство. – 2000. - №10. с.123-124

17 В.А.Ровінський. Діагностування підземного нафтового обладнання. - Матеріали міжнар. конф. “Сучасні методи і засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики”. – Ялта, 2001.

18 McCoy J.N., Podio A.L. Motor Power/Current Measurement for Improving Rod Pump Efficiencies. OK. 1997

19 McCoy, J. N., Collier, Forrest and A. L. Podio,: “Application Of Real-Time Measurement Of Motor Power to Determination Of Beam Pump Efficiency,” Southwestern Petroleum Short Course, Texas Tech University, Lubbock, Texas, April 1995.

20 Halderson, M. H.: “Determining Actual Power Output and Derating Factor of Electric Motors that Drive Oil Well Pumping Units,,: AIEE Transactions, January 1959, pp. 551-559.

21 Lea, J. F. and M.O. Durham: “Study of the Cyclical Performance of Beam Pump Motors,* SPE 18827 presented at the SPE Production Operations Symposium, Oklahoma City, OK, March 13-14, 1989.

22 Durham, M. O., Lockherd C. R. and J. F. Lea,: «Motor Design Slip Performance on Cyclic Loads» IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 5, September/October, 1990.

23 Neely, A. B., K. E. Opal and H. A. Tripp: “Power Savings and Load Reductions on Sucker Rod Pumping Wells,” SPE 19715 paper presented at the 64th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX October 8-11, 1989.

24 Gibbs, S. G.: “Utility of Motor-Speed Measurements in Pumping-Well Analysis and Control,” SPE Production Engineering (August 1997, pp. 199-208).

25 Byrd, J. P. and W. L. Beasley: “Predicting Prime Mover Requirements, Power Costs, and Electrical Demand for Beam Pumping Units,” Petroleum Society of CIM, paper No.374035 presented at 25th Annual Technical Meeting, Calgary, Alta. May 7-10, 1974.

26 Skinner, D. R.: “Efficient Use of Electric Power in Production Operations,” SPE 11559 paper presented at the 1993 Production Operations Symposium, Oklahoma City, OK, February 27-March 1.

27 McCoy, J. N., A. L. Podio, Kay Capps, J. West and J. Jennings: “Simplified Computer-Aided Analysis of Electrical Current in Motors Used for Beam Pumping Systems,” SPE 25447, Presented at the Production Operations Symposium, March 21-23, 1993, Oklahoma City, OK.

28 Ott, Russ et al.: “Reducing Electrical Consumption of Beam Pumping Units by Properly Counterbalancing Using PC Software, (Southwestern Petroleum Short Course, Texas Tech University, Lubbock Texas, April 1995.

29 Бульбас В.М., Денис Б.Д., Калужний Б.С. Діагностика свердловини з глибинним штанговим насосом. “Нафтова і газова промисловість”. 2001. №1

30 Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Маслов Г.С. Прикладная механика: Учеб. для вузов / Под ред. Г.Б. Иосилевича. – М.: Высш. шк., 1989. – 351с.

31 Гузенков П.Г. Детали машин. Учебник для немашиностроит. специальностей вузов. –М.: “Высшая школа”, 1968, 464с.

32 Мирский Г.Я. Электронные измерения: 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 440с.

33 Касаткин А.С., Электротехника. Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1973, - 560 с.

34 Быков М.А., Грацианский И.Н., Кифер И.И. и др. Курс электрических измерений. Часть II. / Под.ред. В.Т.Прыткова и А.В. Талицкого. – Л.: Госэнергоиздат, 1960, - 431с.

35 Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 583с.

36 Шило В.Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1979. – 368с.

37 Граф Р. Электронные схемы: 1300 примеров: пер. с англ. – М.: Мир, 1989, 688с.

38 Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд. – М.: Высш.шк. 1991. – 622с.

-
- 39 Energy Metering IC with On Chip Fault Detection ADE7751. //Analog devices // www.analog.com
- 40 Three Phase Energy Metering IC with Pulse Output ADE7752. //Analog devices // www.analog.com
- 41 Three Phase Multi Function Energy Metering IC with Serial Port ADE7754. //Analog devices // www.analog.com
- 42 MSP-430 DataBook. Application Examples. Electricity Meters. /Chapter 4. //Texas Instruments //www.ti.com
- 43 Исакович Р.Я. Технологические измерения и приборы. Изд.2-е. перераб. М.: Недра,1979 – 344с.
- 44 www.skbp.ru/products/TK-166_01.html
- 45 www.vibrocenter.ru/products/Tair-AK.html
- 46 J.F.Lea, H.W. Winkler. What's new in artificial lift //Word Oil. March 1998. Vol. 219 No 3
- 47 Жерве Г.К., Промышленные испытания электрических машин.-Л.: «Энергия». 1968. - 575с
- 48 www.vibrocenter.ru/products/Test-SK.html
- 49 www.oemz.omsk.ru/products.html
- 50 Куликовский Л.Ф., Кричке В.О. Ваттmetroграфический метод контроля работы глубиннонасосных установок. // Нефть и газ. – 1976. - №8. – с.81-85
- 51 Абдулаев Н.Т., Агагусейнов Н.Т., Антонов А.В. Ваттmetroграфический метод диагностирования штанговых нефтяных установок. // Известия вузов, нефть и газ, 1991. - №5
- 52 Ровінський В.А., Заміховський Л.М. Вдосконалена статична модель верстата-качалки. – Матеріали 4-ї наук.-тех. конф. “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. – Київ,2003. – с.290-293
- 53 Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн.заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л., «Энергия», 1974

54 Асинхронные двигатели общего назначения/ Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др.; Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488с.

55 Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Машины переменного тока. – М. «Энергия», 1965

56 Ровінський В.А., Заміховський Л.М. Способи одержання інформації при діагностиці зрівноваженості верстатів-качалок. Матеріали конференції “Сучасні прилади і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання” Івано-Франківськ 2002.

57 Євчук О.В., Ровінський В.А., Заміховський Л.М., Про методи експериментального визначення мас зрівноважуючих вантажів верстатів-качалок. Неруйнівний контроль та діагностика неоднорідних об’єктів: Збірник наукових праць. Львів. 2003.

58 Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». – М: Высш. шк., 1988 –448с.

59 Сборник задач по математике для втузов. Специальные курсы. – М.: Наука, 1984. – 608с.

60 Ровінський В.А., Заміховський Л.М. Мінімізація апаратної частини електронних вимірювальних систем./ Міжвід. наук.техн. збірка: Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електриф. паливно-енерг.компл.- Івано-Франківськ, 1999. вип.36 (т.6).

61 www.mathcad.com

62 Потемкин В.Г. Инструментальные средства MATLAB 5.X. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 332с.

63 Кардашев Г.В., Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование. – М., Горячая линия-Телеком, 2002. – 261с.

64 Assembler / В.Юров – СПб.: Питер, 2002. – 624с.

65 Ю.В. Новиков, О.А.Калашников, С.Э. Гуляев. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC. Под общей редакцией Ю.В. Новикова. Практик. пособие – М.: ЭКОМ., 2000 –224с.

66 Боборыкин А.В., Липовецкий Г.П., Литвинский Г.В. и др. Однокристалльные микроЭВМ. М.: МИКАП, 1994, -400с.

67 8-bit Microcontroller with 4K Bytes Programmable Flash. AT89C51. // www.atmel.com

68 www.mikon.ru

69 www.DeltaX.com

70 www.Lufkin.com

71 www.Djax.com

72 3V/5V, CMOS, 500 μ A Signal Conditioning ADC AD7714. // www.analog.com

73 Васьків О.В., Заміховський Л.М., Ровінський В.А., Шумада В.М. Тензометричний давач для діагностування штангових глибинно-насосних установок. ДМНТЗ, Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер.: техн. кіберн. та електриф. об'єктів паливно-енергет. комплексу. Вип. 37 (том 6). Івано-Франківськ, 2001.- с.201-209.

74 Васьків О.В., Заміховський Л.М., Ровінський В.А., Вдосконалення тензометричного давача автоматизованої системи діагностування штангових глибинно-насосних установок. Методи та прилади контролю якості. - №8 Івано-Франківськ 2002

75 Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я., Ровінський В.А., Удосконалена автоматизована випробувальна система з ЕОМ для дослідження корозійно-механічного руйнування. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Випуск 1.(12) 2002

76 Побережний Л.Я., Ровінський В.А., Вимірювальний комплекс з АЦП на основі мікросхеми AD7714. Збірник наукових праць II-ї Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів. Донецьк, 2002

77 Євчук О.В., Ровінський В.А., Заміховський Л.М. Спосіб побудови динамографічного давача для діагностування штангових глибинно-насосних установок // Матеріали 4-ї наук.-тех. конф. “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. – Київ, 2003. – с.287-289

78 Васьків О.В., Заміховський Л.М., Ровінський В.А., Шумада В.М. Локальна система діагностування штангових глибинно-насосних установок ДМНТЗ, Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер.: техн. кіберн. та електриф. об’єктів паливно-енергет. комплексу. Вип. 37 (том 8). Івано-Франківськ, 2000.

79 Заміховський Л.М., Зікратий С.В. Мікропроцесорна система діагностування електроустановок для видобутку нафти // В зб.: Методи і засоби технічної діагностики. – Івано-Франківськ, 1995

80 Ровінський В.А. Вимірювач потужності приводу верстатів-качалок./ Методи та прилади контролю якості. - №9. - Івано-Франківськ, 2002.

81 Ровінський В.А., Заміховський Л.М., Євчук О.В. Моделювання похибки цифрових ватметричних систем // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –2003, №1. - с.83-86

82 Б.П.Демидович., И.А.Марон., Э.З.Шувалова. Численные методы анализа./ Под ред. Б.П.Демидовича. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 367с.

83 Котов А.Н. Исследование показателей качества напряжения на нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях. // Средства измерений и автоматизации в нефтяной промышленности. – Уфа: Изд.Уфимс.нефт.ин-та, 1985. – 187 с.

84 Ровінський В.А., Особливості побудови вимірювачів потужності електричних двигунів для діагностики штангових глибинно-насосних установок. Міжвід. наук.техн. збірка: Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електриф. паливно-енерг.компл.- Івано-Франківськ, 2001. вип.37 (т.6).-С.209-215

85 AD780 $-2.5V/3.0V$ High Precision Reference. //Analog Devices//
www.analog.com

86 Burr-Brown Integrated Circuits Data Book // Linear Products: Tuson, AZ.:
Burr-Brown Corporation, 1996

87 Burr-Brown Integrated Circuits Data Book // Mixed Signal Products:
Tuson, AZ.: Burr-Brown Corporation, 1996

88 8-bit Microcontroller with 4K/8K Bytes In-System Programmable Flash.
AT90S4434, AT90LS4434, AT90S8535, AT90LS8535. // www.atmel.com

89 Evaluation Board Documentation AD7751/AD7755 Energy Metering IC//
www.analog.com

90 Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: в 2 т. – М.: Мир, 1984

91 Электрические конденсаторы и конденсаторные установки:
Справочник / В.П.Берзан, Б.Ю.Геликман, М.Н. Гураевский и др.; Под ред.
Г.С.Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656с.

92 Резисторы: Справочник/ В.В.Дубровский, Д.М.Иванов, Н.Я.
Пратусевич и др.; Под ред. И.И. Четверткова и В.М. Терехова. – 2-е изд.,
перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 528с.

93 Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: Справ.
радиолюбителя / Р.М. Терещук, К.М. Терещук, С.А.Седов. – 4-е издание – К.:
Наук.думка, 1989 – 800с.

94 Петровский И.И., Прибыльский А.В., Троян А.А., Чувелев В.С.
Логические ИС КР1533, КР1554. Справочник. В двух частях. – М.: Бинوم. 1993.
496с.

95 Шило В.Л. Популярныe цифровые микросхемы: Справочник. – М.:
радио и связь, 1987. – 352 с.

96 Цифрова техніка: Навч.посібник/ Б.Є. Рицар. – К.:УМК ВО, 1991. –
372с.

97 Техніка програмування мовою Сі: Навчальний посібник/
В.С. Проценко, П.Й. Чаленко, А.Б. Ставровський. К.: Либідь, 1993. – 224с.

98 Трой Д. Программирование на языке Си для персонального компьютера IBM PC: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1991. – 432с.

99 Н.С. Бахвалов. Численные методы. – М.: Наука, 1975. – 632с.