

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

На правах рукопису

НІКОЛЬСЬКИЙ Віталій Валентинович

УДК 681.2.082: 681.586.773: 532.133: 532.137

**ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПРИСТРОЇВ П'ЄЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ ДЛЯ
СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

05.13.05 - «Елементи та пристрої обчислювальної
техніки та систем керування»

Дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант
Тодорцев Юрій Костянтинович
доктор технічних наук,
професор

Одеса - 2005

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВАЖКИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ І ЇХНІХ СУМІШЕЙ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ.....	15
1.1. Аналіз паливних систем суднових двигунів внутрішнього згорання, як об'єктів керування	15
1.2. Аналіз технологічного процесу спалювання палива в дизельній установці	23
1.3. Надійність і термін служби деталей паливної апаратури	38
1.4. Аналіз схем контролю	42
1.5. Висновки і постановка задачі	51
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРУ В'ЯЗКОСТІ І КОНСТРУКЦІЙ РЕОМЕТРІВ ТА ВІСКОЗИМЕТРІВ	53
2.1. Методи виміру в'язкості	53
2.2. Аналіз існуючих віскозиметрів на співвісних циліндрах.....	57
2.3. Віскозиметри і реометри на ротаційному методі.....	60
2.4. Віскозиметри на крутильних коливаннях	70
2.5. Вібраційні віскозиметри.....	82
2.6. Висновки.....	88
РОЗДІЛ 3 ОСНОВИ ТЕОРІЇ РЕОМЕТРІВ ТА ВІСКОЗИМЕТРІВ НА СПІВВІСНИХ ЦИЛІНДРАХ	90
3.1. Процеси в п'єзорезонаторі.....	92
3.2. Процеси в триботехнічних вузлах.....	112
3.3. Математичний опис віскозиметра з приводом на маніпуляторі...../	115
3.4. Математичний опис віскозиметра - реометра з п'єзодвигунами.....	126

3.5. Методика проектування реометрів на співвісних циліндрах.....	140
3.6. Методика визначення коефіцієнта в'язкості.....	140
3.7. Висновки.....	142
РОЗДІЛ 4 ВІСКОЗИМЕТРИ І РЕОМЕТРИ ДЛЯ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ В'ЯЗКІСТЮ І ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ДВЗ НА ПРИСТРОЯХ П'ЄЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ	144
4.1. Вібраційні віскозиметри	144
4.2. Віскозиметри з приводом на маніпуляторах	154
4.3. Реометри з п'єзодвигунами.....	168
4.4. Ротаційний віскозиметр	176
4.5. Висновки.....	179
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРИСТРОЇВ П'ЄЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ	180
5.1. Дослідження лабораторного вібраційного віскозиметра на біморфному п'єзоелементі	180
5.2. Дослідження віскозиметра на циліндрі	183
5.3. Дослідження лабораторного вібраційного віскозиметра на біморфному п'єзоелементі з триботехнічним вузлом	184
5.4. Дослідження лабораторного вібраційного віскозиметра на біморфному п'єзоелементі з триботехнічним вузлом і генераторним датчиком переміщення.....	187
5.5. Дослідження лабораторного вібраційного віскозиметра на біморфному п'єзоелементі з триботехнічним вузлом і параметричним датчиком переміщення.....	188
5.6. Оптичний датчик переміщень.....	189
5.7. Дослідження реометрів з п'єзоелектричним двигуном і пасивним ротором	191
5.8. Висновки.....	208

РОЗДІЛ 6 ПРИСТРОЇ П'ЄЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ ДЛЯ СИСТЕМ	210
КЕРУВАННЯ	
6.1. Сенсорний перемикач каналів	210
6.2. П'єзоелектрична кнопка з оптичним виходом	214
6.3. П'єзооптичний акселерометр	216
6.4 Ультразвуковий п'єзотрансформаторний датчик вологості	222
6.5. Ультразвуковий біполярний п'єзоелектричний випромінювач	228
6.6. Датчик коливань тиску в трубопроводі високого тиску	229
6.7. Висновки.....	231
ВИСНОВКИ.....	233
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	236
ДОДАТКИ.....	252
Додаток А (Патент України №20031211819).....	253
Додаток Б (Патент України №2003109671).....	254
Додаток В (Патент України №2003054350).....	255
Додаток Д (Патент України №u200500629).....	256
Додаток Ж (Патент України №20031211820).....	257
Додаток З (Протокол порівняльних іспитів).....	258
Додаток К (Результати порівняльних вимірів).....	259
Додаток Л (Акт впровадження НПЦ “Енергетика”).....	260
Додаток М (Акт впровадження ОСРЗ “Україна”).....	261
Додаток Н (Акт впровадження в навчальний процес ОНМА).....	262
Додаток П (Почесний диплом).....	263
Додаток Р (Акт впровадження судноплавної компанії “УКРТАНКЕР”).....	264

ПРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БОК -	багатозв'язний об'єкт керування
БПЕ -	біморфний п'єзоелемент
БПСГ -	біполярний п'єзоелектричний сенсорний генератор
ВО -	виконуючий орган
ВОД -	високооборотний дизель
ГД -	головний двигун
ГТУ -	газова турбінна установка
ДВЗ -	двигун внутрішнього згоряння
ДУ -	дизельна установка
ІВС -	інформаційна вимірювальна система
ККД -	коефіцієнт корисної дії
ЛПД -	лінійний п'єзоелектричний двигун
МОД -	малооборотний дизель
НРКР -	нематична рідкокристалічна рідина
ПЕ -	п'єзоелемент
ПЕД -	п'єзоелектричний двигун з пасивним ротором
ПЕМ -	п'єзоелектричний маніпулятор
ПЕТ -	п'єзоелектричний трансформатор
ПНВТ -	паливний насос високого тиску
ПП -	п'єзопривід
ПР -	п'єзорезонатор
ПС -	паливна система
СЕУ -	суднова енергетична установка
СОД -	середньооборотний дизель
СТЗ -	суднові технічні засоби
УБПВ -	ультразвуковий біполярний п'єзоелектричний випромінювач
ЧЕ -	чутливий елемент

$F_{дин}$ -	динамічне зусилля в ПЕМ
ρ -	щільність
d_{33}, d_{31}, d_{15} -	п'єзоелектричні модулі
F_y -	зусилля пружної деформації
F_E -	зусилля в ПЕМ, викликане прикладеним електричним полем
F_C -	статичне зусилля
K_O -	коефіцієнт зворотного п'єзоефекту
$K_p, K_{33}, K_{31}, K_{15}$ -	коефіцієнти електромеханічного зв'язку
$K_{33}^T (\epsilon_{33}^T / \epsilon_0)$ -	відносна діелектрична проникність
$K_d (h_{33}, h_{31}, h_{15})$ -	коефіцієнт внутрішнього демпфірування ПЕМ
K_{Π} -	коефіцієнт прямого п'єзоефекту
$K_y (g_{33}, g_{31}, g_{15})$ -	коефіцієнт пружності ПЕМ
N_L, N_T, N_R -	частотні постійні
Q_m -	механічна добротність
S_{11}^E, S_{33}^E -	параметр еластичності
$T_c (T_k)$ -	температура точки Кюрі
$tg \delta$ -	тангенс кута діелектричних утрат при частоті 1 кГц у слабких полях
Y_{11}^E, Y_{33}^E -	модулі Юнга

ВСТУП

Тенденція безупинного росту світових цін на нафту і відповідно ціни на паливо для двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) вимагає рішення ряду задач по ефективному використанню паливних ресурсів. Більш 60 % транспортних перевезень у світі складають морські перевезення. Для зниження витрат на паливо судна оснащують малооборотними дизелями (МОД), що можуть працювати на суміші дешевих високов'язких асфальтутримуючих сортів вуглеводневих видів палива з дистильтними. Постачання споживачу мазуту здійснюється в стані “як є”, що приводить до невизначеності кожної операції по змішуванню палива і його підготовці.

Тому виникає необхідність постійного моніторингу реологічної характеристики палива, а саме, залежності коефіцієнта динамічної в'язкості, і яка визначає вимоги до режиму роботи ДВЗ, паливної системи (ПС) і системи керування нею.

Існуючі типи первинних перетворювачів, що входять до складу систем керування, не справляються зі зростаючим колом задач, зв'язаних з автоматизацією процесів ДВЗ при переході до безвахтового обслуговування. Потрібні нові типи первинних перетворювачів, робота яких могла б здійснюватися при впливах зовнішнього середовища, що збурюються і змінюються випадковим образом, (хвилювання моря, вітер, плин, температура заборотної води і т.п.) і навколишнього оточення (проходження вузькостей, маневрування при розбіжності судів, швартування і відхід від причалу та ін.); обмеженнях по зовнішніх умовах (температура і вологість навколишнього середовища, крен і диферент, ударні навантаження й ін.) і внутрішнім умовам (тиски і температури робочих процесів, рівні палива, олії і води у видаткових цистернах робітничих середовищ, частота обертання механізмів і т.д.) функціонування.

Одним з перспективних напрямків в області створення первинних перетворювачів для систем керування є датчики на основі елементів і пристроїв п'єзоактивної механіки, значний внесок у рішення теорії і практики яких зробили такі відомі вітчизняні і закордонні вчені, як Алексєєв А.Н., Бансевичус Р.Ю., Васильєв П.Е., Вишневський В.С., Грибовський П.О., Джагунов Р.Г., Євмененко В.В., Єрофєєв А.А.,

Іванов Є.А., Ісупов В.А., Лавриненко В.В., Курило Р.Е., Нікольський О.А., Петренко С.Ф., Плужніков В.М., Рагульськис К.М., Сабінін Ю.О., Сильченкова В.В., Смоленський Г.А., Трофимов А.И., Шарапов В.М., Барфут Дж., Берлінкур Д., Катц Г., Кеді У., Кауфман А., Мезон У., Окадзакі К., Холанд Р. і інші.

Таким чином, можна сформулювати **науково – технічну проблему**: розвиток теоретичних і практичних основ створення первинних перетворювачів, що мають високі якісні й експлуатаційні показники, на базі елементів і пристроїв п'єзоактивної механіки з метою підвищення ефективності використання важких моторних палив і їхніх сумішей у ДВЗ за рахунок оцінки реологічних властивостей цих тиксотропних рідин, яку не можна здійснити в рамках традиційної елементної бази.

Однак, розробка і впровадження первинних перетворювачів на основі елементів і пристроїв п'єзоактивної механіки обмежується цілим комплексом **протиріч** між:

- необхідністю постійного моніторингу реологічної характеристики палива прямими методами вимірів і фактичним разовим виміром цієї характеристики непрямыми методами;

- прийнятими в практиці електромеханічними й електромагнітними приводами віскозиметрів і реометрів з реальним вузьким діапазоном швидкості і великим кроком її зміни і вимогою розширення цього діапазону при зменшенні кроку зміни швидкості;

- робочим діапазоном температур п'єзокераміки і фактичним діапазоном температур підігрітого моторного палива;

- постійно розширюваним застосуванням комп'ютерно-інтегрованих систем керування і високим фоном перешкод у машинному відділенні, створюваним електричними датчиками і кабелями;

- нагальною потребою використання комбінацій клавiш у пультах керування і повною відсутністю цієї можливості в наявних сенсорних перемикачах поряд з їхньою низькою стійкістю до перешкод і надійністю;

- необхідністю постійного виміру тиску підігрітого палива і неможливістю введення датчика в трубопровід високого тиску.

На вирішення цих протиріч спрямовані зусилля багатьох українських і

закордонних колективів дослідників.

Приведені положення визначають **актуальність** робіт, зв'язаних із впровадженням у системи керування ДВЗ принципово нових конструкцій первинних перетворювачів на основі пристроїв п'єзоактивної механіки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилася відповідно до прикладних держбюджетних науково-дослідницьких робіт, які проводились під науковим керівництвом автора: «П'єзоелектричні перетворювачі в'язкості палива й олій» (держ. рег. №0103U006407); «П'єзооптичні перетворювачі фізичних величин» (держ. рег. №0104U002961).

Мета і задачі дослідження. Розробка теоретичних основ створення первинних перетворювачів, що забезпечують підвищення ефективності функціонування систем керування ДВЗ, на базі пристроїв п'єзоактивної механіки, що володіють високими якісними й експлуатаційними показниками на відміну від традиційних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні **задачі**, спрямовані на проведення теоретичних і прикладних досліджень, проблемно орієнтованих на:

- комплексний аналіз характеристик і станів палив та олій, призначених для використання в ДВЗ, у триботехнічних вузлах із зазором 1-25 мкм в умовах високих тисків і температур;
- формування вимог до технічних характеристик п'єзоелектричних пристроїв для систем керування паливними системами ДВЗ;
- розробку структур п'єзоелектричних пристроїв для систем керування ДВЗ;
- удосконалювання і розробку п'єзоелектричних вібраційних віскозиметрів для виміру коефіцієнтів в'язкості в анізотропних шарах тиксотропних рідин товщиною 1-25 мкм;
- розробку методу проектування віскозиметрів і реометрів, що базується на концепції використання п'єзоелектричного привода і співвісних циліндрів;
- створення конструкцій реометрів і віскозиметрів на співвісних циліндрах з п'єзоелектричним приводом;
- дослідження фізико-технічних характеристик нових п'єзоелектричних

пристроїв суднових систем контролю і керування.

Цей комплекс задач визначає структуру і послідовність викладу матеріалу в дисертаційній роботі.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються в паливних системах ДВЗ і первинних перетворювачах для системи керування ними.

Предмет дослідження – методи, моделі і пристрої п'єзоактивної механіки для систем керування ДВЗ.

Методи дослідження.

Для вирішення поставлених задач використовується метод кінцевих елементів; метод електромеханічних аналогій; методи теорії лінійної електропружності; теорія п'єзоелектричних перетворювачів; методи натурного і напівнатурного експерименту; теорія автоматичного керування; теорія фрикційного контакту; комп'ютерне моделювання за допомогою сучасного програмного забезпечення.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації розроблена методологія проектування первинних перетворювачів на пристроях п'єзоактивної механіки для систем керування ДВЗ, що дозволяє забезпечити високі якісні й експлуатаційні показники.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- уперше враховані особливості протікання процесів у триботехнічних вузлах ДВЗ при побудові вимірювальних зондів реометрів на відміну від існуючих, що дозволило сформулювати вимоги до технічних характеристик п'єзоелектричних реометрів;

- обґрунтовані і розроблені нові структури п'єзоелектричних реометрів на співвісних циліндрах, що складаються з вимірювального зонда і п'єзоелектричного привода, що дозволяє виключити негативний вплив редукторів, магнітних муфт і додаткових насадок, що використовуються в традиційних структурах;

- розроблено теоретичні основи створення п'єзоелектричних реометрів на співвісних циліндрах, що дозволяють врахувати одночасне протікання прямого і зворотного п'єзоефекту, фрикційного контакту;

- уперше створені математичні моделі віскозиметрів на співвісних циліндрах з

п'єзоприводом на маніпуляторах, які дозволили розробити основи їхнього проектування з використанням комп'ютерного моделювання;

- уперше створені математичні моделі реометрів на співвісних циліндрах з п'єзоприводом на лінійних двигунах і нереверсивних двигунах з пасивним ротором, які дозволили сформулювати основи їхнього проектування з використанням комп'ютерного моделювання;

- запропоновано новий підхід по визначенню коефіцієнтів динамічної в'язкості тиксотропної рідини, що забезпечує нескрутний перехід від механічної до реологічної характеристики;

- розроблено метод проектування реометрів на співвісних циліндрах з п'єзоприводом;

- удосконалено структури вібраційних віскозиметрів, які дозволяють проводити виміри коефіцієнтів динамічної в'язкості судових технічних рідин у зазорах 1-25 мкм;

- експериментальним шляхом досліджене поведіння п'єзоелектричних первинних перетворювачів і проведене узагальнення їх експериментальних характеристик при контролі стану рідкого палива й олії в діапазоні швидкостей зсуву $0-6000\text{ с}^{-1}$ і деформацій зрушення $0-2000\text{ Па}$, що підтвердило їхню високу ефективність при заміні менш ефективних електромагнітних і електромеханічних приводів у віскозиметрах і реометрах.

Практична цінність отриманих результатів визначається одержанням і створенням на основі теоретичних результатів роботи:

- методики визначення коефіцієнтів динамічної в'язкості тиксотропної рідини по механічній характеристиці п'єзопривода;

- віскозиметрів на співвісних циліндрах із приводом на маніпуляторах зі складальних стовпів шайб для виміру коефіцієнтів в'язкості тиксотропних рідин для інформаційно-вимірювальних систем;

- реометрів на співвісних циліндрах із приводом на лінійних п'єзодвигунах і нереверсивних п'єзодвигунах з пасивним ротором для визначення реологічних характеристик тиксотропних рідин;

- ротаційних віскозиметрів із приводом на нереверсивних п'єзодвигунах з пасивним ротором для виміру коефіцієнтів динамічної в'язкості палива й мастила, які використовуються при експлуатації ДВЗ, а також для інформаційно-вимірювальних систем;

- п'єзооптичного акселерометра для інформаційно-вимірювальних систем, що складається з п'єзоелектричного трансформатора з електричним зв'язком, виконаного на п'єзоелектричних циліндрах і трьох хвилеводах;

- сенсорного комутатора з розширеними функціональними можливостями, що відрізняється високою надійністю, стійкістю до впливу агресивних середовищ;

- п'єзооптичної кнопки, що дозволяє будувати матричні клавіатури, мало чуттєві до електромагнітних перешкод;

- ультразвукового датчика вологості для систем кондиціонування, характеристики якого залежать від тиску, температури і швидкості повітряного потоку;

- датчиків зміни тиску палива в паливному проводі високого тиску, що дозволяють проводити виміри, використовуючи неруйнівні методи контролю.

Порівняльні іспити віскозиметра на співвісних циліндрах у ЗАТ “Харчопромавтоматика” показали переваги в порівнянні з ротаційними віскозиметрами; віскозиметр на співвісних циліндрах був впроваджений у систему підготовки палива заводського парового котла ОСРЗ “Україна”; реометр на співвісних циліндрах впроваджений у теплотехнічній лабораторії НПП “Енергетика”.

Основні положення, висновки і рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використовуються в навчальному процесі Одеської національної морської академії при читанні дисциплін на кафедрі “Теорія автоматичного керування й обчислювальна техніка” для студентів по напрямку підготовки “Автоматизація й комп'ютерно-інтегровані технології”, а також можуть бути використані в системах керування масляною системою будь-якого двигуна внутрішнього згорання.

Реометр на співвісних циліндрах з п'єзоелектричним приводом був визнаний гідним почесного диплома на 10 – й Міжнародній виставці Одеса БОТ ШОУ 2005.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, висновки і рекомендації,

що приводяться в дисертації і виносяться на захист, отримані в період з 1997 по 2005 р. і узагальнені під час оформлення дисертації. Роботи [80, 81, 83, 85, 139, 140, 141, 143, 145, 147, 151, 152, 154, 157, 179] написані особисто автором. У роботах, опублікованих у співавторстві з колегами, здобувачу належать: [22] – конструкції датчиків пройденої відстані і конструкції п'єзоелементів; [23] – датчики переміщень, режими роботи; [25, 28, 136, 137, 138, 146, 153] – сформульована постановка завдання і проведене узагальнення отриманих результатів; [82, 84] – ідея використання п'єзоелектричного приводу при визначенні в'язкості тиксотропних рідин існуючими методами виміру і постановка задачі; [86, 123] – ідея, структурні схеми, моделювання процесів; [142, 159, 164, 183] – ідея і технологічні особливості; [155, 156, 180, 181] – технічна реалізація; [158, 163] – технологічні особливості; [161] – конструкційне виконання; [162, 166] – застосування п'єзотрансформаторів з електричним зв'язком і конструкцією п'єзоелементів, герметизація камери; [174, 175] – ідея, вибір режиму роботи і теоретичних основ по застосуванню в системах кондиціонування повітря.

Апробація результатів дисертації. Наукові результати й основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 10 науково - технічних конференціях: Всеукраїнській науково-технічній конференції “Вимірювання витрати та кількості газу” (Івано-Франківськ, 2005); X - науково-технічній конференції «Вимірювальна й обчислювальна техніка в технологічних процесах» (Хмельницький, 2003); 8-й Міжнародній конференції по керуванню «АВТОМАТИКА – 2001» (Одеса, 2001); 10-й Міжнародній конференції по керуванню «АВТОМАТИКА – 2003» (Севастополь, 2003); 11-й Міжнародній конференції по керуванню «АВТОМАТИКА – 2004» (Київ, 2004); Міжнародному науково-практичному симпозіумі “Проблеми суднобудування: стан, ідеї, рішення” (Миколаїв, 1997); Першій міжнародній конференції “Наука і освіта 98” (Дніпропетровськ, 1998); 54-56 науково – методичних конференціях проф. – виклад. складу та курсантів ОДМА (ОНМА) (Одеса, 2002 - 2004); і на наукових семінарах у Вінницькому державному технічному університеті (травень 2005 р.) і Національному аерокосмічному університеті ім. Н.Е. Жуковського “ХАІ” (червень 2005 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 43 основних наукових працях, у тому числі в 24 статтях у журналах і збірниках наукових праць, затверджених ВАК України, і 5 патентах України на винахід.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВАЖКИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ І ЇХНІХ СУМІШЕЙ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

1.1. Аналіз паливних систем суднових двигунів внутрішнього згоряння, як об'єктів керування

В даний час як суднові двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) використовуються мало оборотні (МОД) і середньо оборотні (СОД) дизеля, газотурбінні (ГТУ) і газопарові установки, що забезпечують високі швидкості спеціалізованим судам і характеризуються високим ступенем автоматизації, енергетичних установок і систем навігації.

Область застосування ГТУ на морському флоті в даний час обмежена судами, що забезпечують швидку доставку кошовних вантажів і пасажирів. Це пояснюється необхідністю використання для ГТУ в основному легких сортів палива, вартість якого значно перевершує вартість палива важких сортів. Скорочення нафтових запасів і зростання вартості палива змушує деяких іноземних судновласників експлуатувати суднові ГТУ на режимах зниженої потужності. Тому проблема палива є визначальною для подальшого застосування ГТУ на судах флоту [1, 2, 3].

Дизельні суднові енергетичні установки (СЕУ) відрізняються від інших енергетичних установок високою енергетичною ефективністю, завдяки якій вони дістали саме широке застосування на судах будь-якого типу. У перспективі при потужностях СЕУ аж до 30 - 35 тис. кВт найбільш поширені сучасні типи судів (контейнеровози, ролкери, ліхтеровози, танкери) обладнаються дизельними установками з МОД і СОД (для газовозів вони перспективні при потужності до 15 тис. кВт). Більшість суха важких і рибпромислових судів також обладнано дизельними установками.

Дизельні установки (ДУ) з МОД - самі поширені на флоті, усе ширше

застосовуються і ДУ із СОД. Подальше удосконалювання МОД і СОД може привести до зниження g_e до 190-200 г/(кВт·ч), і питомої маси двигуна m_i , кг/кВт, до 25-30 (МОД), 15-20 (СОД) з редуктором, підвищенню ресурсу до першого перебирання, тис. год, до 16 - 26 (МОД) і 10 - 14 (СОД) [4].

Переваги установок із СОД у порівнянні з МОД - істотно менші маса габаритні показники при рівних потужностях, що дозволяє широко використовувати їх на спеціалізованих судах з обмеженими габаритами машинно-казанового відділення (ролкери, пороми й ін.), а також на більшості судів з помірною потужністю ДВЗ. Наявність редуктора дозволило забезпечити більш високі пропульсивні якості судів (гвинт працює при оптимальній частоті обертання з великим ККД) і можливість добору потужності від редуктора для більш економічного приводу електрогенератора, насосів і т.п. Однак СОД працюють на паливі й олії більш високої якості, чим МОД і більш трудомісткі в обслуговуванні.

Широке поширення дизельних установок на судах пояснюється їхніми наступними достоїнствами.

1. На сьогодні ДУ є енергетично самим економічним двигуном ($\eta_e=0,40 - 0,45$), особливо при розвинутій утилізації теплових утрат.

2. На відміну від турбінних установок висока економічність ДУ не залежить від агрегатної потужності ГД.

3. Широкий діапазон типорозмірів дизелів з циліндровою потужністю від 5 до 4000 кВт дозволяє створювати ДУ практично для будь-яких судів.

4. Двигуни ДУ можуть працювати на різних сортах палива: легкому, важкому (зі змістом 3 % і більш сірки) і газоподібному.

5. Наявність великого числа типорозмірів дизелів і відносна простота устрою ДУ дозволяє легко автоматизувати, агрегатувати і уніфікувати енергетичне устаткування.

6. Застосування МОД дозволяє максимально спростити установку, використовуючи пряму передачу енергії на гвинт, а застосування дизель - редукторної установки - досягти найбільшого ККД гвинта за рахунок наближення його частоти обертання до оптимального.

7. Мінімальні витрати часу на підготовку дизелів до пуску, що забезпечує постійну готовність до дії, а також можливість швидкого доведення навантаження до номінального.

Подальшої ж перспективи застосування на судах дизельних установок зв'язані з поліпшенням економічних показників установок за рахунок зниження питомих витрат палива й олії, застосування дешевих палив, пристосування до спалювання нових найменш дефіцитних і недорогих сортів палива, застосування комплексної глибокої утилізації теплових утрат (із введенням високотемпературного охолодження дизелів) і забезпечення високої експлуатаційної надійності СЕУ шляхом широкого впровадження автоматизації, передових методів технічного обслуговування зі збільшенням міжремонтних періодів, підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Однієї з підсистем, що забезпечує роботу дизельних ДВЗ є паливна система, що забезпечує подачу палива в робочі циліндри і його спалювання. Вона складається з 2-х підсистем: низького і високого тиску (рис. 1.1).

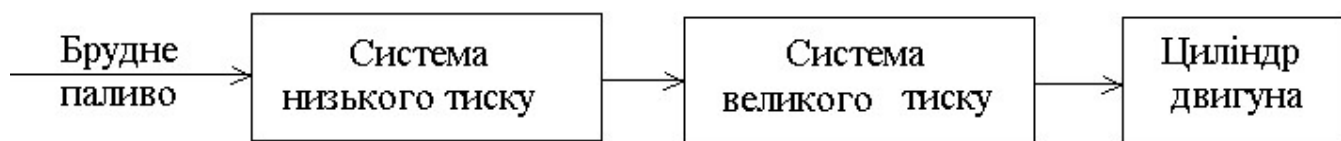


Рис. 1.1. Структура паливної системи

Підсистема низького тиску призначена для підготовки і подачі палива до системи високого тиску і містить у собі цистерни (1), фільтри (2), насоси (3), сепаратори (4), підігрівники (5) і паливопроводи (рис. 1.2). На всьому шляху проходження палива до системи високого тиску необхідно здійснювати контроль тиску, температури, в'язкості, витрати і безперервності потоку.

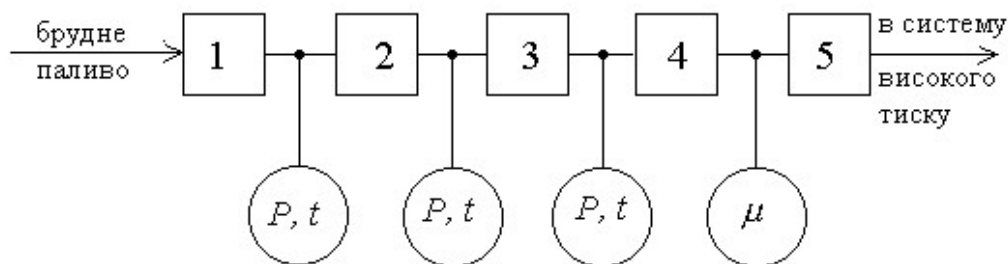


Рис. 1.2. Типова структурна схема системи низького тиску

Підсистема високого тиску здійснює сприскування палива в камеру згоряння двигуна і містить у собі паливний насос високого тиску (ПНВТ) (1) і форсунку (2) (рис. 1.3), звичайно з'єднані паливопроводом високого тиску.

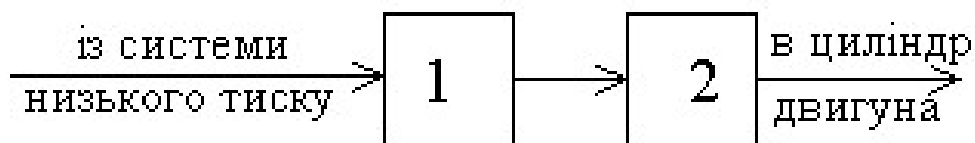


Рис. 1.3. Типова структурна схема системи високого тиску

По сталій практиці в паливопроводі високого тиску не включають датчики. Однак по цьому факту не можна судити про те, що датчики не потрібні. Крім вивчення процесів, що протікають, необхідно ще і контролювати їх.

Відомі кілька типів паливних систем, що з'явилися в процесі створення різних конструктивних рішень дизелів. Особливості паливних систем обумовлюють рівень автоматизації і контрольовані параметри ДВЗ і, відповідно, використовувані типи датчиків для контролю цих параметрів. З метою виявлення особливостей ПС, їхнього впливу на економічність і надійність експлуатації ДВЗ, проведемо класифікаційний аналіз паливних систем і визначимо вплив процесу використання палива на надійність вузлів паливної апаратури.

Класифікаційна схема основних типів паливних систем сучасних дизелів різного призначення представлена на рис. 1.4 [5, 6]. Усі системи поділяються на дві групи: системи безпосередньої дії й акумуляторні. Принципова відмінність систем безпосередньої дії від акумуляторних полягає в тому, що в перших подача палива здійснюється через форсунку під час нагнітального ходу плунжера ПНВТ, а в других - упорскування палива в циліндр здійснюється за рахунок енергії, акумульованої до початку упорскування.

У сучасних дизельних ДВЗ звичайно застосовують системи безпосередньої дії. По конструктивному виконанню вони можуть бути нерозділеного (насоса-форсунки) і розділеного типів. В останніх, паливний насос і форсунка з'єднані паливопроводом високого тиску. У дизелях звичайно застосовують системи розділеного типу, тому що використання насосів-форсунок постійно зменшується

через труднощів розміщення їхній у кришках циліндрів, складності приводу, що мішає демонтажу кришок циліндрів, навіть незважаючи на їхню велику компактність, менші масу і габаритні розміри, відсутність упорскування палива.

У МОД і СОД з великою циліндровою потужністю звичайно на кожному циліндрі встановлюють автономний ПНВТ.

Паливні насоси високого тиску поділяють на золотникові і клапанні. У перших, регулювання подачі палива здійснюється плунжером - золотником, а в других - спеціальними клапанами з механічним приводом від штовхальника плунжера. У клапанних насосах більш проста плунжерна пара, але вони складні по конструкції, мають багато деталей, що рухаються, і дуже чутливі до зносу посадкових пасків у сидлах усмоктувального і відсічного клапанів, штовхальників і важелів, що викликає порушення чіткості упорскування і зростання нерівномірності подачі палива по циліндрах дизеля. Золотникові насоси простіше по конструкції, у регулюванні й експлуатації, чим і пояснюється їхнє широке поширення. Серйозним недоліком золотникових насосів є більш швидкий знос плунжера в золотниковій частині. Паливні насоси високого тиску дизеля мають механічний, газовий, гідравлічний чи пневматичний привод. Найбільше поширення дістав механічний привід, тому що інші виявилися складними в експлуатації. Останнім часом ведуться роботи зі створення п'єзоелектричного привода для автомобільних ДВЗ, що, напевно, буде конкурентом механічному і знайде застосування в судових ДВЗ.

У ВОД іноді використовують і розподільні паливні насоси, у яких секція високого тиску подає паливо до кількох форсунок [7].

Форсунки в паливних системах безпосередньої дії в більшості випадків закритого типу з пружинним запиранням голки. У ВОД з розділеними камерами згоряння дуже часто встановлюють форсунки зі штифтовим розпилювачем. Гідрозапірні форсунки (з гідравлічним запиранням голки) на сучасних дизелях не застосовують, тому що паливна система високого тиску з ними більш громіздка, дорога і менш надійна в експлуатації.

Слід зазначити, що в роботі [6] приводиться трохи інша класифікація ПС, що відрізняється від попередньої чітким поділом привода ПНВТ на жорсткий і гнучкий

привод. Крім того, змінений і порядок у класифікаційних ознаках акумуляторних ПС.

З приведених класифікацій ПС дизельних ДВЗ, використовуваних у даний час [6], нами пропонується виділити структуру дерева елементів ПС, найбільше масово застосовуваної в дизельних ДВЗ (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Структура дерева елементів ПС

Головні особливості паливної системи високого тиску дизеля полягають у проведенні конструктивних заходів, спрямованих, насамперед, на підвищення надійності деталей паливної апаратури. Зокрема, приділяється серйозна увага зниженню температури розпилювачів форсунок. Охолодні канали виконуються з великими перетинами і проходять ближче до носика соплового наконечника

розпилювача, забезпечуючи тим самим більш інтенсивне охолодження, а, отже, і менше утворення нагару на зовнішній поверхні розпилювача й утворення лаку на голці і її направляючій. З метою інтенсифікації відводу тепла від розпилювача для його охолодження часто використовують воду. Щоб зменшити частоту заклинювання плунжерних пар ПНВТ і голок розпилювачів, їх виконують з великими діаметральними зазорами. Але в цьому випадку виникає більш серйозна проблема відводу витоків палива через плунжерну пару, тому що не можна допускати улучення великої кількості палива в циркуляційну олію двигуна.

Проаналізуємо відмінні риси принципових схем паливних систем, використовуваних на сучасних судах, що працюють або на дизельному паливі [5] або на дизельному і важкому (рис. 1.5) [8]. При роботі на дизельному і важкому паливі воно зберігається в танках запасу (1), з яких воно через клапанну коробку (2) і фільтр грубої очистки (3) засмоктується одним з паливо перекачувальних насосів (4) (другий насос резервний) і нагнітається в інший танк, чи у відстійні цистерни (5). З відстійної цистерни (після випуску з її води і шламу) чи безпосередньо з танків запасу насосами сепараторів паливо подається в підігрівники (5) і далі в сепаратори (7), де відбувається очищення палива. Дизельне паливо не вимагає підігріву, тому сепаратор (6) дизельного палива підігрівником не обладнається. Сепароване важке паливо другим насосом сепараторів (7) подається в здвоєну видаткову цистерну (10), а дизельне паливо насосом сепаратора (6) - в аналогічну цистерну (11). Цистерни виконуються здвоєними, причому в одній з них здійснюється вторинний відстій палива, а з іншої паливо надходить до дизеля.

Для інтенсифікації осадження різних домішок паливо в цистернах (5) і (10) підігрівають. Відповідно до вимог Регістра температура підігріву повинна бути принаймні на 10 °C нижче температури спалаху парів палива.

З видаткової цистерни (10) після відстою паливо самопливом через змішувальну - газовідвідну цистерну (13) і фільтр грубої очистки (14) надходить до одного з насосів (15), що підкачують паливо, (другий насос резервний), які нагнітають паливо через підігрівники (16) і фільтри тонкої очистки (17) до ПНВТ (22). Підтримка в'язкості палива в заданих межах здійснює автоматичний регулятор

в'язкості (18), виконавчий механізм якого керує подачею пару в підігрівники (16). Надлишкова кількість палива з ПНВТ по паливопроводу (23) перепускається в цистерну (13), що забезпечує відвід з усмоктувальної порожнини ПНВТ пухирців повітря і парів палива, які по трубопроводу (5) видаляються в атмосферу. У пропускну паливопроводі (23) за допомогою підпірного клапана (20) чи дросельної шайби тиск палива підтримується рівним $0,2 \div 0,4$ мПа. Якщо шайба засмітиться, то спрацює запобіжний клапан (21) і циркуляція палива відновиться.

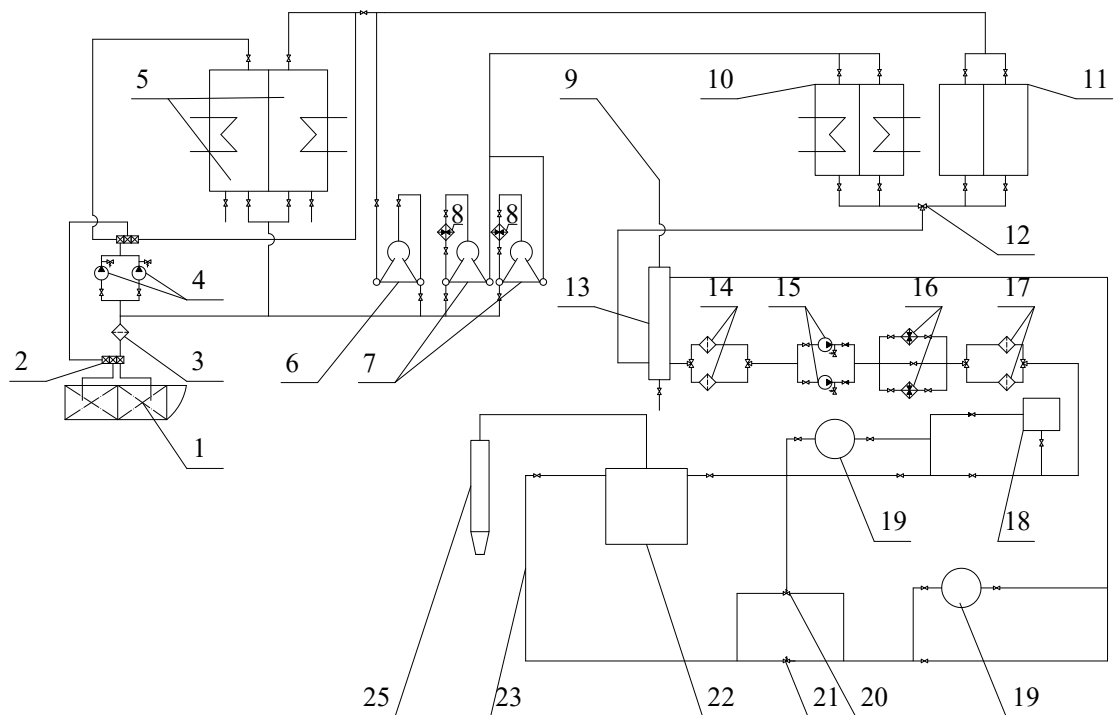


Рис. 1.5. Схема паливної системи на важкому паливі

Насос (22) нагнітає паливо по паливопроводу високого тиску (24) до форсунки (25), що впорскує його в циліндр дизеля.

Паралельно з видатковою цистерною важкого палива в систему включена і здвоєна цистерна дизельного палива (11), на якому дизель працює в період пусків, маневрів, перед зупинкою і нерідко на малих навантаженнях. Паливо з цієї цистерни при відповідному положенні триходового крана (12) також надходить у цистерну (13) і далі до двигуна, при цьому передбачений обхід підігрівників палива і регулятора в'язкості. Витрату палива на двигун визначають по різниці показань

витратомірів (19), що включають на час виміру. З цієї схеми видно, що для контролю параметрів використовуються датчики тиску, віскозиметр, датчик температури, сигнальні пристрої, що включають у свій склад датчики переміщення.

Оскільки важке паливо має високі в'язкості температур застигання, тому танки запасу і цистерни обладнають паровим підігрівом, а паливо проводи покривають ізоляцією чи постачають паровими супутниками.

Крім того, важкі сорти палива мають значно більше механічних домішок, води і шламу, ніж дизельне. Тому особлива увага приділяється очищенню палива, перш ніж воно подається у видаткову цистерну.

Основними способами підготовки палива на морських судах є сепарація і фільтрація [8, 9]. У порівнянні з традиційним методом очищення палив на судах комплексне очищення забезпечує економію використовуваних у судновій дизельній установці палив (до 3% і більш).

У багатьох ВОД і СОД [5, 10] малої потужності, що працюють на дизельному паливі, паливна система помітно спрощується, тому що відпадає необхідність у підігріві палива і регулюванні його в'язкості. Паливо очищається лише у фільтрах, причому на двигун навішують і фільтр тонкої очистки, і насос, що підкачує паливо. Якщо цей насос виходить з ладу, то паливо до ПНВТ із видаткової цистерни надходить самотіком, минаючи насос. Тому найбільш автоматизованими є ПС МОД.

Таким чином, проведений аналіз показав, що найбільш поширеними є МОД, паливна система яких працює на легкому і важкому паливах одночасно, що дозволяє зменшити витрати судноплавних компаній на паливну складову. Другою, не менш важливою складовою ефективності ПС є процес спалювання палива.

1.2. Аналіз технологічного процесу спалювання палива в дизельній установці

У суднових дизелях використовуються різні сорти палива (від дизельного палива до мазуту), причому порівняно широке застосування знаходять моторні

палива, що становлять суміш мазуту з газовими фракціями. Так у СРСР застосовувалися три сорти моторного палива марок ДТ-1, ДТ-2 і ДТ-3, в'язкість яких при 50 °С відповідно не вище 36; 55,3 і 66,6 сст.

Економічність процесу спалювання палива в двигунах внутрішнього згорання, що працюють на важких паливах, залежить від якісного розпилювання палива у форсунках. Це обумовлюється правильно обраною в'язкістю палива, що спалюється, для кожного сорту якого існує певна залежність між його в'язкістю і температурою, що не є строго однозначною. Вона може істотно змінюватися після декількох циклів нагрівання й охолодження, а також у процесі збереження палива в танках через поділ його по фракціях.

Від в'язкості і якості дизельних палив залежить надійна і безперебійна його подача в камеру згорання відповідно до заданих характеристик процесу. Паливо повинне мати оптимальні займистість і випаровуваність, необхідні для здійснення надійного запуску й усталеної роботи на часткових навантаженнях при високій швидкості горіння, мати низку корозійну стійкість і невисоку схильність до відкладень у системах паливо підготовки і паливо подачі до циліндрів дизелів. Крім того, здійснювати змащення елементів паливної апаратури.

Важкі сорти палив являють собою, як правило, суміш залишків чи перегонки крекінгвання нафти з дистилятом. Ця суміш повинна зберігати гомогенність і стабільність навіть після тривалого збереження і не повинна робити корозійної дії на паливну апаратуру.

Тому системи регулювання повинні мати високу швидкодію, надійність, низькою собівартістю, конструктивною простотою і здійснювати регулювання в'язкості віскозиметрами по безпосередньому вимірі в'язкості. І для ефективної експлуатації ДВЗ необхідно безупинно здійснювати контроль і регулювання в'язкості палива. Донедавна найбільш поширеним способом непрямого регулювання в'язкості було регулювання температури палива на виході з підігрівника. Даний спосіб володіє рядом недоліків [1]:

- необхідність зміни настроювання регулятора для кожного нового сорту суміші чи сортів палива;

- велика інерція чутливих елементів регуляторів температури.

Використання важких сортів палива в судових дизелях обумовлено рядом причин, найважливішими з яких є різниця у цінах між дизельним паливом і мазутом, яка постійно збільшується. Усе більший попит на дистильовані сорти палива обумовлений зростанням парку швидкохідних дизелів, які як правило працюють тільки на паливах підвищеної якості; а також бажання мати двигуни, що працює на різних сортах палива.

До основних недоліків спалювання важких палив у дизелях відносяться підвищений знос деталей циліндро - поршневої групи і паливної апаратури, а також більш складна підготовка палива для його спалювання в дизелях. Крім того, при роботі двигуна на важкому паливі більшу роль грає якість застосовуваної олії і присадок до палива, що істотно підвищують експлуатаційні витрати.

Практикою встановлено, що з переходом дизелів на більш грузлі сорти палива процес упорскування часто істотно змінюється. При підігріві можна одержати в'язкість будь-якого палива, дуже близьку до в'язкості дизельного палива ($4,1 \div 5,1$ сст), але в звичайній експлуатації в'язкість підігрітого палива усе-таки вище. Припустима її верхня межа для різних дизелів неоднаковий і досягає $16 \div 43,8$ сст. У судових дизелях, що працюють на більш грузлих сортах палива, чим швидкохідні дизелі, що мають довгі нагнітальні трубопроводи (кілька метрів), в'язкість палива впливає на процес подачі палива: гідравлічний опір нагнітальних трубопроводів зростає зі збільшенням в'язкості палива і довжини трубопроводу, що може привести до значної зміни всього процесу упорскування. Так при упорскуванні дуже грузлого палива спостерігаються стукоти в приводі насоса, обумовлені різким підвищенням тиску палива.

У процесі подачі паливо нагрівається як за рахунок тепла двигуна, так і за рахунок роботи опорів. Крім того, підвищення температури обумовлене і стиском палива. Тому під час експлуатації можливі істотні зміни значення в'язкості палива.

Відмінною рисою схеми системи упорскування для МОД є лише додаткова система прогріву, що виключається при роботі на малогрузлих сортах палива (дизельне).

Допоміжна паливна система, що служить для підготовки палива перед подачею його до двигуна, має додаткове устаткування, необхідне для підігріву палива і його очищення від домішок. У системі передбачений обігрів палива на всьому його шляху проходження від цистерн до форсунок. Для цього встановлюються спеціальні підігрівники палива, у всіх цистернах розміщаються змійовики обігріву, чи обігріваються чи ізолюються всі трубопроводи; часто обігрів мають і фільтри. Обігрів палива в трубопроводах звичайно здійснюється паровим трубопроводом, покладеним разом з паливним і разом ізольованими. Такий спосіб обігрівання простий і досить ефективний. На деяких дизелях нагнітальний трубопровід розміщається усередині парового трубопроводу. У цьому випадку паливо обігрівається рівномірно, але конструкція системи складніше. Обігрів усієї паливної системи найчастіше провадиться насиченим паром.

Велика увага також приділяється автоматичній підтримці заданих температур і в'язкості палива. З цією метою на підігрівниках і системах обігріву цистерн встановлюють теплорегулюючі клапани, що автоматично забезпечують задану температуру палива. Автоматичне підтримування заданої в'язкості перед системою упорскування для різних сортів палива забезпечується автоматизованими системами регулювання в'язкості, до складу яких входять віскозиметри.

До паливної апаратури двигунів, що працюють на важкому паливі, часто пред'являються деякі специфічні вимоги [9, 11]:

- інтенсифікація охолодження розпилювача форсунки;
- забезпечення рівномірного прогріву плунжерних пар ПНВТ у період переведення двигуна з дизельного палива на важке;
- збільшення діаметральних зазорів у прецизійних парах плунжер - втулка і голка - напрямна;
- забезпечення відводу витоків палива з ПНВТ і форсунки.

Важке паливо до дизеля подається при температурі, що нерідко перевищує температуру спалаху, тому у випадку розриву паливопроводу високого тиску з'являється імовірність виникнення пожежі. У зв'язку з цим у багатьох МОД і СОД на зазначені паливопроводи надягають захисні кожухи, з яких паливо при розриві

паливопроводу попадає в спеціальну цистерну.

В'язкість важкого палива при упорскуванні в робочий циліндр дизеля більш висока, чим в'язкість дизельного палива. Оптимальне значення в'язкості встановлюють під час доведення робочого процесу дизеля. Так, для багатьох МОД оптимальне значення в'язкості дорівнює $8\div 15$ мПа·с, однак верхня межа в'язкості палива для різних дизелів неоднакова і досягає $30\div 40$ мПа·с. Високі значення в'язкості рекомендовані і для деяких СОД. Але всі дизелі при пуску і на режимах малих навантажень, як правило, працюють на дизельному паливі в'язкістю $3\div 5$ мПа·с. Таким чином, в експлуатації в'язкість палива, що впорскується в циліндр дизеля, може змінюватися в порівняно широких межах, що впливає на параметри процесу упорскування, а отже, і на параметри дизеля.

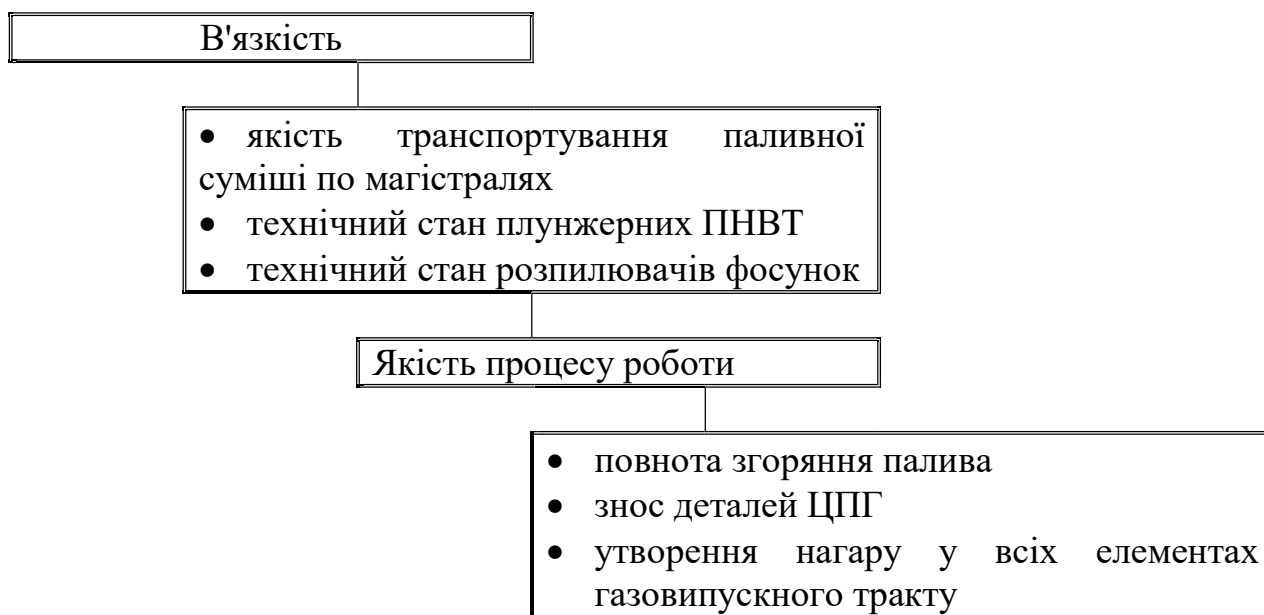


Рис. 1.6. Вплив в'язкості палива на якість робочого процесу

На рис. 1.7 представлена узагальнена структурна схема впливу властивостей палива на процес паливоподачі.

Слід також зазначити, що паливо, як і олія, відноситься до тиксотропних рідин. Рідини з такими структурами здатні зворотно відновлювати чи руйнувати надмолекулярні зв'язки під впливом різних факторів [1]. У якості таких факторів найчастіше виступають механічні впливи.

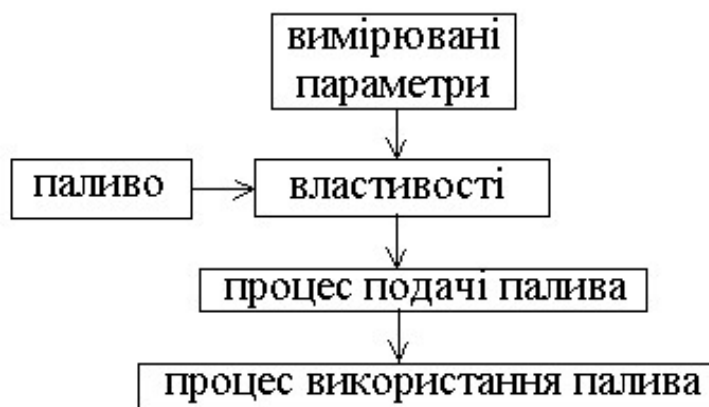


Рис. 1.7. Структурна схема впливу властивостей палива на процес паливоподачі

Для структурних рідин з тиксотропною структурою, в'язкість яких залежить від напрямку зрушення, в умовах стаціонарного стійкого ламінарного плину існують реологічні криві ефективної в'язкості [16], приведені на рис. 1.8, які є залежністю градієнту швидкості зсуву шарів рідини $\Delta V/\Delta h$ від напруги однорідного зсуву F/S . Тут ΔV – зміна величини швидкості, Δh – товщина зазору в триботехнічному вузлі, F – сила деформації, S – площа контакту поверхонь. Реологічна крива є паспортною характеристикою для рідини.

Характер реологічних кривих указує на те, що при визначених значеннях деформацій зсуву, значення коефіцієнтів в'язкості різко відрізняються від "ньютонівських" рідин. У випадку з підшипниками ковзання інтерес представляє радіальний коефіцієнт в'язкості, а у випадку плунжерних пар – усереднений коефіцієнт, до складу якого входять як радіальний, так і поступальний. Тому при переході з однієї фракції на іншу і зміні режиму роботи ДВЗ, потрібно впливати на коефіцієнт в'язкості шляхом зміни структури анізотропного шару або введенням присадок, або зміною температури, або ультразвуковою обробкою палива.

Так для кривої 3 на рис. 1.8 ділянка OA відповідає коефіцієнтам в'язкості палива, з яким воно подається з танка по паливопроводу низького тиску до паливного насоса високого тиску. Ділянка BC характеризує стан паливної суміші на виході розпилювача форсунки в камері згорання, коли забезпечується повне згорання.

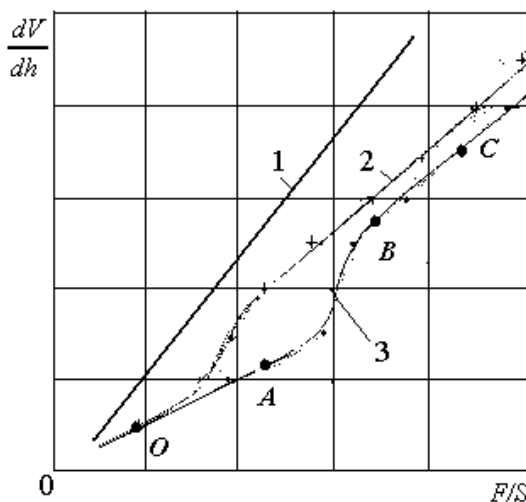


Рис. 1.8. Криві плинності рідин: 1 - “ньютонівської”; 2, 3 - тиксотропних

У той же час крапковий вимір коефіцієнтів в'язкості, здійснюваний у процесі експлуатації, не дає уявлення про властивості і поведінку тиксотропних рідин, якими є не тільки важкі моторні палива, але й олії.

Необхідність одержання характеристики палива – реологічних властивостей паливної суміші в кожен момент часу, обумовлює технічні засоби для комплексної оцінки стану тиксотропних рідин перед початком роботи й у процесі їхнього спалювання.

У таблиці 1.1 приведені наслідки застосування палива від його хімічного складу і в'язкості і вимірювані параметри, що безпосередньо впливають на працездатність ПС [12, 13].

Таблиця 1.1.

Вплив хімічного складу і в'язкості палива на ПС

Хімічний склад палива	Наслідки впливу	Вимірювані параметри
Щільність більш 990 кг/м ³	Посилений знос паливної апаратури, поява в ній задирки; збільшення імовірності прояви нестабільності	Щільність
В'язкість більш 19 - 15 сст	При низьких температурах - зріст тисків і механічної напруги у ПНВТ, форсунках і паливопроводах, їхнє ушкодження; забивання фільтрів	Температура і в'язкість палива
Золи А1, 81	Інтенсивне зношування паливної апаратури	Ступінь очистки
Води - 0,3	Корозійний знос плунжерних пар і розпилювачів, їхнє заклинювання й ушкодження	Щільність, визначення води
Несумісність	Нестабільність паливних сумішей, що виражається в утворенні коксу на розпилювачі, заклинюванні прецизійних елементів ПА	Тиск, температура, в'язкість

Важливе значення грають безпосередньо процеси тертя в плунжерних парах. Так, у процесі роботи плунжерних пар (розпилювачів форсунок) спостерігається два режими тертя: рідинне тертя і тертя при граничному змащенні [14].

1. Тертя при рідинному змащенні виявляється в досить товстій плівці речовини, що змазує, поділяючої контактуючі поверхні. У цьому випадку результатом заміни зовнішнього тертя при безпосередньому контакті тіл внутрішнім тертям (в'язкістю) поділяючим їх шаром рідини є зменшення опору тертя і швидкості зношування поверхні. При рідинному терті тиск мастильного матеріалу врівноважує зовнішнє навантаження. Сила тертя при рідинному змащенні не залежить від природи поверхонь, що сполучаються.

Відповідно до рівняння Рейнольдса [14], ефективна в'язкість рідини і її швидкість у мастильному зазорі відповідальні за утворення несучої мастильної плівки. Товщина і динамічний тиск мастильної плівки є результуючими параметрами.

Рідинне змащення є оптимальним для вузла тертя з погляду втрат енергії, довговічності і зносостійкості. Однак, реалізувати його на всіх режимах роботи при таких жорстких умовах експлуатації не представляється можливим. У роботах [15, 16, 17] показано, що зношування елементів паливної апаратури обумовлено наявністю в процесі їхньої контактної взаємодії граничного режиму змазування.

2. При терті в режимі граничного змащення рідинна плівка мастильного матеріалу не розділяє тертьові поверхні, а здібність мастильного матеріалу знижувати тертя і знос, перешкоджати заїданню трибосполучення визначається його можливістю утворювати на робочих поверхнях міцні граничні шари адсорбційного чи хімічного походження, у порівнянні з основним матеріалом.

У дослідженнях шарів на машині тертя замічена зміна коефіцієнта тертя зі зростанням швидкості, що свідчить про підвищену в'язкість прошарку при малих швидкостях деформації зсуву.

Режим граничного тертя характерний для цілого ряду вузлів (підшипники, плунжерні пари і т.д.) ДВЗ. З трибологічних досліджень ряду палив на машині тертя [14] і в капілярному щілинному віскозиметрі [14] встановлено, що реологічні

характеристики тонких прошарків рідини відрізняються від цих характеристик рідини в «обсязі». Зв'язано це з тим, що на поверхнях пар тертя ці рідини утворюють структуровані шари.

Крім того, тертя при граничному змащенні визначається також схильністю контактуючих матеріалів до схоплювання на ряді фактичних мікро нерівностей, на яких може бути зруйнований граничний шар змащення. У цих місцях може виникнути сухе тертя окисних плівок чи навіть ювенільних поверхонь. Сила тертя залежить від молекулярного схоплювання (адгезії) поверхонь і є функцією тиску.

Граничний шар утворюється в результаті взаємодії активних елементів мастильного матеріалу з металом поверхонь тертя. Активним компонентом палива можуть бути як спеціально введені в нього присадки, так і домішки технологічного походження, продукти окислювання і т.д.

Таким чином, можна стверджувати, що при визначенні вимог до реометрів і віскозиметрів необхідно виходити з умови адекватності процесів у вимірювальних зондах реометрів і віскозиметрів реальним процесам у триботехнічних вузлах із зазорами $1 \div 25$ мкм.

- насосні елементи паливної апаратури роблять зворотно-поступальний рух з числом подвійних ходів у хвилину - $20 \div 250$;
- швидкість ковзання змінюється в діапазоні $0 \div 0.8$ м/с по складному закону;
- мастильне середовище - важкі палива з коефіцієнтом динамічної в'язкості до 17.0 ВУ (при 110°C);
- температура деталей паливної апаратури - $+50 \div +200^{\circ}\text{C}$;
- нормальне питоме навантаження у вузлах тертя в площині ковзання $2 \div 2 \cdot 10^4$ Па.

На основі аналізу в роботі були сформульовані вимоги, пропоновані до реометрів і віскозиметрів:

- зазор між співвісними циліндрами у вимірювальному зонді - $1 \div 25$ мкм;
- діапазон зміни лінійної швидкості рухомого циліндра - $0 \div 0,8$ м/с або частоти його обертання - $0,33 \div 4,16 \text{ c}^{-1}$;

- робочий діапазон температур паливної суміші - $+50 \div +200$ °C;
- діапазон напруг зрушення однорідного шару паливної суміші - $0 \div 2500$ Па.

Прецизійні деталі паливної апаратури виготовляються з високою точністю і незначною шорсткістю поверхонь: $Ra = 0,02$, $Rz = 0,05$. У сполученні плунжер - втулка допускається зазор $1 \div 4$ мкм, коефіцієнт тертя $f=0,05 \div 0,12$. Інтенсивність зношування поверхонь, що сполучаються, $Ih=10^{-12} \div 10^{-10}$.

У паливних насосах високого тиску і розпилювачах форсунок прецизійні деталі, що переміщаються друг щодо друга і паливо, що знаходиться в зазорі між ними, утворюють, так називану, тріаду тертя.

У процесі роботи деталей паливної апаратури зростає радіальний зазор між втулкою і плунжером, а також місцеві зазори, що погіршують процес подачі палива і сумішоутворення, при цьому падає гідравлічна щільність пари.

Під час роботи насоса високого тиску на плунжер, що робить зворотно-поступальний рух, діють неврівноважені радіальні сили, що виникають у результаті перепаду тиску рідини, швидкості відносного переміщення тертьових поверхонь і конструктивних особливостей деталей плунжерної пари.

При відносному переміщенні між тертьовими поверхнями деталей пари виникає гідродинамічний тиск шару рідини, що нерівномірно розподіляється по поверхні тертя і приводить до зсуву плунжера в отворі втулки, перерозподіляючи радіальні зазори. При порушенні співвісності між плунжером і втулкою, а також при наявності відхилень від циліндричності деталей створюються умови для нерівномірного їхнього зношування. У [18] розглядається вплив перепаду тиску палива і деяких конструктивних параметрів деталей на порушення їхньої співвісності. У випадку якщо спостерігається перекручування циліндричної форми плунжера і втулки, тиск палива на плунжер буде нерівномірним і викликає зсув і перекид плунжера в отворі втулки.

Згідно [14] на шток діє сила P_d (рис. 1.9, а) обумовлена стиском палива і не лежача на одній осі з рушійною силою P_T , що приводить до порушення співвісності штока і виникненню неврівноважених радіальних сил P , що викликають його підвищений знос.

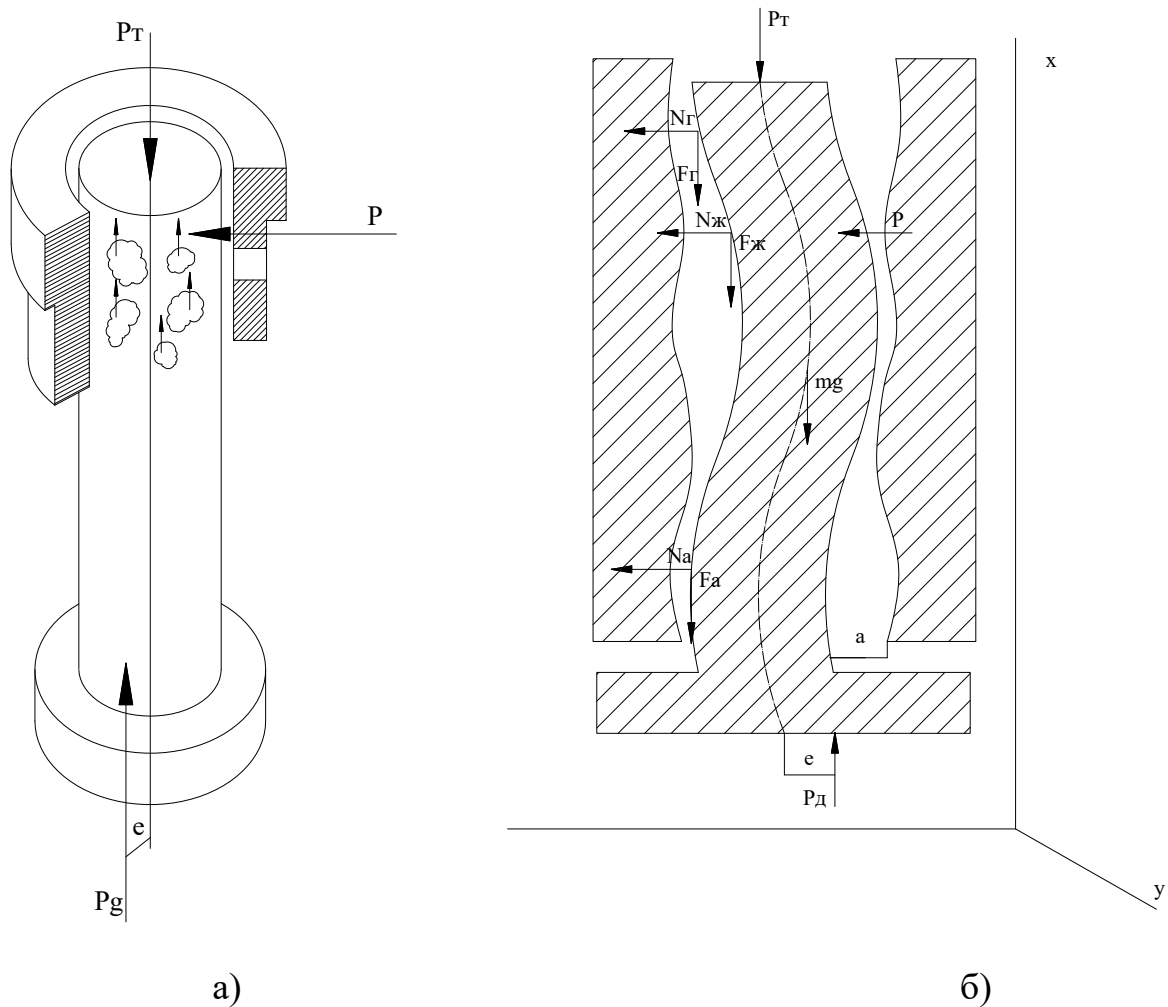


Рис. 1.9. Фізична модель типового вузла тертя

Піддаючись тиску через поза центрові дії цих сил, шток випробує дію деформації вигину. Перебуваючи у хиткому положенні, стріла прогину штока може приймати різні конфігурації в залежності від його довжини і жорсткості.

Процеси в триботехнічних вузлах, таких як розпилювачі форсунок, клапанах і зубчастих передачах досліджувалися в [14, 18, 19]. У [19] отримано залежність для сили тертя при граничному терті:

$$F = S[\alpha f_1(V, T) + (1 - \alpha) f_2(h, V, T)], \quad (1.1)$$

де S - площа поверхні, що несе навантаження; α - частка загальної площі, де установився режим граничного тертя; V - швидкість зрушення; T - температура грузлого шару; h - товщина шару.

У [14] наводиться більш досконала модель триботехнічного вузла (рис. 1.10).

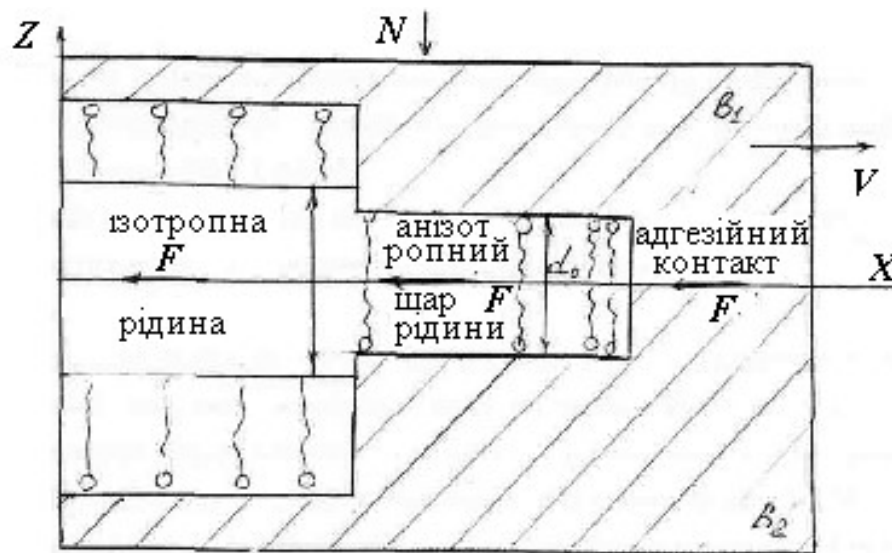


Рис. 1.10. Фізична модель зони тертя насосного елемента ПА, що працює в режимі граничного змащення

Відповідно до цієї моделі весь зазор, заповнений паливом, можна представити з великого числа областей, у межах яких протікають три однотипних триботехнічних процеси:

- а) процес безпосереднього схоплювання контакту робочих поверхонь насосного елемента;
- б) процес зрушення в шарі ізотропного палива;
- в) процес зрушення в анізотропному шарі палива.

Для сили тертя в такому вузлі, згідно [14, 19], справедливе вираження

$$F = \alpha \sigma_{i\lambda} A_C + \beta \sigma_{ik} A_C + \gamma \sigma_{im} A_C, \quad (1.2)$$

де $\sigma_{i\lambda}$, σ_{ik} , σ_{im} - напруги на зрушення в шарі рідини з об'ємними й анізотропними властивостями, а також напруга на зрушення на схоплених контактах поверхонь вузлів тертя, A_C - контурна площа зони тертя, α , β , γ - коефіцієнти, що вказують на якій долі зони тертя розвиваються відповідні процеси. Крім того, повинна виконуватися умова $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

Т.ч. розміри цих шарів досягають 1-100 мкм і їхній розподіл у зазорі носить випадковий характер, то розгляд задачі аналізу діючих сил у вузлі тертя може зводиться до спрощеної плоскої задачі (рис. 1.9, б), де на шток діють сили: F_t - сила обумовлена стиском палива, mg - сила ваги штока, F_d - рушійна сила штока, що

викликається деформацією п'єзoelementу під дією керуючої напруги чи кулачка розподільного вала; e - ексцентриситет (відстань між віссю додатка рушійної сили F_d і геометричною віссю штока); F - неврівноважена радіальна сила, обумовлена конструкційними особливостями пари циліндрів (наявність канавок і пропускних вікон); mg - сила інерції штока, обумовлена його рухом, яку можна прийняти рівною "0", тому що вона занадто мала в порівнянні з діючими в системі силами.

При прямованні штока усередині циліндра виникають сили тертя: F_a - сила опору зрушенню, що виникає на контактах, що схоплюються, у зоні тертя; F_r - сила опору зрушенню орієнтаційно - упорядкованого шару палива; $F_{ж}$ - сила грузлого тертя в шарі палива з об'ємними властивостями; $N_{ж}$ - гідродинамічна піднімальна сила, що виникає на мікроклинах шорсткості поверхні; N_r - сила, обумовлена тиском клину у пристінному орієнтаційно - упорядкованому шарі палива; N_a - сила, обумовлена молекулярною взаємодією на контактах, що схоплюються.

Крім того, на вільно підвішений у гільзі плунжер діє рівнодіюча наступних сил: P_g - сили тиску штовхальника розподільного вала, (рушійна сила); P_d - сили тиску палива на голівку плунжера. Оскільки рівнодіюча цих сил у загальному випадку збігається з віссю плунжера, то виникає згинальний момент, що приводить до деформації плунжера (чи його перекосу) по одній зі схем, приведених на рис. 1.11.

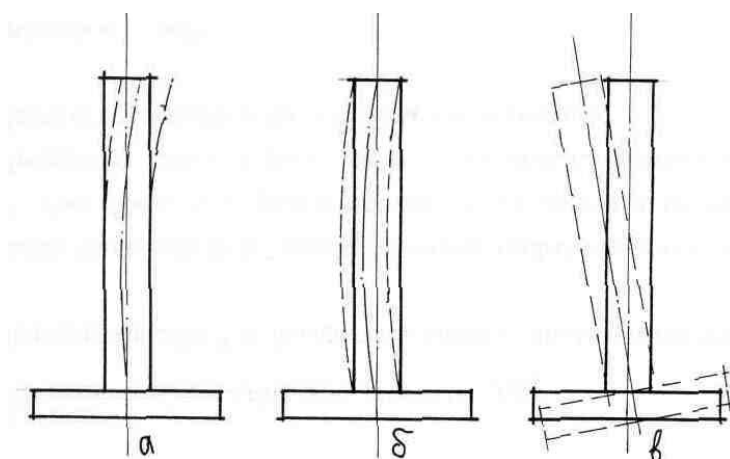


Рис. 1.11. Можливі схеми перекосу (вигину) плунжера паливного насоса внаслідок асиметрії прикладених сил

Результуюча сила, що діє на плунжер, у загальному випадку прикладена не до

осі симетрії плунжера, а зміщена на деяку величину Δx від осі. Такий додаток сили викликає поява згинаючого моменту і згинаючої сили.

Не співвісні положення плунжера з гільзою приводять до утворення на ньому ділянок фактичного контакту, на яких і відбуваються процеси тертя і зносу.

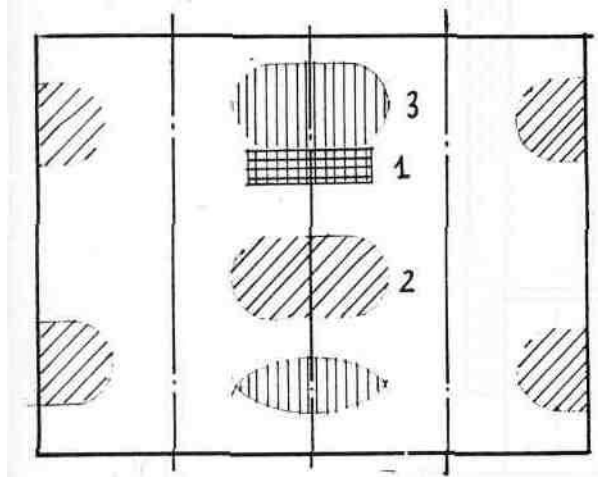


Рис. 1.12. Усереднене розгорнення поверхні плунжера паливного двигуна МАН

KZ78/140 із указівкою найбільш ймовірних зон інтенсивного зносу: |||||

- абразивний знос; /// - окисний знос;  - область найбільш ймовірного схоплювання

Така розбивка поверхні плунжера на зони носить усереднений умовний характер і відображає типи зносу паливних насосів, які найбільш часто зустрічаються при експлуатації. Для кожного типу пар існують свої закономірності розподілу зносу по поверхні. Зближенню поверхонь деталей пари протидіє виникаючий при цьому опір шару палива, а ступінь зближення залежить від конфігурації тертьових поверхонь деталей плунжерної пари, швидкості переміщення, в'язкості палива і величини зазору.

На ділянках виїмок, западин, зовнішнього каналу, що підводить паливо, паливних отворів, у верхній і нижній мертвих крапках руху плунжера гідродинамічний рух не виникає, і плунжер на цих ділянках приходить у безпосередній контакт із втулкою під дією невірноваженої радіальної сили, що виникає від перепаду тиску палива. Має місце тертя при граничному змащенні, коли поверхні сполучених тіл розділені шаром палива дуже малої товщини (від товщини

1 молекули до 0,1 мкм). Наявність граничного шару чи граничної плівки знижує силу тертя в порівнянні з тертям без змащення в $2\div 10$ разів і зменшує знос сполучених поверхонь у $10^2\div 10^4$. Міцність граничної плівки палива багато в чому залежить від природи палива і наявності в ньому активних молекул домішок.

Палива, як і мастила [20], утворюють на металевих поверхнях граничну фазу квазікристалічної структури товщиною до 0,1 мкм, що володіє міцним зв'язком з поверхнею і подовжньою когезією. При наявності щодо товстого мастильного прошарку між поверхнями тертя перехід від орієнтованої структури змащення до неорієнтованого відбувається стрибком.

Отже, інтенсивність зношування деталей плунжерних пар і розпилювачів форсунок обумовлюється особливостями конструктивних параметрів плунжера і втулки, величиною радіального зазору, в'язкістю палива, перепадом тиску, швидкістю відносного переміщення тертьових поверхонь, засміченістю палива абразивом, його природою і фракційним складом, твердістю втулки й ін. Тому, для віскозиметра на співвісних циліндрах, необхідно передбачити наявність триботехнічного вузла, процеси в який будуть адекватні процесам у реальних плунжерних парах.

Крім того, паливо в тонких шарах поводить себе як анізотропна рідина, тому рішення задачі руху втулки ускладнюється. Грузлий тензор напруги нестисливого анізотропного шару палива [18] містить три незалежних коефіцієнти в'язкості $\overline{\eta_2} = \eta_2 + \eta_5 - 2\eta_4$.

Сила тертя для випадку руху елемента в анізотропному шарі палива:

$$F = S \left\{ \begin{aligned} &2\eta_1 V_{ik} + (\eta_3 - 2\eta_1)(n_i n_l V_{kl} - n_k n_l V_{il}) + \\ &(\overline{\eta_2} + \eta_1 - 2\eta_3)(n_i n_l V_{kl} - n_k n_l V_{il}) + \\ &(\overline{\eta_2} + \eta_1 - 2\eta_3)n_i n_k n_l n_m V_{lm} \end{aligned} \right\}. \quad (1.3)$$

Отже, значення грузлої складової тензора напруги має вид:

$$\sigma'_{ik} = (\eta_1, \overline{\eta_2}, \eta_3).$$

Систематизованих досліджень по визначенню коефіцієнтів в'язкості $\eta_1, \overline{\eta_2}, \eta_3$ для мастильних матеріалів і палив, використовуваних у ДВЗ, у даний час немає.

Значні дослідження в цій області були проведені лише для рідких кристалів, що по своїй конфігурації молекул і розмірам близькі до молекул мастильних матеріалів і палив.

На підставі вище викладеного можна зробити висновок, що для визначення кожного з коефіцієнтів в'язкості потрібні відповідні конструкції вимірювальних зондів. Тому для дослідження в'язкості в пристінних шарах необхідні віскозиметри-реометри, що можуть забезпечити плавну зміну градієнта швидкості, сили, зазору і напрямку переміщення. Для проведення таких досліджень переважніше виявляються реометри на співвісних циліндрах і ротаційні реометри на дисках і конусах.

Виникає питання: у якому з віскозиметрів-реометрів процеси наближені до дійсних процесів у триботехнічних вузлах і які з 3 коефіцієнтів в'язкості вони визначають?

Слід зазначити, що всі перераховані процеси впливають на надійність і термін служби деталей паливної апаратури, а для їхнього продовження необхідно постійно контролювати не тільки в'язкість, але тиск, нерозривність потоку, температуру, ступінь очищення.

1.3. Надійність і термін служби деталей паливної апаратури

Вузли і деталі паливної апаратури всіх дизелів відносяться до менш надійних і більш трудомісткі в обслуговуванні. Так, частка відмовлень паливної апаратури від загального числа відмовлень по дизелі в експлуатації складає 20-50 % при витратах на обслуговування і ремонт - 20-30 % загальних витрат. Велика частина робіт з обслуговування паливної апаратури проводиться в період експлуатації дизелів, тоді як витрати і трудомісткість заводського ремонту відносно невеликі, наприклад, 2 % загальних витрат для МОД [4].

Частка відмовлень ПНВТ від загальної суми відмовлень по дизелі в суднових МОД складає 25-35 %. Середній наробіток на відмовлення в суднових СОД дорівнює 1-7 тис. г. Найбільш частий дефект ПНВТ - заклинювання плунжера.

Середня періодичність технічного обслуговування ПНВТ дорівнює 2000 - 3000 г. для МОД, 6000 - 10 000 г. для СОД. Термін служби плунжерних пар для суднових дизелів дорівнює 6000 - 20000 г.

Основні несправності форсунок [4, 9, 11]. Наприклад, утрата герметичності, розпилювачів дизелів рибпромислового флоту 10Д100 досягла відповідно 33 і 90 % усіх відмовлень по форсунках. Зависання голок відбувається головним чином у розпилювачах з низькою якістю виготовлення і відбувається, як правило, у початковий період роботи (до 300-500 г.).

Нормативна періодичність обслуговування форсунок неоднакова для різних дизелів і коливається від 500 до 5000 ч. В експлуатації фактичні терміни профілактики форсунок різні для тих самих дизелів. Середня тривалість роботи форсунок від одного профілактичного обслуговування до іншого 500-1000 г. для МОД, 500-2000 г. для СОД і ВОД. Середній наробіток на відмовлення для форсунок суднових дизелів складає 830-4000 г.

Ресурс розпилювачів для різних дизелів коливається в широких межах: для МОД у середньому 10 000-12 000 г., для СОД 5000-8000 г.

Основні несправності паливного проводу високого тиску: свищі, подовжні тріщини і поперечні переломи кінцевих голівок, викликані кавітаційним зносом паливних проводів, високим тиском палива в них і напругою вигину. Частка відмовлень паливних проводів від загальних відмовлень паливної апаратури змінюється в широких межах. Так, відмовлення паливних проводів дизелів 6ЧН - 25/34 склали 20 %, а дизелів СМД-14 50 % загальних відмовлень по паливній апаратурі.

Основні відмовлення деталей паливної апаратури. Задирки тертьових поверхонь плунжерних пар і заклинювання плунжерів ПНВТ є наслідком недостатньої чистоти палива і влучення в нього води. Вода і бруд в більшості випадків не приводять до зависання плунжерів, якщо в зазор плунжерної пари вони попадають у період роботи. Заклинювання плунжерної пари звичайно відбувається після стоянки, під час якої в зазор попадає бруд і вода, що викликає корозію. Заклинювання можливе також і при роботі ПНВТ на водно паливній суміші з температурою на вході 328 °К

й вище.

Знос прецизійних поверхонь плунжерних пар відбувається в основному гідро абразивний чи абразивний. Такий знос, наприклад, для дизелів 2Д100 складає 84 % загального зносу плунжерних пар, що виходять з ладу.

Порушення герметичності запірного конуса розпилювача. Така несправність виникає внаслідок ряду причин, до яких відносяться: гідро абразивний вплив палива в період упорскування, утворення вибоїв і місцевого наклепу на ущільнювальних пасках голки і корпуса розпилювача при посадці голки на сідло через наявність сторонніх часток у паливі, стомлені руйнування внаслідок динамічного впливу голки на сідло при її посадці, якість виконання конусного з'єднання.

Зависання голок розпилювачів відбувається в результаті влучення з палива дрібних металевих часток у зазор між прецизійними поверхнями, наявності фетінга корозії; деформації корпуса від монтажних зусиль і тиску палива, низької якості виготовлення і дії поперечних сил від деталей механізму запирання голки. При цьому встановлено, що для розпилювачів із зазором 2,5 мкм частки розміром 4 мкм і вище викликають заклинювання голки.

Знос циліндричних поверхонь голки і її направляючої звичайно малий. Знос голки і її направляючої обумовлений головним чином впливом механічних часток, що проходять через зазор. Знос залежить від величини зазору, концентрації абразивних часток і залишкового тиску в лінії високого тиску палива, що визначає швидкість і тривалість плин палива через зазор.

Падіння тиску початку упорскування p_0 під час експлуатації - найбільш розповсюджена несправність у роботі форсунок будь-яких дизелів.

Причинами падіння тиску p_0 є нестабільне положення (по висоті) регулювального гвинта, а також знос опорних поверхонь регулювального гвинта, що сполучаються, пружини і її тарілок, штанги, голки і замикаючого конуса розпилювача. Немаловажне значення за зв'язки з цим мають шорсткість, геометрична форма і твердість поверхонь, що сполучаються, а також якість виконання пружини (особливо її неробочих витків) і співвісність усіх деталей запирання голки.

Коксування отворів розпилювача, що розпорошують, виникає внаслідок негерметичності замикаючих конусів і тривалого протікання кінцевої фази подачі палива, а також у результаті впливу газів, нагрітих до високої температури, на паливо, частина якого залишається в розпилювачі між замикаючим конусом і отворами, що розпорошують, після закінчення упорскування. Коксування відбувається, коли тиск палива в розпилювачі після закінчення упорскування нижче тиску газів у циліндрі дизеля, і останні проникають у кишеню корпусу розпилювача.

Проведений аналіз надійності і термінів експлуатації паливної апаратури дозволяє зробити наступний висновок. Основні причини зниження ресурсу залежать від порушення технологічного процесу. Це, насамперед:

- а) погане очищення палива;
- б) використання різних сортів на різних режимах експлуатації;
- в) порушення в роботі контрольно-вимірювальної апаратури.

Проблема контролю, зокрема, в'язкості, температури і тиску збільшується цілим рядом факторів, що домінують, з яких, є вірогідність інформації. Зросли масиви інформації зажадали розширенню інформаційних систем, що неминуче привело до збільшення числа рівнобіжних інформаційних каналів, організованих на традиційних мідних провідниках. А це, у свою чергу, на тлі зрослих потужностей об'єктів ДВЗ і одночасного зменшення машинного відділення привело до катастрофічного зниження якості інформації і надійності вимірювальних засобів.

Таблиця 1.2.

Частка відмовлень паливної апаратури

Вид відмовлення	Частка відмовлень від загальних відмовлень ТА, %	Причини	Контрольовані параметри
ПНВТ	25-35	Якість палива	В'язкість, ступінь очищення
Паливопровід	20-50	Циклова подача	Фазовий кут
Знос прецизійних поверхонь плунжерних пар	84	Якість палива	В'язкість, ступінь очищення

У той час, як задача обробки зрослих обсягів інформації зважується шляхом

активного впровадження засобів автоматики і комп'ютерів, питання функціонування первинних перетворювачів залишаються на рівні 70-х років.

1.4. Аналіз схем контролю

В даний час комплексно-автоматизовані судна насичені складним енергетичним, електроенергетичним і радіоелектронним навігаційним устаткуванням, а також керуючими електронно-обчислювальними машинами (ЕОМ) або комп'ютерами.

Будь-які погрішності в роботі контрольно – вимірювальної апаратури можуть привести до аварійної ситуації:

- охолодження палива в порожнинах ПС, що неминуче викликає простої ДВЗ;
- висока температура може привести до зростання тиску, а це, у свою чергу, викликає пориви паливних магістралей з викидом палаючої паливної суміші і приводить до пожеж.

Усе це приводить до зниження рівня безпеки мореплавання.

Таким чином, для підвищення ефективності ПС, зниження аварійності необхідно удосконалювати системи контролю процесів подачі й упорскування палива.

У [8] приведено параметри ПС і циліндро-поршневих груп, які необхідно реєструвати: тиск палива; хід голки розпилювача, клапанів, плунжера, рейки; оцінки кута повороту вала; безперервності потоку палива; характеристика упорскування і температуру. На підставі цього можна скласти оригінальну схему системи контролю упорскування палива (рис. 1.13).

Для цих цілей використовуються системи автоматичного регулювання в'язкості палива, що знижують експлуатаційні витрати суднової дизельної установки за допомогою поліпшення використання палива і підвищення надійності дизеля при використанні важкого палива. Робота системи автоматичного регулювання знаходиться в тісному взаємозв'язку з роботою головного двигуна.

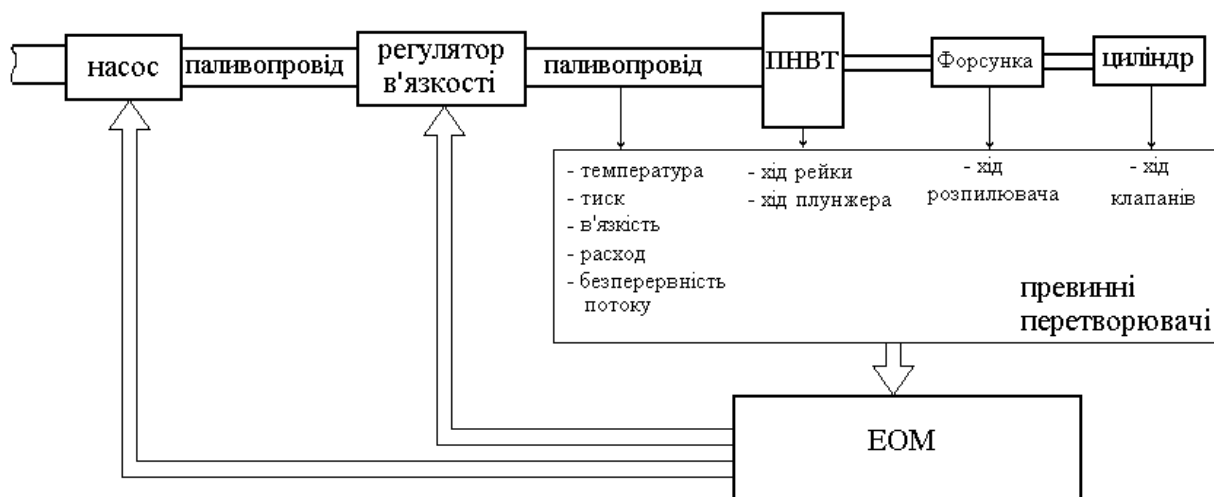


Рис. 1.13. Схема системи упорскування

Аналіз матеріалів експлуатації однотипних двигунів з регуляторами температури палива і системами регулювання в'язкості показує, що в останньому випадку витрата палива зменшується на 3-5%, тому що постійна температура не гарантує постійної в'язкості навіть у паливі одного фракційного складу.

Строк окупності систем автоматичного регулювання в'язкості, до складу яких входить віскозиметр, не перевищує року.

На рис. 1.14 показана схема включення віскозиметра в паливну систему, що працює на важкому паливі. Паливо з видаткових цистерн (4) подається насосами (3) у підігрівник (8), а потім воно надходить у фільтр (9), віскозиметр (10) і ПНВТ (1), що подає його до форсунки (2). Ступінь підігріву палива в підігрівнику (8) регулюється автоматичним клапаном (6), що розміщений на паровій магістралі (5). Імпульс цей клапан одержує від віскозиметра (10), причому при зниженні в'язкості палива відбувається менше відкриття клапана, при підвищенні - більше. При виході з ладу автоматичного клапана регулювання в'язкості палива здійснюється вручну за допомогою клапана (7).

Очевидно, що кожний з перерахованих вузлів, що входять у ПС, володіє визначеною інерцією. Затримка в роботі віскозиметра при переході з одного сорту палива на інше, з однієї фракції на іншу може привести до однієї з поломок паливної апаратури. Тому на сучасному етапі розвитку систем регулювання в'язкості гостро стоять питання підвищення швидкодії віскозиметрів, збільшення діапазонів виміру

коефіцієнта в'язкості, комплексної оцінки паливної суміші, технологічності установки, надійності і зниження собівартості конструкції.

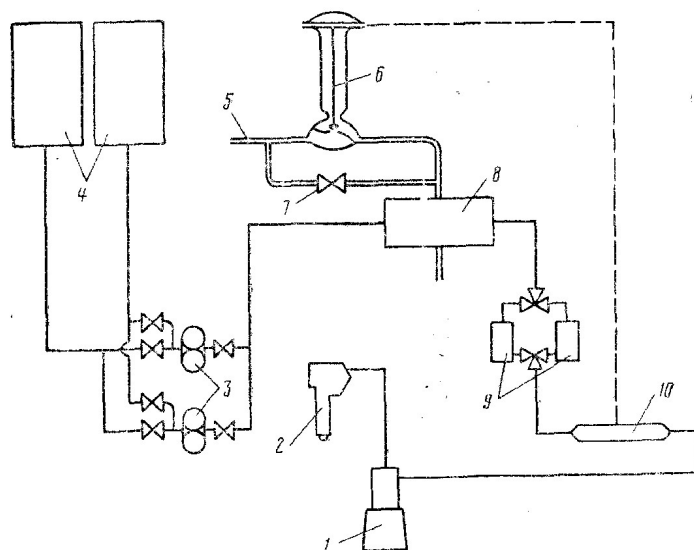


Рис. 1.14. Схема включення віскозиметра в систему важкого палива

Умови експлуатації реометрів та віскозиметрів визначаються температурою паливної суміші, що надходить у порожнину ПНВТ, тиском, створюваним паливним насосом, що підкачує.

У [3, 5, 6, 7, 8] приводяться вимоги до паливних насосів, що підкачують. Тиск підкачування повинен бути більше тиску насичення пару палива і складати 0,1-0,4 мПа для ПНВТ із нагнітальним клапаном, і 0,3-0,7 мПа при відсутності клапана. Продуктивність насоса звичайно повинна перевищувати витрати палива дизелем у 2-7 разів і враховувати витрати на охолодження форсунок, якщо останні прохолоджуються паливом. Насоси, що підкачують паливо, виконують в основному шестерними, поршневыми чи коловратними.

Температура паливної суміші також може змінюватися в широкому діапазоні. Так для легкого палива температура складає $+70^{\circ}\text{C}$, а для важкого – $+130^{\circ}\text{C}$. Однак у довідковій літературі суднових механіків зустрічається значення $+200^{\circ}\text{C}$, що вступає в протиріччя з фізичними процесами, що відбуваються з паливами при таких температурах. Зокрема відбувається коксування паливної суміші.

Діапазон вимірюваної (кінематичної) в'язкості лежить у діапазоні 18 – 800 сст.

Вище перераховані параметри пред'являються до палив у потоці. Але контроль параметрів здійснюється ще на стадії бункерування судна.

Процедура прийому на судно і контролю якості палива, здійснювана при наявності сертифіката, відбувається в такий спосіб. Відбирають у двох екземплярах контрольну пробу для аналізу або з нафтопроводу, або з верхньої частини цистерни (танка) на глибині 20 см від поверхні [8] і проводять експрес аналіз нафтопродуктів за допомогою переносних лабораторій.

Виходячи з вищесказаного, можна упевнитися в тім, що на судні повинні бути присутніми реометри для проведення експрес аналізу палива з пристроєм забору палива та реометр для постійної оцінки реологічних властивостей палива в паливній магістралі перед ПНВТ.

Оскільки умови експлуатації для цих двох типів відрізняються, то будуть відрізнятися і конструкції приладів.

Слід зазначити, що використовувані на сучасних судах перетворювачі неелектричних величин в електричні є одним з основних елементів вимірювальної системи. Вибір перетворювача в значній мірі визначає вибір схеми підсилювального пристрою і блоку живлення. Більш того, параметри вимірювального пристрою як приладу, у першу чергу, залежать від можливостей і якості перетворювача. Тому вибору перетворювача варто приділяти особливу увагу.

За принципом дії перетворювачі поділяються на дві основні групи: активні, чи генераторні, і пасивні, чи параметричні. В перших, вхідна величина безпосередньо перетворюється в електричний сигнал; у других - вихідними електричними величинами є зміни опорів, ємностей, частоти і т.д. До першого класу відносяться, наприклад, п'єзоелектричні й індукційні, а до другого - ємнісні, індуктивні й інші перетворювачі. На відміну від параметричних, що живляться від зовнішнього джерела, активні перетворювачі під впливом вимірюваної величини самі генерують електричний сигнал у виді е.д.с., частоти чи фази перемінного струму.

У тому випадку, коли безпосереднє перетворення вхідної величини у вихідну зробити не вдається, застосовується проміжне перетворення, як у тензометричних перетворювачах, де вимірювана величина (наприклад, сила) перетворюється

попередньо в деформацію пружного елемента, а остання приводить до зміни електричного опору.

Перетворювач повинний задовольняти цілому ряду вимог: мати достатню чутливість і задовільну стабільність, допускати широкий діапазон змін вхідної величини, зручне узгодження з вимірювальною апаратурою і не повинний робити помітного впливу на вимірювану величину.

Для виміру однієї і тієї ж механічної величини можуть бути використані датчики, засновані на різних принципах перетворення, що не завжди рівнозначні по забезпеченню точності і т.д.

Тому при автоматизації ДВЗ використовуються ті перетворювачі і датчики, що виходять простіше, надійніше, досить апробовані і задовільне розроблені з принципової сторони: резисторні, ємнісні, електромагнітні, електронні (механотрони), гальваномагнітні, п'єзоелектричні й оптичні.

Однак, дві групи - п'єзоелектричні й оптичні застосовуються в недостатній мері. Їхня питома вага в порівнянні з іншими групами дуже мала.

П'єзоелектричні перетворювачі застосовуються, в основному, для виміру тиску. І, незважаючи на те, що п'єзоефект був відкритий ще в XIX столітті, а з другої половини XX активно розвивалася теорія і технологія створення п'єзокерамічних матеріалів, вважається, що п'єзокераміка - один з перспективних матеріалів століття XXI. Причиною такого погляду є те, що чудові властивості, притаманні п'єзокераміці, дотепер не повною мірою затребувані наукою, технікою і технологіями.

Активне використання п'єзокераміки в різних областях почалося в 60–70 роках XX століття. Досить добре були вивчені і використані властивості п'єзокерамічних датчиків і перетворювачів. В даний час п'єзокераміка широко використовується для ультразвукової діагностики в медицині, авіаційному і залізничному транспорті, енергетиці, нафтовому і газовому комплексах; силова п'єзокераміка - в ультразвуковому зварюванні, чищенні поверхонь, нанесенні покриттів, свердлінні і т.д.

Відповідно до нових наукових і технічних досягнень в області

п'єзоелектричного мікромеханічного приладобудування поступово створювалася класифікаційна система Джагуповим Р.Г., Єрофєєвим А.С. [21], що прийняла остаточний вид у роботі [22], що дозволяє досить наочно судити про можливий розвиток п'єзотехніки в сьогоденні і майбутньому. У цій класифікаційній системі використані кілька важливих ознак: призначення, конструктивні особливості, області застосування, фізика вхідних і вихідних сигналів і ін., відповідно до яких всі існуючі сьогодні прилади можна розбити на кілька груп, до складу яких входять сотні різних конструктивних варіантів, призначених для всіляких цілей.

На рис. 1.15 представлена класифікація пристроїв, що використовують п'єзоелементи (ПЕ).

У той же час п'єзокераміка ще недостатньо використовується для створення генераторів, актюаторів (приводів) і в комбінованих системах. Однак сучасні вимоги по енергозбереженню, мініатюризації, адаптивності до комп'ютерних систем керування і контролю все частіше змушують виробників техніки й устаткування звертатися до виробників п'єзокераміки з метою спільного пошуку тих чи інших технологічних рішень за допомогою п'єзокераміки. У результаті з'являються нові типи п'єзокераміки, створюються нові й удосконалюються відомі п'єзокерамічні елементи і компоненти. Особлива увага в даний час приділяється п'єзокерамічним трансформаторам і актюаторам. Актюатори (двигуни) володіють двома важливими перевагами в порівнянні з електромагнітними приводами.

Проведення порівняльного аналізу електричних і п'єзоелектричних приводів по непрямому показнику: значенню пропорційного прискорення виконавчого органа (ВО), у даному випадку штока з рухливим циліндром, максимального питомого зусилля F_{max}/S_0 , яке розвиває двигун, тобто зусилля F_{max} віднесеного до площі активної поверхні двигуна S_0 [23, 24, 25] (таблиця 1.3) показало, що максимальне зусилля розвиває п'єзоелектричний привод.

Друга перевага застосування п'єзоелектричного привода - відсутність яких-небудь кінематичних передач, призначених для зміни швидкостей. При використанні п'єзокерамічних маніпуляторів і двигунів діапазон частот, що відпрацьовуються активно приводом, може бути розширений до декількох

кілогерців. За рахунок цього значно підвищується діапазон зміни швидкостей при збереженні загального діапазону переміщень.

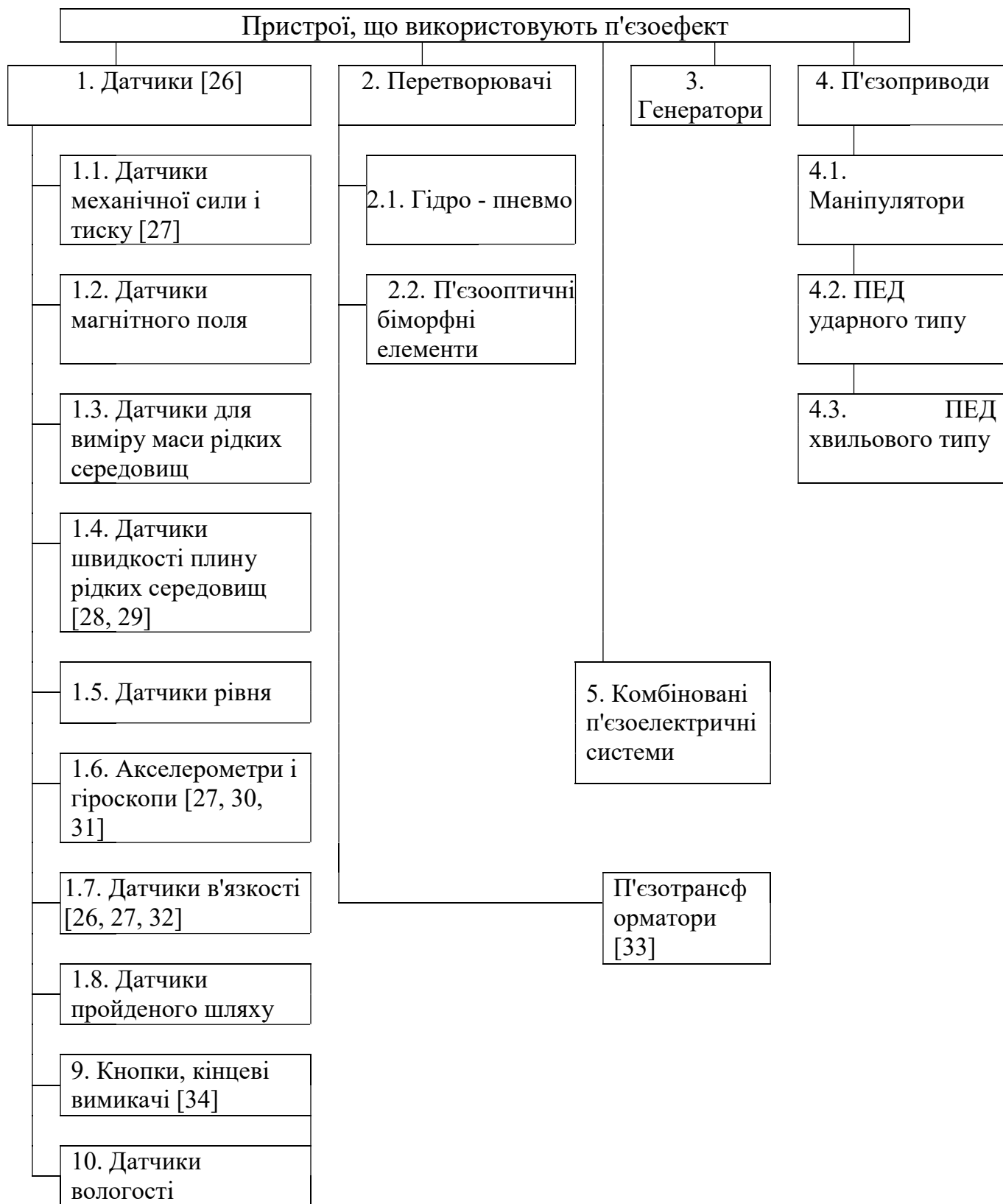


Рис. 1.15. Класифікація пристроїв п'єзоактивної механіки

Відсутність обмоток і простота технології виготовлення не є єдиними перевагами п'єзоелектричних двигунів. Їх також відрізняють висока питома потужність (123 Вт/кг у п'єзодвигунів і 19 Вт/кг у звичайних електромагнітних мікродвигунів), великий ККД (отриманий рекордний дотепер ККД = 85%), широкий діапазон частот обертання і моментів на валу, відмінні механічні характеристики, відсутність випромінюваних магнітних полів.

Таблиця 1.3.

Порівняльні характеристики приводів

Електромеханічний перетворювач	$F_{max}/S_0, 10^4$ Па
Електродвигун постійного струму і кроковий двигун загальнопромислового призначення	1-5
Електромагніт	95 – 240
П'єзоелектрична кераміка	200 – 2100

Тривалий час не вдавалося створити високотемпературну кераміку.

Але в даний час уже розроблена високотемпературна і високостабільна п'єзоелектрична кераміка, призначена для застосування в паливних системах двигунів сучасних автомобілів. Дуже важливим є те, що дана кераміка має значну стійкість до високих температур і не боїться ударів. Однакова частотна реакція робить датчики з даної кераміки придатними для будь-якого типу автомобільного двигуна.

Сучасні, технічно складні автомобілі постійно вимагають упровадження додаткової електроніки для підвищення надійності, безпеки і комфорту.

Так американські виробники автомобільної техніки активно використовують пристрої і вузли на базі п'єзоелектричної кераміки [35]. Прикладами таких пристроїв можуть служити:

- актюатори - клапани упорскування палива;
- актюатори - клапани для газорозподільної системи двигуна;
- датчики повороту - для визначення кута положення дросельної заслінки;

- датчики детонації;
- датчики рівня заправних рідин;
- датчики тиску - для виміру тиску в паливному баці з метою визначення витoku

палива;

- п'єзоприводи дзеркал;
- п'єзоприводи регулювання сидінь;
- передні ультразвукові дистанційні датчики (датчики запобігання зіткнень);
- бічні дистанційні датчики;
- задні (для паркування) ультразвукові дистанційні датчики;
- датчики системи сигналізації і зумери оповіщення;
- швидкісні сенсори в передній панелі для подушок безпеки;
- бічні ударні сенсори подушок безпеки;
- аварійні датчики-сенсори подушок безпеки;
- актюатори системи антиблокування гальм;
- п'єзоприводи системи підвіски;
- датчики кутової швидкості і лінійні акселерометри малих перевантажень,

орієнтовані по трьох осях автомобіля, призначені для автоматизованого керування маршрутом;

- п'єзоприводи регулювання фар;

• датчики й актюатори положення фар - для забезпечення динамічного регулювання променя світла передніх фар у залежності від профілю дороги і зміни величини корисного навантаження автомобіля;

- п'єзоакустичні системи адаптивного регулювання швидкості автомобіля.

Інноваційна розробка актюаторів (п'єзоприводів) і датчиків забезпечує рішення багатьох проблем автомобілебудування і поліпшує експлуатаційні якості автомобіля, що відповідають жорстким експлуатаційним вимогам.

Зіставляючи ступінь застосування п'єзокерамічних пристроїв в автомобілебудуванні і суднобудуванні, можна зробити висновок, що необхідно ширше впроваджувати такі пристрої в автоматизовані системи керування ДВЗ.

1.5. Висновки і постановка задачі

1. Аналіз можливих шляхів ефективного використання палива в двигунах внутрішнього згоряння показав, що за рахунок одержання додаткової інформації про його реологічні властивості, а також контролю безперервності подачі палива і деяких додаткових параметрів можна поліпшити процес використання суміші дистилатних сортів і важких моторних палив.

2. Крапковий вимір коефіцієнтів в'язкості не дає уявлення про властивості і поведінку тиксотропних рідин у пристінних шарах (важкі моторні палива й олії), тому для одержання реологічних характеристик паливної суміші в кожний момент часу необхідні нові типи датчиків.

3. Розробка нових і удосконалювання існуючих типів датчиків для оцінки властивостей технічних рідин у ДВЗ можлива при використанні пристроїв п'єзоактивної механіки.

4. Класифікація пристроїв п'єзоактивної механіки, що одержала подальший розвиток, дозволила установити, що крім датчиків тиску, рівня палива і гіроскопів у суднових системах керування більше жодне з п'єзоелектричних пристроїв не застосовується. У той же час в автомобільній промисловості з метою підвищення безпеки, зниження аварійності, маси і габаритних розмірів, мініатюризації і підвищення комфортності, пристрої п'єзоактивної механіки представлені широко. Рішення проблеми підвищення ефективності використання важких моторних палив і їхніх сумішей у ДВЗ за рахунок оцінки їх реологічних властивостей можливе на основі пристроїв п'єзоактивної механіки в їхніх системах керування.

Таким чином, задачі дисертаційних досліджень полягають у наступному:

- розробити концепції структур п'єзоелектричних пристроїв для систем керування ДВЗ;
- удосконалити і розробити п'єзоелектричні вібраційні віскозиметри для виміру коефіцієнтів в'язкості в анізотропних шарах товщиною $1\div 25$ мкм тиксотропних рідин;
- розробити методи проектування віскозиметрів і реометрів, що базуються на

концепції використання п'єзоелектричного привода і співвісних циліндрів;

- створити конструкції реометрів і віскозиметрів на співвісних циліндрах з п'єзоелектричним приводом;

- дослідити фізико-технічні характеристики нових п'єзоелектричних пристроїв суднових систем контролю і керування.

Основні наукові результати опубліковані в збірниках, приведених у переліку ВАК, [22, 28, 31, 34].

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРУ В'ЯЗКОСТІ І КОНСТРУКЦІЙ РЕОМЕТРІВ ТА ВІСКОЗИМЕТРІВ

Для оцінки існуючих конструктивних рішень віскозиметрів і реометрів спочатку необхідно провести аналіз методів виміру в'язкості, покладених в основу їхньої роботи. А також провести аналіз на адекватність процесів у вимірювальному зонді датчиків процесам у триботехнічному вузлі з зазором 10 мкм (плунжерним парам).

2.1. Методи виміру в'язкості

В даний час при створенні віскозиметрів використовують 7 методів виміру в'язкості [36]: капілярний; ротаційний; співвісних циліндрів; рівнобіжних нерухомих чи рухливих площин, що переміщаються; падаючої кульки; крутильних коливань; вібраційний. Проведемо аналіз методів і визначимо найбільш перспективні при створенні віскозиметрів для ПС.

1. Капілярний метод, заснований на вимірі в'язкості при течії рідини в капілярних трубках [37, 38, 39]. В'язкість визначається по уточненій формулі Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8Q(l + nR)} - \frac{mpQ}{8\pi(l + nR)}, \quad (2.1)$$

де R , l - радіус, довжина капіляра; $\wp$ - перепад тиску в капілярі; Q - секундна витрата рідини щільністю ρ ; n , m - деякі експериментальні коефіцієнти, що враховують вплив крайових ефектів.

Діапазон виміру в'язкості в капілярних віскозиметрах 10^{-1} - 10^4 Па·с.

2. Ротаційний метод [40, 41, 42] полягає у вимірі в'язкості матеріалу, поміщеного між двома співвісними поверхнями і підданого зрушенню. Вимір в'язкості заснований на законі Ньютона.

Найбільш поширені ротаційні віскозиметри складаються з двох співвісних

циліндрів, між якими поміщається досліджуваний матеріал. Циліндри приводяться в обертання відомою парою. В'язкість у цьому випадку визначається з формули:

$$\eta = \frac{M(R^2 - r^2)}{4\pi l(\omega_n - \omega_{\text{н}})R^2 r^2}, \quad (2.2)$$

де M - момент, що діє на циліндр (зовнішній чи внутрішній) на певному відрізку l ; R, r - радіуси зовнішнього і внутрішнього циліндрів; $\omega_{\text{н}}, \omega_y$ - їхні кутові швидкості. У багатьох віскозиметрах один з циліндрів нерухомий. У деяких віскозиметрах замість циліндрів вибираються системи: конус - конус, конус - площина, диск - диск (рис. 2.1), диск - кільце, сфера - сфера і т.п. [41]. Діапазон виміру в'язкості на ротаційних віскозиметрах - 10^{-3} - 10^6 Па·с.

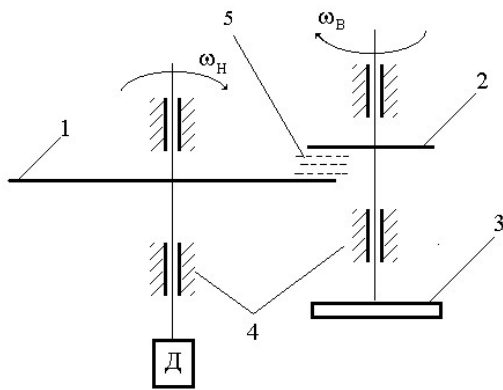


Рис. 2.1. Кінематична схема ротаційного віскозиметра із системою диск-диск:

1 – ведучий і 2 – відомий диски, 3 – пристрій для виставлення зазору, 4 – втулки кріплення осей, 5 – випробувана рідина, Д – двигун

3. Метод співвісних циліндрів складається в переміщенні одного циліндра щодо іншого поступально уздовж осі [40]. На рис. 2.2 приведений один з варіантів конструкцій, коли один циліндр нерухомий, а другий - переміщається усередині.

4. Метод рівнобіжних нерухомих чи рухливих площин, що переміщаються.

5. Метод падаючої кульки (діапазон виміру в'язкості - 10^{-4} - 10^3 Па·с). Вимір в'язкості заснований на відомій формулі Стокса, що зв'язує силу опору F руху кульки радіуса r у густій рідині з в'язкістю η і швидкістю його руху v :

$$F = 6\pi\eta rv. \quad (2.3)$$

Цей метод використовується для лабораторних віскозиметрів.

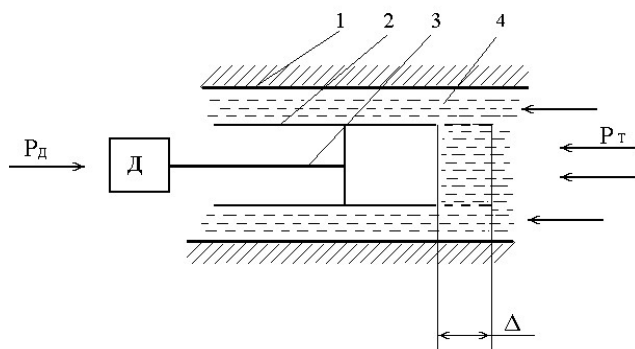


Рис. 2.2. Кінематична схема віскозиметра на співвісних циліндрах: 1 - нерухомий циліндр, 2 - рухливий циліндр, 3 - шток, що з'єднує двигун і рухливий циліндр, 4 - випробувана рідина, P_t – тиск рідини, P_d – тиск із боку двигуна на рухливий циліндр 2; Д – двигун

Широке поширення дістали ультразвукові віскозиметри [43]. Відомі дві модифікації цих приладів - низькочастотні (чи вібраційні) і високочастотні (власне, ультразвукові). У першому випадку довжина вібратора менше довжини хвилі коливань, створюваних генератором. В другому випадку, частота генератора вибирається рівній власній (резонансній) частоті вібратора.

Відмінність полягає в тому, що в низькочастотному варіанті швидкість пластинки у всіх її точках однакова, пластина коливається як єдине ціле, у той час як в ультразвукових віскозиметрах швидкість пластинки розподілена по її довжині по синусоїдальному закону,

Вібратором можуть служити п'єзoelementи з кварцу, п'єзокераміки чи магнітострикційні пластинки.

6. Метод крутильних коливань (маятникові віскозиметри) [44].

У потік рідини поміщається маятник, здатний робити крутильні коливання. Нехай крутильні коливання маятника описуються диференціальним рівнянням:

$$I \frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + \beta \frac{d\varphi}{d\tau} + c\varphi = 0, \quad (2.4)$$

де I - момент інерції маятника разом із приєднаним моментом рідини; β - коефіцієнт

опору середі, пропорційний шуканій в'язкості; c - крутильна жорсткість пружини, на якій підвішений маятник. Вимірюючи декремент загасання коливань маятника по відомих формулах визначають в'язкість. До цього методу близько примикає метод падаючої хвилі [45].

$$\eta = \frac{k}{k_1} \frac{Q}{Tgl} \frac{a_1 - a_1'}{a_1' + a_1}, \quad (2.5)$$

де k , k_1 - коефіцієнт форми тіла; a_1 , a_1' - прискорення падаючої і відбитої від випробуваної рідини хвиль, що вимірюються акселерометрами; T - період власних коливань тіла в досліджуваній рідині; Q - вага тіла; лінійний розмір тіла l .

7. Вібраційний метод [44].

Вимірювальним елементом (датчиком) вібраційного віскозиметра є вібратор (звичайно металевий стрижень), що стикається з досліджуваною рідиною і робить дуже малі коливання з амплітудою в кілька мікрометрів. Опір середовища руху вібратора складається з активного і реактивних. Активний опір обумовлений двома причинами: випромінюванням звукової енергії в навколишнє середовище і втратами на грузле тертя. Зі зменшенням розмірів вібратора випромінювання звукової енергії зменшується настільки, що їм можна зневажити. Активний опір F_a , пропорційний $\sqrt{2\pi\eta\rho}$, де η - в'язкість, ρ - щільність рідини. По виміру активного опору визначається в'язкість матеріалу.

Описані вище методи виміру в'язкості використовуються для виміру не тільки статичної, але і вібраційної в'язкості, тобто в'язкості системи, поміщеної в посудину, що здійснює коливання [46, 47].

Отже, проведення лабораторних іспитів палива здійснюється в широкому діапазоні швидкостей. Що ж стосується проточних віскозиметрів, то тут немає такої широкої зміни, вимір здійснюється на одній чи двох швидкостях.

Таким чином, аналіз методів виміру в'язкості показав, що найбільше поширення одержали вимірювачі коефіцієнтів в'язкості, засновані на: визначенні перепаду тиску в капілярі; зусилля на подолання сил тертя між двома співвісними дисками; часу подвійного проходу поршня в циліндрі, через який прокачується рідина (паливо); загасанні механічних чи ультразвукових коливань. А в основу

роботи реометрів покладені методи виміру в'язкості.

Проведемо аналіз використовуваних у даний час віскозиметрів.

2.2. Аналіз існуючих віскозиметрів на співвісних циліндрах

Аналіз існуючого ринку реометрів та віскозиметрів показав, що найбільшу нішу займають ротаційні і вібраційні реометри та віскозиметри, а також віскозиметри, робота яких заснована на переміщенні тіла усередині рідини. Слід зазначити конструкцію віскозиметра компанії VAF Instrumet, робота якого заснована на методі крутильних коливань, що відноситься до вібраційного.

Так Cambridge Applied Systems, Inc. [48] створила модельний ряд віскозиметрів на співвісних циліндрах (рис. 2.3).

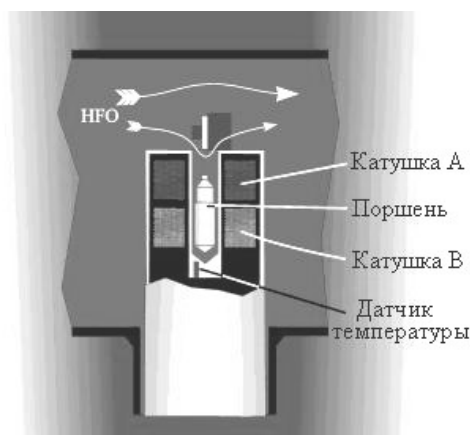


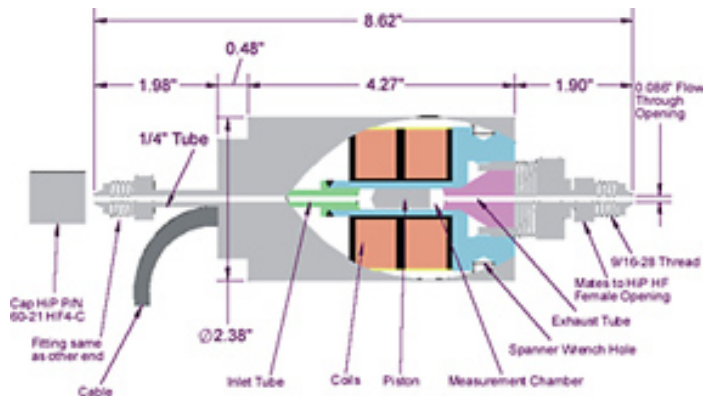
Рис. 2.3. Конструкція віскозиметра фірми Cambridge Applied Systems, Inc.

Як рухливий циліндр використовується капсула, переміщувана у вимірювальній камері за допомогою електромагнітної системи, що складається з двох котушок. Ці ж котушки є датчиками положення капсули. Вихідним параметром є час переміщення капсули у вимірювальній камері, що зв'язано з в'язкістю певною залежністю.

Представником цілої «лінійки» віскозиметрів для лабораторних досліджень і контролю в'язкості в потоці ПС СЕУ є дослідницький віскозиметр високого тиску SPL440, зовнішній вигляд і конструкція якого показані на рис. 2.4.



а)



б)

Рис. 2.4. Віскозиметр високого тиску SPL440: а - зовнішній вигляд, б – конструкція

Технологія виміру, застосовувана в цьому приборі, заснована на електромагнітній концепції. Дві котушки переміщують поршень назад і вперед при постійному зусиллі. Власна електронна схема аналізує час подвійного проходу поршня для виміру абсолютної в'язкості. Убудований датчик температури (RTD) визначає фактичну температуру в камері добору проб. Рідина протікає через трубку внутрішнім діаметром 0,072 дюйма. В'язкість може бути обмірювана при невеликих витратах рідини чи в статичних умовах. Система вимірює в'язкість, температуру і в'язкість з компенсацією температури.

Інформаційна система виміру в'язкості є закінченим пристроєм і складається з блоку електроніки і датчика в'язкості.

Блок електроніки (модель BCC-324 Visco Pro 2000) у корпусі настільного виконання. Постачений цифровим дисплеєм для відображення вимірюваних величин, а також має стандартний аналоговий вихід 4-20 мА, цифровий інтерфейс RS-232. Убудований мікропроцесор дозволяє робити реєстрацію даних, автоматичне калібрування системи. При перевищенні заданого рівня в'язкості включається аварійний сигнал.

Датчик в'язкості (модель SPL440) установлюється на насос високого тиску через типову систему. Рекомендовані швидкості потоків 0-0,33 м/с. SPL440 розрахований на безупинну роботу при тиску до 20000 фунт/дюйм² і випробуваний

статичним тиском до 30000 фунт/дюйм².

Таблиця 2.1.

Технічні характеристики

повний діапазон	від 0,2 до 10000 сПз
діапазони в'язкості	0,2-2 сПз, 0,25-5 сПз, 0,5-10 сПз, 1-20 сПз, 2,5-50 сПз, 5-100 сПз, 10-200 сПз, 25-500 сПз, 50-1000 сПз, 100-2000 сПз, 250-5000 сПз, 500-10000 сПз
точність	±1,0% повної шкали
відтворюваність	±0,8% показання
температурний датчик	Платиновий термометр опору
матеріали, що змочуються	Інконелй 718
макс. розмір часток	25-360 мікрон
макс. температура	190°C
макс. тиск	20000 фунт/дюйм ²
стандартна довжина кабелю	5 м
Вихідний сигнал	
аналоговий	4-20 мА
цифровий	інтерфейс RS-232

Особливості:

- не містить ртуті;
- вимагає менш 2мл для заповнення;
- тиск до 20000 фунт/дюйм²;
- аналоговий і/чи цифровий вихід;
- легка установка;
- не вимагає обслуговування;
- індикація в'язкості в сПз чи сст
- індикація температури в °C чи в °F .

Однак, володія цілим рядом переваг, у цій системі є наступні недоліки, суть яких полягає в наступному:

При вимірі в'язкості важкого палива можливо коксування, утворення лаку на

поверхні деталей. Виробник же рекламує, що немає необхідності в обслуговуванні даного датчика.

Зусилля переміщення поршня постійне, але для ДВС характерні види зусиль, що змінюються, і навантаження, особливо в момент пуску двигуна і на реверсах - моментах інтенсивного зносу і поломок.

2.3. Віскозиметри і реометри на ротаційному методі

Для одержання можливості виміру в'язкості палива в широкому діапазоні швидкостей, а саме, вивчення в'язкості тонких прошарків рідини між парами тертя колективом під керівництвом Б.А. Алтоіз [49] був сконструйований ротаційний віскозиметр (рис. 2.5).

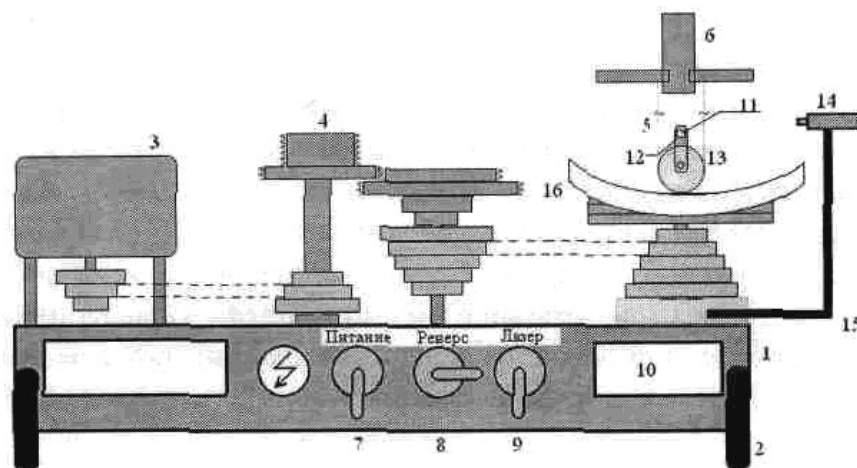


Рис. 2.5. Ротаційний віскозиметр із біфілярним підвісом для дослідження реологічних властивостей тонких прошарків технічних мастил і палива: 1 – підставка; 2 - регулювальні стійки; 3 - синхронний електродвигун; 4 - шестерня і пасова передачі; 5 - біфілярний підвіс; 6 - стійки верхнього кріплення тросів біфілярного підвісу; 7, 8, 9 - тумблери включення живлення, реверса й освітлювача; 10 - вікно для доступу гвинтів натягу пасових передач; 11,12 дзеркало підвісу в оправі; 13 - шків біфілярного підвісу; 14 - лазерний освітлювач; 15 - стійка освітлювача; 16 – триботехнічна пара

В основу установки покладений метод ротаційного циліндричного віскозиметра. Виміри на приборі проводяться методом завдання постійної частоти (від 0,05 до 3,3 Гц) обертання зовнішнього циліндра ($R_n \sim 3 \cdot 10^{-3}$ м). Межі виміру в'язкості $5 \cdot 10^{-3} \div 1$ Па·с; швидкостей деформації $50 \div 4 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹. Вимірником моменту, що крутить, служить біфілярний підвіс з регульованою чутливістю. Прилад постачений набором змінних внутрішніх циліндрів різних розмірів, що дозволяє змінювати товщину прошарку рідини до 50 мкм. Обертання зовнішнього циліндра забезпечується реверсивним синхронним двигуном із двоступінчастим редуктором і двома пасовими передачами.

Для розширення можливостей пристрою по величині товщини вимірюваних прошарків рідини передбачене використання вимірювальних поверхонь у формі притертих друг до друга конусів і прецизійного регулювання зазорів між ними.

Недоліки такої конструкції:

- великі маса-габаритні показники;
- наявність шківів, що можуть прослизати;
- неможливість плавної зміни швидкості обертання триботехнічної пари.

На ринку ж присутній віскозиметр ротаційний (ВР) МТ 201 від ГП "ЦДУ ТЭК" [50], який призначений для експресного виміру в'язкості рідких "ньютонівських" і не ньютонівських середовищ, побудови і реєстрації реологічних кривих. Пристрій дозволяє робити іспит в нестационарних умовах зрушення.

Таблиця 2.2.

Технічні характеристики

Момент, що крутить, мНм	0,1 – 20
Дозвіл по моменті, що крутить, мНм	0,05
Кутова швидкість обертання, хв (с ⁻¹)	0,7- 800
Діапазон температур, °С	-20.....+180
Діапазон швидкостей зрушення, с (с ⁻¹)	1-4000
Діапазон напруги зрушення, Па	1 – 20000
Діапазон в'язкості, Па·с	0.001 – 2000
Номинальна робоча напруга, В	12
Споживана потужність, Вт	10-20
Габаритні розміри, мм	160x230x500
Вага, кг	5

Віскозиметр також заснований на ротаційному принципі виміру, створює задану швидкість зрушення і реєструє напругу зрушення. Як чуттєві елементи використовуються коаксіальні циліндри, конуси і рівнобіжні пластинки.



Рис. 2.6. Віскозиметр ротаційний (ВР) МТ 201

Однак, конструкція віскозиметра на рис. 2.5 громізка і дозволяє використовувати віскозиметр тільки в лабораторних дослідженнях, віскозиметр МТ 201 може вимірювати в'язкість теж тільки в лабораторних умовах.

На ринку присутній цілий ряд віскозиметрів за аналогічною схемою [51, 52, 53].

Загальний недолік — немає можливості проведення вимірів в'язкості в безупинному потоці, а також необхідність декількох зондів для покриття всіх діапазонів в'язкості.

Інтерес представляє гама віскозиметрів, що крім одержання коефіцієнтів в'язкості дозволяють будувати реологічні характеристики. Розглянемо промисловий потоковий віскозиметр заглибного типу ТТ-200 (рис. 2.7) [54], ротаційний з концентричними циліндрами, який монтується на фланці безпосередньо в резервуар під атмосферним чи підвищеним тиском.

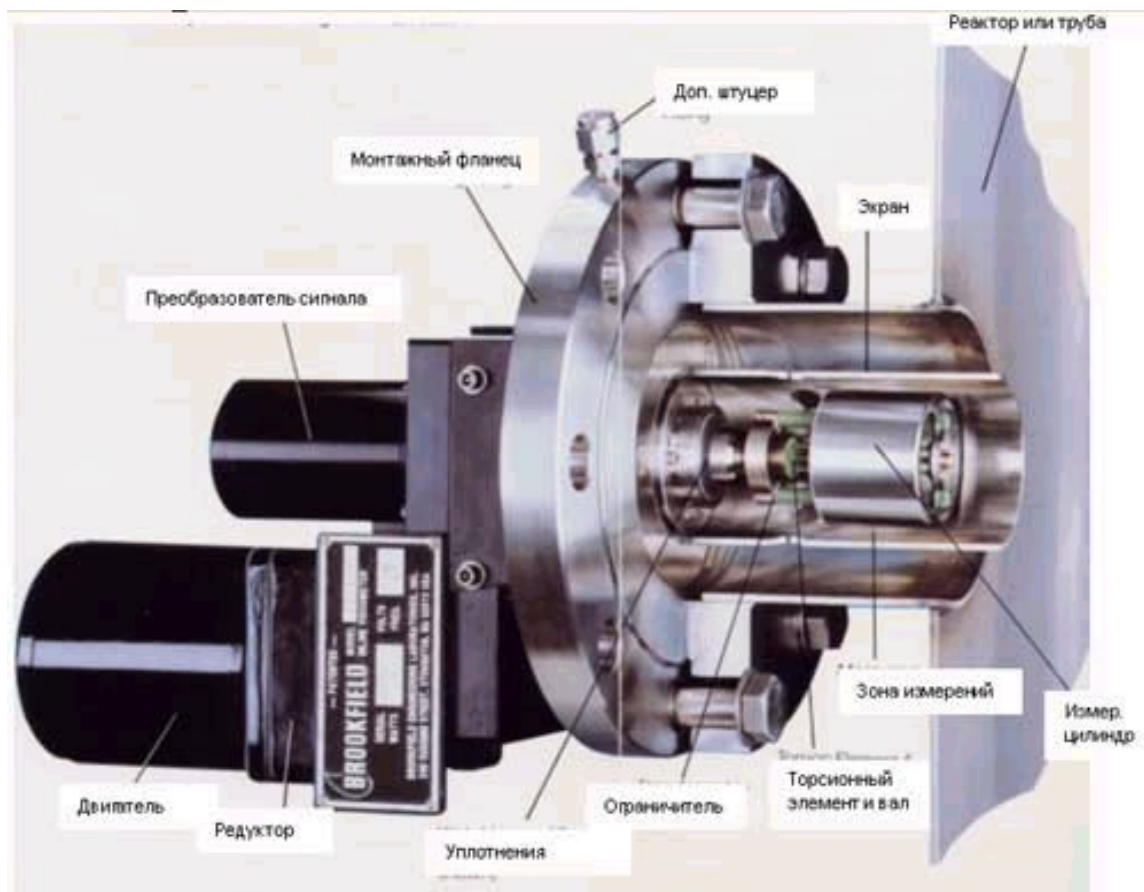


Рис. 2.7. Конструкція потокового віскозиметра заглибного типу ТТ-200

Прилад вимірює в'язкість по в'язкістному гальмуванню (обертальному відхиленню) на обертовому ковпачку чи шпинделі, встановленому на торсіонному елементі. Для захисту компонентів, що змочуються, від ушкодження й установки керованої коаксіальної геометрії виміру чуттєвий циліндр торсіонного елемента оточує екран. Ця геометрія забезпечує керовану швидкість зрушення і точні показання вимірів в'язкості, засновані на відношенні пропорційності співвідношення в'язкості для напруги зрушення / швидкості зрушення.

Головна особливість ТТ200 - запатентована вимірювальна система з трубкою крутіння. Ця конструкція цілком ізольована від торсіонів і тисків, що ущільнюють, на вимірювальний циліндр так, щоб тільки гальмування було причиною кутового відхилення, що вимірюється перетворювачем. ТТ200 дозволяє надійно вимірювати в'язкість майже всіх типів рідин з дуже високою точністю і відтворюваністю (± 0.5 % шкали).

Таблиця 2.3.

Характеристики потокового віскозиметра заглибного типу ТТ-200

Діапазон в'язкості	10-500000 сПз
Діапазон швидкостей зрушення	10-1000 с ⁻¹
Діапазон температур	-40°C мін., 150°C макс
Діапазон тисків	0-14 атм макс.
Повторюваність	±0.5% шкали
Вихід	4-20 мА
Електроживлення	15В 50/60 Гц. 100 Вт
Монтаж	нерж. 300 4" фланець #150
Двигун	Одношвидкісний синхронний
Вага	15 кг

До особливостей даного віскозиметра відносяться: відсутність сприйнятливості до змін температури, тиску, ламінарності потоку чи щільності. Не вимагає камери для зразка - монтується за допомогою фланцевого з'єднання безпосередньо в резервуар чи у трійник діючого трубопроводу. Робота в діапазоні тисків від зниженого до 34 атм. Унікальна конструкція усуває тертя у вимірювальному механізмі. Виготовлений з нержавіючої сталі для стійкості до реакційних середовищ. Тефлонове покриття полегшує чищення і захищає чуттєві елементи від корозії і впливу реагентів і розчинників. Можливість модифікації для сполучення робочих характеристик з типом вимірюваного матеріалу. Вимір в'язкості при визначеній швидкості зрушення, що визначається властивостями тестуємого матеріалу.

Інтерес представляє потоковий віскозиметр зондового типу ТТ-220 [55] уставного типу, який використовується для безупинного контролю в'язкості нафти, нафтопродуктів, водно-нафтових емульсій, бурових розчинів і рідин, застосовуваних для гідророзриву шару. Віскозиметр уставляється безпосередньо в резервуар. Завдяки невеликій вазі, прилад може переноситися вручну. Віскозиметр може бути укомплектований додатковим датчиком тиску і температури.

Таблиця 2.4.

Характеристики віскозиметр зондового типу ТТ-220

Діапазон в'язкості:	0-1000 сПз чи за замовленням
Діапазон температур:	110°C макс
Діапазон тисків:	Атмосферне
Повторюваність:	±0.5% шкали
Вихід:	4-20 мА (макс. 600 Ом)
Електроживлення:	115 чи 230 В/50 чи 60 Гц/100 Вт*
Двигун:	Одношвидкісний синхронний
Довжина зонда:	81 см х 100 см х 51 мм діаметр*
Матеріал деталей, що змочуються:	Нерж. 300



Рис. 2.8. Потоковий віскозиметр зондового типу ТТ-220

Потоковий віскозиметр ТТ-100 [56] використовується для безупинного контролю в'язкості нафти, нафтопродуктів, водно-нафтових емульсій, бурових розчинів і рідин, застосовуваних для гідророзриву шару, при їхньому перекачуванні по трубопроводах. Віскозиметр установлюється на основній чи обвідній трубі за допомогою власних фланців.

Поміщений у потік тестуємого продукту, віскозиметр видає лінійний сигнал 4-20 мА, пропорційний в'язкості і сумісний зі стандартним промисловим контрольним устаткуванням, самописами, реєстраторами і комп'ютерами.

При роботі потік тестуємого продукту подається у вимірювальну камеру приладу (рис.2.9), у якій знаходиться обертовий циліндр чи ротор, що приводиться в рух синхронним двигуном. Обертання ротора створює доцентрову силу, що змушує

продукт текти у вимірювальний зазор між ротором і статором. Грузле гальмування продукту на статорі передає опір на гнучкий елемент і трубку крутіння, кутове відхилення яких реєструється ротаційним перетворювачем. Цей сигнал обробляється електронікою, що видає лінійний сигнал 4-20 мА, пропорційний в'язкості.

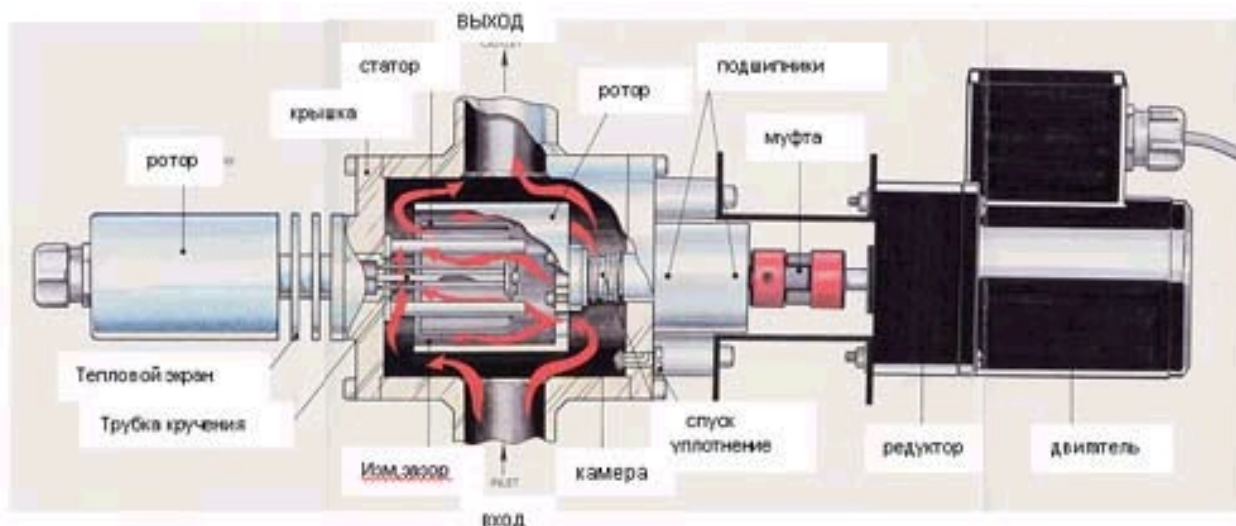


Рис. 2.9. Поточний віскозиметр ТТ-100

Таблиця 2.5.

Характеристики Поточний віскозиметр ТТ-100

Діапазон швидкостей зрушення:	10-500 000 сПз 10-1 000 сек-1
Діапазон температур:	-40°C хв., 150°C макс.
Діапазон тисків:	0-14 атм макс.
Швидкість потоку:	88 л/хв макс.
Повторюваність:	±0.5% шкали
Вихід:	4-20 м
Електроживлення:	15V 50/60 Гц. 100Ут
Камера:	нерж. 300.1" трубного різблення (внутр.) вхід і вихід
Двигун:	одношвидкісний синхронний
Загальні розміри:	13 x 13 x 43 см
Вага:	15 кг

Реометри Brookfield PVS [57], що використовуються для контролю і керування якістю при реологічних іспитах. Призначені для виміру в'язкості рідких ньютонівських середовищ, а також побудови і реєстрації реологічних кривих не ньютонівських середовищ. Реометри моделі PVS розроблені для проведення вимірів

в умовах підвищеного тиску. Компактність приладу дозволяє використовувати його в складі стаціонарної чи мобільної лабораторії. Реометр PVS є ідеальним інструментом для дослідження реології бурових розчинів і рідин, застосовуваних для гідророзриву шару.

Сконструйований для роботи в несприятливих умовах. Відтворює умови технологічного процесу: шпара, змішування, теплова обробка, реактори.

Потокові промислові віскозиметри Brookfield дозволяють одержати інформацію про відповідність реології рідин гідророзриву встановленим характеристикам. Ці прилади забезпечують потокові (у режимі реального часу) виміри в'язкості гелів, подаваних під тиском зі змішувачів у призабойну зону шпари. Реометри та віскозиметри Brookfield забезпечують необхідну точність виміру в'язкості рідин гідророзриву за певних умов зрушення, у відповідності зі стандартом API.

Можлива геометрія з потрібним вимірювальним зазором для збільшення чутливості при вимірах низької в'язкості. Швидке і просте налаштування. Комплектується з вибором шпинделя, вимірювальної чашки, програмного забезпечення і комп'ютера.

Таблиця 2.6.

Характеристики реометра PVS

Діапазон в'язкості	0,5-36000000 сПз
Діапазон температур	-40°C хв., 200°C макс
Діапазон тисків:	70 атм макс.
Повторюваність:	±0.5% шкали
Вихід:	RS-232



Рис. 2.10. Реометр PVS

Віскозиметр ротаційний типу ВСН-3 призначений для виміру реологічних характеристик пружногрузлопластичних тіл (наприклад, бурових рідин, лакофарбових матеріалів, нафтопродуктів і т.д.), а також для визначення в'язкості ньютонівських рідин.

Принцип дії приладу заснований на вимірі напруги зсуву у контрольованому середовищі, розташованому між обертовою зовнішньою гільзою і вимірювальним циліндром, зв'язаним з циліндричною пружиною крутіння.

Віскозиметр складається з корпусу, вимірювальної системи, привода і забірника проби для випробуваного середовища. Вимірювальна система кріпиться до верхньої плати на двох опорах і являє собою вимірювальний циліндр, розміщений на осі.

Привод віскозиметра складається з електродвигуна типу ДСД-2, двох швидкісного двигуни типу ДСГ-1, шестірень і вала.

Технічні характеристики: Швидкість привода віскозиметра 0,2; 200; 300; 400; 600 об/хв. Межі вимірів дотичних напружень зрушення (діапазон виміру граничної статичної напруги зрушення): для пружини № 1 $0 \div 45$ Па; для пружини № 2 $0 \div 90$ ПА. Межі вимірів динамічної в'язкості ньютонівських рідин (при 200 об/хв): для пружини №1 $0,001 \div 0,2$ Па·с; для пружини №2 $0,001 \div 0,4$ Па·с. Частота обертання гільзи 0,3; 200; 300; 400; 600 об/хв. Живлення - від мережі перемінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц; від дизельгенераторних установок: напругою 220 В, частотою (50 ± 2) Гц. Споживана потужність не більш 65 Вт. Габаритні розміри 285x205x540 мм. Маса 18 кг.

Імовірність безвідмовної роботи при довірчій імовірності 0,8 складає 0,99. Середній технічний ресурс 10 000 г. Середній час відновлення 8 г. Термін служби приладу не менш 6 років.

Умови експлуатації: температура навколишнього повітря $10 \div 35$ °С, відносна вологість $30 \div 80$ %.

Усім перерахованим вище віскозиметрам-реометрам притаманні наступні недоліки: наявність редуктора, неможливість плавної зміни швидкості у всьому діапазоні деформацій зсуву, можливість заклинювання на механічній стороні і, відповідно, наявність складної системи захисту, підвищені маса-габаритні розміри.

На суднах же використовується віскозиметр із пневматичним перетворювачем [58] (рис. 2.11), в основу якого покладений метод співвісних дисків. Вал (2) мотора обертає з постійною частотою обертаючу ведучу шайбу (1), що має радіальні пази з вигнутим назовні краєм (рис. 2.11, а). Лопатки ці працюють як лопатки насоса, постійно проганяючи через зазор (5) між дисками частина палива, що протікає. Унаслідок внутрішнього тертя між частками палива на поверхні відомої шайби (4) виникає момент, що крутить, і розвертає вихідний валик (3) вимірника на кут, пропорційний поточному значенню в'язкості і зазору S між шайбами. Цей момент передається на перетворювач (рис. 2.11, б), вихідний пневматичний сигнал (14) якого пропорційний в'язкості.

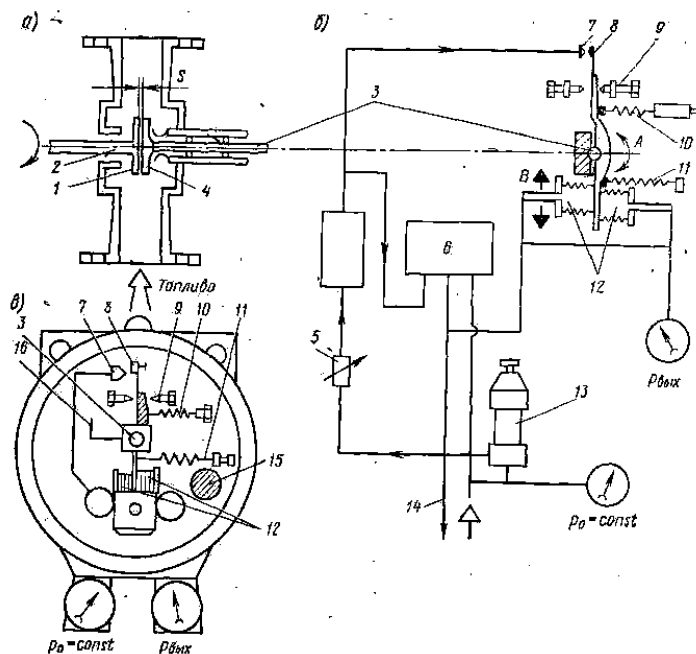


Рис. 2.11. Система автоматичного регулювання в'язкості палива BUCK-21П (VISK-21P): а - вимірник; б - схема роботи; у – пневматичний перетворювач (кришка знята)

Площина, у якій повертається важіль заслінки (8) перетворювача, перпендикулярна площини вихідного валика (3) (на рис. 2.9, б ці площини сполучені). При збільшенні в'язкості зазор між соплом (7) і заслінкою (8) зменшується і сигнал на вході підсилювача (6) збільшується; у такому ж ступені збільшується і керуючий сигнал на виході (14), що також передається в сильфони

(12) зворотного зв'язку, (5) – пневматичний опір. Осі сильфонів зміщені таким чином, що момент, який розвивається ними на важелі (8), протилежний за знаком моменту (4) на валику (3) вимірника; рівновага відновлюється, коли ці моменти врівноважують один одного. Конструкцією передбачена можливість зсуву лівого сильфона, як показано стрілкою (В), що забезпечує регулювання ступеня зворотного зв'язку (коефіцієнта підсилення вимірника). Зі зменшенням відстані між осями сильфонів коефіцієнт підсилення зростає, і навпаки. Початкову точку діапазону виміру - нульову точку - можна відрегулювати натягом пружини (10); пружина (11) - компенсаційна.

Вихідний сигнал (14) вимірника є лінійною функцією в'язкості палива.

Щоб уникнути перегріву включення стиснутого повітря через редуційний клапан (13) варто робити, коли вимірник тільки починає прогріватися (гранична температура 70° С).

Вимірник в'язкості постачаний тепловим вимикачем, оскільки не рекомендується працювати при занадто низьких чи надто високих значеннях температури, який спрацьовує при запуску двигуна і нижнім значенні заданої температури і на його зупинку у випадку погрози перевантаження. Таким чином, віскозиметри з електромоторами вимагають ланцюгів захисту від короткого замикання на механічній стороні, що приводить до збільшення габаритних розмірів і шуму.

Перейдемо до розгляду віскозиметрів, робота яких заснована на крутильних коливаннях

2.4. Віскозиметри на крутильних коливаннях

Інтерес представляє експериментальна установка [59], основною частиною якої є високودобротний (добротність $Q=8500$) лабораторний камертон (1) (власна частота $f=1600$ Гц), що представляє собою П-образну металеву рамку. Камертон закріплюється в механічний затискач (2). Для запобігання витоку енергії коливань контакт стрижня (3) і затискача (2) здійснюється через механічний ізолятор (4).

На поверхню камертона (на його «ніжки») наносяться краплі (5) і (6)

досліджуваної рідини, розміри яких для більшої точності можуть бути обмірювані окуляром мікрометром мікроскопа (7). Коливання камертона збуджуються дерев'яним молотком (8) і реєструються за допомогою мікрофона (9), підключеного до комп'ютера (10) (див. рис. 2.12).

Принцип дії полягає в наступному: при коливанні камертона і, отже, підніжжя краплі по краплі нагору біжить грузла хвиля, обумовлена в'язкістю серед (краплі). Така хвиля є поперечною: частки серед коливаються горизонтально, тобто перпендикулярно напрямку поширення коливань (хвиля біжить нагору).

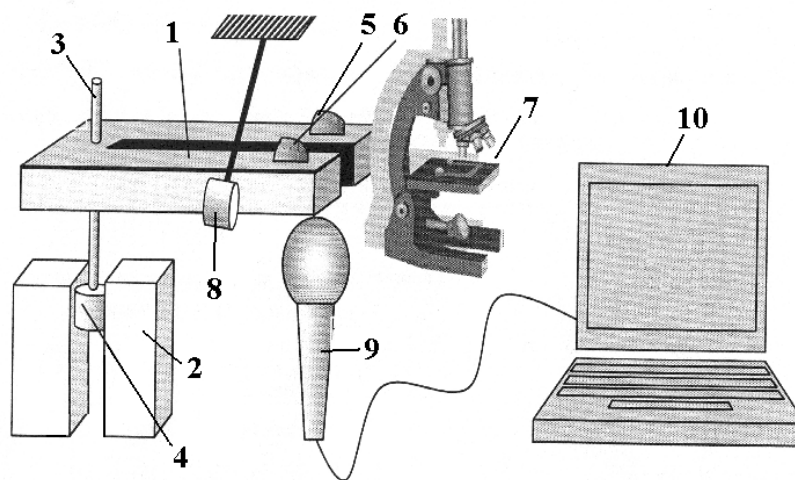


Рис. 2.12. Експериментальна установка для виміру динамічної в'язкості рідини по загасанню коливань камертона

Основне рівняння динаміки для шару рідини масою Δm , що робить коливання під дією результуючої сил грузлого тертя з боку шарів, які розташовані нижче і вище (сили поверхневого натягу в даній моделі не враховуються), запишеться у виді:

$$F_X(z + \Delta z, t) - F_X(z, t) = -\Delta m \frac{\Delta V_X(z, t)}{\Delta t},$$

де елемент маси $\Delta m = \rho \cdot S \cdot \Delta z$ (ρ - щільність рідини, S - площа шару, Δz - товщина шару).

Динамічна в'язкість зв'язана з вимірюваними експериментально величинами й ефективним коефіцієнтом твердості камертона наступним виразом:

$$\eta = \frac{8(k_{ef})^2}{\rho\omega^5} \left(\frac{(\gamma - \gamma_0)}{S} \right)^2, \quad (2.6)$$

де $(\gamma - \gamma_0)$ - різниця декриментів загасання з краплею і без неї, S - площа краплі, k_{ef} - ефективний коефіцієнт твердості камертона.

Вимір динамічної в'язкості η зводиться до перебування кута нахилу графіка залежності $\eta(S)$ декрименту загасання від площі краплі. Ефективний коефіцієнт твердості $k_{эфф}$ камертона знаходиться по залежності $\eta(S)$ для рідини з відомою в'язкістю.

Основним недоліком погрішності є неточність виміру площі краплі (при досить великих розмірах її форма стає неправильною).

Технічні характеристики:

- обсяг проби менш 1 мл;
- діапазон вимірів $\sim 0,1$ -5000 мПа·с;
- тимчасовий дозвіл (при роботі в режимі реального часу) ~ 5 с.;
- точність вимірів 5-10 %;
- інтервал робочих температур обмежений тільки температурами фазових переходів досліджуваних рідин і робочим діапазоном роботи мікрофона.

На рис. 2.13 показана залежність в'язкості η від різниці декриментів загасання $(\gamma - \gamma_0)$ у перерахуванні на краплю одиничної площі для різних розчинів гліцерину у воді. Точки - експериментальні дані, крива - їхня параболічна апроксимація.

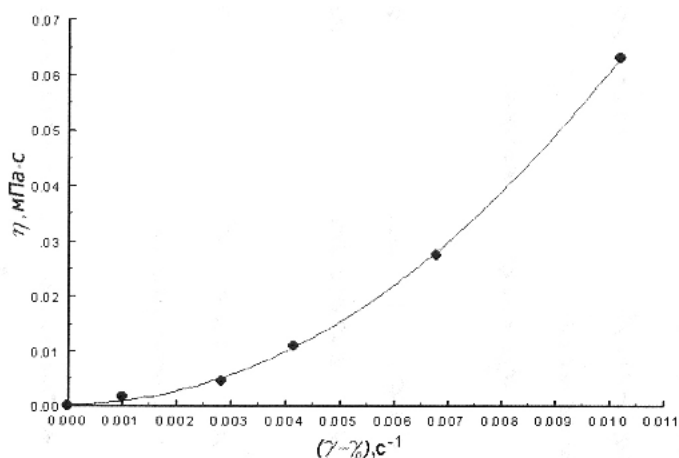


Рис. 2.13. Залежність в'язкості η від різниці декриментів загасання $(\gamma - \gamma_0)$ для розчинів гліцерину у воді з різним процентним умістом

До достоїнств даної установки по визначенню динамічної в'язкості рідини по загасанню коливань високодобротного камертона є: малі обсяги проби (близько 1 мл), можливість роботи в режимі реального часу (тимчасовий дозвіл порядку 5 с), широкий діапазон вимірів (0,1-5000 мПа·с). Простота конструкції робить описану лабораторну модель віскозиметра зручною в налаштуванні і більш доступною, чим прилади, що промислово випускаються. Але в умовах судна така установка не прийнятна.

У цьому ж напрямку на більш ранньому етапі були проведені дослідження [60, 61, 62, 63, 64, 65], де використовувалася пластинка з монокристала кварцу, що володіє малою коливальною потужністю. Це приводило до звуження діапазону виміру.

Тому, надалі поширення одержали віскозиметри з магнітострикційної пластинкою, що жорстко закріплюється у вузлі коливань. Половина пластинки знаходиться в досліджуваній рідині, а інша половина охоплюється котушкою збудження (рис. 2.14).

Напівхвильова магнітострикційна пластинка (1) довжиною 102 мм, шириною 3 мм і товщиною 0,2 мм упаяна в дно зонда. Основна частота власних коливань пластинки, обумовлена її довжиною, складає близько 28 кГц.

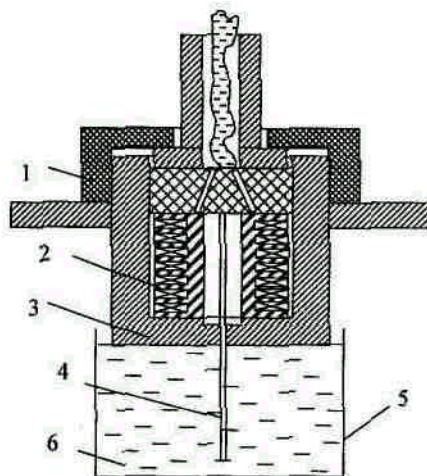


Рис. 2.14. Конструкція ультразвукового віскозиметра Рича і

Рота: 1 - гайка; 2 - збудлива котушка; 3 - корпус; 4 - магнітострикційна пластина; 5 - посудина; 6 - рідина

Недолік магнітострикційних перетворювачів - великі габарити, вага, енергоспоживання.

Зонд являє собою металевий герметичний циліндр, у якому змонтована котушка зі збудливою обмоткою. Половина пластинки виступає, половина охоплюється збудливою обмоткою усередині зонда. На збудливу обмотку з генератора імпульсів (див. блок-схему віскозиметра, рис. 2.15) подається імпульс малої тривалості (50 мкс), що деформує пластинку. У пластинці виникають експонентні загасаючі коливання, що наводять у котушці (2) е.д.с., пропорційну амплітуді і частоті коливань пластинки. Ця е.д.с. підсилюється, детектується і подається на вхід спускової схеми (5), що спрацьовує, коли амплітуда коливань пластинки і, отже, величина сигналу на вході підсилювача (3) зменшиться до визначеного значення. З входу спускової схеми (5) сигнал подається на імпульсний генератор (6), де формується імпульс визначеної тривалості й амплітуди, відкіля він надходить на збудливу котушку (2). Частота повторення імпульсів залежить від в'язкості і вимірюється електронним частотоміром (7), показання якого можуть бути проградуйовані в одиницях в'язкості.

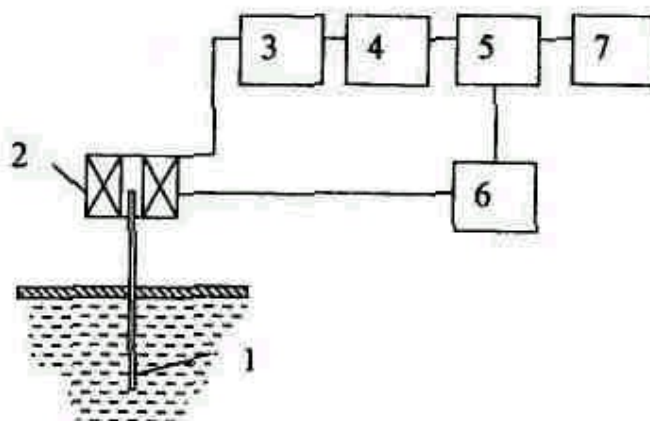


Рис. 2.15. Блок-схема ультразвукового віскозиметра: 1 - магнітострикційна пластинка, 2 - котушка збудження, 3 - підсилювач, 4 - схема порівняння, 5 - спускова схема, 6 - імпульсний генератор, 7 - електронний частотомір

Високою ефективністю володіють ультразвукові віскозиметри з п'єзоелементами з п'єзокераміки [66]. Схема такого віскозиметра показана на рис.

2.16 [67, 68].

У п'єзокерамічній пластині (2) за допомогою генератора імпульсів (1) збуджують загасаючі коливання, число яких рахують за допомогою лічильника (3).

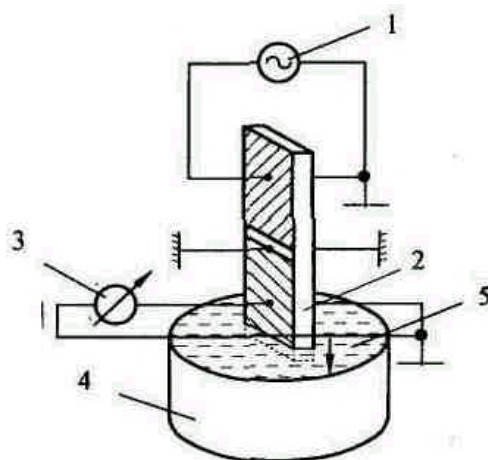


Рис. 2.16. П'єзокерамічний віскозиметр: 1 - генератор імпульсів; 2 - п'єзоелемент; 3 - частотомір; 4 - посудина; 5 - рідина

Загасання цих коливань залежить як від утрат R_1 у самому п'єзоелементі (внутрішнього тертя в п'єзокераміці), утрат на випромінювання R_2 , що залежать від співвідношення акустичних опорів ($\rho c S$) п'єзокераміки і рідини, в'язкості рідини (R_3).

Число вільних (загасаючих) коливань у секунду [72]:

$$N = f_{сл} f_p \frac{2L}{R_1 + R_2 + R_3} \ln \frac{l}{a}, \quad (2.7)$$

де $f_{сл}$ - частота проходження імпульсів; f_p - резонансна частота, $f_p = 1/T$; L - еквівалентна індуктивність п'єзоелемента.

Внутрішнє тертя R_1 п'єзокераміки в діапазоні робочих температур (10 – 35 °С) і тисків (760 ± 30 мм рт. ст.) є величиною постійної [69].

Утрати на випромінювання R_2 залежать від глибини занурення п'єзоелемента (тобто від площі контакту S з рідиною), а також від щільності рідини $\rho_{ж}$ і швидкості звуку в ній $c_{ж}$, що повинно бути враховане при вимірах.

На рис. 2.17, а приведена залежність числа загасаючих коливань від глибини занурення п'єзоелемента в рідину, що вимагає строгої фіксації глибини занурення

для забезпечення точності виміру. На рис. 2.17, б приведена калібрована характеристика перетворювача з п'єзoeлементом діаметром 5 і довжиною 50 мм. $N_{\text{отн}} = f(\eta)$, побудована за результатами виміру в'язкості води ($\eta = 1,006$ сПз), касторової олії ($\eta = 997$ сПз), гліцерину ($\eta = 1450$ сПз), машинної олії ($\eta = 1500$ сПз).

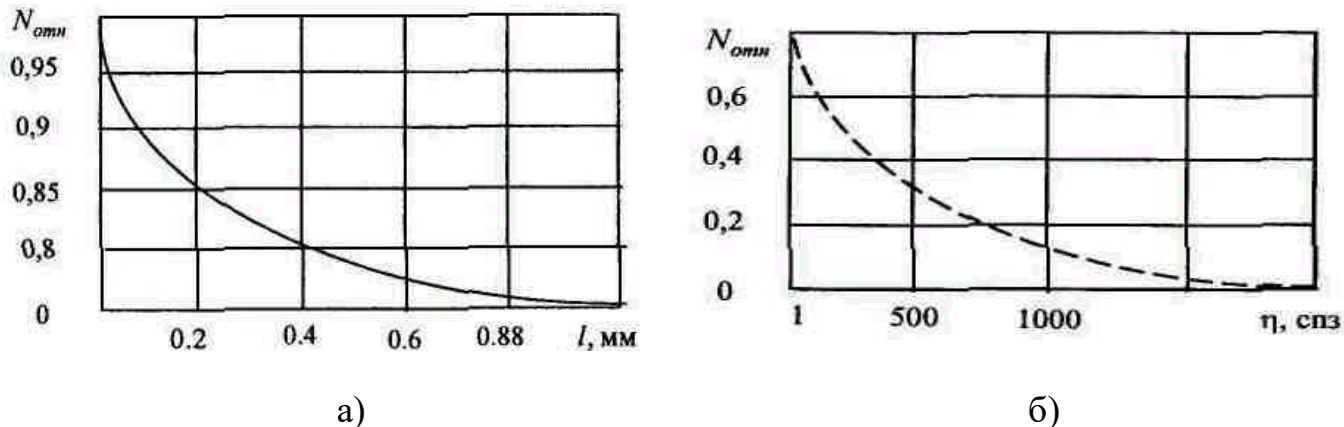


Рис. 2.17. Залежність числа коливань від глибини занурення (а) і калібрована характеристика перетворювача (б)

Виміри проводилися при температурі 20°C при зануренні на глибину 1 мм.

З рис. 2.17, б видно, що в цілому калібрована характеристика близька до залежності $1/x$, крім того, при великих значеннях в'язкості чутливість зменшується. Тому для виміру великої в'язкості необхідно збільшувати енергію коливального процесу. Для цього були використані ультразвукові концентратори [70], що представляють собою механічний трансформатор коливань. Результатом роботи типу концентраторів, принцип дії яких різний: фокусні чи височастотні, стрижневі чи низькочастотні, є амплітуда зсувів на вихідній стороні концентратора, що у K раз більше чим на вхідний (K - коефіцієнт передачі концентратора).

Деякі види перетворювачів в'язкості з ультразвуковими концентраторами представлені на рис. 2.18.

Відомо, [67] що при роботі коливальної системи (п'єзoeлементу чи концентратора) у повітрі виникає стояча хвиля, а при приміщенні системи в рідину, з'являється хвиля, що біжить і котра спричиняє ультразвукові втрати, що, у свою чергу, залежать від глибини занурення в рідину і співвідношення акустичних опорів.

На рис. 2.18 представлені конструкції перетворювачів в'язкості: а) східчастим з

порожнім внутрішнім профілем: 1 - генератор електричних коливань; 2 - вібратор у виді дискового п'єзoeлементу; 3 - вхідна система електродів; 4 - вихідна система електродів; 5 - східчастий концентратор з порожнім внутрішнім профілем; 6 - рідина; 7 - лічильник; б) порожнім: 1 - генератор електричних коливань; 2 - вібратор у виді дискового п'єзoeлементу; 3 - вхідна система електродів; 4 - вихідна система електродів; 5 - порожній концентратор; 6 - рідина; 7 - лічильник; в) східчастим: 1 - генератор електричних коливань; 2 - дисковий п'єзотрансформатор; 3 - східчастий концентратор; 4 - вхідна система електродів; 5 - вихідна система електродів; 6 - лічильник; 7 - посудина; 8 - рідина.

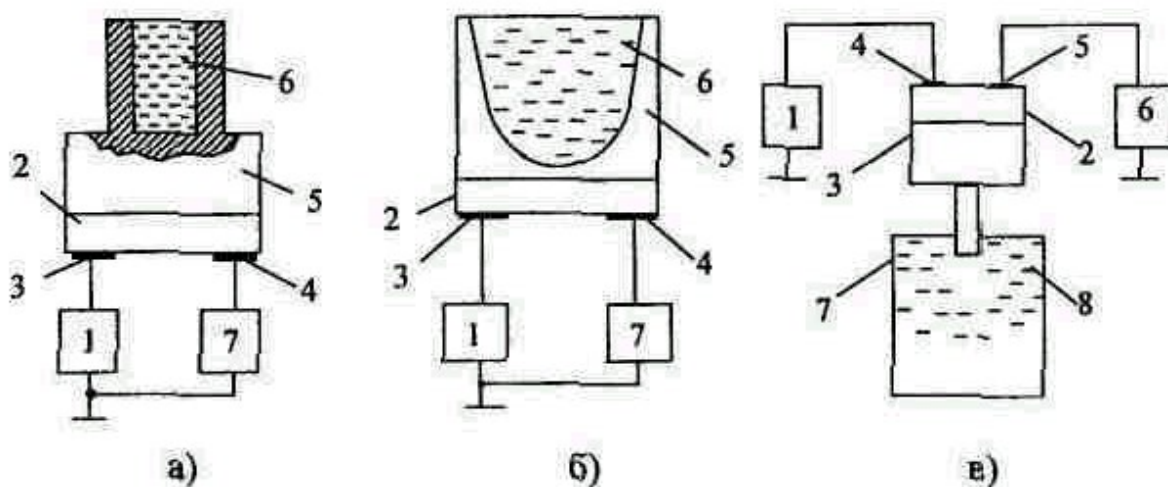


Рис. 2.18. Перетворювачі в'язкості з ультразвуковими концентраторами

Однак, у зонах концентратора, де існують максимальні амплітуди коливань, у рідині виникають кавітаційні пухирці, що спотворюють результати вимірів [71]. Тому, у [72] для виключення турбулентності і кавітації при прямуванні твердих тіл у рідині, необхідно забезпечити ламінарний режим з числом Рейнольдса значно менше критичного ($Re \ll 2300$) для трубопроводів [67]. У ряді конструкцій [72, 69] розділено перетворювач на вібратор і, з'єднаний з вібратором твердою тягою, зонд, що рухається в рідині і який зменшує погрішність вимірів, обумовлену ультразвуковими втратами.

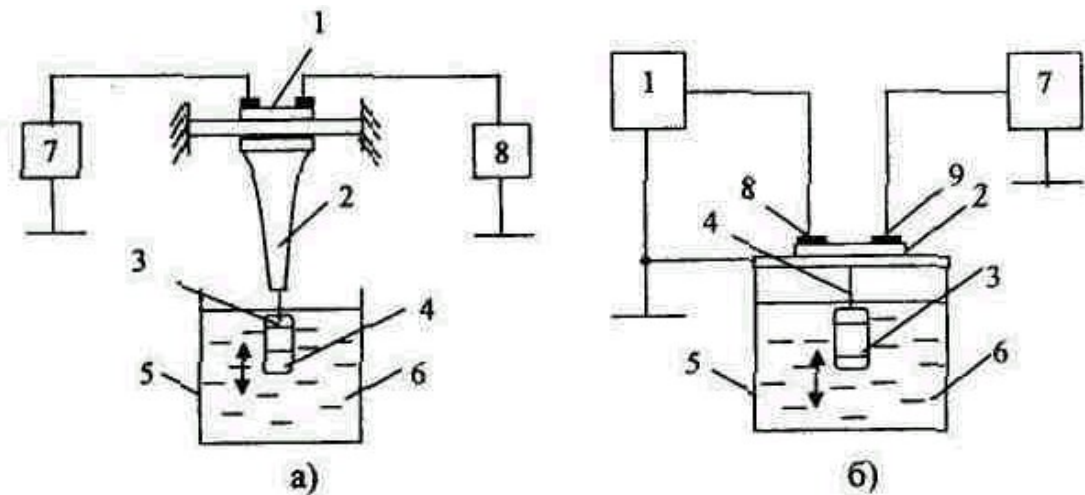


Рис. 2.19. Перетворювачі в'язкості з зондом: а) з ультразвуковим концентратором подовжніх коливань: 1 - п'єзоелемент; 2 - ультразвуковий концентратор подовжніх коливань; 3 - тверда тяга; 4 - зонд; 5 - посудина; 6 - рідина; 7 - генератор електричних коливань; 8 - лічильник; б) з асиметричним біморфним п'єзоелементом і зондом у виді пластини: 1 - генератор електричних коливань; 2 - асиметричний біморфний п'єзоелемент - зонд; 4 - тверда тяга; 5 - посудина; 6 - рідина; 7 - лічильник

Таблиця 2.7.

Характеристики віскозиметрів

Параметр, Тип віскозиметра	Діапазон виміру в'язкості, П	Погрішність вимірів 5, %
Віскозиметр Ломоносова М.В.	1 - 10	10
Капілярний віскозиметр	1 - 100	5
Ультразвуковий віскозиметр фірми Bendix Aviation Corporation	1 - $5 \cdot 10^2$	5
Ультразвуковий віскозиметр Рича і Рота по пат. №5947 (Японія)	1 - 10^2	5
п'єзокерамічний віскозиметр з ультразвуковим концентратором	1 - 10^3	10
п'єзокерамічний віскозиметр із зондом	1 - 10^3	$\leq 2,5$
Ультразвуковий віскозиметр з ультразвуковим концентраторним зондом	1 - 10^3	$\leq 2,5$

У перетворювачі з п'єзоелементом і концентратором крутильних коливань зонд виконують у формі тіла обертання (циліндра, кулі, еліпсоїда) [73, 74, 75, 76].

На наш погляд уваги заслуговує також віскозиметр на крутильних коливаннях

від VAF Instrument B. V., що займається дослідженнями і виробництвом приборів і систем керування для морської індустрії. У 2000 році широко почали робити віскозиметр ViscoSense, призначеного для визначення в'язкості палива в суднових енергетичних установках. Відповідно до заяви VAF Instrument B. V., у новому віскозиметрі закладені технології, що раніш не використовувалися в цій області [77].

Вимір в'язкості базується на загасанні вібрації тіла, що знаходиться в рідині. В основу теорії закладена залежність інтенсивності загасання коливань від в'язкості рідини. Чим вище інтенсивність, тим вище в'язкість рідини.

У приборі використовується чутливий елемент - тіло циліндричної форми, що коливально обертається навколо своєї осі з великою частотою. Ці коливання створюють хвилі зсуву в рідині. Характер загасання цих хвиль у залежності від відстані до циліндра, що їх генерує, показаний на рис. 2.20.

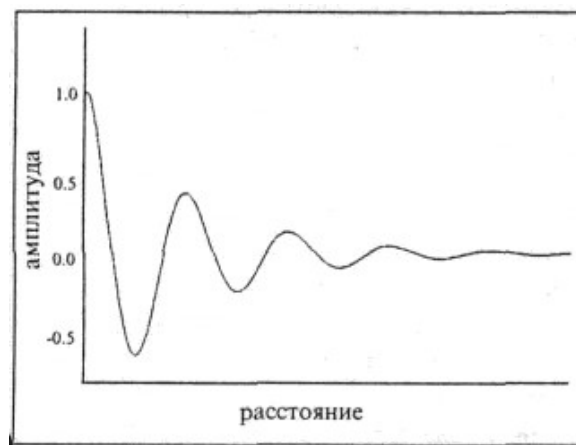


Рис. 2.20. Залежність інтенсивності загасання від в'язкості

Довжина цих хвиль тим більше, чим більше в'язкість рідини. Використання в даному віскозиметрі саме обертальних коливань має ряд серйозних переваг.

Хвилі зсуву, що виникають при таких коливаннях, загасають дуже швидко. Як результат - відсутність відбитих хвиль, що могли б вплинути на результати вимірів. У той же час такі коливання не вимагають якого-небудь переміщення рідини, тому витрати енергії на їхню генерацію мінімальні. Крім того, тому що більшість механічних вібрацій на судні є подовжніми, то вони не впливають на обертальний рух і не роблять впливу на результати вимірів.

Пристрій віскозиметра (рис. 2.21, а): вимірювальний прилад складається з

циліндра, виконаного з нержавіючої сталі, що з'єднаний із кріпильним диском, що служить для кріплення прибору за допомогою трубки, що скручується. Два п'єзоелектричних елементи знаходяться усередині циліндра. Один п'єзoeлемент вимірює амплітуду обертальних коливань циліндра, другий - надає рух самому циліндру. Трубка, що скручується, діє як пружина, керуючи напрямком обертання циліндра. Циліндр коливається з частотою, що є резонансною для даної системи (циліндр + трубка). Фактично віскозиметр є резонатором крутильних коливань, що працює зі своєю власною частотою.

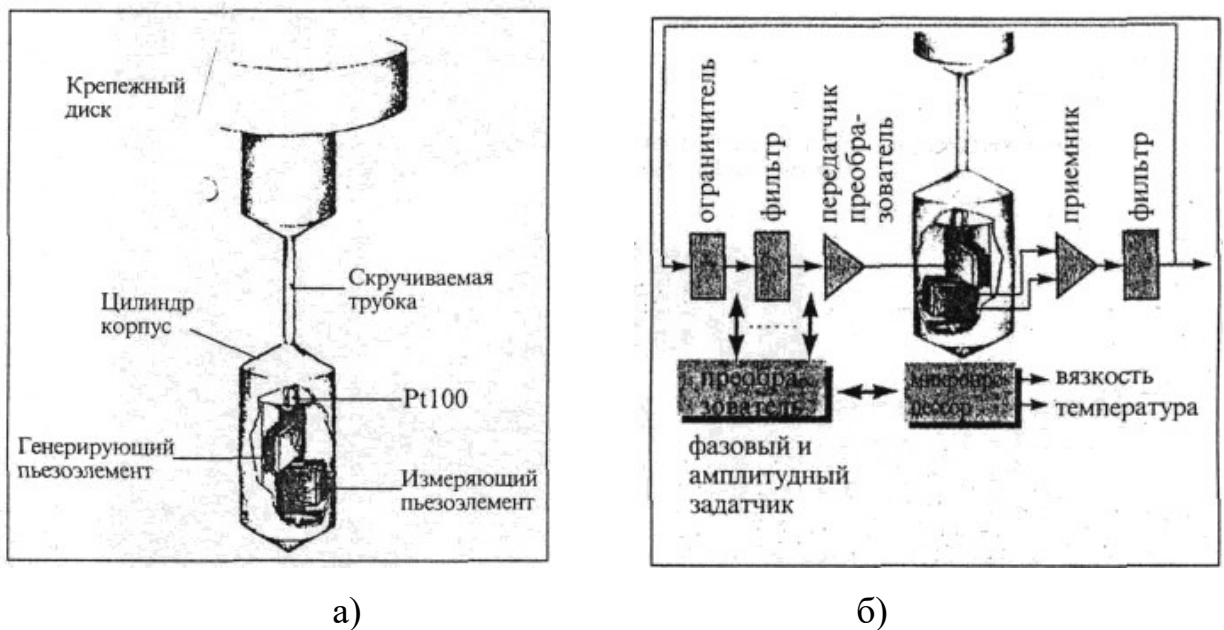


Рис. 2.21. Пристрій чутливого елемента (а) і схема віскозиметра (б)

Полірована поверхня циліндра практично не піддається забрудненню. У випадку ж забруднення поверхні очистка її не викликає великих проблем.

Простота конструкції полегшує установку внутрішніх п'єзoeлементів з дотриманням необхідної точності і якості.

Достоїнством такого технічного рішення є дуже мала споживана потужність і мінімальне використання дорогої електроніки і з'єднань.

Віскозиметр складається з описаного вище чутливого елемента, що керує і вимірює блоків. Взаємозв'язок різних компонентів системи показана на рис. 2.21, б.

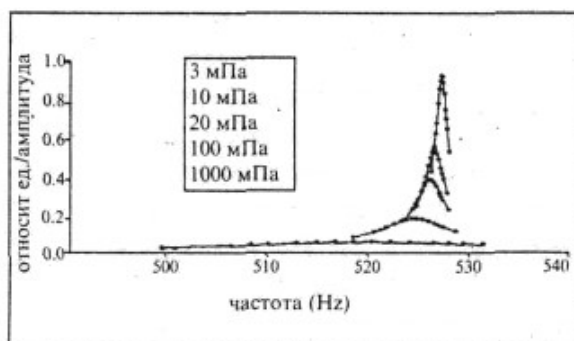
Циліндр приводиться в прямуювання двома ведучими п'єзoeлементами. Проходячи через відповідні перетворення, вихідний сигнал п'єзoeлемента, що

вимірює, також є вхідним сигналом ведучих п'єзоелементів. При цьому одержуємо замкнуту систему, у якій у результаті повернення обмірюваного сигналу здійснюється підтримка власної частоти коливань системи.

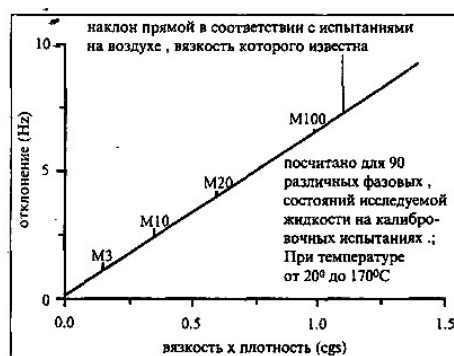
У результаті використання двох що вимірюють п'єзоелементів легко усунути можливі помилки у вимірах. Унаслідок такого рішення стало можливим значне спрощення електричної схеми віскозиметра. Малий вхідний сигнал, що використовується для створення малих коливально-обертальних рухів циліндра, приводить до того, що незначні моменти, що крутять і випробовувані трубкою, можуть гарантувати тривалий час експлуатації віскозиметра.

Метод, на якому засноване проведення вимірів коефіцієнтів в'язкості рідини, використовує зміну резонансної кривої чутливого елемента.

Зі збільшенням в'язкості рідини резонансна крива стає менш вираженою, причому максимум кривої зміщається у бік менших частот. При цьому зміна резонансної частоти виявляється пропорційною кореню квадратному зі значення в'язкості досліджуваної рідини (рис. 2.22, а).



а)



б)

Рис. 2.22. Метод проведення вимірів (а) і результати іспитів (б)

При виконанні вимірів запропонованим способом ми не залежимо від потужності вихідного сигналу елемента, що вимірює. Це робить систему нечутливою до погіршення стану п'єзоелементів: їхнє старіння не може вплинути на результати вимірів. Для установлення відповідності між теоретичними дослідженнями й експериментом виробником були проведені великі іспити. Усі проведені виміри дали гарну відповідність з теоретичної кривої віскозиметра (рис.

2.22, б). Для визначення експериментальної кривої віскозиметра досить провести тільки один контрольний вимір, тому вся процедура настроювання і калібрування віскозиметра стає надзвичайно простою і швидкою.

Основним недоліком є вихід з ладу ПР у момент зміни тиску палива, тому що при роботі в діапазоні температур від +70 до +200 °С відбувається обрив електродів і, відповідно, зміна резонансних частот. А також для подачі сигналів на випромінюючий ПР і знімання інформації з приймаючого ПР потрібні спеціальні міри для запобігання «брязкоту» контактної частини.

2.5. Вібраційні віскозиметри

Проаналізуємо особливості побудови віскозиметрів, робота яких заснована на вібраційному методі. Вимірювальним елементом (датчиком) вібраційного віскозиметра є вібратор (звичайно металевий стрижень), що стикається з досліджуваною рідиною і здійснює дуже малі коливання з амплітудою в кілька мікрометрів. Опір середі прямиванню вібратора складається з активного і реактивних. Активний опір обумовлений двома причинами: випромінюванням звукової енергії в навколишнє простір і втратами на грузле тертя. Зі зменшенням розмірів вібратора випромінювання звукової енергії зменшується настільки, що їм можна зневажити. Тому по виміру активного опору визначається в'язкість матеріалу.

Принцип дії п'єзоелектричних вібраційних віскозиметрів заснований на використанні залежності між динамічними властивостями коливного БПЕ і силами грузлого тертя (демпфірування), що виникають у середовищі, з яким пластинка взаємодіє [78].

На рис. 2.23, а приведена схема віскозиметра. Чутливий елемент БПЕ (2) за допомогою діелектричного вкладиша (1) установлюється з певним зазором у кожусі (3). При проведенні вимірів внутрішня порожнина кожуха заповнюється досліджуваною речовиною (4). Віскозиметр із БПЕ має порівняно невелику чутливість і розрахований на вимір в'язкості рідких серед у межах від 10^{-2} до 10 Па·с. Крім того, особливості конструкції перетворювача не дозволяють

застосовувати його в системах безупинного виміру.

Цих недоліків позбавлений віскозиметр, схема якого приведена на рис. 2.23, б. Роль чутливого елемента тут виконує круглий БПЕ (7), затиснутий у циліндричному корпусі (8) за допомогою еластичної (пластикової чи гумовий) манжети (5). Пластика поділяє корпус на дві порожнини, що повідомляються один з одною тільки через отвори в кришці (6). У процесі роботи перетворювач постійно знаходиться в середовищі, в'язкість якого змінюється. Демпфірування коливань БПЕ в такій конструкції здійснюється за рахунок прокачування речовини через отвори в кришках. П'єзoeлектричні вібраційні віскозиметри можуть мати два виходи: амплітудний і частотний. У першому випадку БПЕ працює в режимі ПЕТ, вихідна напруга якого при постійній напрузі є функцією в'язкості.

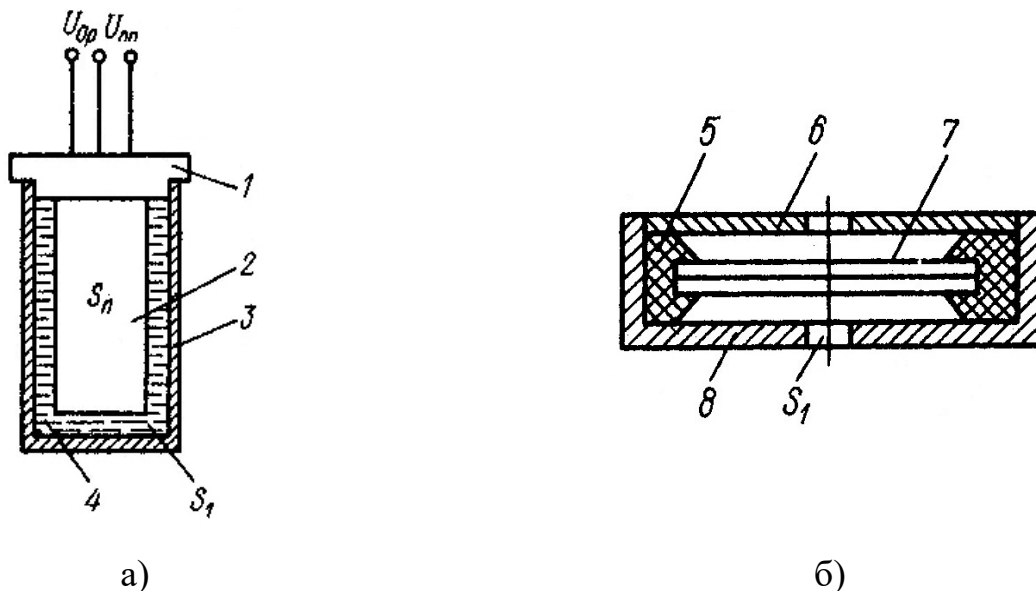


Рис. 2.23. Схема п'єзoeлектричних віскозиметрів

На рис. 2.24, а приведені залежності між вихідною напругою віскозиметра з прямокутним БПЕ ($l_1=4 \cdot 10^{-2}$ м; $l_2=10^{-2}$ м; $l_3=5 \cdot 10^{-4}$ м) і вимірюваною в'язкістю. Напруга живлення 220 В, навантаження 10^5 Ом; $k=5 \cdot 10^{-2}$. Кривим (1) і (2) відповідають частоти 50 і 100 Гц. Основною експлуатаційною особливістю віскозиметра з амплітудним виходом є залежність крутості його характеристики від частоти вхідної напруги. Як і при вимірі тисків, погрішність віскозиметра можна значно зменшити (до 0,5 %), якщо використовувати автоколивальний режим схеми з функціонально розділеними ПЕ.

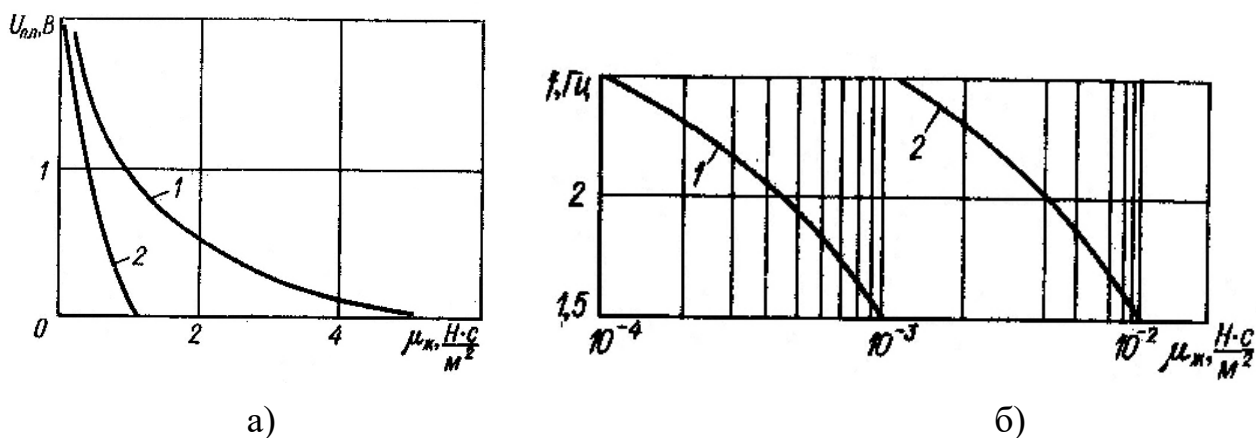


Рис. 2.24. Характеристики віскозиметра в трансформаторному режимі

(а), характеристики віскозиметра в автоколивальному режимі

(б): 1 – $k_s = 10^{-4}$; 2 – $k_s = 10^{-5}$

На рис. 2.24, б приведені залежності між частотою коливань і в'язкістю віскозиметра з круглим БПЕ ($d=4 \cdot 10^{-2}$ м; $l_3=5 \cdot 10^{-4}$ м) і підсилювачем, що має $k_y=1,5$; $R_{вх}=R_{вих}=10^5$ Ом і $k_{НЛ}=0,5$. При конструюванні вібраційних віскозиметрів необхідно прагнути до того, щоб обсяг, займаний використовуваним середою, був якнайменше. При $\mu < 10^{-2}$ виконання цієї умови має першорядне значення.

Закономірності, установлені для віскозиметрів з амплітудним і частотним виходами, не утрачають свого значення за умови, якщо між обсягом грузлої середи площею S_{Π} БПЕ існує співвідношення

$$V=(3 \div 7) \cdot 10^{-4} S. \quad (2.8)$$

Це співвідношення виконується у віскозиметрі на основі трубчастого п'єзокерамічного перетворювача (рис. 2.25, а). У цьому пристрої легко забезпечити мінімальний зазор між корпусом і вібратором для одержання максимальної чутливості.

Корпус віскозиметра виконаний у виді пустотілого циліндра (1), а вібратор являє собою п'єзокерамічну трубку (3), установлену через ізоляційну прокладку (2) у корпусі коаксиально. На внутрішню поверхню трубки нанесений суцільний електрод (4). На зовнішній поверхні трубки мають дві пари електродів збудження коливань трубки (5) і пари електродів (7), використовуваних як датчик амплітуди її коливань. Пробка (6) перешкоджає проникненню досліджуваної рідини усередину

трубки.

На рис. 2.25, б представлена схема з'єднань електродів вібратора. Одна пара електродів (5) підключена безпосередньо до генератора перемінної напруги (8), а інша - через фазоповертач (9), що здійснює поворот фази напруги генератора на 90° . Електроди (7) підключені до прибору, що реєструє, (10). Тому що п'єзокерамічна трубка (3) поляризована радіально, то при подачі напруги на два діаметрально протилежних електроди (5) на одній з ділянок трубки, що прилягають до цих електродів, напрямок вектора поляризації збігається з напрямком вектора прикладеного зовнішнього електричного поля, а на іншій ділянці буде протилежно йому. Унаслідок зворотного електрострикційного ефекту одна з ділянок трубки подовжується, а інша - стискується, тому трубка зігнеться аналогічно біморфній пластинці. Під дією двох сигналів перемінної напруги, зрушених по фазі на 90° і прикладених до діаметрально протилежних електродів (5), вільний кінець трубки здійснює обертально-коливальний рух, амплітуда якого залежить від в'язкості рідини, що перебуває в зазорі трубкою між (3) і корпусом (1).

Під дією коливань трубки (3) між електродами (7) виникає перемінна напруга, пропорційна амплітуді цих коливань. Значення напруги між електродами (7) фіксується прибором (10). Для одержання максимальної чутливості частота генератора (8) повинна бути близька до резонансної частоти п'єзокерамічної трубки, а це діапазон $5 \div 20$ кГц.

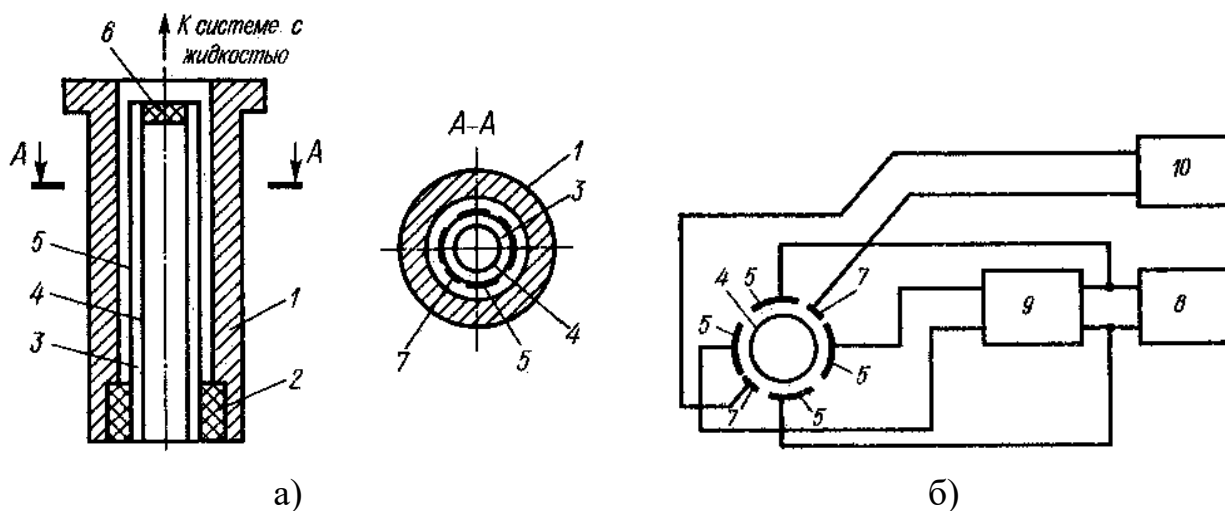


Рис. 2.25. Віскозиметр на основі трубчастого п'єзокерамічного перетворювача (а) і схема з'єднань електродів вібратора (б)

Циліндрична форма корпусу (1) і вібратора (3) дозволяє виготовити їх з високою точністю і легко забезпечити невеликий зазор між ними. Датчик віскозиметра може мати невеликі розміри, так що об'єм зазору між корпусом і вібратором, заповнений досліджуваною рідиною, буде малим. При цьому віскозиметр можна використовувати для дослідження мікро кількостей рідини. Такий віскозиметр конструктивно простіше, тому що трубчастий п'єзокерамічний вібратор являє собою одну деталь, у ньому відсутній сполучний шов, що збільшує його надійність і технологічність.

Однак, існуючий ряд конструкцій п'єзоелектричних віскозиметрів на основі біморфних елементів, відносяться до вібраційних віскозиметрів.

Нами встановлено, що для виміру в'язкості в пристінних шарах ($10 \div 20$ мкм) тиксотропних рідин необхідне виконання співвідношення між об'ємом грузлої середи V і площею S для трубчастих елементів:

$$V = (1 \div 2) \cdot 10^{-5} S. \quad (2.9)$$

Очевидно, що співвідношення (2.8) і (2.9) відрізняються на порядок, і забезпечити таке співвідношення для трубчастих елементів у даний час по технологічних питаннях не представляється можливим.

Розглянемо реометр із перетворенням Фур'є GBC MFR 2100 [79] (рис. 2.26), що впливає на пробу псевдо випадковими коливальними імпульсами. Такий підхід у сполученні з розвиненим математичним апаратом, що використовує для обробки сигналу перетворення Фур'є, забезпечує повний аналіз в'язкістно-еластичних властивостей проби в широкому діапазоні швидкостей зрушення за лічені секунди.

Таким чином, MFR 2100 прекрасно підходить для аналізу властивостей речовин зі швидко мінливими реологічними характеристиками.

Ще однією особливістю MFR 2100, що відрізняє його від традиційних реометрів-віскозиметрів є винятково малий об'єм зразка. MFR 2100 може працювати з пробами менш 100 мікро літрів. Це розширює область застосування прибору в дослідженнях дорогих матеріалів, а також біологічних зразків. Так, аналіз реологічних властивостей людських сліз, дуже важливий при розробці і виробництві контактних лінз, з успіхом здійснюється на MFR 2100.

Робочий діапазон MFR 2100 дуже широкий: від 1 мПа·с до більш ніж 100000 Па·с, тобто реометр успішно справляється і з аналізом рідин, близьких по в'язкості до води, і з контролем властивостей полімерів і бітумів.

Технічні характеристики: висока швидкість аналізу – до 400 кроків по частоті в секунду; малий об'єм проби – менш 100 мкл; високий дозвіл по фазі – менше 2°; широкий робочий діапазон в'язкості; могутнє програмне забезпечення; автоматична установка зазору; проста процедура калібрування; простота і зручність в обслуговуванні; вимірюваний модуль зрушення від 10^{-4} Па; нижня межа вимірюваної в'язкості – менш 1 мПа·с; діапазон частот – від 0 до 100 Гц; діапазон прикладених сил – від 0,002 до 44,5 Н; точність установки зазору – 0,6 мкм; амплітуда коливань: 0,2 – 20 мкм; час аналізу – від 4 до 10 секунд.



Рис. 2.26. Реометр із перетворенням Фур'є GBC MFR 2100

У зв'язку з цим інтерес становлять дослідження віскозиметрів, до складу яких можуть входити п'єзоелементи як датчик, привод і які здійснюють вимірювання в'язкості у широкому діапазоні зусиль і деформацій зрушення.

У даному контексті становить інтерес застосування п'єзоелектричного привода для ротаційного і співвісного віскозиметрів [80, 81, 82]. На рис. 2.27 показана класифікаційна схема п'єзоелектричних віскозиметрів, що дозволяють одержувати реологічні криві тиксотропних рідин.

Класифікація реометрів і віскозиметрів.

Реометри, віскозиметри					
Метод виміру	Вібраційний		На співвісних циліндрах		Ротаційний
Тип привода	маніпулятори			двигуни	
Конструкція п'єзореzonатора (ПР)	Циліндр	біморф	стовп	лінійні (ЛПД)	роторні (ПЕД)
Довжина ходу рухливого циліндра	<0,1 мкм		<0,5 мм	>5 мм	$n=0\div 5$ Гц
Наявність математичного опису	є		відсутнє		

Рис. 2.27. Класифікація віскозиметрів з п'єзоелектричним приводом

Таким чином, відсутність математичного опису реометрів на співвісних циліндрах вимагає додаткових досліджень. Існує кілька варіантів виконання п'єзоелектричних приводів. Щоб визначити, який тип привода використовувати у віскозиметрі, заснованому на методі співвісних циліндрів і дістати математичний опис усього пристрою необхідно розглянути процеси, що протікають у триботехнічному вузлі (рухливому і нерухомому циліндрах). Реальним об'єктом, що увібрав у себе всі характерні процеси для такого вузла, є плунжерна пара, що складається з нерухомого і рухомого циліндрів із зазором $\sim 10\div 20$ мкм.

2.6. Висновки

Аналіз методів виміру в'язкості в ПС ДВЗ показав, що найбільшого поширення дістали реометри і віскозиметри, у яких використовуються методи, засновані на:

- перепаді тиску в капілярі;
- часу подвійного проходження рухомого циліндра;
- зусиллі, переданому від одного циліндра іншому при їхньому співвісному обертанні;
- загасанні резонансних коливань;

- вібрації з певною амплітудою.

Установлено, що:

- тільки реометри і віскозиметри на співвісних циліндрах і ротаційні дозволяють оцінювати реологічні властивості тиксотропних рідин у зазорі $1 \div 25$ мкм, що відповідає 24 основним вузлам ДВЗ;

- жоден з існуючих пристроїв не використовується для комплексної оцінки реологічних властивостей суднових технічних рідин;

- привод рухомих елементів пристроїв, заснованих на ротаційному методі і методі співвісних циліндрів здійснюється електромеханічними й електромагнітними приводами, що відрізняються низькою ефективністю, високими масами і габаритними розмірами, неможливістю плавної зміни швидкості.

Аналіз конструкцій реометрів і віскозиметрів виявив наступні недоліки, основними з яких є:

- розміри зазорів у вимірювальному зонді вище 25 мкм;
- діапазони лінійних і кутових швидкостей не відповідають швидкостям, що розвиваються частинами паливної апаратури;

- час відновлення у випадку виходу з ладу, складає від однієї години до восьми;

- наявність громіздких і складних редукторів.

Для усунення вище перерахованих недоліків пропонується використання п'єзоелектричного привода, що забезпечує високий пусковий момент, ефективність у перерахуванні на потужність/кг, можливість плавного регулювання лінійної і кутової швидкості переміщення рухомої частини вимірювального зонда, відсутність редуктора.

Основні наукові результати опубліковані в збірниках, приведених у переліку ВАК, [80, 81, 82].

РОЗДІЛ 3

ОСНОВИ ТЕОРІЇ РЕОМЕТРІВ ТА ВІСКОЗИМЕТРІВ НА СПІВВІСНИХ ЦИЛІНДРАХ

П'єзонапівпровідникові пристрої на основі п'єзоманіпуляторів і п'єзодвигунів відкривають нові перспективи по створенню віскозиметрів і реометрів високої точності, заснованих на методі співвісних циліндрів [80, 81, 82, 83, 84]. З метою розробки методики проектування складемо кінематичні схеми можливих конструкцій реометрів та віскозиметрів і на співвісних циліндрах, що складаються з триботехнічного вузла і привода.

Як було встановлено в розділі 2, використовуємо ПЕМ на основі п'єзорезонатора, в одному випадку, з біморфного п'єзоелемента і, у другому, зі складального стовпа шайб. Це дозволяє створити дві конструкції віскозиметрів, представлених на рис. 3.1, а і б [85, 86], характерною рисою яких є наявність жорсткого зв'язку між ПР і рухливим циліндром. Таке з'єднання не допускає повертання рухомого циліндра усередині нерухомого. Ударні двигуни лінійного переміщення (ЛПД) і нереверсивні ПЕД з пасивним ротором дозволяють створити дві конструкції реометрів - віскозиметрів (рис. 3.1, в і г) з можливістю переміщення одного циліндра щодо іншого.

Усі чотири конструкції призначені для виміру динамічної в'язкості в потоці, а також для оцінки реологічних властивостей тиксотропних рідин. Тому необхідно оцінити, яка конструкція є найбільш оптимальною з погляду адекватності процесам у триботехнічних вузлах .

Усі процеси у віскозиметрах можна розділити на чотири основних групи:

1. Процеси в ПР, у результаті яких відбувається перетворення напруги живлення в переміщення вільного кінця.
2. Процеси в триботехнічному вузлі, сила тертя в який залежить від швидкості переміщення і конструктивних розмірів рухомого циліндра.
3. Фрикційний контакт взаємодії ПР і рухомої частини ЛПД і ротора ПЕД.
4. Процеси в кривошипному механізмі.

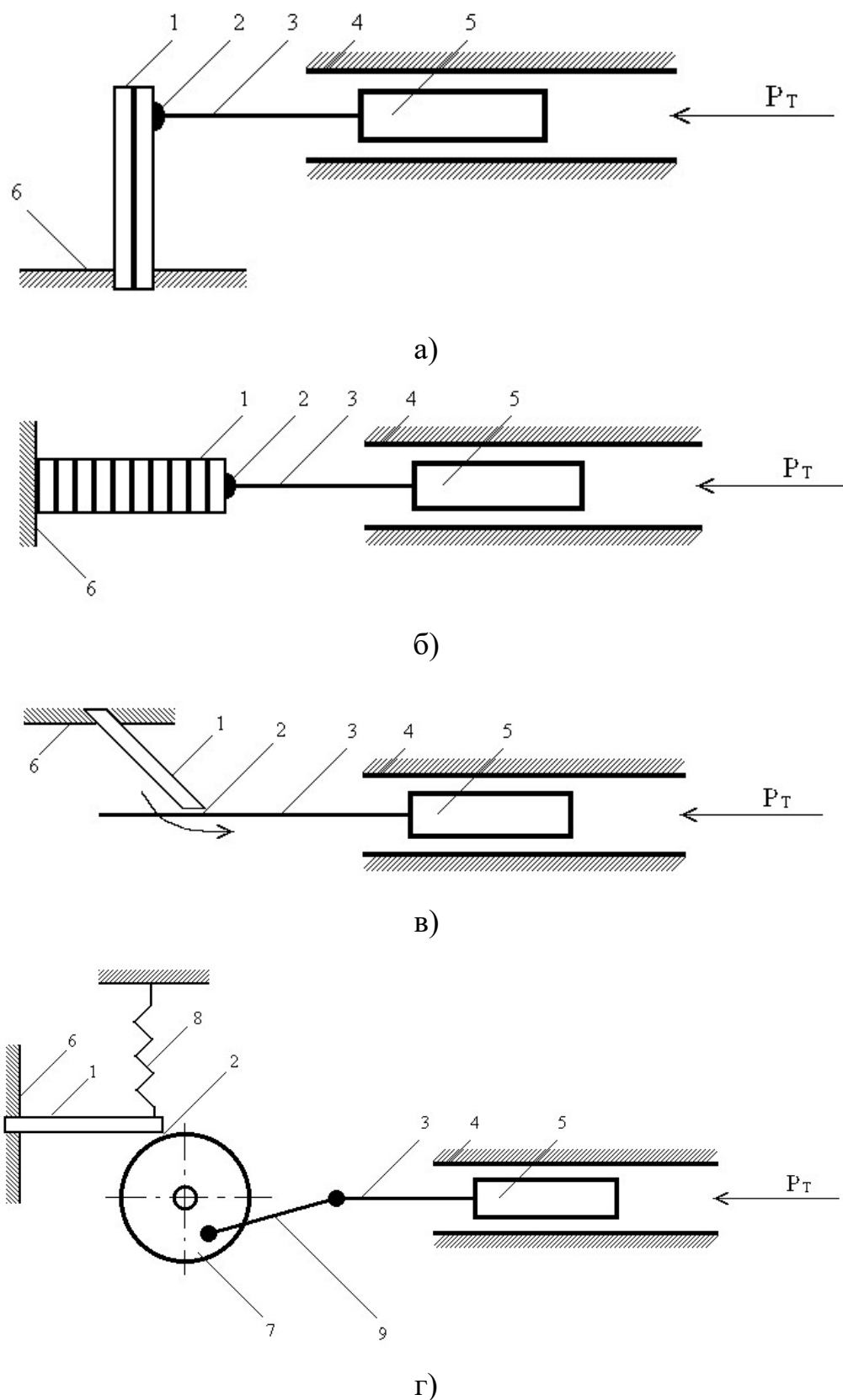


Рис. 3.1. Структурні схеми віскозиметрів і реометрів на співвісних циліндрах: 1 - ПР; 2 – точка торкання; 3 - шток; 4 – нерухомий циліндр; 5 – рухомий циліндр; 6 – корпус; 7 - маховик; 8 - пружина; 9 – ланка

При оцінці процесів, що протікають у запропонованих конструкціях віскозиметрів та реометрів, приймемо наступні теоретичні обмеження і допущення.

Коефіцієнт динамічної в'язкості "ньютонівської" рідини визначається з наступного співвідношення:

$$\eta = \frac{F_{TP} / S}{\Delta V / \Delta h}, \quad (3.1)$$

де F_{TP} - сила внутрішнього тертя, $\Delta V / \Delta h$ – градієнт швидкості, S – площа поверхні внутрішнього циліндра, тобто зони тертя, Δh – товщина шару. S і Δh - постійні величини.

Потужність, що розвивається ПП, P визначається, як

$$P = F_{PP} \times V_{PP},$$

де F_{PP} - зусилля і V_{PP} - швидкість, що розвиваються кінцем п'єзореzonатора і залежні від амплітуди U_M і частоти коливань f керуючої напруги. Таким чином робота ПР у п'єзодвигунах здійснюється на частоті резонансу і є величиною постійної для конкретного типу двигуна, то F_{PP} і V_{PP} залежать від U_M .

Відомі співвідношення для кривошипного механізму дозволяють визначити по кутовій швидкості обертання ротора ω п'єзодвигуна лінійну швидкість поршня і, відповідно, швидкість зрушення шарів ΔV .

Виходячи з вище сказаного, можна зробити висновок, що коефіцієнт в'язкості рідини σ пропорційний відношенню U_M / ω . У той же час, відношення U_M / ω є механічною характеристикою п'єзодвигуна, що дозволяє установити момент опору $M_{\text{опору}}$. На підставі чого можна стверджувати, що $M_{\text{опору}}$ є аналогом σ , а механічна характеристика п'єзодвигуна в складі реометра відповідає реологічній кривій досліджуваної рідини.

3.1. Процеси в п'єзореzonаторі

Традиційний математичний апарат, використовуваний для опису процесів у п'єзоактивній середі з різними способами перетворення енергії, має як об'єкт різні ПР: в основному, з однією чи двома парами електродів для ПЕМ зі складального

стовця з рівнобіжним з'єднанням електродів, а також для ПЕД [87, 88, 89, 90, 91 і ін.]. При цьому підході механічні зсуви описуються однорідним хвильовим рівнянням, на основі рішення якого складається схема заміщення. Для кожного конкретного випадку перетворення енергії електричні параметри (коефіцієнт передачі, вплив навантаження і т.п.) визначається на основі аналізу схеми заміщення ПЕМ і ПЕД. Ефективним є аналіз роботи ПЕМ і ПЕД, заснований на використанні методів теорії чотириполюсників [92, 93].

Застосування ПЕМ і ПЕД для побудови віскозиметрів вимагає всебічних як теоретичних, так і експериментальних досліджень їхньої статичної і динамічної характеристик.

Розглядання процесів електромеханічного перетворення енергії в ПЕМ і ПЕД важливо не тільки з позицій оцінки енергетичних можливостей, але і з погляду створення адекватної їм математичної моделі.

Дослідження і розрахунок стаціонарних режимів у ПЕД дозволяє оцінити якісно і кількісно експериментальні залежності ПЕД і їхні аналітичні вирази в умовах дії сильних збурень, оцінити багатомірні статичні моделі (схеми заміщення) ПЕД.

Дослідження динамічних властивостей п'єзоприводів дозволяє визначити функціональні принципи побудови віскозиметрів на їхній основі в силу багатомірного характеру фізичних процесів у них, що зв'язані з особливостями п'єзоелектриків [94, 95, 96, 97, 98]. При цьому основну роль грають динамічні властивості, що зв'язані з частотними обмеженнями і визначаються кінцевою швидкістю поширення зовнішніх впливів у приводі, таких як процеси тертя в триботехнічних вузлах, що проходять при особистій участі тиксотропних рідин.

Параметри ПЕМ і ПЕД у динамічних режимах, у загальному випадку, є нелінійними і визначаються не тільки параметрами п'єзоматеріалу, топологією і станом (поляризацією) ПР, типом коливань і способом перетворення електромеханічної енергії, але й амплітудою і швидкістю зміни вхідних впливів [78]. Аналіз процесів у п'єзоприводі в динамічних режимах середи, розподілення, нелінійності і багато зв'язаності його параметрів становить значних математичних

труднощів.

Так, у фундаментальних роботах [99, 100, 101, 102, 103] процеси в п'єзоелектриках описують за допомогою матричних п'єзоелектричних рівнянь (фундаментальних рівнянь елементарного об'єму п'єзоелектричної середи і рівняння руху (хвильового рівняння), причому їхні рішення справедливі в режимі стаціонарних резонансних коливань для одномірного випадку (вузькому діапазоні частот різних чи близьких резонансній частоті f_p). Складні (двох - і тривимірні) задачі з додатковими граничними умовами практично вивчені мало [89]. У роботах [89, 90, 98] в основному приводяться ряд загальних положень. Наприклад, у роботі [98] розглянуті в загальній формі динамічні властивості керованого п'єзоефекту в п'єзоелектрику, обумовлені інерцією його вхідного ланцюга, часом встановлення електричного поля в п'єзоелектрику, часом установа стану поляризації, інерцією процесів на перемінному струмі.

Таким чином, складність (ПЕМ і ПЕД являє собою нелінійну систему з розподіленими параметрами і нестационарними властивостями) і мала вивченість процесів у п'єзоприводах обумовлює необхідність використання експериментальних методів визначення їхніх динамічних характеристик.

Динамічні процеси у функціональному п'єзоелементі типу п'єзотрансформатора, характеристики його як динамічної ланки (об'єкта) керування, динамічні моделі ПЕТ були запропоновані А.А.Єрофєєвим і розглянуті в роботах [94, 95, 96].

У пристроях автоматики й обчислювальної техніки (наприклад, системах стабілізації частоти обертання) робота ПЕМ і ПЕД здійснюється в основному в перехідних режимах відпрацьовування різного роду збурень, спрямованих на керування вихідним параметром, що вимагає знання їхніх динамічних характеристик.

3.1.1. Характеристики і параметри п'єзоприводу в статичних режимах

Процеси в п'єзоприводах (ПП) характеризуються сукупністю деяких величин, що відображають ступінь взаємодії різних фізичних ефектів (в основному,

зворотного і прямого п'єзоефектів, а в цілому первинних ефектів і ефектів більш високого порядку) [94, 95, 88, 90].

Якість п'єзокераміки характеризується наступними, прийнятими за рубежом, основними параметрами [104, 105, 106]:

K_{33}^T ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$) - відносна діелектрична проникність;

$\tan \delta$ - тангенс кута діелектричних утрат при частоті 1 кГц у слабких полях;

T_c (T_k) - температура точки Кюрі;

K_p , K_{33} , K_{31} , K_{15} - коефіцієнти електромеханічного зв'язку;

d_{33} , d_{31} , d_{15} - п'єзоелектричні модулі;

g_{33} , g_{31} , g_{15} - електричні коефіцієнти по напрузі;

Y_{11}^E , Y_{33}^E - модулі Юнга;

N_L , N_T , N_R - частотні постійні;

S_{11}^E , S_{33}^E - параметр еластичності;

ρ - щільність;

Q_m - механічна добротність.

Різноманіття форм зв'язків ефектів між собою, їхня нелінійність і складність утрудняють аналітичний опис процесів у ПП у повній області зміни зовнішніх впливів.

З урахуванням відомих допущень [88, 90] для ПР ПП у залежності від їхньої конструктивної особливості складаються лінійні п'єзоелектричні рівняння, за допомогою яких можна описати стаціонарні режими гармонійних коливань ПР у вузькій області частот поблизу резонансу. Наприклад, для ПР (з поперечною поляризацією) системи п'єзоелектричних рівнянь у загальному випадку мають вид [88, 90, 111]:

$$S = S^E T + d^T E; D = d T + \epsilon^T E \quad (3.2)$$

де S^E - постійна пружності; ϵ^T - діелектрична постійна; верхній індекс (E , T) означає вимір константи при постійному значенні величини, зазначеної в індексі; нижній індекс t означає транспоновану матрицю; константи між собою взаємозалежні [88].

Рішення рівняння (3.2) для ПР із поперечною поляризацією (уздовж осі Z) розглядають при наступних обмеженнях: усі механічні напружки, крім T_1 ,

дорівнюють нулю на вільних поверхнях; електричне поле E рівномірне по ($E_1=E_2=0$) всьому об'єму, тому що товщина a і ширина b малі в порівнянні з довжиною l (див. рис. 3.4). З урахуванням цих особливостей (матеріалу і конструкції ПР) можна одержати:

$$S_l = S_{11}^E T_l + d_{31} E_3; \quad D_3 = d_{31} T_l + \epsilon_{33}^T E_3, \quad (3.3)$$

де S_l , T_l , E_3 , D_3 - компоненти вектора, відповідно, деформації, механічної напруги, електричного поля і зсуву.

В основі всіх ПР лежать п'єзоелементи з двома типами поляризації: поперечної (рис. 3.2, а) і подовжньої (рис. 3.2, б), кожному з яких можна поставити у відповідність схему заміщення у виді, як показано на рис. 3.2, в і г.

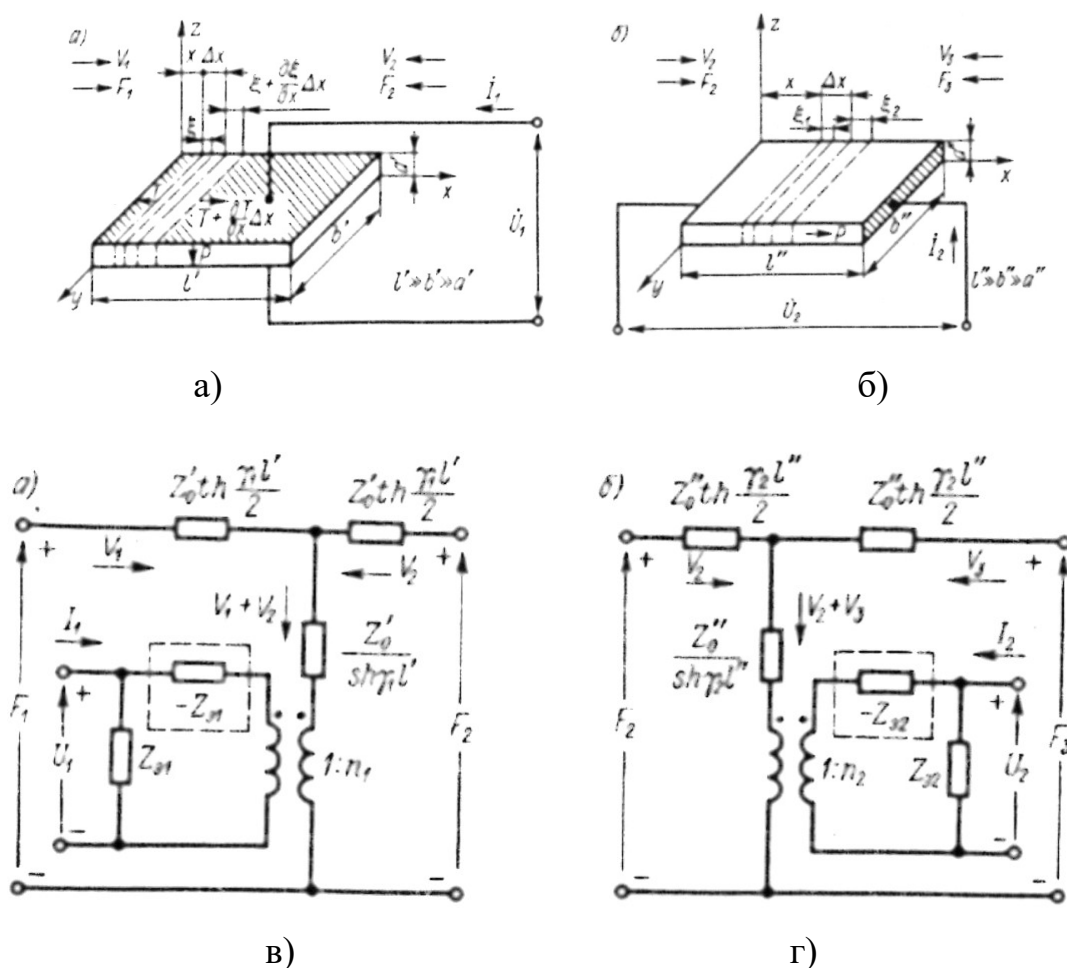


Рис. 3.2. П'єзорезонатор пластинчастого типу з поперечною (а) і подовжньою (б) поляризацією; схеми заміщення ПР із поперечною (а) і подовжньою (б) поляризацією

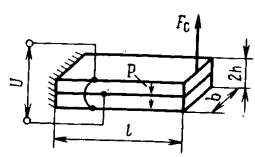
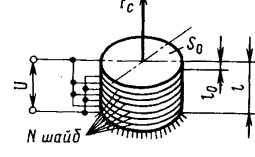
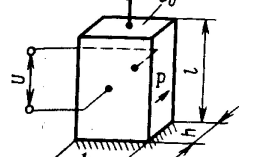
З (3.3), визначивши T , можна записати рівняння для зсуву

$$D_3 = \epsilon_{33}^T E_3 + \frac{d_{31}}{S_{11}^E} S_1. \quad (3.4)$$

Для попереднього (оцінного) розрахунку основних конструкцій ПР із метою визначення деформації і зусилля, що розвивається, у залежності від геометричних розмірів і властивостей використовуваної кераміки будемо використовувати співвідношення, представлені в таблиці 3.1 [107].

Таблиця 3.1.

Оцінні розрахунки параметрів ПЕМ різних конструкцій

Параметр	Біморфна, консольно забита пластина (деформація кінця консолі)	Складальний пакет пластин, що працює на подовжньому п'єзоефекті	Елемент, що працює на поперечному п'єзоефекті
			
Деформація під дією керуючого поля Δ_E , м	$\Delta_E = \frac{3}{4} d_{31} U \frac{l^2}{h^2}$	$\Delta_E = N d_{33} U = d_{33} E l$	$\Delta_E = d_{31} E l = d_{31} U \frac{l}{h}$
Деформація під дією зовнішнього навантаження Δ_F , м	$\Delta_F \cong \frac{1}{2} F_C l^3 / (Y_{11} b h^3)$	$\Delta_F = F_C l / (S_0 Y_{33})$	$\Delta_F = F_C l / (S_0 Y_{11})$
Коефіцієнт пружності K_y , Н/м	$K_y \cong 2 Y_{11} b h^3 / l_3$	$K_y = S_0 Y_{33} / l = S_0 Y_{33} / (N l_0)$	$K_y = S_0 Y_{11} / l = Y_{11} b h / l$
Коефіцієнти прямого і зворотного п'єзоефектів K_{Π} і K_O , Н/В	$K_{\Pi} = K_O = \frac{3}{2} Y_{11} d_{31} \frac{l_1 l_2}{l_3}$	$K_{\Pi} = K_O = S_0 Y_{33} d_{33} / l_0$	$K_{\Pi} = K_O = Y_{11} d_{31} l_2$
Електрична ємність C_0 , Ф	$C_0 \cong 1,8 \epsilon_0 \epsilon_{33} b l / h$	$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_{33} (1 - ((d_{33})^2 Y_{33} / (\epsilon_0 \epsilon_{33}))^2) N S_0 / l_0$	$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_{33} (1 - ((d_{31})^2 Y_{11} / (\epsilon_0 \epsilon_{33}))^2) l_1 l_2 / l_3$
Еквівалентна приведена маса m_{Σ} , кг	$m_{\Sigma} = m_0 + 0,243 \cdot m_K$	$m_{\Sigma} = m_0 + 0,382 \cdot m_K$	$m_{\Sigma} = m_0 + 0,382 \cdot m_K$
Власна частота (при $m_0=0$; $U=0$) ω_M , с ⁻¹	$\omega_M = 2,03 \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_M}}$	$\omega_M = \frac{1,58}{l} \sqrt{\frac{Y_{33}}{\rho_M}}$	$\omega_M = \frac{1,58}{l} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_M}}$

Слід зазначити, що явище прямого п'єзоефекту утрудняє формування керуючого поля, особливо при реалізації динамічних процесів, які швидко протікають. При аналізі динаміки ПЕМ малої ємності (біморфні елементи) нехтують

малою електростатичною постійною часу $T_E = R_{BT}C_0$. При керуванні ж ПЕМ великої ємності для компенсації явищ, зв'язаних із прямим п'єзоефектом, застосовуються спеціальні технічні міри, такі, як організація спеціальних швидкодіючих контурів регулювання керуючого поля, включення в схему підсилювача додаткових діодів, що утворюють ланцюги замикання наведених токів.

Для випадку віскозиметра з ПЕМ варто враховувати, що, якщо робочі частоти в системі лежать значно нижче частоти першого механічного резонансу, розподілення параметрів триботехнічного вузла і самого ПЕМ у першому наближенні можуть не прийматися в увагу. Однак у віскозиметрі з ПЕМ є практична можливість реалізації керованих рухів, спектри яких містять частоти, що перевищують частоту резонансу комплексу ПЕМ-ВО, особливо, коли необхідно дістати переміщення більш 1 мм. А це вимагає обережності в питаннях зневаги розподілення параметрів і при використанні спрощеної моделі.

При складанні динамічних моделей ПЕМ з розподіленими параметрами необхідно пам'ятати про те, що швидкість поширення звукової хвилі в п'єзоматеріалі в загальному випадку залежить від граничних умов на "електричній" стороні. Відомо, наприклад, що швидкість звуку в п'єзопластині, що працює на поперечному п'єзоефекті, при наявності на бічних гранях суцільних електродів, що вирівнюють потенціал поля уздовж пластини, завжди визначається модулем Юнга Y для випадку коротко замкнутої пластини незалежно від того, розімкнуті її електроди чи замкнуті між собою в дійсності. У між електродному просторі окремих п'єзопластин, що працюють на подовжньому п'єзоефекті, швидкість поширення звукової хвилі трохи вище і визначається модулем Юнга $Y^D > Y$ для режиму холостого ходу пластини. Відомо, що динамічні властивості складеного ПЕМ з ростом числа N п'єзошайб у складальному стовпі наближаються по асимптоті до властивостей однорідного пружного стрижня, що характеризується швидкістю поширення звуку, рівній швидкості звуку в коротко замкнутій пластині. У складальному п'єзодвигуні "вирівнювання" поля здійснюється за рахунок рівнобіжного з'єднання електродів, що рівномірно пронизують активну зону. Ця обставина дозволяє широко використовувати як складену частину моделей складальних ПЕМ моделі пасивних

стрижнів, а також методи аналізу їхніх динамічних властивостей.

Тому при дослідженні просторово протяжних динамічних систем у механіці дістав поширення метод кінцевих елементів [108], при якому об'єкт дослідження розбивається на ряд дискретних вузлів із зосередженими параметрами. Сукупність рівнянь динаміки усіх вузлів з додаванням граничних і початкових умов цілком описує поведінку об'єкта. П'єзoelementи в режимі ПП реалізують в основному переміщення, що з достатньою точністю можуть бути зведені до одномірних, що дозволяє в більшості випадків з успіхом використовувати одномірні моделі ПЕМ, у яких кожен вузол зв'язаний тільки з двома найближчими сусідніми: попереднім і наступним.

У [109] показано, що, при певних обмеженнях, ЛПД і ПЕД можуть бути зведені до одномірної механічної моделі.

Аналіз методів, використовуваних при побудові моделей віскозиметрів на однорідних плоских ПР і складальних п'єзопакетах показав, що при побудові моделей з один однорідним ПР доцільніше використовувати метод кінцевих елементів, а при побудові моделей зі складальними пакетами - хвильову теорію.

Побудуємо модель ПР як класичного об'єкта з розподіленими параметрами, використовуючи співвідношення для акустичного компенсатора [107].

Для обліку реальних властивостей віскозиметра спочатку побудуємо його модель із зосередженими параметрами, еквівалентну об'єкту з розподіленими параметрами по частоті власних коливань. Такі моделі складаються для триботехнічного вузла з наступним їхнім об'єднанням у спільну модель усієї системи. Виберемо ПЕМ на основі складального стовпця шайб із подовжньою поляризацією, що являє собою однорідний стрижень довжиною l , поперечним перерізом S_0 і власної маси m_k . Жорстко закриємо його одним кінцем у нерухомій основі і зчленуємо інший кінець з інерційним навантаженням (рухомим циліндром - поршнем) m_0 , додатково зв'язаним з нерухомою основою пасивним пружним елементом, що володіє власним коефіцієнтом пружності K_{y0} .

Згідно [107] схему заміщення нескінченно тонкого шару п'єзоактивної шайби, що відповідає ПЕМ із внутрішнім грузлим тертям, можна представити у виді,

показаному на рис. 3.3, а, де $\dot{L} = 1/(K_y^D l)$ - питома (на одиницю довжини) піддатливість шайби, Н^{-1} ; $\dot{C} = m_K / l$ - погонна маса шайби, кг/м ; $\dot{r} = 1/(K_D l) = l/(m_K \kappa)$ - питомий на одиницю довжини коефіцієнт механічної добротності шайби, $\text{Н}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

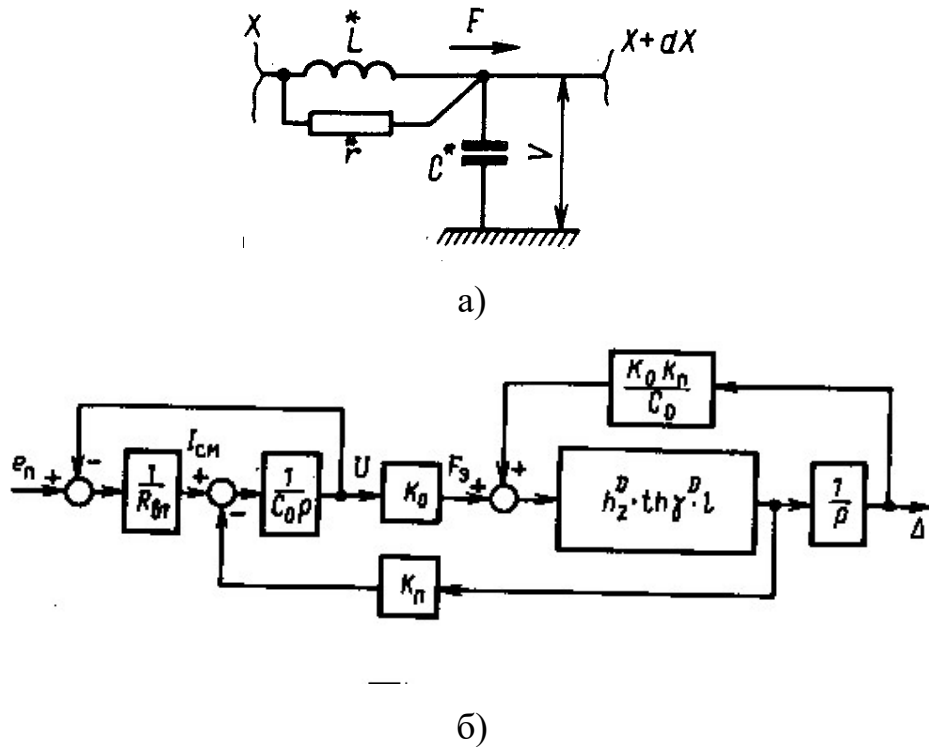


Рис. 3.3. Схема заміщення п'єзоактивної шайби (а), структурна схема п'єзошайби закріпленої на нерухомій основі (б)

З урахуванням цих позначень хвильові параметри для схеми заміщення п'єзоактивного шару рис. 3.3, а, складають:

$$\gamma^D = p / \left[l \sqrt{K_y^D (1 + p K_D / K_y^D)} / m_K \right] = p / \left(C_{3B}^D \sqrt{1 + p K_D / K_y^D} \right); \quad (3.5)$$

$$h_Z^D = 1 / \sqrt{m_K K_y^D (1 + p K_D / K_y^D)} = C_{3B}^D / \left(Y^D S_0 \sqrt{1 + p K_D / K_y^D} \right). \quad (3.6)$$

Вирази для F_0 і F_2 як функції швидкостей деформації V_0 і V_2 :

$$\left. \begin{aligned} F_0 &= (V_0 cth \gamma^D l - V_2 / sh \gamma^D l) / h_Z^D; \\ F_2 &= -(V_2 cth \gamma^D l - V_0 / sh \gamma^D l) / h_Z^D. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

$$\left. \begin{aligned} F_3 + F_{II} - F_0 + F_{C0} - F_C &= mp V_0; \\ -(F_3 + F_{II} - F_2) + F_{C2} + F_C &= mp V_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

І на підставі (3.7) і (3.8) і отриманого вище опису ланцюгів формування керуючого поля можна відразу скласти показану на рис. 3.3, б структурну схему ПЕМ у вигляді шайби без інерційного навантаження $m_0=0$. Аналіз моделі на рис. 3.3, б показує, що внаслідок дії прямого п'єзоефекту динамічні властивості однієї п'єзошайби якісно різко відрізняються від властивостей ПЕМ у виді пакета з N шайб. На відміну від моделі, приведеної в [20], структура на рис. 3.3, б описує полірезонансний об'єкт із близькою першою резонансною частотою (відмінність не більш 10%), але із сильно зміщеними у високочастотну область частотами всіх наступних максимумів і мінімумів амплітудно-частотної характеристики $|\Delta(j\omega)/U(j\omega)|$.

Використовуючи метод кінцевих елементів, побудуємо модель окремо узятотоу ПР із поперечним перерізом S_0 , закріпленим одним кінцем на нерухомій основі, початковий розмір якого l_0 змінюється під дією електричного поля E в напрямку дії поля на значення Δ (графа 1, табл. 3.1), і виконавчий орган, що рухається, масою m_0 , з'єднаний з його вільним кінцем. Основне динамічне зусилля в розглянутому випадку діє на ПЕМ також у напрямку прикладеного поля.

Запишемо умову рівноваги сил, прикладених до рухомої границі активної частини ПЕМ:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_C. \quad (3.9)$$

де $F_y = K_y \Delta$ - зусилля пружної деформації ПЕМ, Н; $F_E = d_{\text{п}} Y S_0 E$ - зусилля в ПЕМ, викликане прикладеним електричним полем, Н; F_C - статичне зусилля, Н; $F_d = K_d d\Delta/dt$ - зусилля, що демпфірує, у ПЕМ, Н; $F_{\text{дин}} = m_{\Sigma} d^2\Delta/dt^2$; - динамічне зусилля в ПЕМ, пропорційне швидкості зсуву поршня і викликаними при цьому процесами дисипації енергії в ПЕМ, Н; $K_y = Y S_0 / l_0$; - коефіцієнт пружності ПЕМ, Н/м; K_d - коефіцієнт внутрішнього демпфірування ПЕМ, кг/с; m_{Σ} - еквівалентна приведена сумарна маса рухомих частин, кг.

За умови, що модуль Юнга і діелектрична сприйнятливність не залежить від напруженості електричного поля і від механічної напруженості в ПЕМ:

$$I_{CM} = C_0 dU / dt + K_{\Pi} V , \quad (3.10)$$

де $C_0 = (\epsilon_0 \chi S_0 - d_{\Pi}^2) / l_0 = \epsilon_0 \chi S_0 (1 - K_{\Sigma M}^2) / l_0$ - ємність ПЕМ, Ф; $K_{\Pi} = K_y d_{\Pi}$ - коефіцієнт прямого п'єзоефекту, К/м; $U = El_0$ - напруга, прикладена до електродів ПЕМ, В; $V = d\Delta / dt$ - швидкість виконавчого органа, м/с; $K_{\Sigma M}^2 = d_{\Pi}^2 Y / (\epsilon_0 \chi)$ - коефіцієнт електро механічного зв'язку.

Установимо зв'язок між зусиллям F_{Σ} й електричною напругою, прикладеним до електродів ПЕМ:

$$F_E = Y S_0 d_{\Pi} E = Y S_0 d_{\Pi} U / l_0 = K_0 U , \quad (3.11)$$

де $K_0 = Y S_0 d_{\Pi} / l_0 = K_y d_{\Pi}$ - коефіцієнт зворотного п'єзоефекту, Н/В. Відзначимо, що коефіцієнти зворотного і прямого п'єзоефектів рівні між собою.

Прийmemo, що заряд ПЕМ здійснюється від джерела є.д.с. (підсилювача) e_{Π} через еквівалентний внутрішній опір останнього R_{BT} . Для такого ланцюга справедливе рівняння

$$(e_{\Pi} - U) / R_{BT} = I_{CM} . \quad (3.12)$$

Після нескладних перетворень виразів (3.10) - (3.12) одержимо:

$$\frac{dF_{\Sigma}}{dt} = \frac{K_0 e_{\Pi} - F_{\Sigma}}{C_0 R_{gm}} - \frac{K_0 K_{\Pi}}{C_0} V . \quad (3.13)$$

Рівняння (3.13) у сполученні з двома нижченаведеними (3.14) і (3.15), що можуть бути виведені з виразів для складових зусилля $F_{дин}$:

$$dV / dt = (F_{\Sigma} - K_y \Delta - K_d V - F_C) / m_{\Sigma} ; \quad (3.14)$$

$$d\Delta / dt = V , \quad (3.15)$$

утворюють повну систему диференціальних рівнянь, що описують ПЕМ з ВО при зроблених вище допущеннях. На підставі рівнянь (3.13)-(3.15) складена структурна схема [20], згортання якої приводить до наступної передавальної функції ПР, незалежно від типу поляризації і керованого від джерела є.д.с.:

$$\tilde{X}(p) = \frac{K_0}{R_{gm} C_0 m_{\Sigma} p^3 + (m_{\Sigma} + R_{gm} C_0 h) p^2 + (K_0 K_{\Pi} R_{gm} + h + R_{gm} C_0 g) p + g} , \quad (3.16)$$

де K_0 - коефіцієнт зворотного п'єзоефекту; K_{Π} - коефіцієнт прямого п'єзоефекту; $K_0 = K_{\Pi} = b \cdot Y_{11} \cdot d_{31}$; R_{BT} - опір генератора; C_0 - електрична ємність ПР; m_{Σ} - приведена

маса ПР і ВО; g - коефіцієнт пружності; h - коефіцієнт демпфірування; F_C - сила поперечної напруги.

Для ПР із поперечною поляризацією, використовуваного в ЛПД і ПЕД з пасивним ротором значення основних параметрів кераміки ЦТС-19 [5] складуть: $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{33}=1500$, $h=8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $g=0,032$ Н/м, $\rho=7,6 \cdot 10^3$ кг/м³, $Y_{11}=8 \cdot 10^{10}$ Па, $d_{31}=175 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. При розмірах ПР $l_1=1,9 \cdot 10^{-3}$ м, $l_2=5,5 \cdot 10^{-3}$ м, $l_3=19 \cdot 10^{-3}$ м, $m_\Sigma=0,025$ кг, $R_{em}=50$ Ом АЧХ передавальної функції (3.16) в області низьких частот буде мати вид, як показано на рис. 3.4, а. Тут: крива 1 відповідає виду полінома знаменника $(K_O K_\Pi R_{em} + h + R_{em} C_0)p + g$, крива 2 - $(m_\Sigma + R_{em} C_0 h)p^2 + g$, крива 3 - $R_{em} C_0 m_\Sigma p^3 + (m_\Sigma + R_{em} C_0 h)p^2 + (K_O K_\Pi R_{em} + h + R_{em} C_0 g)p + g$. А в області високих частот АЧХ приймає вид для всіх трьох випадків, як показано на рис. 3.4, б.

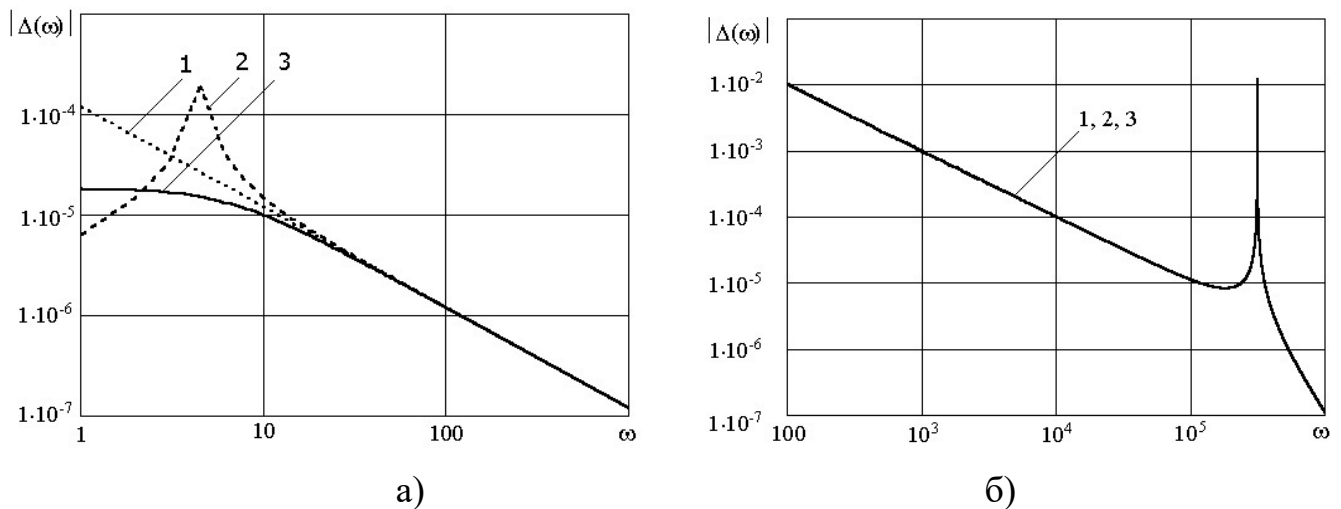


Рис. 3.4. АЧХ ПР в області низьких частот (а) і високих частот (б)

Очевидно, що при розрахунку ПП, виконаному на ПЕМ зі складального пакета шайб, необхідно враховувати всі складові знаменника полінома, а при розрахунку ПР, використовуваного в ЛПД і ПЕД на резонансних частотах, що складаються при p і p^3 можна зневажити, діставши наступний вираз для передавальної функції структурної схеми, представленої на рис. 3.5:

$$\Delta(p) = \frac{K_O \left[\frac{U_m 2\pi f}{p^2 + (2\pi f)^2} - \frac{F_C(1 + R_{em} C_0 p)}{K_O} \right]}{(m_\Sigma + R_{em} C_0 h)p^2 + g}, \quad (3.17)$$

Специфічні особливості п'єзоприводу, взаємозв'язок процесів керування (наявність природних і перехресних зв'язків) приводить до розгляду ПЕМ і ПЕД як багатозв'язного об'єкта керування (БОК) [110].

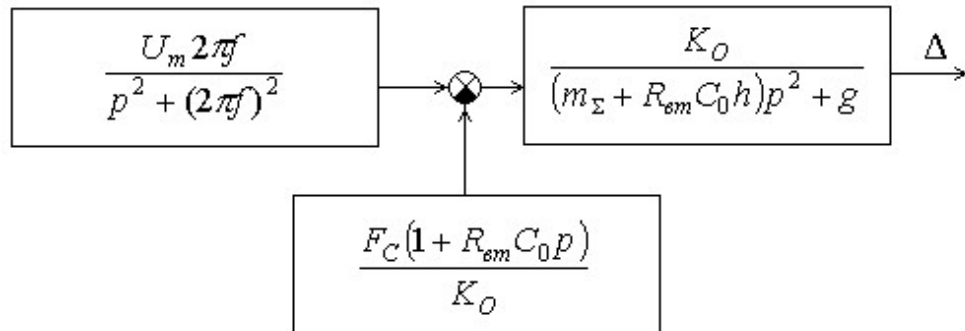


Рис. 3.5. Структурна схема ПР при керуванні від джерела е.д.с. в області високих частот

У спільному випадку його структурну схему можна представити у виді послідовного з'єднання двох блоків (рис. 3.6, а): електромеханічного - з координатами x_i на вході зі складовими U_{BX} ПЕМ і ПЕД (амплітудою, частотою і фазою) і зі складовими зсуву Δ кінця п'єзорезонатора, як координати y_i на виході; механічного - з координатами на вході і з вихідною координатою у виді Δ' переміщення маніпулятора або ЛПД і частоти обертання ω (швидкості n) ротора ПЕД. На рис. 3.6, б представлена структурна схема привода у виді одного еквівалентного динамічного об'єкта керування з x_i на вході і $\omega(n)$ на виході, що містить тільки прямі зв'язки, при цьому через $f_k(t)$ позначений вплив зовнішніх збурень (зміни навантаження ΔM_C - в'язкості палива, температури $\Delta \theta$, напруги живлення U_C , механічні впливи і впливи інших параметрів середи), через $f_{BH}(t)$ - дія внутрішніх збурень (шуми, старіння, зміна зусиль притиску F_{Π} і кута притиску φ ПР до штовхальника ЛПД чи ротора ПЕД).

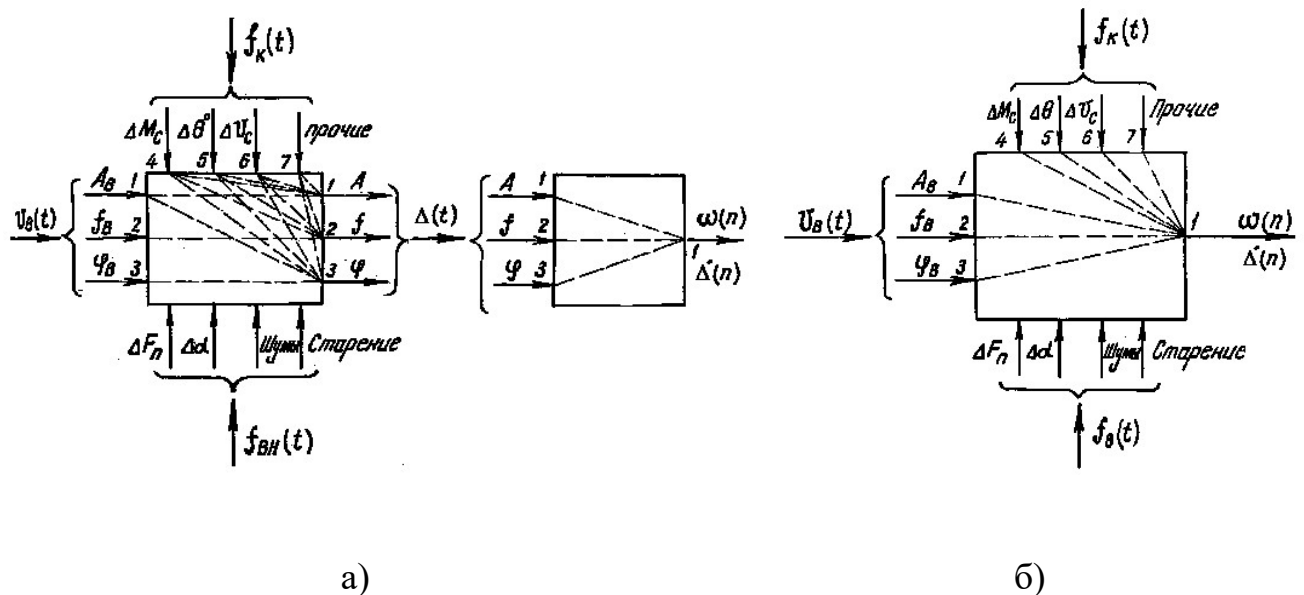


Рис. 3.6. Структурні схеми ЛПД і ПЕД, як БОК

Принциповий підхід, використовуваний для опису процесів у функціональних п'єзоелементах типу п'єзотрансформатор, ідентифікація його, властивостей, розглянутих у роботах [95, 96, 111], лишаються справедливими і для ПЕМ і ПЕД.

Важливим фактором серед зовнішніх збурень є температура [112, 99, 90]. При зміні температури навколишнього середовища сильний вплив на характеристики п'єзоприводу роблять градієнти температури $\Delta\theta^\circ$ і межі її зміни [112]. Тому для них вплив температури досить відчутні і зміна температури відноситься до сильних збурень. При вузькому діапазоні зміни температури ПЕМ і ПЕД змінюють властивості незначно. В даний час проводяться роботи зі створення нових керамічних матеріалів, що володіють високою температурною стабільністю [113].

Внутрішніми $f_{BH}(t)$ є вплив різного роду неоднорідних збурень (структури і властивостей кристала, поляризації, його обробки). Ці збурювання можуть надавати свій вплив через старіння, шуми [114, 115]. Старіння, тобто зміна параметрів ПЕМ і ПЕД у часі, створює властивість нестационарності і є залежним процесом як від зовнішніх впливів, так і є чисто тимчасовим фактором. Істотний вплив на старіння роблять зовнішні впливи (E , T , θ), фактори навколишнього середовища (підвищений тиск, хімічні реагенти й ін.) [98]. Проте, старіння для ПЕД на основі сучасних матеріалів, що були отримані з використанням нових технологічних способів якісної обробки кераміки (наприклад, поліруванням ПР підвищують стабільність їхньої

частоти в 3-10 разів; температурною обробкою [116]; опроміненням у γ - і нейтронних потоках дозволяють більш ніж у 2-3 рази зменшити зміну характеристик [99, 117]; поляризацією під тиском і ін.), варто розглядати як слабке збурювання [118].

При роботі ЛПД і ПЕД з пасивним ротором можлива поява низькочастотних акустичних шумів чи скрипів. Так у [115] розглядаються скрипи в приводі магнітофонів. При цьому було з'ясовано, що поява скрипів залежить від погоджених розмірів ПР ПЕД, резонансних частот пластини ПР (по ширині і товщині), кріплення ПР, а також від матеріалу і зони контакту ПР із ротором ПЕД (ширина контактної площадки - мінімальна, наприклад, для частот $20 \div 200$ кГц - 0,05-0,5 мм) [115].

З усього різноманіття навколишніх умов найбільш жорстким є вплив ядерного чи радіоактивного випромінювання на п'єзоелементи, з якими приходиться мати справу при їхньому використанні, наприклад, в установках ядерної фізики, у бортовій апаратурі космічних і літальних об'єктів. П'єзокерамічні елементи в порівнянні, наприклад, з напівпровідниковими володіють підвищеною радіаційною стійкістю і зберігають працездатність у нейтронних потоках при дозах порядку 10^{-18} - 10^{-21} нейтрон/см² (у напівпровідників - 10^{14} - 10^{16} нейтрон/см²) [98, 119, 120, 121]. Отже, радіоактивне випромінювання для п'єзоприводів варто розглядати як слабке збурювання.

Необхідно відзначити, що найбільш повно (з погляду процесів у ПР) внутрішні збурювання досліджені в роботах [98, 99, 117, 122].

Усі ці впливи, тобто електричний, тепловий і механічний впливи, являють собою керуючі чи зовнішні впливи, що обурюють. Вони є головними і визначають основні і зв'язані з ним ефекти і явища в п'єзорезонаторах [88, 95, 98]. Але при складанні моделей віскозиметра приймемо наступні обмеження:

а) $\Delta\theta^\circ=0$, тому що підтримувана температура роботи ПР повинна бути постійною;

б) електричний вплив є постійним.

Тому переважаюче значення будуть мати, як механічний вплив з боку ЛПД, ПЕД і ПЕМ на триботехнічний вузол, так і з боку триботехнічного вузла на привод.

3.1.2. П'єзоелектричний маніпулятор зі складального стовпа

Так, при побудові структурної схеми маніпулятора зі складального пакета ПЕ, варто враховувати, що він буде робити одномірні коливання в системі ПЕМ-ВО в області частот до $2 \cdot \pi \cdot 10$ Гц. Крім ВО переміщаються також елементи об'єму активної частини маніпулятора, маса якого m_k найчастіше менше, ніж маса поршня. При цьому інерція елементарних об'ємів, що переміщаються, ПЕМ можна зневажити або, маючи у виді, що ПЕМ закріплено одним кінцем і ця його частина не приймає участі в прямованні, уточнити значення сумарної приведенної рухомої маси m_{Σ} , включивши в неї крім маси m_0 частину маси ПЕМ m_k . Відповідно до комплексу зусиль, що діють на приведені маси $\dot{m}$, і рівняння [107, 109], описуючі поведження ПЕМ, складена структурна схема, представлена на рис. 3.7. Аналіз структурної схеми вказав на істотну особливість однолінійної моделі, що впливає і полягає в тому, що зусилля в складальному ПЕМ, породжувані в динаміці керуючим полем, діють безпосередньо тільки на границях активної зони. Усі процеси усередині активної зони протікають винятково під дією пружних і зусиль, що демпфують. Останні можуть виникати у внутрішніх шарах ПЕМ тільки внаслідок переміщень прикордонних шарів. Зовнішні збурювання "передаються" усередину активної зони через граничні дільниці. Нарешті, внутрішній зворотний зв'язок для складального стовпа з великого числа однакових п'єзошайб визначається тільки різницею швидкостей границь активної зони. Відзначені властивості вказують на виняткову важливість динамічних процесів на границях активної зони ПЕМ, у той час як рух його внутрішніх шарів подібно процесам у пасивних пружних елементах.

Точність опису складального п'єзoeлемента зростає з ростом числа шайб у пакеті.

Однак, при переході до передатної функції досить складно здійснити згортання структури на рис. 3.7. Особливо для випадку, якщо $N=100$.

Тому, інтерес становить структура ПЕМ (рис. 3.2, а), що закріплений на нерухомій основі ($m_2 \rightarrow \infty$) і керується від джерела Е.Д.С. Комбінації з декількох подібних структур можуть використовуватися для аналізу динаміки складального п'єзостовпа з N однакових п'єзошайб, з'єднаних електрично паралельно, а механічно

послідовно з чергуванням напрямків поляризації.

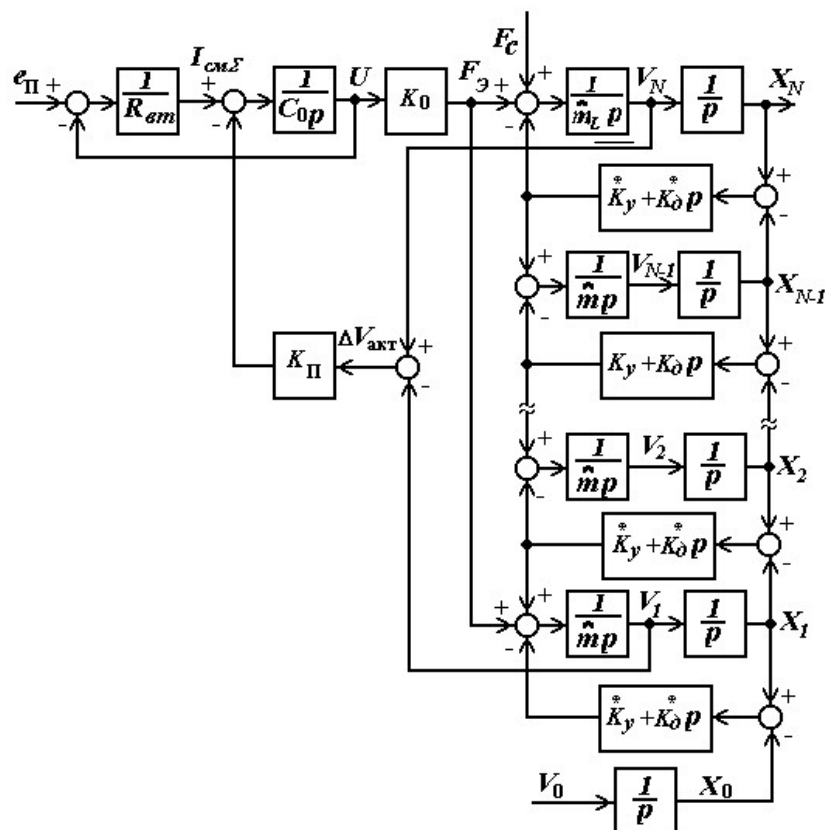


Рис. 3.7. Структурна схема багато масової моделі складального стовпа

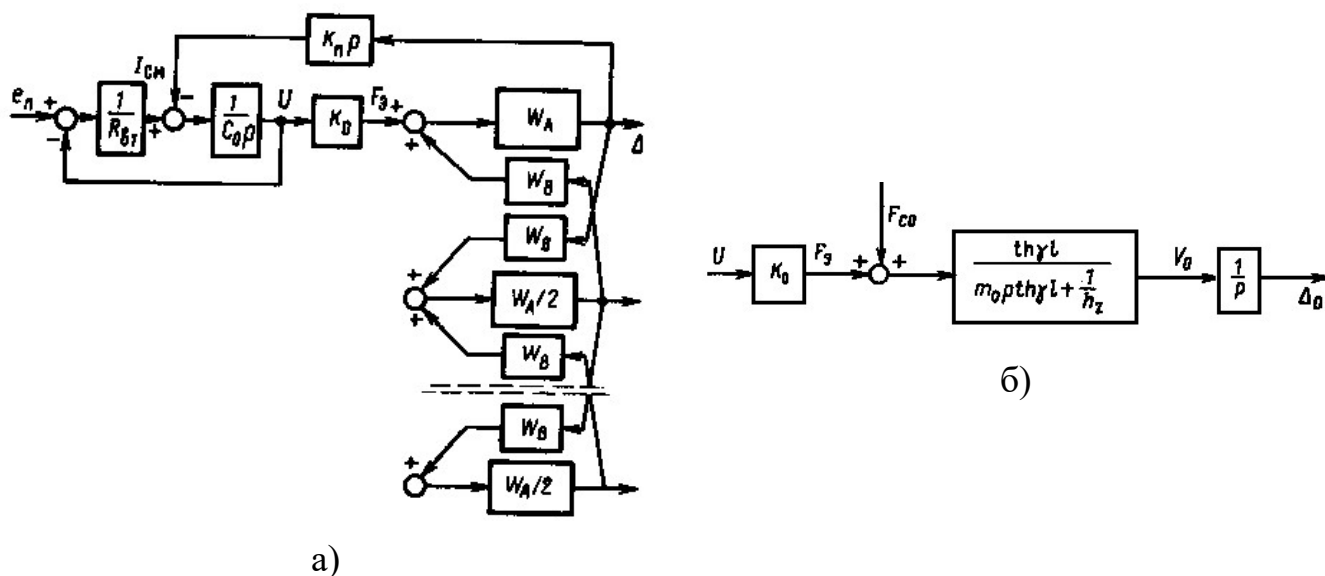


Рис. 3.8. Структурна схема складального стовпа, закріпленого на нерухомій підставі (а); Структурна схема складального стовпа у випадку, коли $N_{\text{п'єзостолба}} \rightarrow \infty$ (б)

Зі збільшенням кількості шайб у стовпі його властивості наближаються до властивостей розподіленого стрижня з параметрами γ і h , причому вплив прямого п'єзоефекту усе в більшій мірі обмежується ланцюгами формування керуючої напруги U . На рис. 3.8, б приведена структурна схема ПЕМ у виді складального п'єзостовпа, закріпленого одним кінцем на нерухомій основі. Схема добре описує властивості реального об'єкта вже при числі елементарних шайб у стовпі $N \geq 3 \div 5$.

3.1.3. Лінійний п'єзодвигун і п'єзодвигун з пасивним ротором

Розглянемо наступний випадок, коли ПР із поперечною поляризацією використовується в ЛПД і ПЕД.

Так для п'єзопластики з елементарним об'ємом з [88, 90, 98] і з огляду на, що

$$E = \text{const} \text{ і } S_1 = \frac{\partial \Delta}{\partial x}.$$

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = (c)^2 \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} \quad (3.18)$$

де Δ - зміщення уздовж осі x , C - швидкість поширення хвиль у пластині (при

постійному E) $c = \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E}} = \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho}}$. Припустивши, що пластина досить тонка, можна

вважати розподіл S і T однорідним по всьому перетині, а коливання поширюється уздовж осі як плоска хвиля синусоїдальної форми. Тому рішення диференціальних рівнянь для переміщення Δ , швидкості V і діючої сили F у будь-якому перетині пластини при гармонійному порушенні $E_3 = E_0 e^{j\omega t}$ і граничних умовах ($x=0$, $x=l$, $T_1=0$) має вид

$$\Delta = \left[j \frac{V_2 + V_0 c h \gamma l}{\omega s h \gamma l} c h \gamma x + \frac{V_0}{j \omega} s h \gamma x \right] e^{j\omega t}; \quad (3.19)$$

$$V = \frac{\partial \Delta}{\partial t} = - \frac{V_2 + V_0 c h \gamma l}{s h \gamma l} c h \gamma x + V_0 s h \gamma x; \quad (3.20)$$

$$F(x) = \gamma Y_{11}^E \sigma \left[j \frac{V_2 + V_0 c h \gamma l}{s h \gamma l} c h \gamma x - V_0 s h \gamma x \right] e^{j\omega t}, \quad (3.21)$$

де $\sigma = ab$; γ - постійна поширення хвиль при відсутності загасання

$$\gamma = j\omega\sqrt{Y_{11}^E\rho} = j\omega/c = j\beta.$$

Для ПЕД з пасивним ротором:

$$F_0 = \left[\frac{z_0}{th(\gamma l/2)} + n_\phi^2 z_{E.ЛР} \right] V_0 + \left(\frac{z_0}{sh\gamma l} + n_\phi^2 z_{E.ЛР} \right) V_2 + n_\phi^2 z_{E.ЛР} I, \quad (3.22)$$

$$F_2 = \left(\frac{z_0}{sh\gamma l} + n_\phi^2 z_{E.ЛР} \right) V_0 + \left[\frac{z_0}{th(\gamma l/2)} + n_\phi^2 z_{E.ЛР} \right] V_2 + n_\phi^2 z_{E.ЛР} I, \quad (3.23)$$

$$U = n_\phi z_{E.ЛР} V_0 + n_\phi z_{E.ЛР} V_2 + z_{E.ЛР} I, \quad (3.24)$$

де $n_\phi = bY_{11}^E U_{31}$ - коефіцієнт трансформації; $z_{E.ЛР} = \frac{U}{I} \Big|_{V_0=V_2=0} = \frac{1}{j\omega \frac{bl}{a} \varepsilon_{33}^T (1 - K_{31}^2)}$ -

ємнісна частина вхідного опору.

Рішення рівняння (3.1) інтегруванням з урахуванням граничних умов при періодичному зовнішньому впливі щодо сил F_0, F_2 і коливальних швидкостей V_0, V_2 (відповідно на границях пластини), напруги U і току I (рис. 3.3) у матричній формі, мають вид для поперечного ефекту

$$\begin{vmatrix} F_0 \\ F_2 \\ U_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & A_2 & B \\ A_2 & A_1 & B \\ B & B & C \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_0 \\ V_2 \\ I_0 \end{vmatrix}, \quad (3.25)$$

а для подовжнього ефекту

$$\begin{vmatrix} F_1 \\ F_2 \\ U_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A'_1 & A'_2 & B' \\ A'_2 & A'_1 & B' \\ B' & B' & C' \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \end{vmatrix} \quad (3.26)$$

чи в узагальненій формі

$$\begin{vmatrix} F_i \\ U_i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A \\ B \\ C \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_i \\ I_i \end{vmatrix}, \quad (3.27)$$

де A, B, C - складові матриці $[A]$.

На основі методу електромеханічних аналогій (по теорії подоби систем) від рівняння (3.27), замінюючи механічні сили (F_i) і коливальні швидкості (V_i) електричною напругою U і током I , можна перейти до схеми заміщення, п'єзопластини [88]. Схема заміщення ПР ПЕД (при порушенні тільки подовжніх

коливань) являє собою шестиполіусник (рис. 3.3, а), електричні параметри якого визначені на основі аналізу приведеної схеми і мають наступний вид

$$z_0 = ab\rho c = \sigma\sqrt{\rho Y_{11}^E} ; z_{E.ПР} = \frac{a}{blj\omega\epsilon_{33}^T(1-K_{31}^2)} \text{ чи } X_E = \frac{a}{bl\epsilon_{33}^T(1-K_{31}^2)},$$

тому що $z_{E.ПР} = -jX_3$

$$n_\phi = bU_{31}Y_{11}^E ; K_{31}^2 = U_{31}^2 Y_{11}^E / \epsilon_{33}^T ; \quad (3.28)$$

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{\rho / Y_{11}^E} , \text{ де } \beta = \omega / c .$$

У схемах заміщення електричні і механічні параметри зв'язані за допомогою коефіцієнта трансформації n_ϕ , п'єзоелектричні коефіцієнти у виразах (3.28) є речовинними, а електричні втрати виражені через опір $z_{E.ПР}$ (реактивний опір X_3).

Більш ефективним, з погляду аналізу роботи ПЕД, є використання методів теорії чотиріполіусників [23], при цьому багатополіусну схему заміщення ПР ПЕД зводять до схеми чотиріполіусника .

Для ПР із порушенням тільки подовжніх коливань п'єзоелектрична активність по вигині відсутня, і, отже, коефіцієнт трансформації дорівнює нулю. У [23] описана схема заміщення ПЕД з пасивним ротором, що представляє два шестиполіусника, що є схемами заміщення подовжніх і коливань згину (рис. 3.2, а і б). Зв'язок між двома видами коливань на схемі заміщення представлена двома ідеальними трансформаторами (рис. 3.9).

Необхідно відзначити роботи [115, 23], у який отримані й описані схеми заміщення (моделі) ПЕД. У схемах заміщення тригонометричні функції замінюються гіперболічними, коефіцієнти ідеальної трансформації, як і інші електромеханічні коефіцієнти, стають комплексними. Схему можна представити у виді схеми з зосередженими параметрами R, L, C , що не залежать від частоти, лише приблизно, у вузькому діапазоні частот (біля f_p), не приймаючи в увагу їхні малі зміни від частоти в цьому діапазоні.

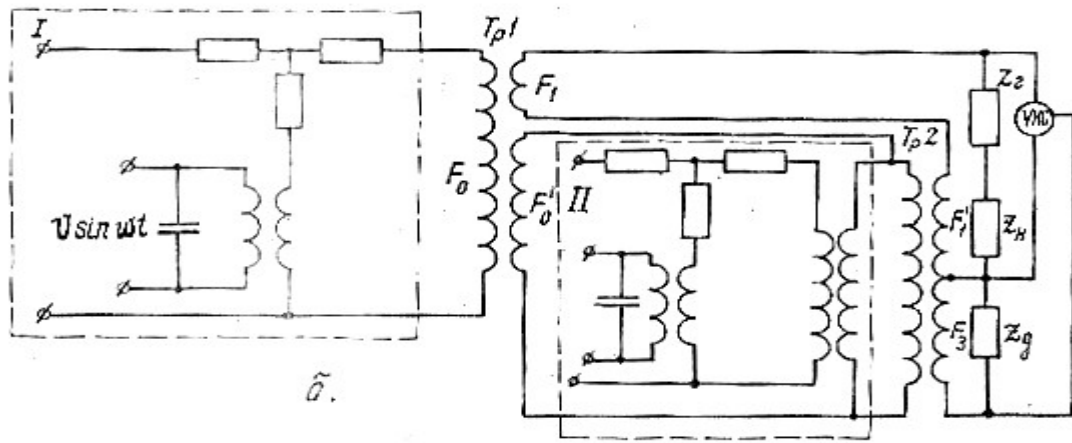


Рис. 3.9. Схема заміщення ПЕД з пасивним ротором

Наприклад, для розглянутого типу ПР (рис. 3.2, а і б) матричні коефіцієнти у вираженнях (3.28) мають наступний вид

$$A_1 = \frac{Z_0}{th\gamma l} + n_\phi B ; \quad A_2 = \frac{Z_0}{th\gamma l} + n_\phi B ; \quad B = n_\phi C ; \quad C = Z_{E,ПР} , \quad (3.29)$$

де Z_0 , $Z_{E,ин}$, N_ϕ , K_{31}^2 і γ - параметри схеми (рис. 3.2, в і г) і визначаються на основі виразів (3.22).

Поряд з таким підходом при описі роботи ПР також використовується метод кінцевих елементів, що дозволяє описати поведінку елементарного шару і далі здійснити перехід до узагальненої моделі конструкції будь-якого привода. У [109] Щербінін О.М. запропонована математична модель ЛПД із мультиплікацією, де ПР перебуває в постійному контакті з рухомою частиною. Якщо використовувати схеми заміщення двигунів, як показано на рис. 3.9, то в якості УНС необхідно використовувати схему заміщення триботехнічного вузла.

3.2. Процеси в триботехнічних вузлах

Особливість процесів у триботехнічному вузлі накладає обмеження на роботу усього віскозиметра. Як відзначалося раніше, тертя в пристінному шарі – це нормальний режим роботи триботехнічного вузла. Однак поряд з ним у процесі експлуатації через знос може виникати адгезія контактуючих поверхонь, що зажадає

збільшення потужності привода, не адекватної вимірюваній в'язкості. Як правило, після декількох робочих циклів цей контакт усувається. Однак, у цей момент часу необхідно виключити можливість виміру в'язкості. Можливий другий граничний випадок, коли навпаки відбувається підйом B_1 , що у випадку виміру тільки сили тертя приводить до того, що товщина шару стає такою, що діють властивості "ньютонівських" (об'ємних) рідин. Для запобігання такої ситуації передбачено, що об'єкт, що переміщається, має циліндричну форму і переміщається усередині іншого циліндра.

Крім того, вимір в'язкості можна проводити як у тупиковій камері (для лабораторних іспитів), так і в потоці. Однак при використанні тупикової камери варто врахувати, що після декількох проходів під дією напруги, що прикладаються, паливо починає розділятися на фракції, що, в остаточному підсумку, може призвести до явища облітерації - захопленню елементів триботехнічного вузла і тонкого шару палива.

При моделюванні процесів у триботехнічному вузлі варто врахувати, що його можна представити у виді рівнобіжного з'єднання жорсткостей.

У роботі [123] розглядається схема заміщення тиксотропної рідини по моделі О.Ю. Ішлинського.

Нами було проведено моделювання процесів, що відбуваються в триботехнічному вузлі, і здійснений перехід від механічної системи до електричного, при якому жорсткість пружини c змінюється на конденсатор C , демпфер k – резистор R , маса m – індуктивність L , і отримана схема заміщення моделі О.Ю. Ішлинського для тиксотропної рідини (рис. 3.10).

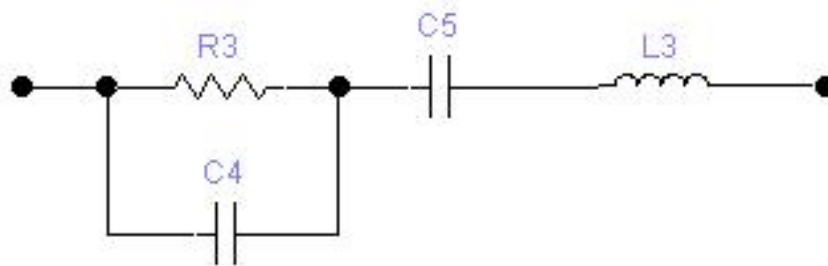


Рис. 3.10. Електрична схема триботехнічного вузла

Оскільки фізичне моделювання сполучене з великим матеріальними витратами, довелося удатися до математичного моделювання з використанням засобів і методів обчислювальної техніки.

Нами був досліджений вплив параметрів елементів схеми заміщення на АЧХ і побудовані графіки при зміні $L1$ - рис. 3.11, а; $C1$ – рис. 3.11, б; $C2$ - рис. 3.11, в; $R1$ - рис. 3.11, г.

На рис. 3.11, а зображена АЧХ при зміні $L1:1$ – $L1=1$ мГ, 2 – $L1=100$ мкГ, 3 – $L1=1$ мкГ, при $C1=10$ мФ, $C2=10$ пФ, $R1=10$ МОм.

На рис. 3.11, б зображена АЧХ при зміні $C1:1$ – $C1=10$ мФ, 2 – $C1=1$ нФ, 3 – $C1=10$ пФ, при $L1=100$ мкГ, $C2=10$ мФ, $R1=1$ МОм.

На рис. 3.11, в зображена АЧХ при зміні $C2:1$ – $C2=1$ мкФ, 2 – $C2=100$ пФ, при $L1=1$ мкГ, $C1=1$ мФ, $R1=1$ МОм.

На рис. 3.11, г зображена АЧХ при зміні $R1:1$ – $R1=100$ кОм, 2 – $R1=1$ МОм, 3 – $R1=10$ МОм, при $L1=100$ мкГ, $C1=10$ мФ, $C2=10$ пФ.

Аналіз характеристик дозволяє зробити наступні висновки. При зменшенні $L1$ відбувається зсув характеристики в область підвищених частот, при зменшенні $C1$ також спостерігається зсув характеристики вправо, крім того, спостерігається випрямлення ділянки 1 і 2. При зменшенні $C1$ в області високих частот спостерігається розбіжність графіків, а при зміні $R1$ спостерігається плавне об'єднання характеристики в одну на високих частотах. Таким чином, отримана електрична схема заміщення для моделі, зображена на рис. 3.11, д відповідає своїй механічній аналогії.

Отримана електрична схема заміщення тиксотропної рідини дозволяє побудувати надалі модель віскозиметра з п'єзоелектричним приводом, у якій при заданому сигналі керування зовнішній вплив (явища в триботехнічному вузлі), змінює момент сил, що прикладається до п'єзоелектричного привода, і, зокрема, до ПР.

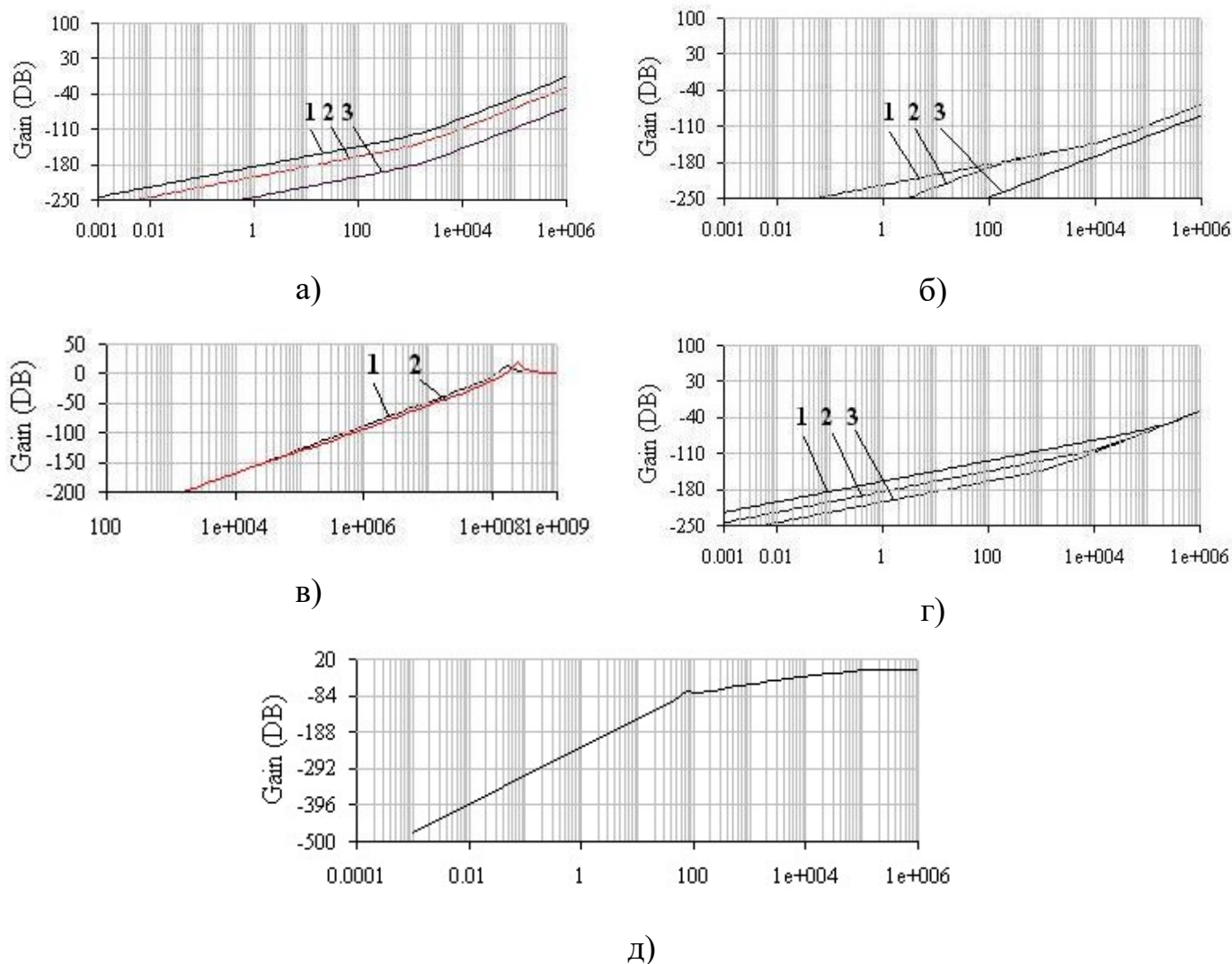


Рис. 3.11. АЧХ схеми заміщення

3.3. Математичний опис віскозиметра з приводом на маніпуляторі

При розробці математичних моделей з ПЕМ, ЛПД і ПЕД з пасивним ротором, на наш погляд, доцільно використовувати, отримане в роботах А.А.Нікольського, диференціальне рівняння 1-го порядку, що описує п'єзоелектричне зусилля, що розвивається ПР, з урахуванням приведення його маси, а також лінійні математичні моделі для ЛПД із мультиплікацією, отримані в роботах О.М. Щербіна.

Попередньо побудуємо модель віскозиметра з ПЕМ у виді складального стовпця, оскільки згідно [107, 113] він розвиває найбільше зусилля в порівнянні БПЕ.

Спочатку побудуємо модель для віскозиметра з ПЕМ з одного ПР. Запишемо

умову рівноваги сил, прикладених до рухомої границі активної частини ПЕМ:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_T - F_{TP}. \quad (3.30)$$

де $F_y = K_y \Delta$ - зусилля пружної деформації п'єзоелектричного маніпулятора (ПЕМ), Н; $F_E = d_{\Pi} Y S_0 E$ - зусилля в ПЕМ, викликане прикладеним електричним полем, Н; $F_d = K_d d\Delta/dt$ - демпферне зусилля у ПЕМ, Н; $F_{\text{дин}} = m_{\Sigma} d^2 \Delta / dt^2$; - динамічне зусилля в ПЕМ, пропорційне швидкості зсуву рухомого циліндра і викликаними при цьому процесами дисипації енергії в ПЕМ, Н; $K_y = Y S_0 / l_0$ чи (g_{31}, g_{33}) - коефіцієнт пружності ПЕМ, Н/м; $K_d (h_{31}, h_{33})$ - коефіцієнт внутрішнього демпфірування ПЕМ, кг/с; m_{Σ} - еквівалентна приведена сумарна маса рухомих частин, кг; F_{Π} - статичне зусилля, прикладене до поршня і діюче на ПЕМ з боку палива, що надходить у вимірювальну камеру, Н; $F_{TP} = \eta S \frac{\Delta V}{\Delta h}$ - сила грузлого тертя в триботехнічному вузлі, Н, уведена вперше; η - коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; S - площа поверхні тертя, м²; $\Delta V / \Delta h$ - градієнт швидкості зрушення однорідного шару рідини в триботехнічному вузлі, с⁻¹.

На підставі рівнянь (3.7) - (3.8) складена структурна схема рис. 3.12.

$$\text{Тут } W_1(p) = \frac{K_0}{1 + R_{em} C_0 p}, \quad W_2(p) = K_{\Pi} R_{em}, \quad W_3(p) = g_{33} + h_{33} p, \quad W_4(p) = \frac{1}{m_{\Sigma} p},$$

$$W_5(p) = W_{TP}(p) = \tilde{\eta}(p) \frac{S}{\Delta h} - \text{передавальна функція залежності в'язкості рідини від}$$

$$\text{швидкості переміщення рухомого циліндра (звено введено вперше), } W_6(p) = \frac{1}{p},$$

$W_7(p)$ - сила тиску палива на рухомий циліндр. Перенесемо передавальну функцію впливу палива в початок структурної схеми. Згортання структури [124, 125, 126] рис. 3.12 приводить до наступної передавальної функції віскозиметра з ПЕМ, керованого від джерела е.д.с.:

$$\tilde{V}(p) = \frac{p \left[U_{BX}(p) - \frac{F_T (1 + R_{em} C_0 p)}{K_0} \right]}{R_{em} C_0 m_{\Sigma} p^3 + (m_{\Sigma} + R_{em} C_0 (h + W_{TP}(p))) p^2 + (K_0 K_{\Pi} R_{em} + h + R_{em} C_0 g + W_{TP}(p)) p + g}, \quad (3.31)$$

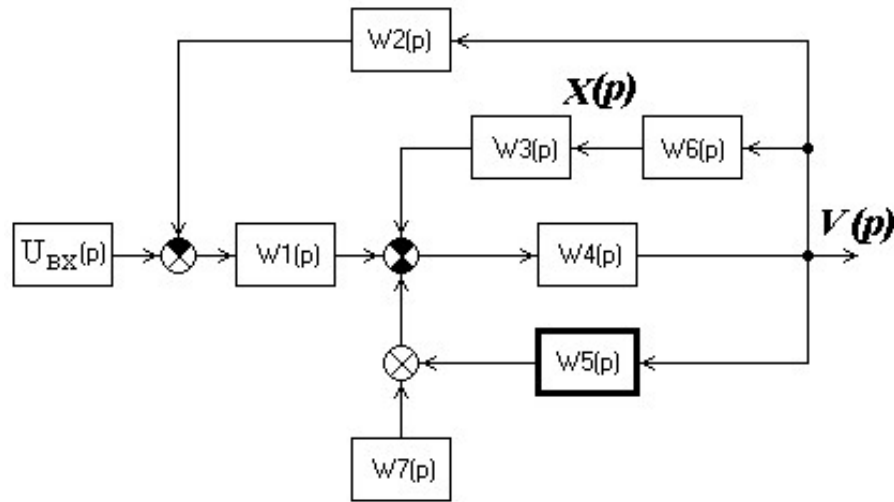


Рис. 3.12. Структурна схема п'єзоелектричного ПЕМ на одному ПР при керуванні від джерела е.д.с.

Вираз (3.31) показує, що в ПЕМ крім демпфірування, обумовленого внутрішніми дисипативними процесами, має місце також демпфірування, зв'язане з прямим п'єзоефектом і представлене у виді ланки $W_2(p)$.

Щоб побудувати АЧХ віскозиметра, необхідно:

- а) вибрати розміри рухомого циліндра і розмір зазору в триботехнічному вузлі;
- б) зробити вибір коефіцієнта в'язкості;
- в) вибрати параметри п'єзокераміки відповідно до типу поляризації.

Виберемо розмір рухомого циліндра $d=5 \cdot 10^{-3}$ м, $h=1 \cdot 10^{-2}$ м, виготовленого з заліза. Тоді площа поверхні циліндра, рівна поверхні тертя, $S=6,283 \cdot 10^{-4}$ м². З огляду на матеріал, з якого виготовлений циліндр, дістанемо масу поршня $m=0,015$ кг.

Задамо коефіцієнти грузлого тертя, що входять до складу рівняння, з наступних міркувань. У [127] на машині тертя для олії були побудовані реологічні характеристики, представлені на рис. 3.13.

Виберемо коефіцієнти ПР у виді шайби з подовжньою поляризацією і виготовленого з кераміки ЦТС-19 [113]: $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{33}=1500$, $l_0=1,9 \cdot 10^{-3}$ м, $S_0=7,854 \cdot 10^{-5}$ м², $m_{\text{ПР ЦТС-19}}=0,01134$ кг, $R_{\text{em}}=50$ Ом, $g_{33}=22,3 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $h_{33}=0,032$ кг/с, $\rho=7,6 \cdot 10^3$ кг/м³, $Y_{33}=5,952 \cdot 10^{10}$ Па, $d_{33}=360 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Виберемо коефіцієнти в'язкості $\eta_1=0,1$ Па·с, $\eta_2=10$ Па·с, $\eta_3=20$ Па·с, $\eta_4=30$ Па·с для ньютонівських рідин і

побудуємо графік ЛАЧХ (рис. 3.14, а). У разі, якщо вибрати коефіцієнти $\tilde{\eta}(p) = \eta_i / p$ для неньютонівських рідин, получимо інший характер ЛАЧХ (рис. 3.14, б).

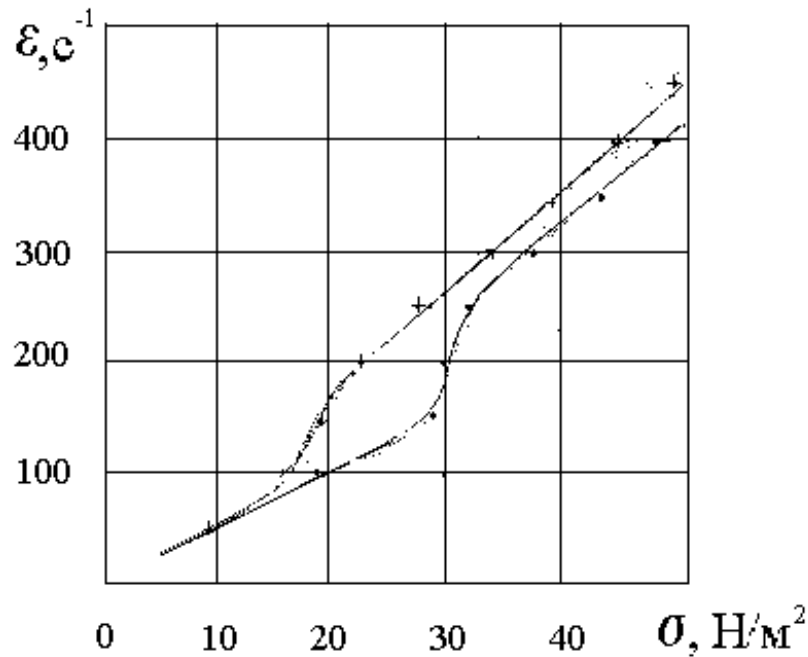


Рис. 3.13. Реологічні характеристики олій

Виберемо коефіцієнти ПР у виді паралелепіпеда з поперечною поляризацією і виготовленого з кераміки ЦТС-19 з урахуванням наступної умови, щоб площа паралелепіпеда дорівнювала площі шайби: $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{33} = 1500$, $l_1 = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $l_2 = 7,854 \cdot 10^{-3}$ м, $l_3 = 19 \cdot 10^{-3}$ м, $m_{\text{ПР ЦТС-19}} = 0,01134$ кг, $R_{\text{em}} = 50$ Ом, $g_{31} = 8,9 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $h_{31} = 0,032$ кг/с, $\rho = 7,6 \cdot 10^3$ кг/м³, $Y_{11} = 8 \cdot 10^{10}$ Па, $d_{31} = 175 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Побудуємо графіки ЛАЧХ у разі введення в зазор ньтонівських та тиксотропних рідин (рис. 3.14, в і г).

Аналіз ЛАЧХ показав, швидкість, яка розвивається ПР у діапазоні від 0 до 100 Гц, залежить від коефіцієнта в'язкості неньютонівських рідин.

У пакеті Matlab проведено моделювання процесів у віскозиметрі, де зверху вниз розташовуються зусилля, що розвивається, ПР, швидкість вільного кінця ПР, амплітуда переміщення і напруга, що керує.

На рис. 3.15, а представлені результати моделювання на холостому ходу для віскозиметра з ПЕМ у виді шайби з подовжньою поляризацією на частоті $f = 314$ кГц при амплітуді керуючої напруги 100 В, на рис. 3.15, б – 1000 В.

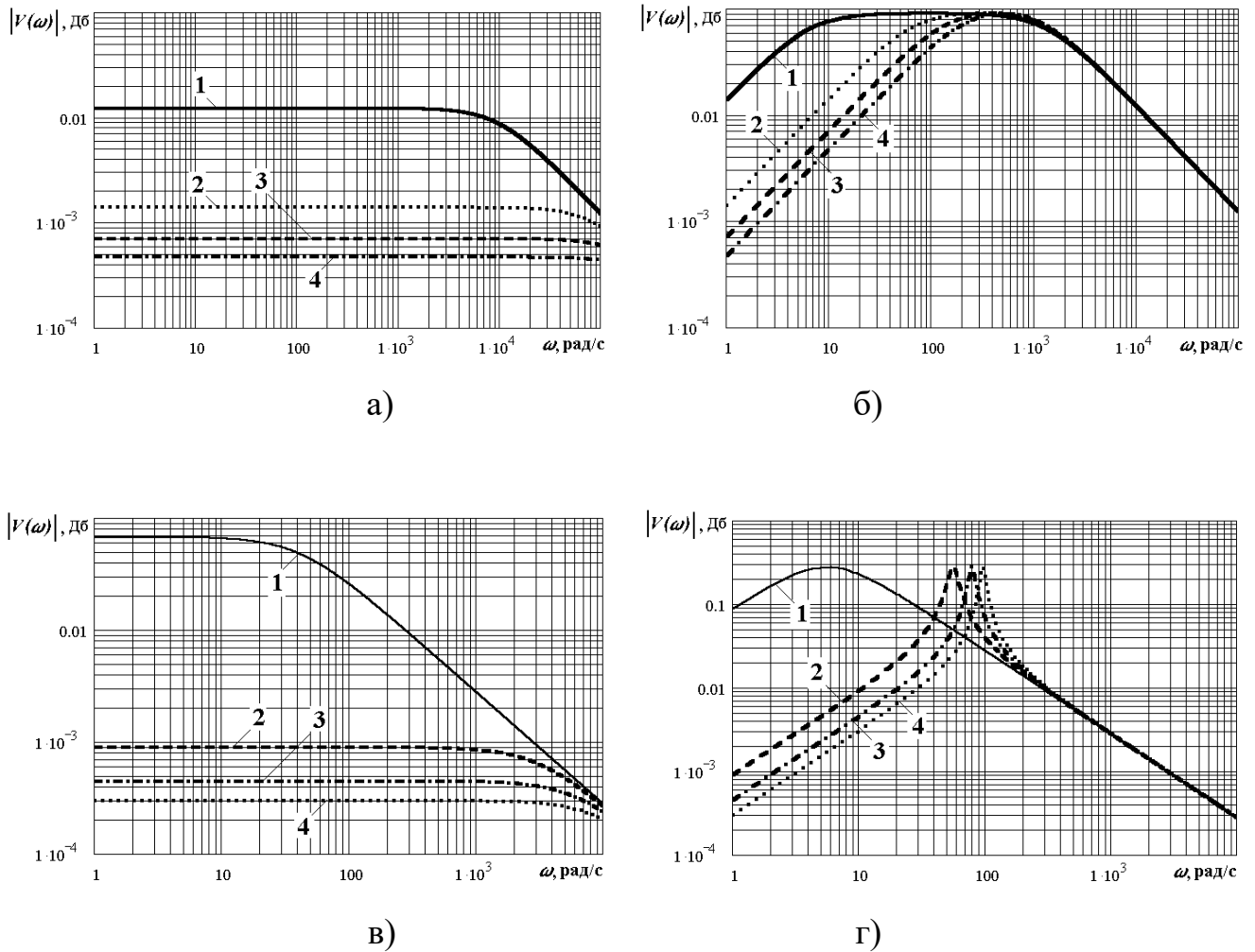
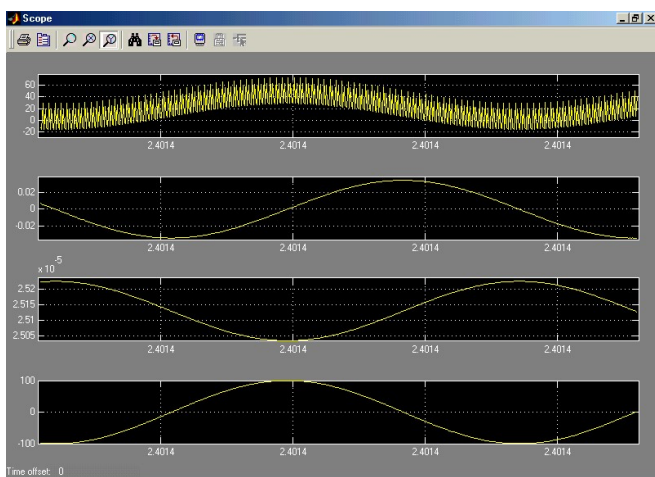


Рис. 3.14. ЛАЧХ реометра з подовжньою поляризацією ПР: а - $\tilde{\eta}(p) = \eta_i$, б - $\tilde{\eta}(p) = \eta_i / p$, $l_0 = 1,9 \cdot 10^{-3}$ м, $S_0 = 7,854 \cdot 10^{-5}$ м²; та поперечною поляризацією ПР: в - $\tilde{\eta}(p) = \eta_i$, г - $\tilde{\eta}(p) = \eta_i / p$, $l_1 = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $l_2 = 7,854 \cdot 10^{-3}$ м, $l_3 = 19 \cdot 10^{-3}$ м; $m_{\text{ПР ЦТС-19}} = 0,01134$ кг, $R_{\text{em}} = 50$ Ом; 1 – холостий хід, 2 - $\eta_1 = 10$ Па·с, 3 - $\eta_2 = 20$ Па·с, 4 - $\eta_3 = 30$ Па·с

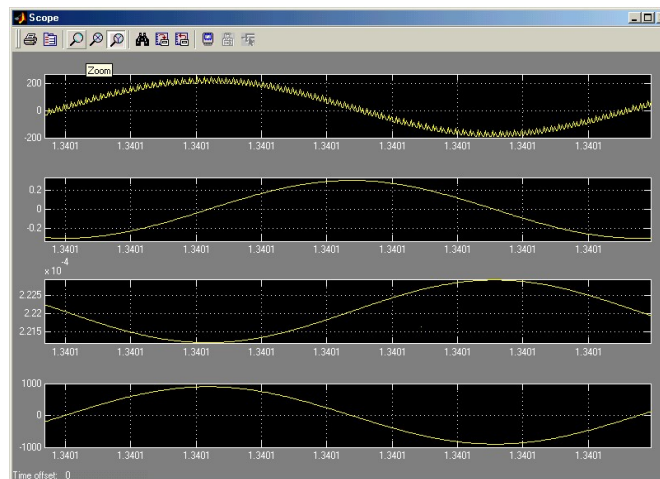
На рис. 3.16 представлена реакція ПР на наявність грузлого тертя з коефіцієнтом $\eta = 10$ Па·с.

На рис. 3.17 представлена реакція ПР, де четвертий графік зверху – момент, що розвивається ПР на холостому ході і при $\eta = 10$ Па·с, відповідно.

З графіків видно, що зусилля, що розвиваються, потужність, швидкість і переміщення залежать від амплітуди керуючої напруги.



а)



б)

Рис. 3.15. Характеристики перехідних процесів на холостому ході: (а – 100 В, б – 1000 В)

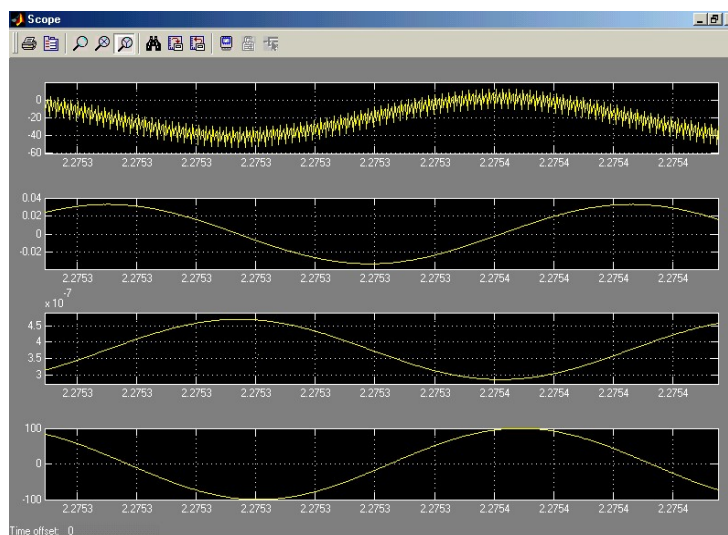


Рис. 3.16. Характеристики перехідних процесів при $\eta=10$ Па·с

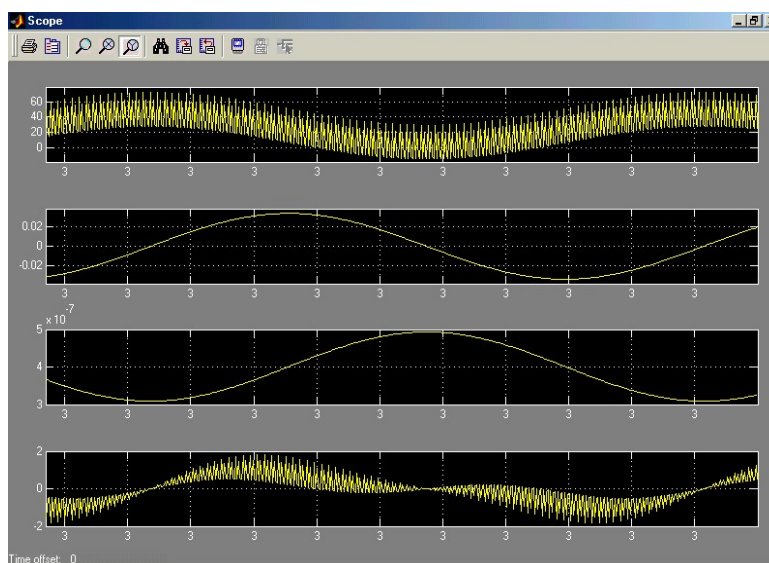


Рис. 3.17. Характеристики ПР

Отриманий вище опис реометра з ПЕМ (3.26) - (3.28) придатний не тільки для найпростішого випадку однорідного плоского елемента. В області частот від нуля до першого механічного резонансу воно задовільно описує процеси в ПЕМ усіх типових конструкцій, що забезпечують підвищені переміщення, - складальних стовпцях, біморфних ПЕМ. Найкращий збіг динамічних характеристик моделі й об'єкта виходить при використанні для моделювання експериментально визначених параметрів m_{Σ} , K_y , K_0 , K_{Π} , C_0 , R_{BT} .

І оскільки шайба є складовою частиною складального стовпа представимо у виді одномірної моделі віскозиметр із ПЕМ, виконаний у виді складеного стовпа з N однакових шайб товщиною l_0 с напрямком поляризації, що чергується, (рис. 3.18, а).

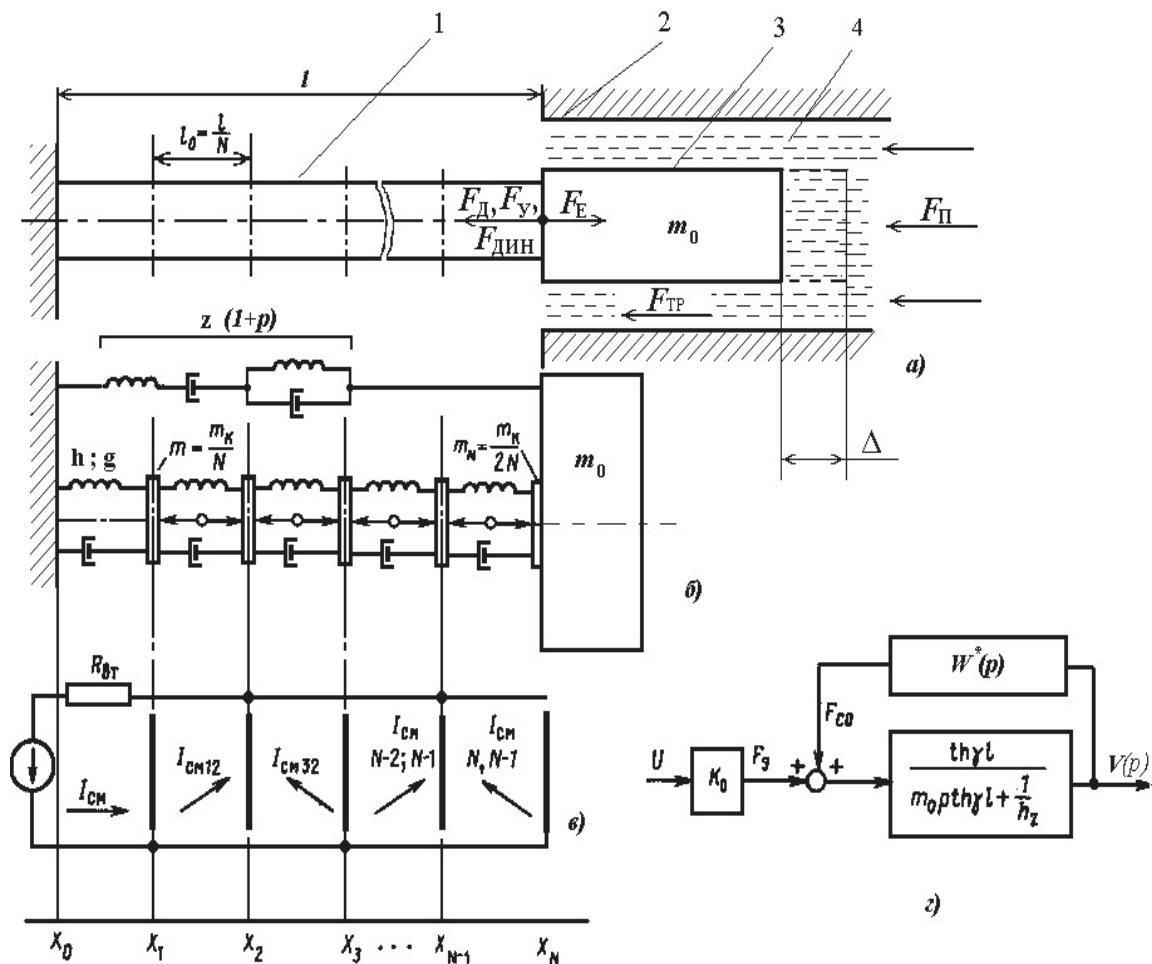
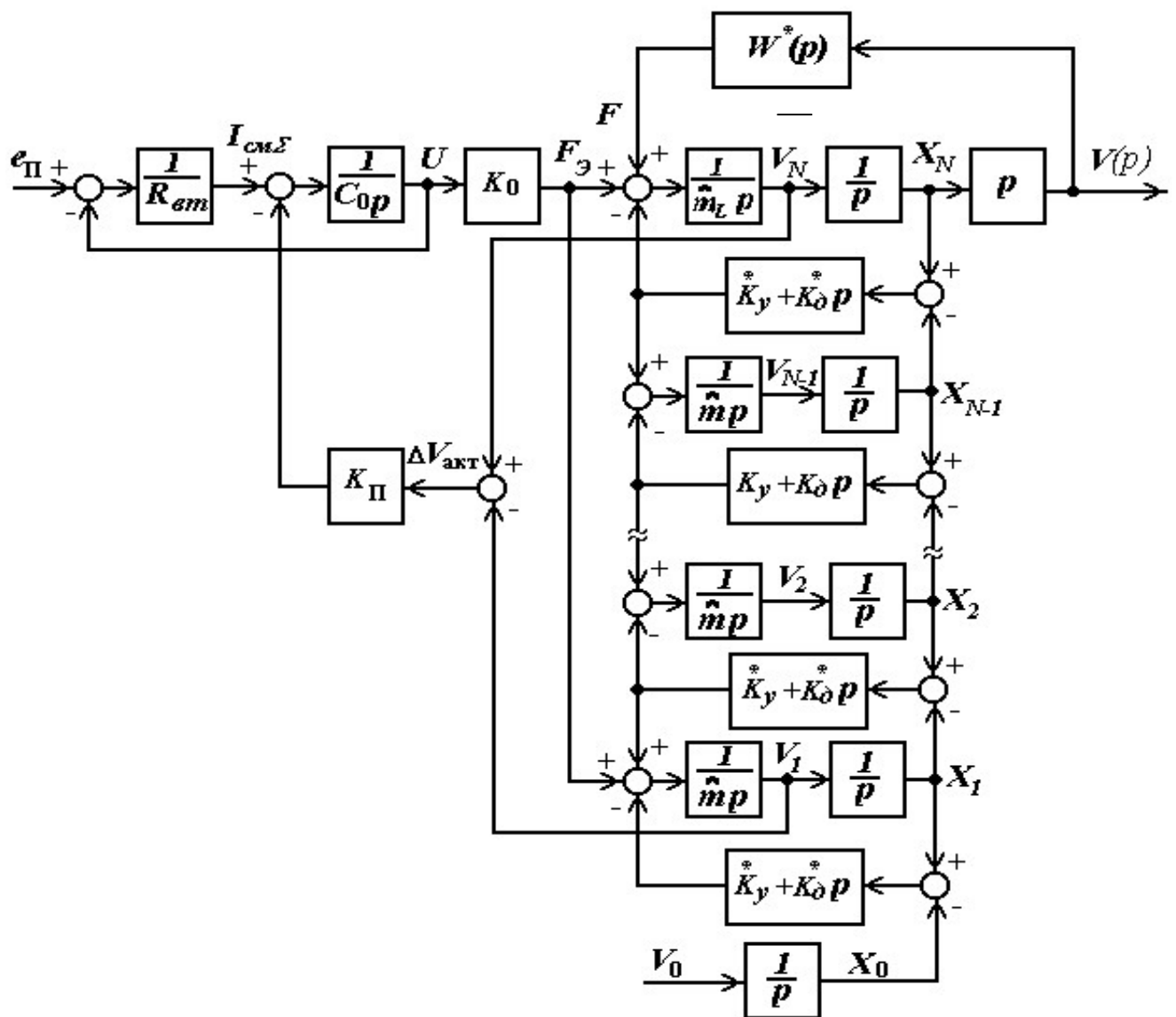
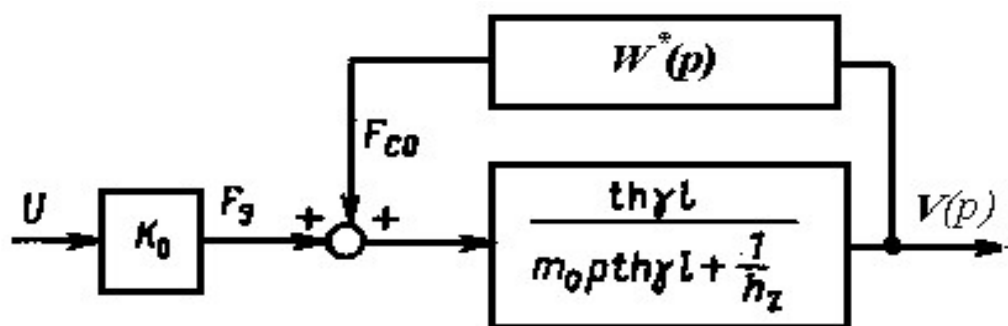


Рис. 3.18. Віскозиметр із ПЕМ зі складального стовпа: а - багато масова модель; б - електрична схема заміщення; в - пакет шайб; 1 - складальний стовп; 2 - нерухомий циліндр, 3 - рухомий циліндр, 4 - випробувана рідина, F_{Π} - тиск рідини, F_E - зусилля маніпулятора



a)



б)

Рис. 3.19. Структурна схема багато масової моделі реометра з ПЕМ зі складального стовпа (а); структурна схема реометра для випадку $N_{\text{пьезостолба}} \rightarrow \infty$ (б)

Згортання структури на рис. 3.19, б приводить до передавальної функції реометра зі складального стовпа для швидкості переміщення рухомого циліндра до наступного виду:

$$V(p) = \frac{K_o}{m_{\Sigma}p + \frac{1}{th(\gamma^D l)h_z^D} + \frac{\eta S}{\Delta h}},$$

$$\text{де } \gamma^D = p / \left[l \sqrt{g_{33}^D \left(1 + p \frac{h_{33}}{g_{33}^D} \right)} / m_{\Sigma} \right] \text{ і } h_z^D = \frac{1}{\sqrt{g_{33}^D \left(1 + p \frac{h_{33}}{g_{33}^D} \right)} m_{\Sigma}} \text{ хвильові параметри.}$$

Виберемо коефіцієнти.

Тип поляризації ПР - шайба з подовжньою поляризацією і розмірами $l_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $R_{\text{ПР}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м

Матеріал кераміки ЦТС-19: $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{33} = 1500$, $R_{\text{см}} = 50$ Ом, $g_{33} = 22,3 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $h_{33} = 0,032$ кг/с, $\rho = 7,6 \cdot 10^3$ кг/м³, $Y_{33} = 5,952 \cdot 10^{10}$ Па, $d_{33} = 360 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

Задамо розміри рухомого циліндра $R_{\text{Ц}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м, $L_{\text{Ц}} = 0,1$ м. Кількість шарів $N = 100$. Розрахунок показав, що маса рухомого циліндра і маніпулятора становить $m_{\Sigma} = 1,25$ кг.

Побудуємо графік ЛАЧХ (рис. 3.20).

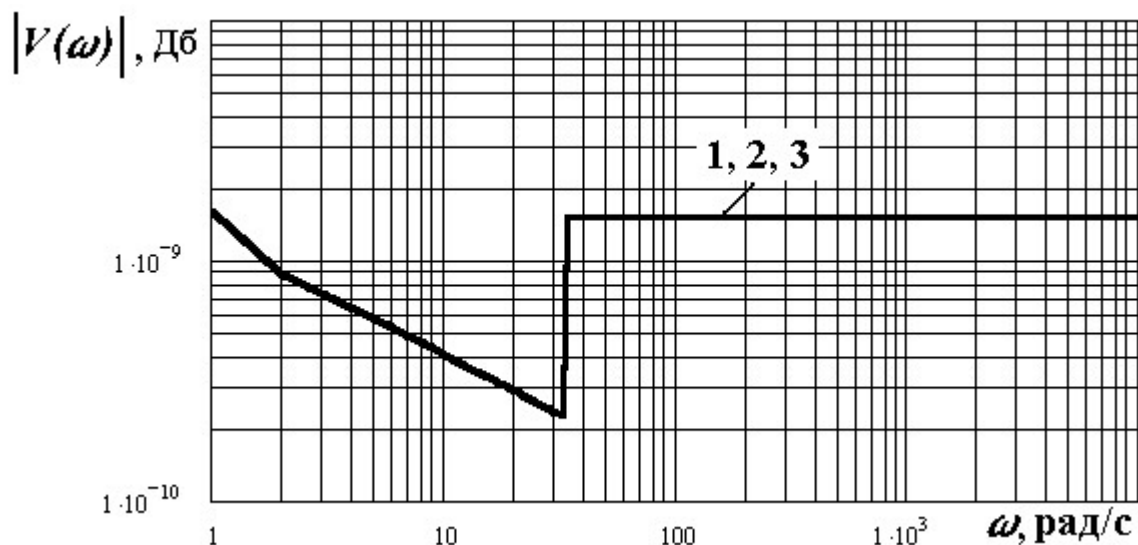
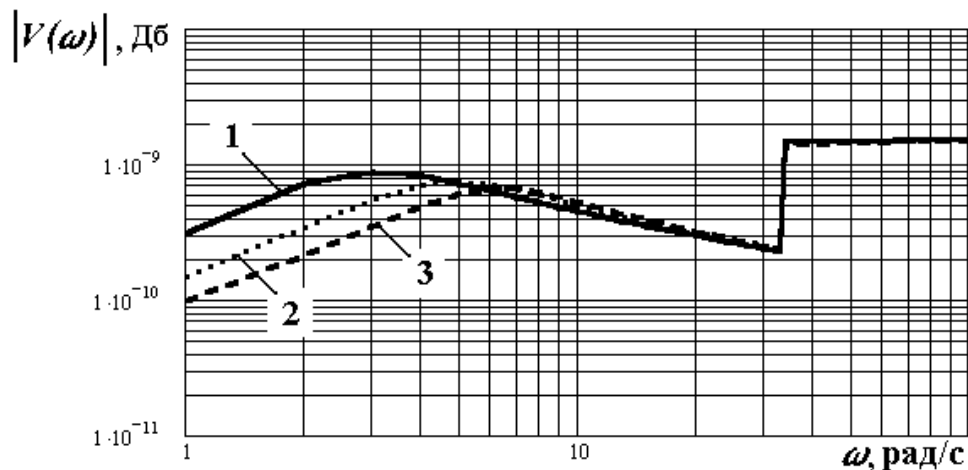


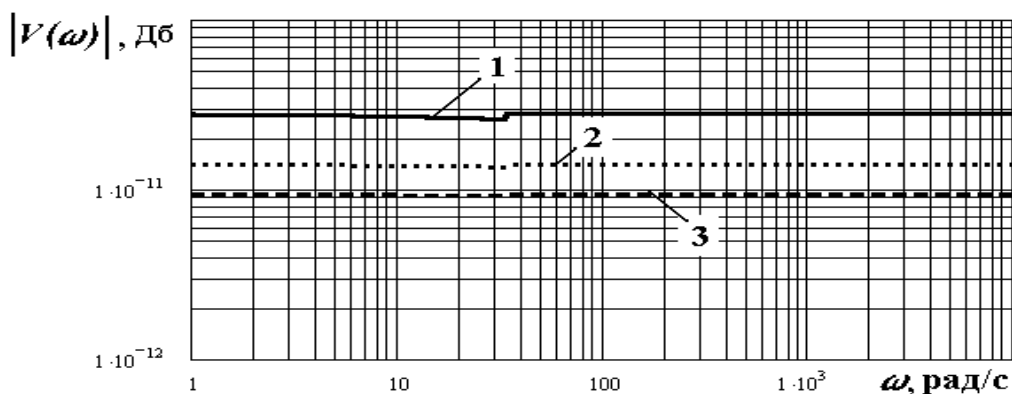
Рис. 3.20. ЛАЧХ

Дослідження показали, що при зміні розмірів п'єзокераміки і рухомого

циліндра ПЭМ не відчуває зміну в'язкості. Домогтися результату можна, якщо змінювати зазор чи узяти матеріал з п'єзомодулем $d_{33}=56 \cdot 10^3$ Кл/Н. Побудуємо графік ЛАЧХ (рис. 3.21, а і б).



а)



б)

Рис. 3.21. ЛАЧХ реометра з маніпулятором зі складального стовпа при введенні в зазор: а - тиксотропних рідин, б – ньютонівських рідин, 1 - $\eta_1=10$ Па·с, 2 - $\eta_2=20$ Па·с, 3 - $\eta_3=30$ Па·с

Порівнюючи АЧХ реометрів можна зробити висновок, що в області низьких частот шайба і складальний стовп ведуть практично однаково. А в області біля резонансних частот відмінності істотні. У стовпа спостерігається спад АЧХ, у шайби – резонанс. Однак одержувані переміщення досить малі і становлять у шайби 0,4 мкм, а в стовпа з 100 шайб при напрузі 1000 В – 40 мкм.

Тому, щоб дістати переміщення понад 1 мм необхідно використовувати п'єзодвигуни.

3.4. Математичний опис віскозиметра - реометра з п'єзодвигунами

Особливість використання п'єзоелектричних двигунів як привід рухомого циліндра припускає побудову механічної характеристики віскозиметра з урахуванням фрикційного контакту в самому п'єзодвигуні. Тут необхідно здійснити перехід у математичному описі від процесів ПР до процесів, що відбуваються із самою рухомою частиною – рухомим циліндром, на який на відміну від віскозиметра з ПЕМ діє сила тертя в зоні фрикційного контакту. Тому при розробці математичній опису віскозиметра з ЛПД і ПЕД, на наш погляд, доцільніше використовувати вже раніше згадуване диференціальне рівняння 1-го порядку, що описує п'єзоелектричне зусилля, що розвивається ПР, з урахуванням приведення його маси. А також варто врахувати, що у випадку з ПЕМ ПР виконує одномірні переміщення, а у випадку з двигуном – двовимірні.

Теорія фрикційного контакту розроблялася Лавріненко В.В. [128], відповідно до якої два тіла $T1$ і $T2$, притиснуті друг до друга нормальною силою F_n (рис. 3.22, б), закон зміни якої $F_n = P_0 + F_{n0} \sin(\omega t + \varphi)$. Тіло $T1$ робить коливання зі швидкістю V_{T1} за законом $V_{T1} = V_0 \sin \omega t$. На тіло $T2$ (у нашому випадку циліндр) масою m_0 діє сила навантаження F_L .

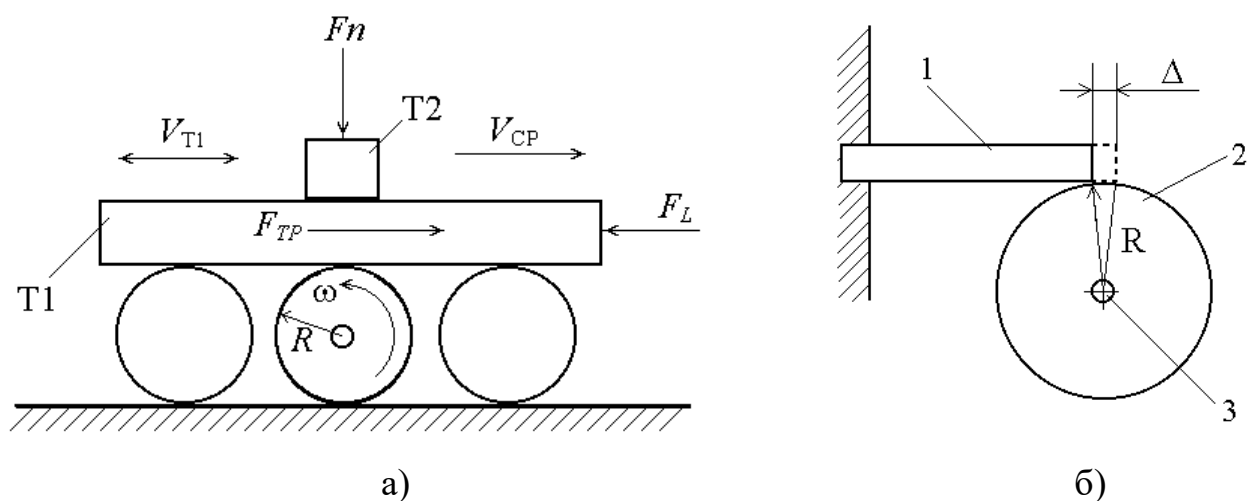


Рис. 3.22. Модель фрикційного контакту

Виключивши ефект заклинювання і думаючи, що коефіцієнт тертя k є величиною постійною і не залежною від напрямку прямовання, вираження для сили тертя у фрикційній парі приймає вид:

$$F_{TP} = k \cdot F_n F_{CT}, \quad (3.32)$$

де F_{CT} - сінусна функція, що має три значення: 0; +1; -1.

У [128] розглянуто два можливих стани фрикційного контакту:

1) функція має чотири зони: I - зона розгону тіла T_2 ; II—зона гальмування; III—зона порушення фрикційного контакту; IV—зона гальмування. Усі чотири зони в сумі дорівнюють періоду коливань тіла T_1 . Відстань, на яке переміститься тіло T_2 за один період складе:

$$S_T = \frac{2\pi}{\omega} A_{01} \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{2D} + \frac{1}{2} \right)^2},$$

де $D = kF_{n0} / F_L$.

Середня швидкість переміщення складе:

$$V_{CP} = A_{01} \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{2D} + \frac{1}{2} \right)^2}.$$

2) у функції швидкості V_{T1} є дві зони: I - зона розгону від t_1 до t_2 і II - зона гальмування від t_2 до t_3 . У цьому випадку відстань, на яке переміститься тіло T_2 за один період складе:

$$S_T = U_{CP} \cdot 2\pi / \omega,$$

де $U_{CP} = A \sin \omega t$.

Корисна потужність, що розвивається п'єзодвигуном, складе:

$$P_n = F_L \frac{2\pi}{\omega} A \cdot \sin \omega t_1 U_{CP},$$

де $t_1 = \frac{\pi P_0 (k_{ПР} - k_L) - 2F_L \pi}{\pi P_0 \omega (k_{ПР} - k_L)}$, $k_{ПР}$ - коефіцієнт тертя у фрикційній парі при

прямованні вправо, k_L - коефіцієнт тертя у фрикційній парі при прямованні вліво ($k_{ПР} > k_L$). Причому, ефекти заклинювання і розклинення мають місце тільки тоді, коли осцилятор чи штовхальник розташовані похило стосовно відомого органа.

З іншого боку, одержавши з диференціального рівняння для п'єзошайби, знаходимо рішення для $F(t)$ і $V(t)$. Знаючи амплітуди зусилля, що розвивається, і швидкості ПР, можна визначити середню лінійну швидкість $V_{CP_P.K.}$, зусилля F і потужність P п'єзодвигуна. Згідно [115] для ПР:

$$V_{CP_P.K.} = \frac{8l_3 U d_{31} f Q_M}{\pi l_2}, \quad F = U l_2 d_{31} Y_1^E \cos \alpha, \quad P = \frac{2U^2 l_2 d_{31} Y_1^E l_3 Q_M}{\pi l_1}.$$

У випадку використання ПЕД з пасивним ротором можна визначити кутову швидкість обертання ротора (рис. 3.22, б) $\omega = V_{CP}/R$.

Таким чином, за час дії одного періоду керуючої напруги протягом першого півперіоду відбувається зачеплення кінця ПР зі штоком і переміщення його. У цей же час на шток поршня буде діяти сила опору з боку триботехнічного вузла. Для того, щоб ПР мав можливість переміщати поршень, необхідно, щоб зусилля ПР було більше сил опору. Протягом наступної половини періоду ПР виходить із зачеплення зі штоком і повертається у вихідну координату. А прямування поршня зі штоком починає сповільнюватися під дією сил опору аж до повної зупинки.

3.4.1. Модель реометра з нереверсивним ПЕД і пасивним ротором

Щоб процеси в реометрі були адекватні реальним процесам в ДВЗ, за основу візьмемо конструкцію реометра з нереверсивним ПЕД і пасивним ротором із кривошипно-шатунною передачею зворотно-поступального руху від ротора до поршня. Конструкцію ПЕД з пасивним ротором візьмемо з [78]. На рис. 3.1, г представлена структурна схема такого реометру.

На ПР подається керуюча напруга $U_{BX} = U_M \cdot \sin(\omega t)$. Для обраного двигуна ω залишається величиною постійної. На швидкість, що розвивається ПЕД, впливає амплітуда керуючої напруги U_M . Т.ч. основним каналом керування буде канал "амплітуда-частота обертання (швидкість)" ($A_B - \omega$) і "частота-частота обертання" ($f_B - \omega$).

Перехідні процеси ж у ПЕД короткочасні ($\approx 10^{-1} \dots 10^{-4}$ с) [135], причому час розвантажування τ_P більше часу гальмування τ_T .

Передатна функція каналу "амплітуда-частота обертання" (" $A_B-\omega$ "), без обліку електромеханічних процесів у ПР, може бути визначена з рівняння руху ПЕД:

$$\omega = \int_0^t \frac{M - M_C}{J_\Sigma} dt \quad (3.33)$$

де $\varepsilon = (M - M_C)/J_\Sigma$ - прискорення інерційних мас п'єзодвигуна; $M = p/\omega$ - момент що розвивається ПЕД; J_Σ - приведений до вала ПЕД сумарний момент інерції; M_C - приведений до вала ПЕД сумарний момент опору, що включає моменти сумарних утрат, корисної навантаження і сил грузлого тертя в триботехнічному вузлі; ω - частота обертання ПЕД.

Використання кривошипного механізму дозволяє ввести в лінійну математичну модель ланку з передавальною функцією для лінійної швидкості рухомого циліндра.

Так, у кривошипному механізмі (рис. 3.23, а) кривошип ОА довжиною r обертається з кутовою швидкістю ω і довжиною шатуна АВ, рівній l , швидкість повзуна щодо кривошипа ОА [129, 130, 131] при даному куті φ складе:

$$V_{OTH} = \omega l \left(1 + \frac{r \cos \varphi}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \varphi}} \right) \sin \varphi .$$

На поршень діє сила тиску палива і сила грузлого тертя. Залежність між моментом M_P , що діє на кривошип, і силою тиску P на поршень при рівновазі:

$$M_P = Pr \left(1 + \frac{r \cos \omega t}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \omega t}} \right) \sin \omega t .$$

Сила грузлого тертя створює момент $M_{F_{TP}}$, що діє на кривошип:

$$M_{F_{TP}} = 2F_{TP}r |\sin \omega t| .$$

Сумарна сила, прикладена до кривошипа, складе:

$$F_C = F_{II} \left(1 + \frac{r \cos \omega t}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \omega t}} \right) \sin \omega t + 2F_{TP} |\sin \omega t| . \quad (3.34)$$

Диференціальні рівняння руху моментів мають наступний вид:

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \Delta\omega_C \approx \omega_C ; \quad (3.35)$$

$$T_M \frac{dM}{dt} + M = M_C. \quad (3.36)$$

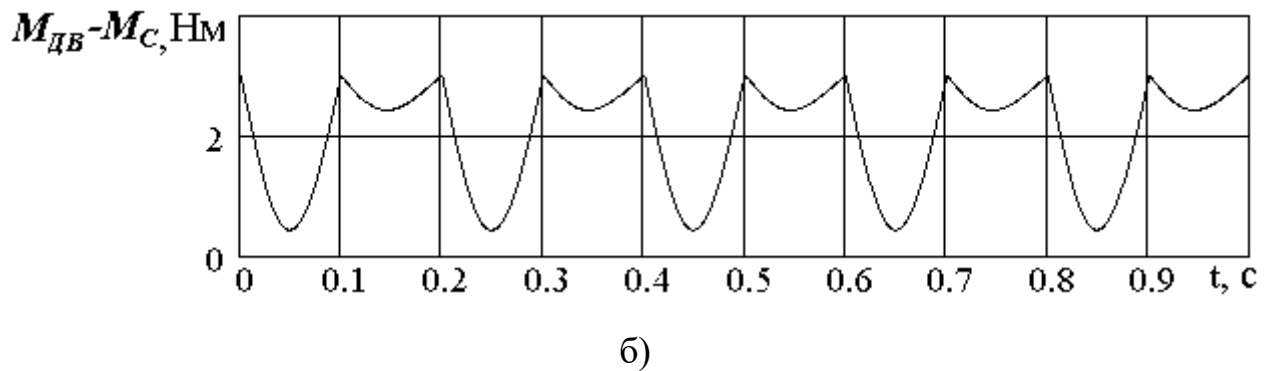
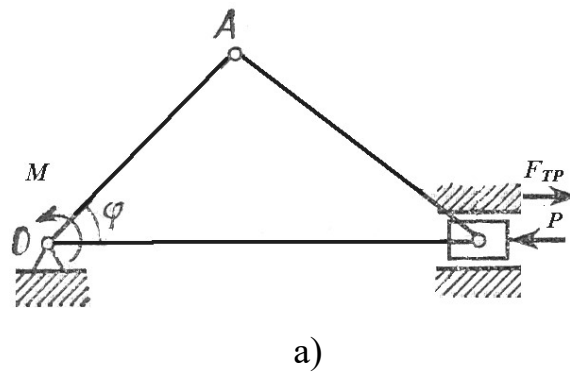


Рис. 3.23. Кривошипний механізм (а); графік прямування ротора ПЕД (б)

Перехідні процеси в п'єзореzonаторі ПЕД по амплітудному каналу можна приблизно врахувати через еквівалентну постійну часу:

$$T_{\omega} \approx 2 / \Delta\omega_{\Pi} = 2Q_{\text{ЭМ}} / \omega_P, \quad (3.46)$$

де $\Delta\omega_{\Pi}$ - смуга пропущення; $Q_{\text{ЭМ}} = \omega_P / \Delta\omega_{\Pi}$ - електромеханічна добротність ПЕД (на рівні 0,707). З цього випливає, що від величин $Q_{\text{ЭМ}}$ і $\Delta\omega_{\Pi}$ залежить інерція процесів у ПЕД.

У цьому випадку диференціальні рівняння (3.35) і (3.36) в операторній формі будуть мати наступний вид:

$$(T_{\omega} T_M p^2 + T_M p + 1) \omega = \omega_C; \quad (3.37)$$

$$(T_{\omega} T_M p^2 + T_M p + 1) M = M_C \quad (3.38)$$

Визначивши початкові умови при $t=0$ легко можна одержати рішення рівнянь (3.35), (3.36) чи (3.37), (3.38). Так, вирішуючи рівняння (3.35) і (3.36), будемо мати наступне:

$$\omega = \omega_C + (\omega_H + \omega_C)e^{-t/T_{\omega I}}; \quad (3.39)$$

$$M = M_C + (M_H + M_C)e^{-t/T_{\omega I}}. \quad (3.40)$$

$$\varepsilon = [(\omega_C + \omega_H)/T_M]e^{-t/T_{\omega I}} \quad (3.41)$$

де ω_H , M_H - початкові значення частоти обертання і моменту, M_C – момент опору.

З рівнянь (3.35), (3.36) і (3.37), (3.38) при нульових початкових умовах можна одержати наступні вираження для передавальних функцій по каналах (відповідно) "амплітуда-частота обертання" (" A_B - ω "), "момент навантаження - частота обертання" (" M_C - ω ").

с обліком $T_{E\omega}$

$$W_U(p) = \frac{\omega(p)}{A_B(p)} = \frac{K_{11}}{T_{E\omega}T_M p^2 + T_M p + 1}; \quad (3.42)$$

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{-M_C(p)} = \frac{1 + T_{E\omega}p}{K_M(T_{E\omega}T_M p^2 + T_M p + 1)} \quad (3.43)$$

без обліку втрат $T_{E\omega}$

$$W_U(p) = \frac{K_{11}}{T_M p + 1}; W_{\omega}(p) = \frac{1}{T_M p + 1}; W_M(p) = \frac{1}{K_M(T_M p + 1)}, \quad (3.44)$$

де K_{11} - коефіцієнт передачі ПЕД по амплітудному каналі.

Значення коефіцієнтів K_{11} , K_M , можна приблизно визначити по формулах ($\tau_K \approx \pi/\omega_p$) [132, 133]:

$$K_{11} = 8bld_{31}Y_1^E \omega_B / D_{POT}(\pi^2 abY_1^E - \omega_B l m_{PP}); \quad (3.45)$$

$$K_M = D_{POT}^2(\pi^2 abY_1^E - \omega_B l m_{PP}) / 8\omega_B l \pi, \quad (3.46)$$

де m_{PP} - маса ПР; a , b , l - відповідно, товщина, ширина і довжина ПР; D_{POT} - діаметр ротора; d_{31} - п'єзомодуль п'єзокераміки ПР; Y_1^E - модуль Юнга.

Необхідно відзначити, що звичайно в ПЕД $T_{E\omega} \ll T_M$, а величина T_M є перемінним параметром. Так, наприклад, залежність $T_M = f(F_{II})$ змінюється приблизно по гармонійному закону в межах 50...140 мс для ПЕД із ПР із п'єзокераміки ЦТССТ-5 розмірами 19×5,5×1,9 мм ($l \times b \times a$) і ротором із твердого сплаву ВК-6 $d=10$ мм [23].

Таким чином, дослідження динамічних властивостей ПЕД показали, що при малих впливах ПЕД є квазілінійною ланкою, а при великих - нелінійна ланка з перемінними розподіленими параметрами.

З метою обліку усіх параметрів, а, саме, обліку прямого п'єзоефекту побудуємо лінійну математичну модель реометра з нереверсивним ПЕД. На рис. 3.24, а показана структурна схема реометра з ПЕД і кривошипним механізмом. У структуру введений коефіцієнт n , відповідальний за кут атаки ПР до ротора двигуна.

Ланка $\Delta_{CP} \cdot t_1$ дозволяє перейти від переміщення, чиненого вільним кінцем ПР, до середньої лінійної швидкості ротора.

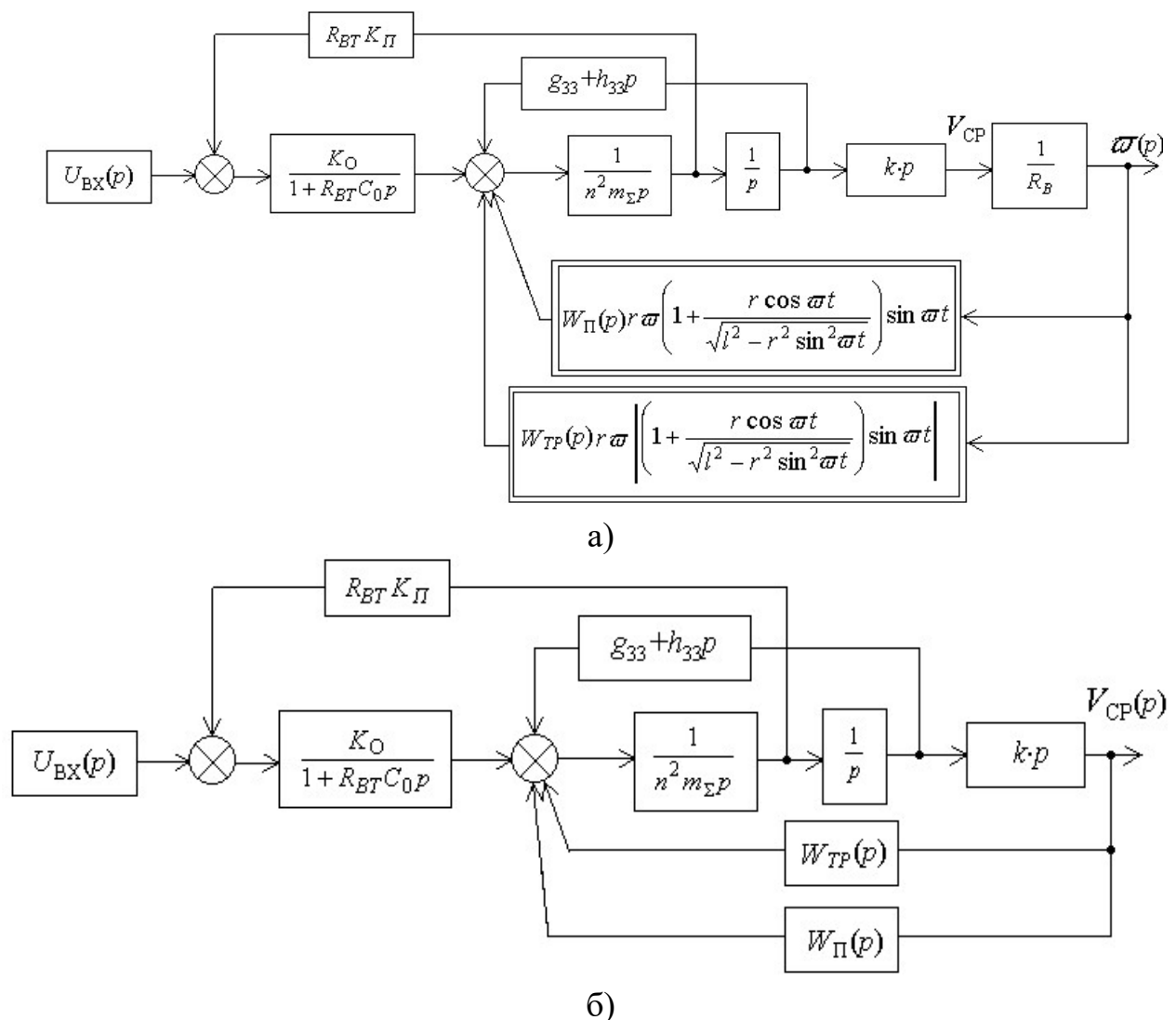


Рис. 3.24. Структурні схеми реометрів з роторними (а) і лінійними (б) п'єзодвигунами

На рис. 3.25, а приведена модель реометру на співвісних циліндрах з ПЕД, яка була зібрана в Electrjcnics Workbench.

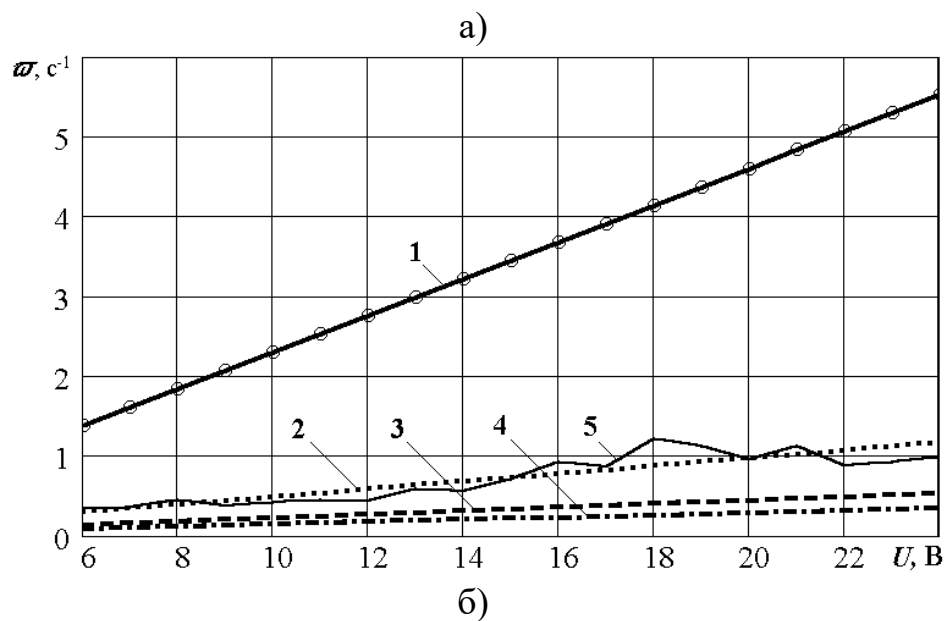
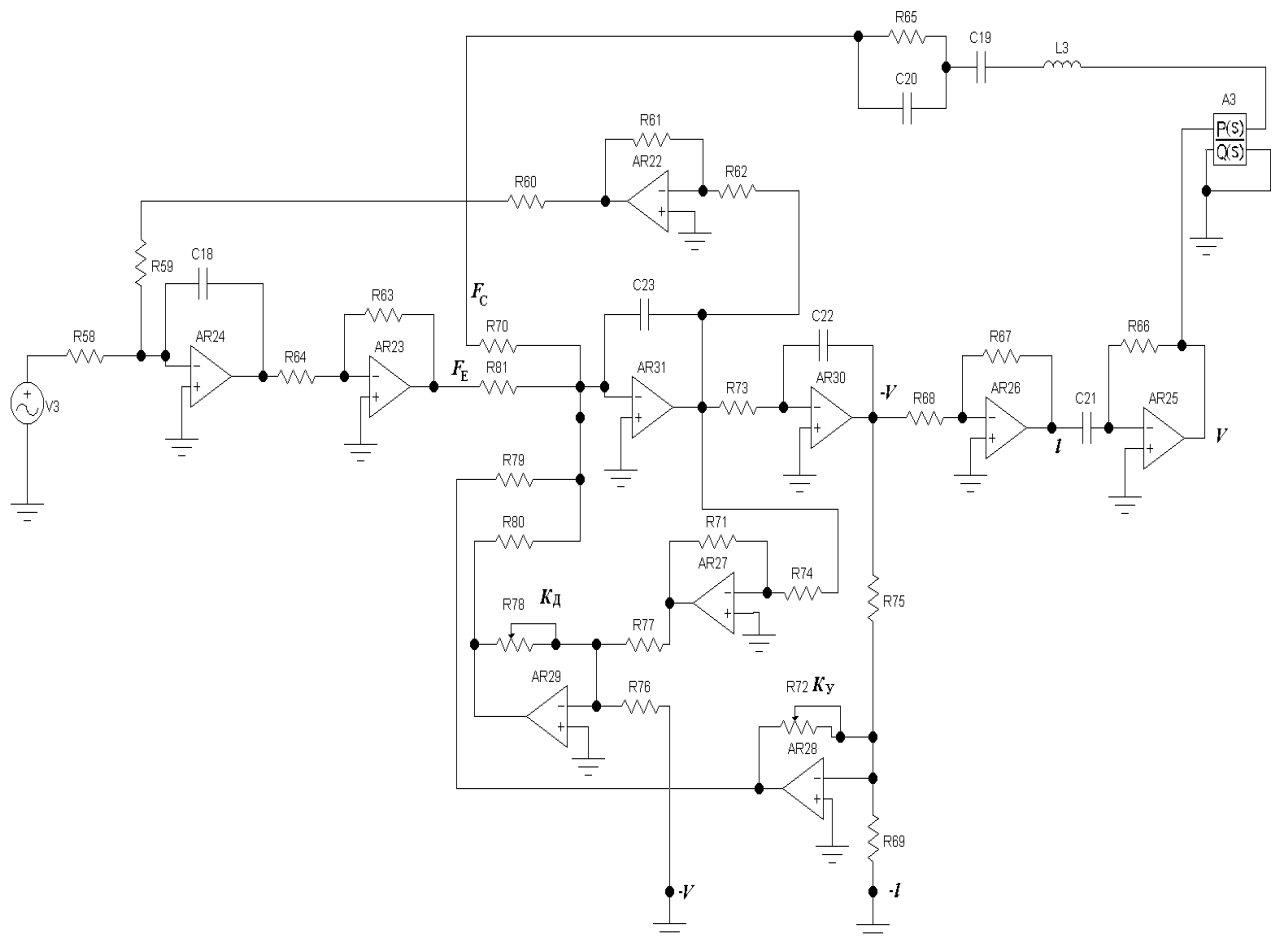


Рис. 3.25. Реометр на співвісних циліндрах з ПЕД: а – модель; б– механічна характеристика “частота обертання - амплітуда керуючої напруги” при частоті резонансу 57 кГц; 1 – холостий хід при $\eta_1=0,1$ Па·с; 2 - $\eta_2=10$ Па·с; 3 - $\eta_3=20$ Па·с; 4 - $\eta_4=30$ Па·с; 5 – тиксотропна рідина

Ланка зворотного зв'язку буде нелінійною через наявність кривошипного механізму, який можна замінити звеном $P(s)/Q(s)$. Використовуючи метод кусочно-лінійної апроксимації з припасовуванням (метод точкового перетворення), можна здійснити заміну нелінійної ланки лінійною у момент, коли здійснюється контакт ПР і ротора, а рухомий циліндр знаходиться по середині між крайніми положеннями і його відносна швидкість максимальна, але одержання аналітичного виразу не є доцільним. Інтерес представляє механічна характеристика, яку можна одержати за допомогою моделі. На рис. 3.25, б представлена механічна характеристика приводу реометру “частота обертання - амплітуда керуючої напруги”, аналіз якої показав, що частота обертання ротора двигуна залежить лінійно від в'язкості палива у разі використання ньютонівських рідин, та з ростом амплітуди керуючої напруги ПР підвищується частота обертання ротора ПЕД, відповідно збільшується число проходів поршня у вимірювальній камері.

Однак, через наявність підшипників кочення, знижується ресурс роботи ПЕД. Тому, можна позбутися від зайвих конструктивних елементів, як кривошип і підшипники, за допомогою лінійного п'єзодвигуна.

3.4.2. Реометр із лінійним п'єзодвигуном

При побудові механічних моделей реометрів із ЛПД будемо використовувати конструкції ЛПД, запропоновані в [23, 109], з який інтерес становлять дві: ЛПД з одним ПР і зворотною пружиною і ЛПД із двома ПР для переміщення циліндра.

На рис. 3.26 представлена конструкція реометра, що становить з ЛПД із зворотною пружиною і триботехнічного вузла.

Такій конструкції можна поставити у відповідність механічну модель (рис. 3.27). При розгляді приймемо наступні допущення: 1. Переміщення тільки в площині XOY . 2. ЛПД закріплений на абсолютно твердому і не рухомій основі. 3. Маса навантаження на лінійному і момент інерції на обертальному виходах віднесені до мас поршня і ролика відповідно. 4. Приведена маса ПР зосереджена в точці 1 у момент заклинювання (фрикційного контакту).

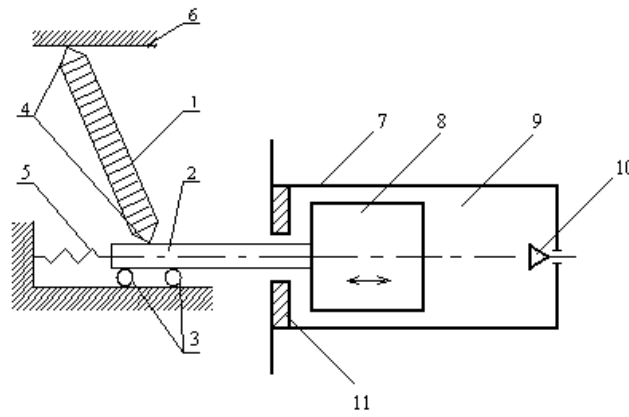


Рис. 3.26. Схема структурна реометра з ЛПД і зворотною пружиною: 1 - ПР; 2 - шток; 3 - ролики; 4 - кінці ПР; 5 - пружина; 6 - корпус; 7 - зовнішній циліндр; 8 - рухомий циліндр; 9 - вимірювальна камера; 10 - клапан; 11 - сальник

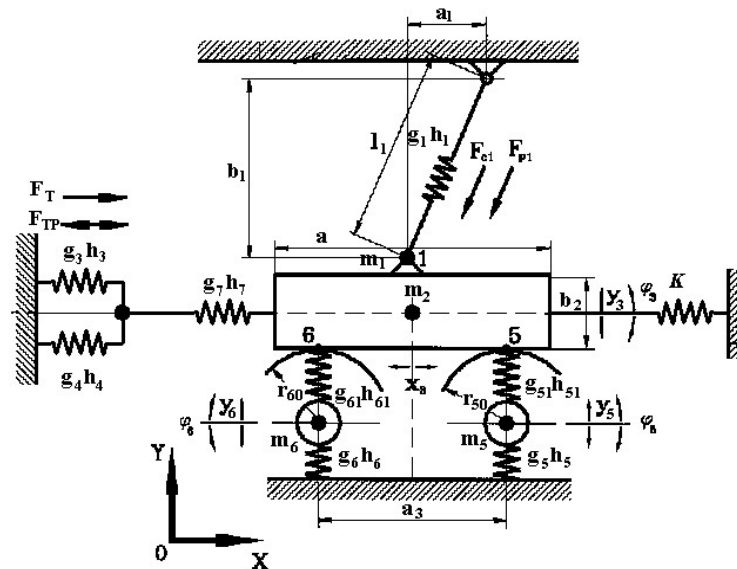


Рис. 3.27. Механічна модель реометра з одним ЛПД і зворотною пружиною

Тут x_3, y_3, j_3 - узагальнені координати положення поршня; y_5, j_5, y_6, j_6 - узагальнені координати положення роликів; m_1 - приведена маса ПР, m_3 - маса рухомого циліндра; m_5, m_6 - маси роликів; коефіцієнти жорсткості і дисипативних утрат: g_1, h_1, g_2, h_2 - ПР, g_5, h_5, g_6, h_6 - у підшипниках; $g_{51}, h_{51}, g_{61}, h_{61}$ - у точках контакту 5, 6; $g_3, h_3, g_4, h_4, g_7, h_7$ - триботехнічного вузла; зусилля: F_{c1} - п'єзоелектричне, F_{p1} - попереднього навантаження, F_T - палива, F_{TP} - сили тертя; l_1 - довжина ПР; r_5, r_6 - радіуси роликів; a, b_2 - довжина і висота поршня; DO - коефіцієнт жорсткості пружини.

Цю модель можна призвести до лінійної механічної моделі [109], так як рухомий циліндр робить переміщення тільки в напрямку однієї осі. Для опису взаємодії ПР і рухомого циліндру вводиться коефіцієнт трансформації $n = \sin(\arctg(a_1/(2b_1)))$.

На рис. 3.28, а представлена лінійна механічна модель реометра при роботі ПР і прямованні поршня в прямому напрямку на ділянці $\left[-\frac{\pi}{2} + 2\pi n; \frac{\pi}{2} + 2\pi n\right]$, на рис. 3.28, б – при зворотному прямованні (гальмуванні) за допомогою пружини на ділянці $\left[\frac{\pi}{2} + 2\pi n; \frac{3\pi}{2} + 2\pi n\right]$.

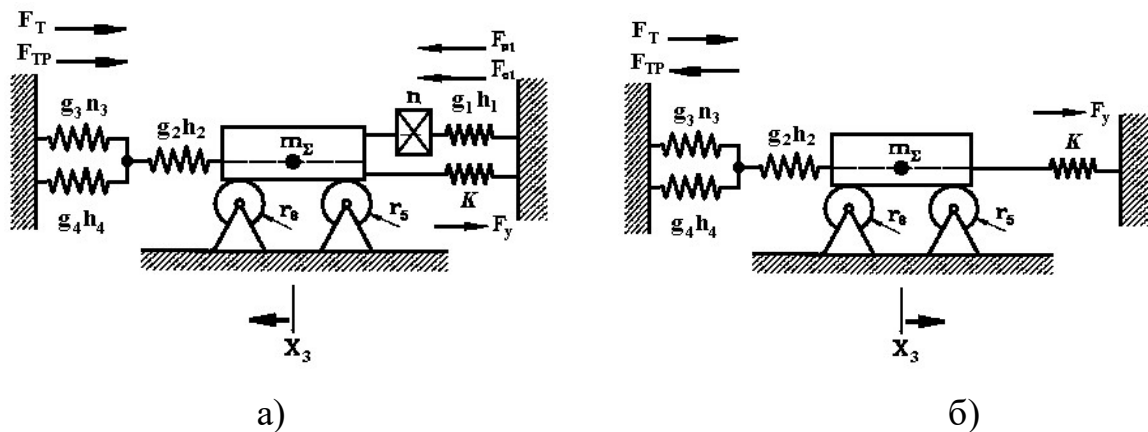


Рис. 3.28. Лінійна механічна модель реометра з ЛПД

Отриманій моделі на рис. 3.28, а можна поставити у відповідність лінійну математичну модель динаміки реометра (рис. 3.29), яку можна отримати зі структурної схеми (рис. 3.24, б) шляхом вицлюювання ланок, що відповідають за обертання.

Використовуючи таку конструкцію, вимір відстані здійснюється тільки при роботі ПР у прямому напрямку. Повернення ж поршня здійснюється під дією пружини. Оскільки зворотна пружина з часом утрачає свою жорсткість, можна внести зміни в конструкцію реометра, зв'язану з застосуванням другого ЛПД, що робить прямовання рухомого циліндру в зворотному напрямку. У [78, 109] пропонуються конструкції ЛПД, де зворотно-поступальне переміщення рухомої частини (циліндра) здійснюють два ПР і відмінна риса одного з них є наступні

обмеження: обоє ПР притискаються до рухомої частини (башмаку). Тому в процесі роботи ЛПД створюється додатковий опір переміщенню башмака при роботі одного ЛПД і обмежує хід його рухомої частини. У нашому випадку, навпаки, необхідно споконвічно установити можливість прослизання башмака при відсутності керуючої напруги на ПР. Тоді при почерговій роботі кожного ЛПД інший не буде створювати йому протидію. На рис. 3.30 приведена структурна схема конструкції реометра з двома ЛПД.

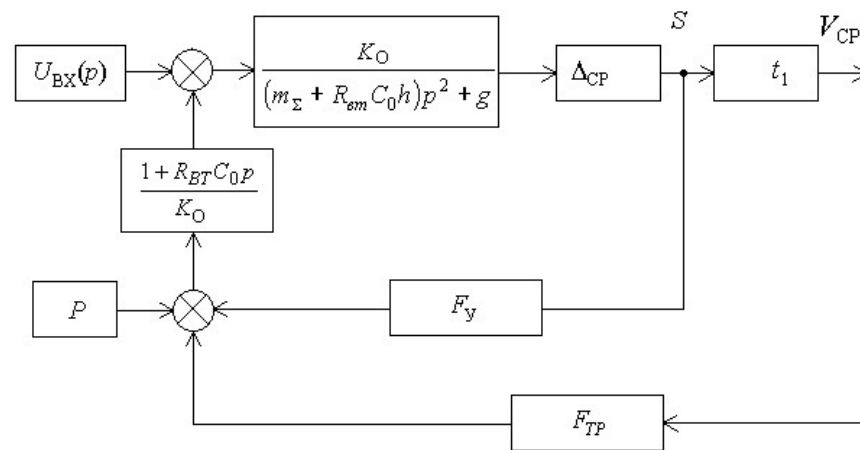


Рис. 3.29. Структурна схема реометра з одним ЛПД і зворотною пружиною на

$$\text{ділянці } \left[-\frac{\pi}{2} + 2\pi n; \frac{\pi}{2} + 2\pi n \right]$$

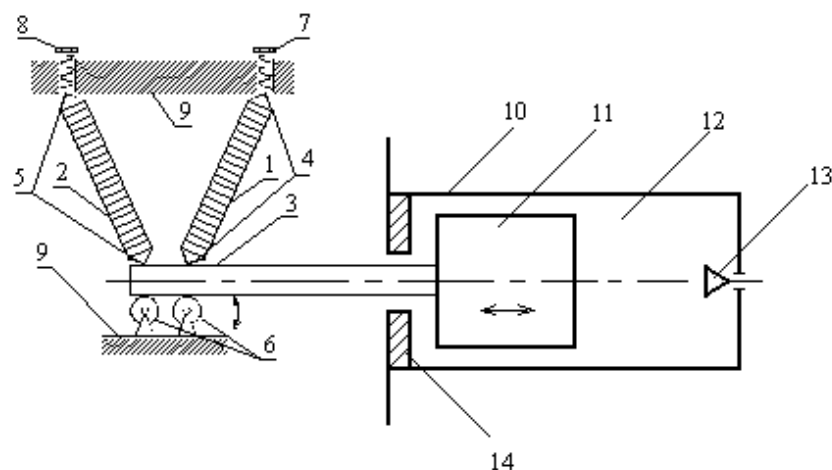


Рис. 3.30. Модель реометра з двома ЛПД: 1, 2 - ПР; 3 - шток; 4, 5 - кінці ПР 1 і 2; 6 - ролики; 7, 8 - вузли кріплення ПР; 9 - корпус; 10 - нерухомий циліндр; 11 - рухомий циліндр; 12 - вимірювальна камера; 13 - клапан; 14 - сальник

У відповідність даній конструкції побудуємо лінійну математичну модель, попередньо розділивши механічну модель на дві частин: прямування у прямому напрямку (рис. 3.31, а) і зворотному (рис. 3.31, б).

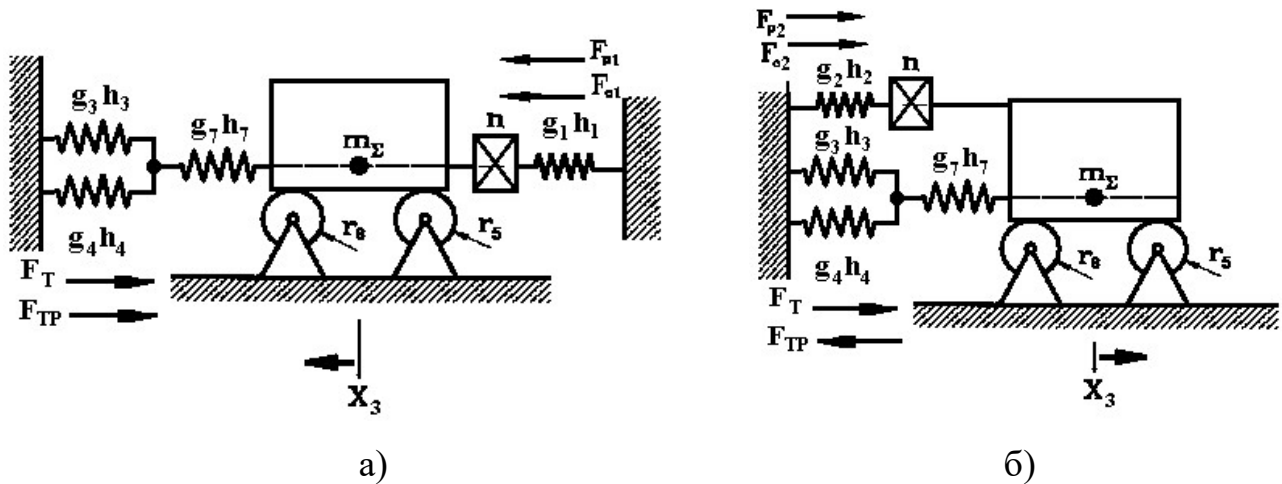


Рис. 3.31. Механічна модель реометра з двома ЛПД при прямованні в прямому напрямку (а) і зворотному напрямку (б)

Механічній моделі на рис. 3.31, а можна поставити у відповідність структурну схему (рис. 3.24, б). Лінійна математична модель реометра з одним ЛПД буде відповідати математичній моделі реометра з двома ЛПД при прямованні рухомого циліндра в прямому напрямку при виключенні передавальної функції пружини. Розгляд же математичної моделі в зворотному напрямку не становить інтересу.

Згортання структури приводить до наступної передавальної функції:

$$\tilde{V}(p) = \frac{p U_{BX}(p)}{R_{em} C_0 n^2 m_{\Sigma} p^3 + (n^2 m_{\Sigma} + R_{em} C_0 (h + W_O(p)k)) p^2 + (K_O K_{II} R_{em} + h + R_{em} C_0 g + W_O(p)k) p + g}, \quad (3.47)$$

де $W_O(p) = W_{II}(p) + W_{TP}(p)$, уперше введені $W_{II}(p)$, $W_{TP}(p)$ – передавальні функції сили опору палива і сили грузлого тертя рідини, що прикладаються з боку палива і триботехнічного вузла, R_B – радіус ротора ПЕД, r – радіус кривошипа, Δh – зазор, n – коефіцієнт кута атаки, k – коефіцієнт, що характеризує фрикційний контакт.

Графіки АЧХ для $V(\omega)$, представлені на рис. 3.32 показують, що цей реометр має високу чутливість до зміни властивостей рідини.

Слід зазначити, що розрахунок по рівнянню (3.33) також прийнятний при

розрахунку реометрів на співвісних циліндрах, хоча і не враховує процеси, що відбуваються в ПР. Так на рис. 3.33 представлені графіки моменту, що розвивається.

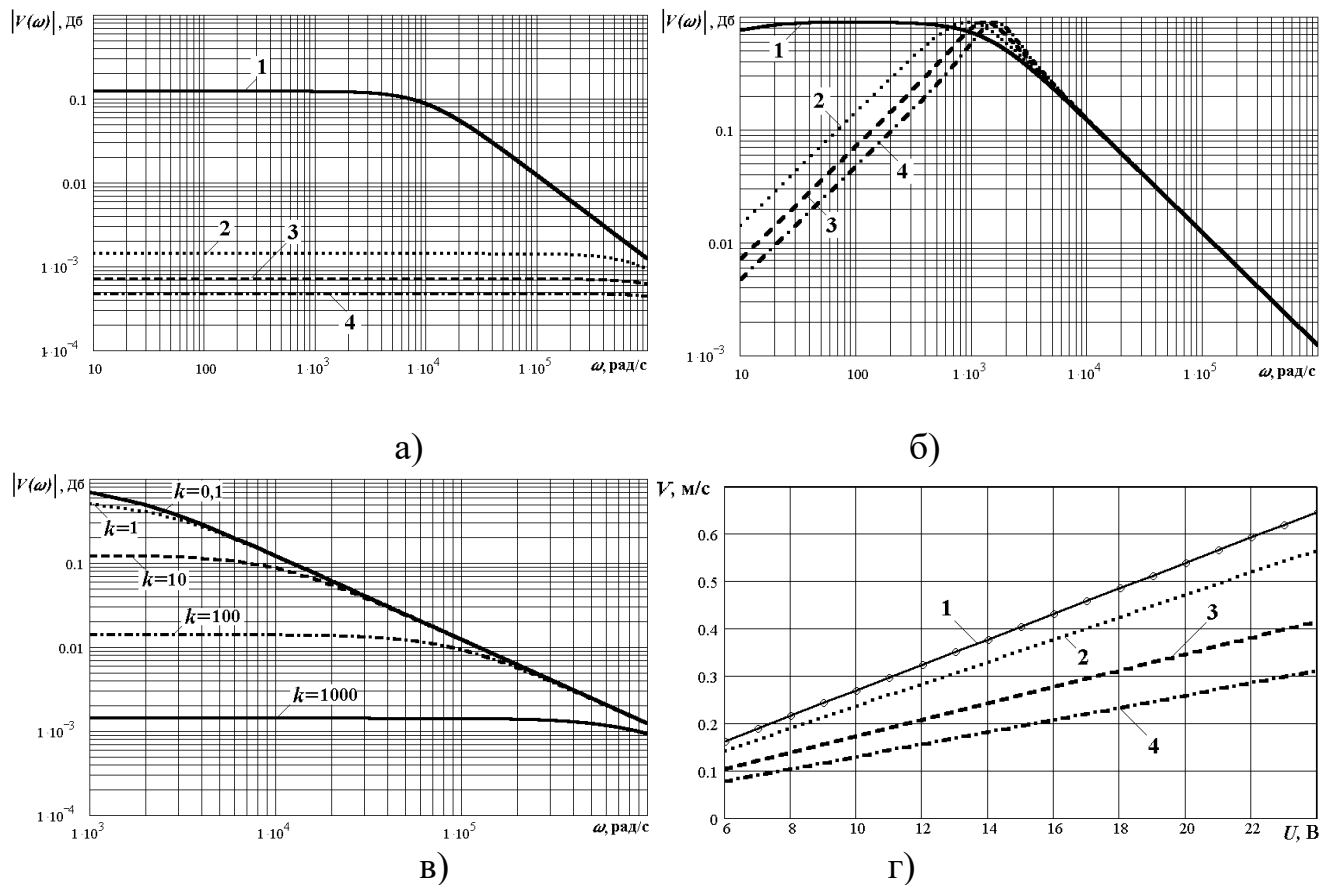


Рис. 3.32. Характеристики реометрів на співвісних циліндрах з двома ЛПД у прямому напрямку: а - ЛАЧХ $\tilde{\eta}(p) = \eta_i$; б - ЛАЧХ $\tilde{\eta}(p) = \eta_i / p$, $k=10$; в - ЛАЧХ при зміні k ; г - механічна характеристика “лінійна швидкість - амплітуда керуючої напруги”, частота резонансу ПР 57 кГц; 1 – холостий хід при $\eta_1=0,1$ Па·с; 2 - $\eta_2=10$ Па·с; 3 - $\eta_3=20$ Па·с; 4 - $\eta_4=30$ Па·с

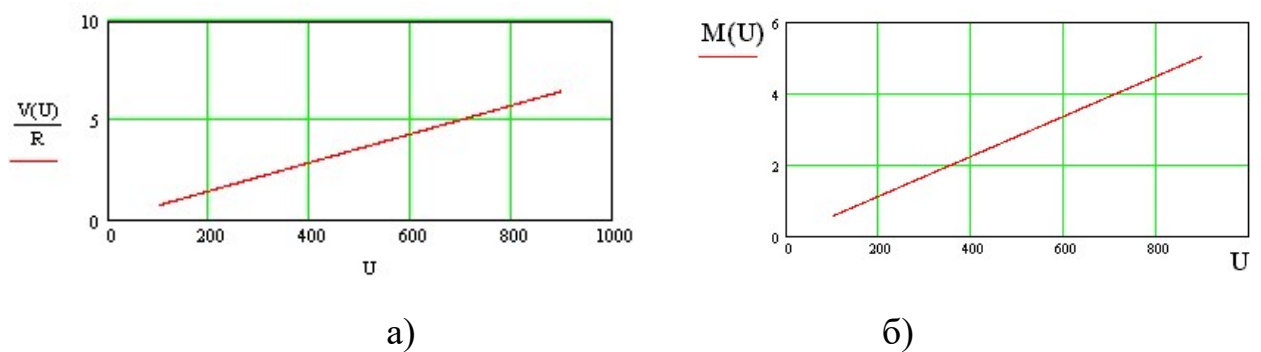


Рис. 3.33. Графік залежності частоти (а) ПЕД і моменту (б) на валу від напруги керування

3.5. Методика проектування реометрів на співвісних циліндрах

Отримані математичні описи дозволяють синтезувати методику проектування реометрів на співвісних циліндрах з лінійними і роторними п'єзодвигунами з урахуванням фізико-хімічних властивостей палива, у залежності від розмірів чи форсунок, відповідальних вузлів ТА ($V, F, \Delta h, S$); вибір тиску палива в трубопроводі низького тиску F_T ; попереднього вибору лінійних розмірів п'єзоелементів; побудови амплітудно-частотної характеристики; аналізу чутливості й уточнюючого розрахунку ПР із метою коректування АЧХ, а саме:

Вихідними даними є тиск палива в трубопроводі низького тиску P_T , триботехнічний зазор dh , діапазон швидкостей лінійних ΔV чи кутових Δn , площа контакту рухомого і нерухомого циліндрів S , діапазон напруги керування ΔU_M .

Здійснюється розрахунок:

1. Визначаються розміри рухомого циліндра вимірювального зонда. Задаються значенням радіуса рухомого циліндра $R_{Ц}$ і знаходиться його довжина $l_{Ц} = S / (2 \cdot \pi \cdot R_{Ц})$.
2. Вибираються розміри кривошипа $l_{КШ}$.
3. Визначається маса рухомого циліндра, ротора, кривошипа виходячи з розмірів.
4. По заданому діапазону швидкостей визначаються розміри п'єзорезонатора, попередньо задавши два розміри l_1 і l_2 .
5. Знаходиться частота резонансу п'єзорезонатора.
7. Попередньо розраховуються швидкості і зусилля, що розвиваються п'єзодвигуном для заданого діапазону зміни керуючої напруги.
8. Будується амплітудно-частотна характеристика реометра.
9. У випадку малої чутливості провадиться уточнюючий розрахунок, змінюючи розміри і властивості ПР, розмірів, матеріалу і конструкції рухомого циліндра, розмірів і матеріалу ротора п'єзодвигуна і розмірів кривошипа.

3.6. Методика визначення коефіцієнта в'язкості

Отримані математичні моделі створення віскозиметрів і реометрів дозволяють створити методику визначення реологічних характеристик і коефіцієнтів динамічної

в'язкості по механічних характеристиках п'єзоприводу, що здійснюється по наступному алгоритму:

1. Визначаємо механічні характеристики п'єзоелектричного приводу на холостому ході, у яких на відміну від крокових двигунів [134, 135] є залежністю швидкості переміщення (обертання) від амплітуди керуючої напруги $V=f(U_{\text{УПР}})$ і $n=f(U_{\text{УПР}})$. Одержуємо графік, показаний на рис. 3.34.

2. Задаємо момент навантаження і визначаємо лінійну швидкість чи кутову швидкість у залежності від типу приводу при заданому значенні амплітуди керуючої напруги.

3. Будуємо механічні характеристики $n=f(M_C)$ чи $V=f(U_{\text{УПР}})$ п'єзоприводу, які можна представити (апроксимувати) у вигляді прямих і описуваних рівняннями:

$$F=K_M(V_0 - \Delta V_C), \quad (3.49)$$

$$M=K_M(\omega_0 - \Delta \omega_C), \quad (3.50)$$

Тоді вирази (3.49) і (3.50) можна записати в такий спосіб:

$$F - F_C = K_{M1} T_M \frac{dV}{dt}, \quad (3.51)$$

$$M - M_C = K_M T_M \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.52)$$

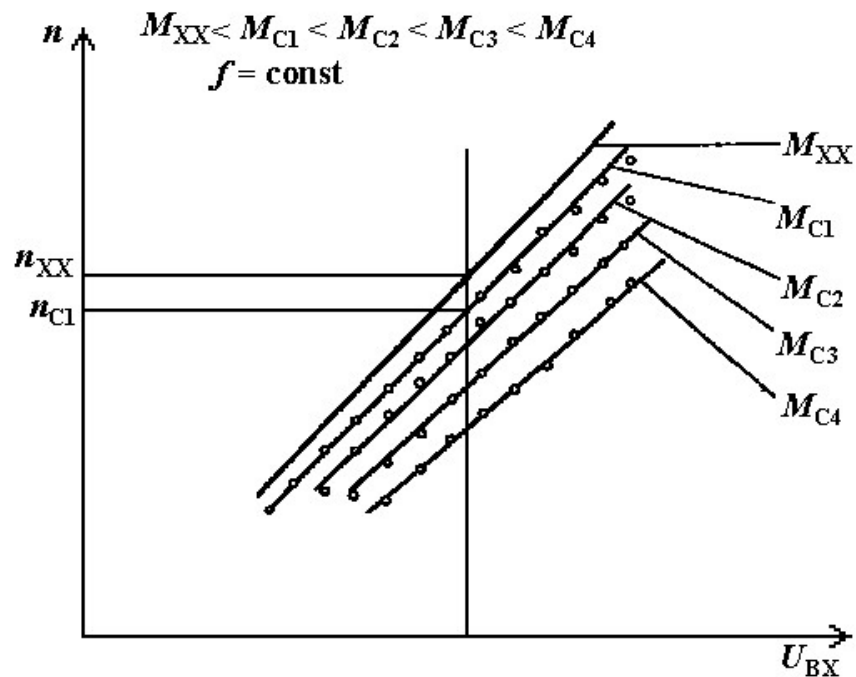


Рис. 3.34. Механічна характеристика

де K_M - коефіцієнт жорсткості механічної характеристики; $T_M = J_{\Sigma}/K_M$ - механічна постійна часу ПЕД; ω_0 - кутова швидкість обертання ПЕД ідеального холостого ходу; $\Delta\omega_C = M_C/K_M$ статичний перепад кутової частоти обертання.

3. Одержуємо вирази

$$M_C = \frac{\Delta\omega_C}{\omega_0 - \Delta\omega_C} M, \quad (3.53)$$

$$F_C = \frac{\Delta V_C}{V_0 - \Delta V_C} F, \quad (3.54)$$

де $M = P/\omega$ і $F = P/V$ – момент і зусилля, що розвиваються ПП.

4. Підставляємо вирази для моменту чи сили грузлого тертя і визначаємо σ .

3.7. Висновки

У результаті проведених досліджень:

1. Синтезовано кінематичні схеми віскозиметрів із приводом на маніпуляторах і реометрів із приводом на п'єзоелектричних двигунах на співвісних циліндрах.

2. Запропоновані структури віскозиметрів на співвісних циліндрах за рахунок використання п'єзоелектричного маніпулятора, триботехнічного вузла на співвісних циліндрах, у яких камера приводу і вимірювальна камера розділені повітряним зазором з метою забезпечення робочої температури п'єзокераміки не вище $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ при зміні температури підігрітого рідкого важкого палива в діапазоні $+70\div 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, дозволяють постійно вимірювати коефіцієнти в'язкості тиксотропних рідин у трубопроводі низького тиску.

3. Структури реометрів, призначені для комплексної оцінки реологічних властивостей тиксотропних рідин, що складаються з приводу на п'єзодвигунах, триботехнічного вузла на співвісних циліндрах, у яких камера приводу і вимірювальна камера розділені повітряною подушкою, дозволяють розв'язати протиріччя між робочою температурою п'єзокераміки ($+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) і температурою підігрітого важкого палива ($+70\div 130\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4. Математичні моделі віскозиметрів із приводом на маніпуляторах, виконаних на: п'єзошайбі, біморфі і складальних стовпах, і реометрів із приводом на п'єзоелектричних двигунах: лінійному і нереверсивному з пасивним ротором дозволяють реалізувати електронне моделювання пристроїв для їх ефективного проектування.

5. Методика проектування віскозиметрів і реометрів на співвісних циліндрах, до складу яких входять п'єзопривід і триботехнический вузол із зазором $1 \div 25$ мкм, дозволяє створити пристрої з заданими конструктивними розмірами і чутливістю, що враховують особливості технологічного процесу.

6. Методика побудови реологічних характеристик по механічній характеристиці п'єзоприводу, що має лінійну залежність, дозволяє визначати на її основі коефіцієнти динамічної в'язкості суміші важких моторних палив і дистилятних.

Вірогідність отриманих результатів підтверджена при електронному моделюванні в середовищах MATLAB і ELECTRONIC WORK BENCH, та аналоговому обчислювальному комплексі.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості проектування віскозиметрів і реометрів на співвісних циліндрах, процеси в яких адекватні процесам у реальних триботехнічних вузлах паливної апаратури ДВЗ.

Основні наукові результати опубліковані в збірниках, приведених у переліку ВАК, [80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 123].

РОЗДІЛ 4

ВІСКОЗИМЕТРИ І РЕОМЕТРИ ДЛЯ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ В'ЯЗКІСТЮ І ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ДВЗ НА ПРИСТРОЯХ П'ЄЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ

Аналіз методів виміру в'язкості і конструкцій у розділі 2 дозволив виявити особливості їхнього практичного застосування при побудові систем регулювання в'язкості ДВЗ.

Так при заборі проби від компанії, що бункерує судна, можливе використання вібраційних віскозиметрів, як найбільш простих у конструктивному виконанні. В міру надходження палива від танка до ПНВТ зростають вимоги до віскозиметрів, процеси в яких повинні бути адекватні процесам у вузлах ПС.

Критеріям, які були висунуті у першому розділі задовольняють реометри та віскозиметри на співвісних циліндрах і ротаційних віскозиметрах, класифікація яких представлена на рис. 2.27, і які використовують у якості чутливих елементів п'єзоелектричні двигуни і маніпулятори.

Нижче розглянемо конструкції реометрів та віскозиметрів, що об'єднані по методу виміру, використанню чутливих елементів, способу керування.

Так у підрозділі 4.1 розглянуті вібраційні віскозиметри, 4.2 – реометри та віскозиметри на співвісних циліндрах із приводом на ПЕМ, 4.3 – реометри на співвісних циліндрах з ПЕД, 4.4 – ротаційні реометри.

4.1. Вібраційні віскозиметри

4.1.1. Вібраційні віскозиметри для виміру в'язкості палива

Для лабораторного і безупинного виміру в'язкості палива в ДВЗ нами були розроблені і досліджені кілька конструкцій вібраційних віскозиметрів [136, 137, 138].

Для виміру в потоці запропоноване і досліджено два типи датчика.

Для першого типу використаний чутливий елемент (ЧЕ), конструкція якого

показана на рис. 4.1.

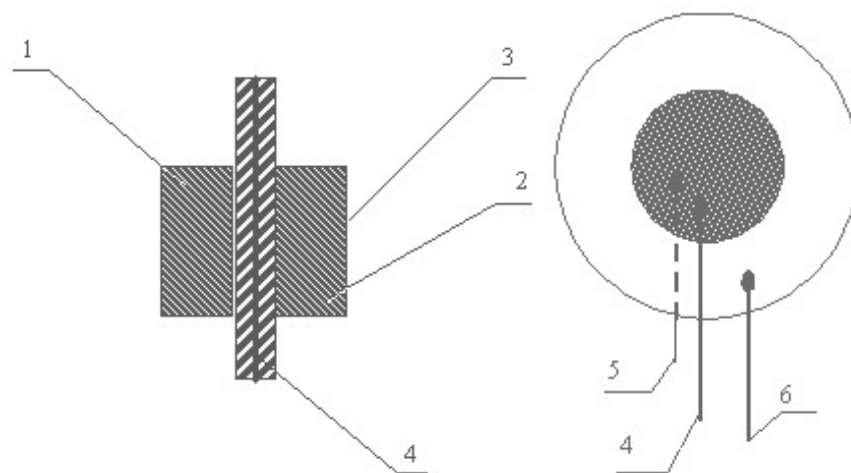


Рис. 4.1. П'єзоелектричний перетворювач: 1, 2 - п'єзоелементи; 3 - ізолюючий шар; 4 - спільний контакт; 5 і 6 - вхідний і вихідний контакти

Він складається з двох круглих пластин (1) і (2) виготовлених з кераміки ЦТС - 19, з'єднаних монолітно через ізолятор (3) і покритий анаеробним полімером, що забезпечує гарну герметизацію. Це дозволяє уникнути явища поглинання вологи поверхневим шаром кераміки, що викликає збільшення маси ЧЕ і зміну його резонансних характеристик.

Для виміру вихідного сигналу передбачені три електроди, що використовуються і як кріпильні елементи.

Геометричні розміри ЧЕ: $D=10$ мм, $l_3=0,5$ мм. Матеріал – ЦТС – 19.

Первинний перетворювач віскозиметра являє собою біморфний п'єзоелемент, розташований у потоці рідини.

Вимірювальний перетворювач віскозиметра виконаний у виді циліндричної порожньої ємності, у якій перпендикулярно течії рідини розташований ЧЕ (рис. 4.2), закріплений за допомогою трьох електродів до корпусу.

Через вхідний патрубок (8) (рис. 4.2) надходить грузла середа (3), заповнюючи цілком корпус (2), обтікаючи ЧЕ. Взаємодія ЧЕ з потоком рідини приводить до коливань п'єзоелементі. Через вихідний патрубок (7) грузла середа видаляється з корпусу.

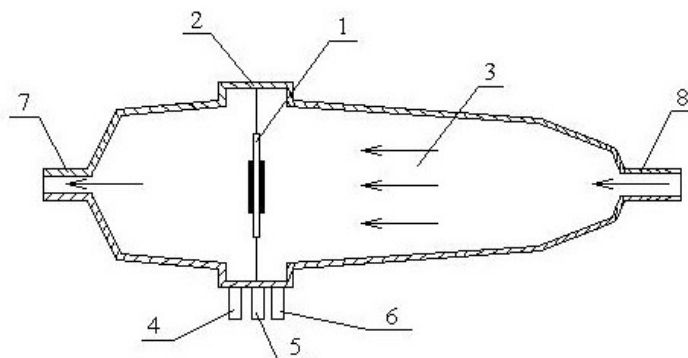


Рис. 4.2. Структурна схема конструкції вібраційного віскозиметра: 1 - п'єзоперетворювач; 2 - корпус; 3 - грузла середа; 4, 5 - вхідний і вихідний контакти; 6 - спільний контакт; 7, 8 - вихідний і вхідний патрубки

Електрична схема експериментальної установки для дослідження віскозиметра показана на рис. 4.3, до складу якої входять генератор (1), БПЕ (2), підсилювач напруги, що нормує вихідний сигнал, (3) і АЦП (4).

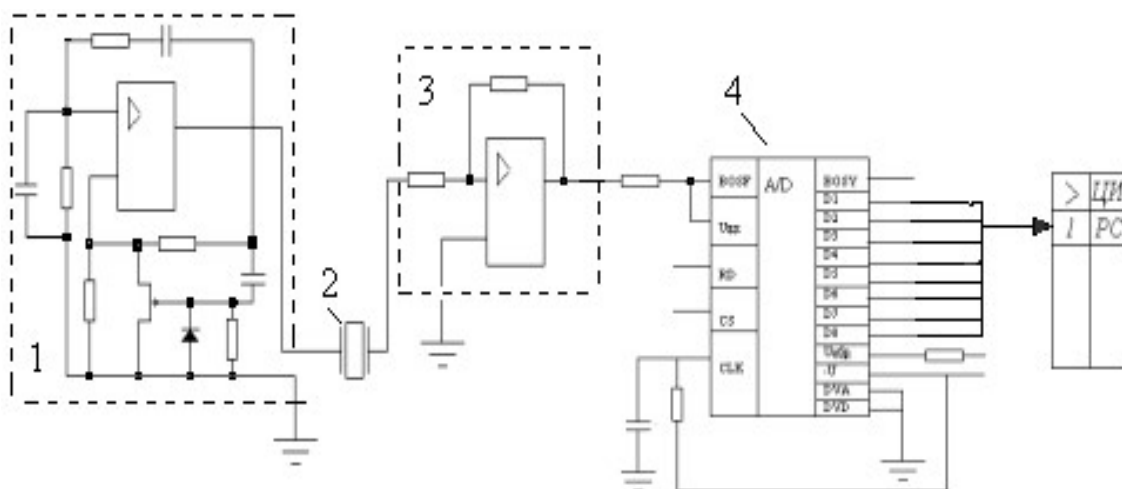


Рис. 4.3. Принципова схема системи

Частота синусоїдальних коливань даного генератора є лінійною функцією і залежить від номіналів опорів і ємностей у схемі. Мікросхеми підсилювачів, що входять до складу, як генератора, так і підсилювача, що нормує, являють собою операційні підсилювачі К140УД2А середньої точності без частотної корекції зі

складовими транзисторами на вході. У систему також був включений АЦП K572ПВ3, який служить для перетворення аналогового сигналу в цифровий. Напруга вихідного сигналу п'єзоелектричного віскозиметра лежить у межах 20...200 мВ. Це значення неприйнятне для вимірювальних інформаційних систем, тому на виході датчика розташована схема підсилювача напруги.

На вхідний контакт (4) подається напруга для збудження ЧЕ (1) (за допомогою пристрою, що реєструє), через вихідний контакт (5) знімається вихідний сигнал. Спільний контакт (6) підключається до джерела напруги і пристрою, що реєструє.

Для обробки інформації була використана система, що складається з генератора синусоїдальних коливань з регулюванням частоти вихідного сигналу в діапазоні 1...100 кГц, аналого-цифрового перетворювача і пристрою, що реєструє.

Даний вібраційний віскозиметр являє собою пристрій, в основу якого покладені явища прямого і зворотного п'єзоефекту.

У зв'язку з тим, що ЧЕ надає протидію діючій на нього грузлій середі, його коливальна швидкість руху залежить від значення коефіцієнта в'язкості рідини. Для рідких серед з різною в'язкістю частоти першого і другого резонансу будуть різні. Це дозволяє установити залежність між в'язкістю рідини і значенням частоти, на якій спостерігається резонанс п'єзокерамічного елемента. За значеннями цих частот будується перехідна характеристика.

Результатом роботи пристрою є не тільки безпосередньо числове значення в'язкості. За допомогою такого датчика можна розпізнати невідому рідину по визначеній, що перебуває в базі даних системи, перехідній характеристиці, що відображає значення піків резонансних коливань п'єзоелемента в різних рідинах, отриманих за допомогою цієї ж системи заздалегідь і занесених у базу даних.

Однак, основний недолік вібраційного віскозиметра - неможливість вимірювати в'язкість тиксотропних рідин у тонких шарах.

4.1.2. Вібраційний віскозиметр із приєднаним рухомим циліндром

З метою удосконалювання вібраційних віскозиметрів для виміру в'язкості в пристінному шарі була розроблена конструкція з приєднаним рухомим циліндром.

До складу вимірювального зонда віскозиметра увійшли триботехнічний вузол і БПЕ, що виконує дві функції. Відмінною рисою стало жорстке з'єднання БПЕ з рухомим циліндром.

Нами розроблена конструкція проточного вібраційного віскозиметра [139] зі збудливим елементом, виконаному на основі БПЕ [78], і показаному на рис. 4.4.

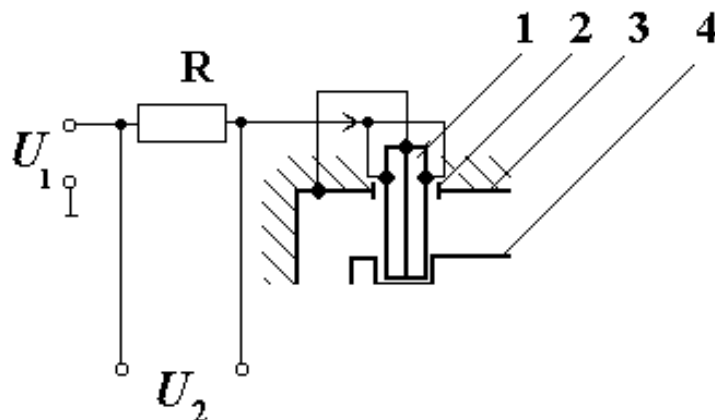


Рис. 4.4. Збудливий елемент: 1 - БПЕ; 2 - ізолююча втулка; 3 - корпус вимірювальної камери; 4 - приєднаний рухомий циліндр

БПЕ являє собою прямокутну пластину з виведеним центральним електродом і розмірами $30 \times 10 \times 2 \text{ мм}^3$ і виготовлену з кераміки ЦТС – 19. Габаритні розміри вимірювального зонда – $0,05 \times 0,07 \times 0,04 \text{ м}^3$. Вага – 0,3 кг.

Структурна схема конструкції вібраційного віскозиметра приведена на рис. 4.5.

Віскозиметр складається з вимірювального зонда, виконаного у виді циліндра з заглушеними торцями, і схеми керування. Усередині зонда розташовується БПЕ, забитий одним кінцем в ізолюваній втулці в корпус, і, зв'язаний з ним жорстко рухомий циліндр зі штоком. БПЕ прикріплений тільки з однієї сторони до штока рухомого циліндру я і створює несиметричний додаток зусилля, що переміщає циліндр. Зазор між рухомим циліндром і внутрішньою поверхнею циліндра вимірювальної камери обраний 10 мкм.

По центру рухомого циліндру симетрично у вимірювальному зонді зроблені впускний і випускний штуцера для подачі палива.

Схема керування складається з керованого генератора напруги (10), сигнал з

якого через резистор (8) надходить на БПЕ (3), і диференціального підсилювача (11), на входи якого подається напруга з резистора.

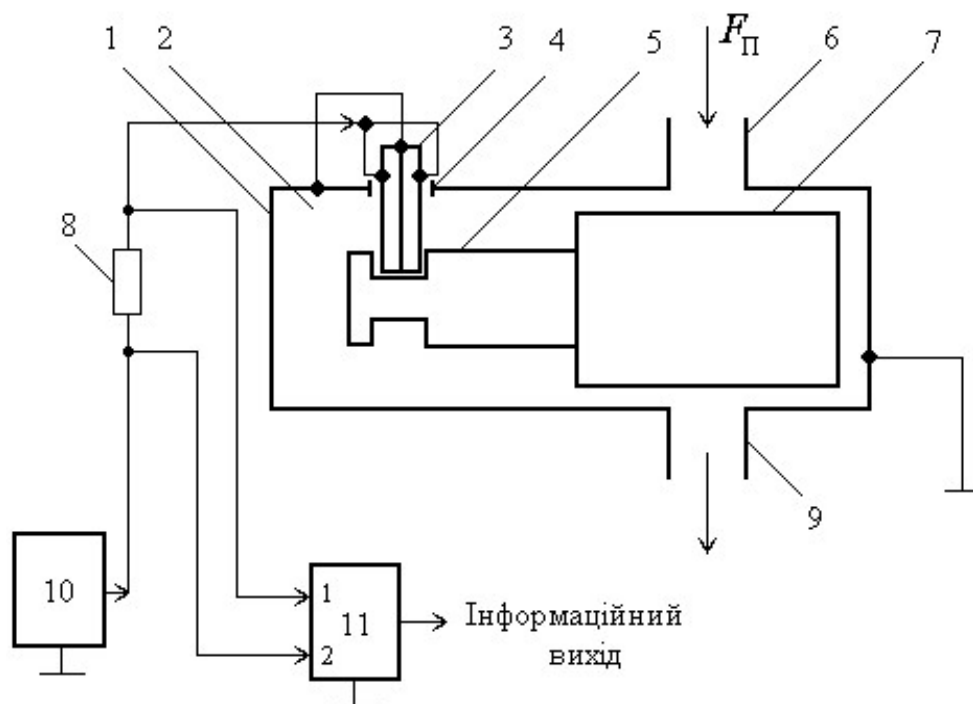


Рис. 4.5. Структурна схема конструкції вібраційного віскозиметра: 1 - вимірювальний зонд, 2 - вимірювальна камера, 3 - БПЕ, 4 - діелектрична втулка, 5 - шток рухомого циліндру, 6 - вхідний штуцер, 7 - рухомий циліндр, 8 - резистор у ланцюгу керування, 9 - випускний штуцер, 10 - генератор, 11 - диференціальний підсилювач

Принцип перетворення віскозиметра полягає в наступному. У вихідному стані при відключеному живленні БПЕ (4) перебуває в рівноважному стані у вимірювальному зонді (1). З'єднаний із БПЕ рухомий циліндр (7) займає положення посередині між впускним і випускним штуцерами вимірювальної камери (2). Спадання напруги на резисторі (8) дорівнює нулю. До вхідного штуцера (6) підключається вхідний трубопровід від паливної системи, по якому надходить паливо, заповнюючи під тиском весь об'єм вимірювальної камери. Залишає паливо вимірювальну камеру через випускний штуцер (9). Центральний електрод БПЕ,

корпус вимірювальної камери і маса схеми керування об'єднані між собою.

При вмиканні живлення керований генератор (10) видає керуючий сигнал, що надходить через резистор (8) на БПЕ. Під дією керуючого напруги в режимі прямого п'єзоефекту вільний кінець БПЕ (4) починає робити згинаючі коливання. Жорстко зв'язаний рухомий циліндр (6) при цьому буде здійснювати коливання усередині вимірювальної камери. По заповненні паливом всього об'єму вимірювальної камери БПЕ буде здійснювати додаткові коливання в об'ємі. При цьому на резисторі (8) буде формуватися спадання напруги, яка пропорційна усередненій динамічній в'язкості рідини, і надходить на два входи диференціального підсилювача (11). Чим вище амплітуда вихідного сигналу, тим менше в'язкість палива. Однак, жорсткий зв'язок БПЕ і втулки не дозволяє проводити їй прокручування навколо осі. У той час як у сучасних плунжерних парах таке прокручування здійснюється примусово. За таких умов віскозиметр може вимірювати в'язкість палива, коли молекули орієнтовані уздовж і впоперек переміщення рухомого циліндру, тобто усереднену динамічну в'язкість, до складу якої входять нормальна і подовжня складові.

Основними достоїнствами такої конструкції є простота і низька собівартість. Прибор не чутливий до впливу електромагнітних випромінювань. Вихідний сигнал представлений в аналоговій формі і для спільного використання з мікро ЕОМ потрібно АЦП.

Недоліками є фіксований зазор триботехнічного вузла і малий інтервал робочих температур, що для кераміки ЦТС-19 становить $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ця конструкція стала перехідною між вібраційними віскозиметрами і віскозиметрами на співвісних циліндрах з ПЕМ. Той же самий БПЕ став виконувати роль ПЕМ, а напруга з резистора - пропорційна швидкості переміщення вільного кінця з приєднаною масою. Крім того, з метою поширення інтервалу робочих температур до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ камера привода і триботехнічний вузол були розділені і скріплені за допомогою шпильок.

Структурна схема конструкції універсального віскозиметра, що може бути використаний і як вібраційний і як з ПЕМ, приведена на рис. 4.6.

Ця конструкція дозволила збільшити температурний діапазон роботи до $+130$

°C при обдуванні камери привода стисненим повітрям. Однак, як привод, БПЕ розвиває менше зусилля в порівнянні з іншими приводами. Тому що з однієї сторони збільшення товщини приводить до збільшення напруги живлення, з іншого боку – прогин конструкції по середині при значному зусиллі з боку палива, що блокує його переміщення.

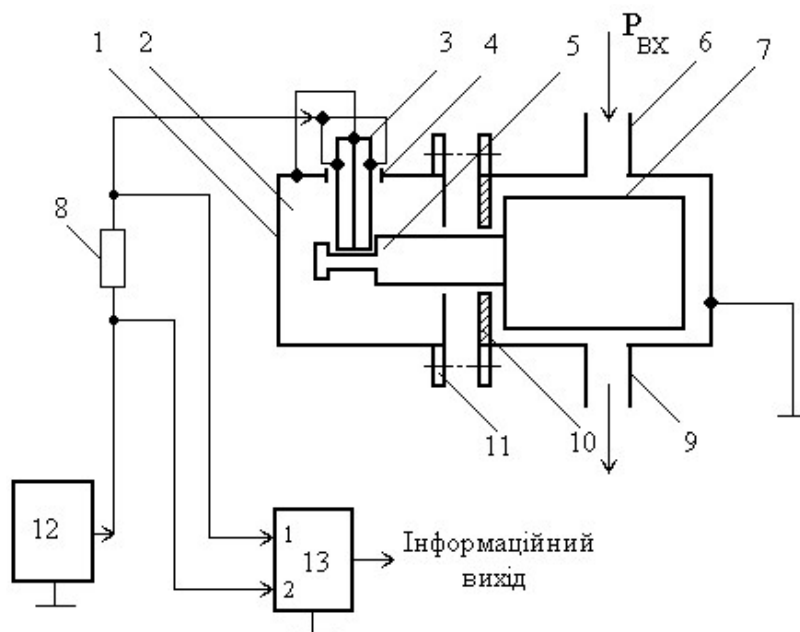


Рис. 4.6. Структурна схема конструкції вібраційного віскозиметра: 1 - вимірювальний зонд, 2 - вимірювальна камера, 3 - БПЕ, 4 - діелектрична втулка, 5 - шток рухомого циліндру, 6 - вхідний штуцер, 7 - рухомий циліндр, 8 - резистор у ланцюгу керування, 9 - випускний штуцер, 10 - сальник, 11 - шпильки, 12 - генератор, 13 - диференціальний підсилювач

У випадку адгезії контактних пар відбувається прогин чи заклинювання рухомого циліндру через несиметричну дію сили.

4.1.3. Вібраційні віскозиметри на трубках

Дослідження за допомогою існуючих вібраційних віскозиметрів на основі трубчастих п'єзоелементів для виміру в'язкості в пристінних шарах не проводилися.

Оскільки на його роботу накладаються обмеження, зв'язані з наступним умовою: між об'ємом грузлої середи V і площею S для трубчастих елементів існує

співвідношення:

$$V=(1\div 2)\cdot 10^{-5} S,$$

забезпечити яке в даний час по технологічних питаннях не представляється можливим. Це, насамперед, шорсткість поверхні електродів, що досягає 5 мкм, їхнє стирання і відшаровування в зазорах 10 мкм приводять до втрати працездатності трубчастого п'єзoeлемента.

Тому була почата спроба по удосконаленню існуючих конструктивних рішень.

В основу роботи віскозиметра покладена можливість обертання незакріпленого кінця п'єзoeлектричної трубки з радіальною поляризацією при поділі зовнішнього електрода на чотири секції і двох координатному вмиканні цих електродів.

Нами була розроблена конструкція віскозиметра з трубчастим п'єзoeлементом, у якого змінені кількість і співвідношення електродів до 8 штук (рис. 4.7, а). Причому чотири збудливих електроди використовувалися для створення обертаючого поля, як і в конструкціях, запропонованих у [23, 78]. Чотири інших електроди використовувалися для зняття інформації (рис. 4.7, б). Щоб уникнути короткого замикання між електродами через влучення в міжелектродний простір часток з поверхні електродів, другий циліндр розташовувався усередині трубки (рис. 4.8) .

Розміри циліндра склали $D=0,012$ м, $h=0,035$ м, $r=0,002$ м. Матеріал – кераміка ЦТС-19. Вага – 0,025 кг.

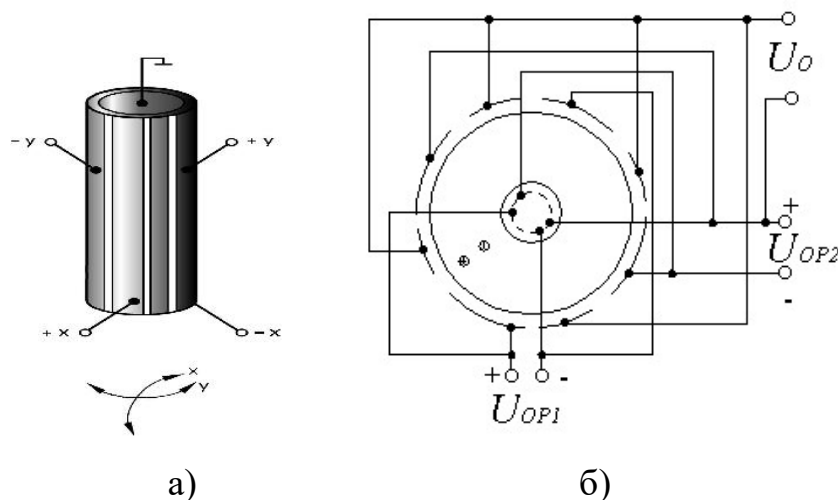


Рис. 4.7. Трубчастий ПЕ з радіальною поляризацією: а - конструкція; б - схема двохкоординатного керування

Внутрішній циліндр (2) має отвір (5) для подачі палива, від якого по шести бічних отворах (6) подається паливо в зазор 10 мкм. П'єзоелектричний циліндр жорстко забитий у основу (7). Для зливу палива з вимірювальної камери (2) є отвір (9).

Працює віскозиметр у такий спосіб.

При подачі імпульсів керування на електроди зі зрушенням фаз 90° , виникає кругове електричне поле, під дією якого в режимі зворотного п'єзоефекту починає обертатися вільний кінець циліндра (1).

Паливо, що перебуває між циліндрами (1) і (2) починає гальмувати обертання вільного кінця (1). На електродах, з яких знімається напруга під дію прямого п'єзоефекту, генерується напруга, пропорційна в'язкості рідини.

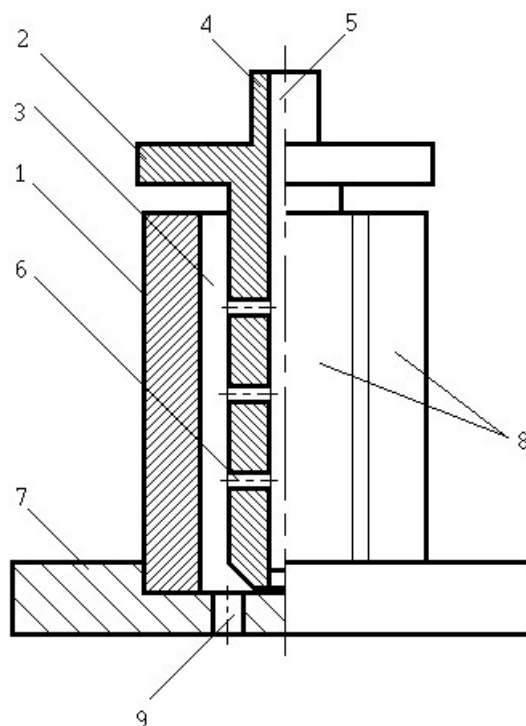


Рис. 4.8. Конструкція вібраційного віскозиметра з трубчастим п'єзоелементом: 1 - п'єзоелектрична трубка, 2 - внутрішній циліндр, 3 - вимірювальна камера, 4 - штуцер, 5 - основний паливний канал, 6 - бічні отвори подачі палива, 7 - основа, 8 - електроди трубки, 9 - зливальний отвір

Даний віскозиметр має наступне достоїнство: простотою виміру омичного контакту між центральним електродом циліндра (1) і циліндром (2).

Однак, самий істотний недолік конструкції – стирання центрального електрода чи відшаровування його окремих фрагментів, різко знижує ресурс роботи віскозиметра. Крім того, через влучення в між циліндровий простір часток срібного електрода п'єзоелемента приводить до адгезії поверхонь, гальмуванню вільного кінця циліндра (1).

Наявність резонансу в діапазоні частот вище 1 кГц не дозволяє здійснювати виміри в'язкості тиксотропних рідин на частотах від 0 до 50 Гц, що відповідає частотам роботи реальних вузлів паливної системи. Нам же потрібно, щоб зусилля і переміщення, що розвивається вільним кінцем циліндра (1) завжди лишалося постійним на цих частотах.

4.2. Віскозиметри з приводом на маніпуляторах

Дослідження віскозиметрів із приводом у виді ПЕМ показали, що для реєстрації переміщення рухливого циліндра необхідно використовувати дорогі оптичні датчики, ціна яких у десятки-сотні разів більше вартості самого віскозиметра. Тому подальші дослідження були спрямовані на пошук рішень, у яких співвідношення цін були б прийнятні.

4.2.1. Віскозиметр із приводом на біморфному маніпуляторі і генераторному датчику переміщення

Нами розроблена конструкція віскозиметра для проведення лабораторних іспитів проб палива перед бункеруванням судна.

У якості ПЕМ рухомого циліндру триботехнічного вузла обраний біморфний п'єзоелемент із розмірами $30 \times 10 \times 1$ мм³. При подачі керуючої напруги БПЕ, затиснений одним кінцем у корпусі, починає згинатися під дією зворотного п'єзоефекту. Рухомий циліндр, жорстко з'єднаний із другим кінцем БПЕ, здійснює переміщення. Для виміру відстані, яку проходить рухомий циліндр, попередньо

була проведена оцінка можливостей датчиків переміщення на основі біполярного сенсорного генератора (БПСГ) [140, 141]. Установлено, що ці конструкції дозволяють фіксувати переміщення тільки в момент торкання чутливого елемента. Тому була обрана група датчиків, що працюють у п'єзотрансформаторному режимі [142]. У результаті чого, у конструкцію датчика в'язкості введений генераторний п'єзоелектричний датчик переміщення, що складається з двох монопластин. Одна з цих пластин є випромінювачем і кріпиться за допомогою кронштейна до корпусу, а друга – приймачем, прикріпленим до кінця штока рухомого циліндру.

Принцип дії датчика полягає в тому, що випромінювач випромінює в простір акустичну хвилю. У цей час на виході приймача в залежності від відстані формується сигнал, амплітуда якого залежить від відстані між ними.

У якості триботехнічного вузла обраний розпилювач форсунки, для датчиків переміщення обрані круглі пластини з розмірами $d=10\cdot 10^{-3}$ м і $l_3=0,5\cdot 10^{-3}$ м.

Габаритні розміри вимірювальної камери – $0,1\times 0,05\times 0,05$ м³. Вага – 0,15 кг.

На рис. 4.9 представлена структурна схема конструкції віскозиметра з генераторним датчиком переміщення.

Ультразвуковий генераторний датчик переміщень [78] складається з випромінювача (7) і приймача (8). Схема керування складається з блоку (9), що видає сигнал на випромінювач (7), приймає сигнал із приймача (8), вимірює зрушення фаз між цими сигналами і видає вихідний сигнал на інформаційний вихід, а також на вхід схеми керування (10). Для компенсації коливань БПЕ в крайніх положеннях використовується метод, запропонований у [78], при якому на другий елемент БПЕ сигнал керування подається через схему затримки.

Принцип виміру в'язкості полягає в наступному. При подачі керуючого імпульсу з блоку (10) на БПЕ відбувається заряд його ємності. Схема керування може бути виконана як у [143]. Під дією зворотного п'єзоефекту БПЕ згинається в напрямку вихідного штуцера (6). Час, витрачений при переміщенні рухомого циліндру на фіксовану відстань, залежить від в'язкості палива. Причому, чим вище в'язкість палива, тим більше часу буде потрібно для подолання цієї відстані.

Однак загальновідомим недоліком застосованого генераторного датчика є

нестационарність процесів в акустичному тракті, обумовлена зміною температури, тиску й інших параметрів звукового проводу. Тому при найменшій відхиленні цих параметрів відбувається збій у роботі схеми виміру.

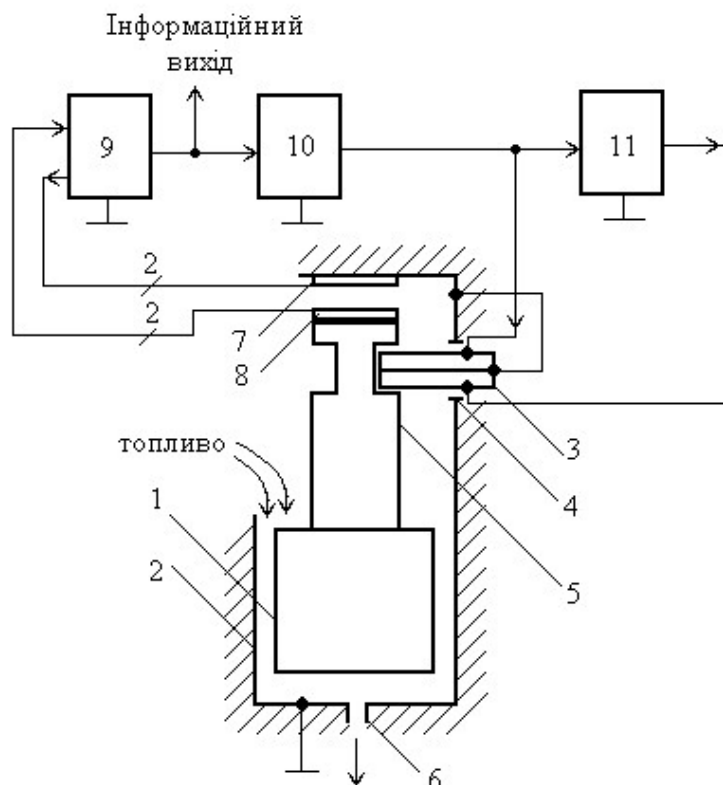


Рис. 4.9. Структурна схема віскозиметра з генераторним датчиком переміщень: 1 - корпус вимірювального зонда; 2 - рухомий циліндр; 3 - БПЕ; 4 - діелектрична втулка; 5 - шток рухомого циліндру; 6 - вихідний штуцер; 7 - випромінювач; 8 - приймач; 9 - схема керування генераторного датчика; 10 - схема керування приводом; 11 - схема затримки

Якщо подавати однополярні імпульси на БПЕ при вимірі в'язкості, то він не зможе повернути рухомий циліндр у вихідну координату через гистерезис і повзучість. При цьому від циклу до циклу буде накопичуватися помилка, що виражається в зсуві початкової координати рухомого циліндру. Для виходу з цієї ситуації необхідно, щоб БПЕ приймача в стані спокою перебував на відстані 2,8 мкм від випромінювача. Подача двуполярних імпульсів керування на БПЕ дозволяє

здійснювати переміщення від 2,6 мкм до 3,0 мкм. Таким чином, відстань, яку проходить рухомий циліндр, складає 0,4 мкм. У результаті чого вплив гистерезиса не буде позначатися на показаннях віскозиметра. У той же час робота такого віскозиметра буде адекватна роботі вібраційного віскозиметра з тією лише різницею, що частоти керуючих імпульсів відрізняються на порядки. Для забезпечення 300 подвійних проходів за хвилину рухомого циліндру віскозиметра частота проходження імпульсів керування склала 1,6 Гц. Для керування БПЕ в схему були внесені зміни: вихідний сигнал із блоку (9) може приймати три значення: негативне значення, що відповідає положенню верхньої мертвої крапки; позитивне значення – нижній мертвій крапці. Нульовий стан відповідає перебуванню рухомого циліндру в стані спокою.

Однак мінімальна відстань 0,4 мкм при дослідженні рідин з низькою в'язкістю іноді приводить до того, що БПЕ проскакує крайні крапки при зміні параметрів навколишнього середовища, навіть, незважаючи, на чудові старт - стопові характеристики. Для зниження резонансної частоти ПР необхідно збільшувати масу випромінювача і приймача, що в підсумку приводить до додаткового навантаження маніпулятора і зменшенню ходу рухомого циліндру.

Другим недоліком малого переміщення рухомого циліндру є неможливість руйнування омичного контакту між елементами триботехнічного вузла. Що в підсумку може призвести до заклинювання вузла.

4.2.2. Віскозиметр із приводом на біморфному маніпуляторі і параметричному датчику переміщення

З метою зменшення впливу властивостей звукового проводу і збільшення діапазону переміщення в конструкцію віскозиметра з приводом на БПЕ були внесені зміни. Генераторний датчик переміщення був замінений на параметричний, в основу якого покладений п'єзотрансформаторний режим роботи з повітряним зв'язком. Датчик переміщення складається з випромінювача і приймача, розташованих нерухомо. Налаштування п'єзоелементів здійснюються таким чином, щоб між ними установилася стояча хвиля. Тоді при введенні в простір між джерелом і приймачем

шторки, як показано на рис. 4.10, виготовленої, наприклад, з алюмінію, буде змінюватися інтенсивність стоячої хвилі.

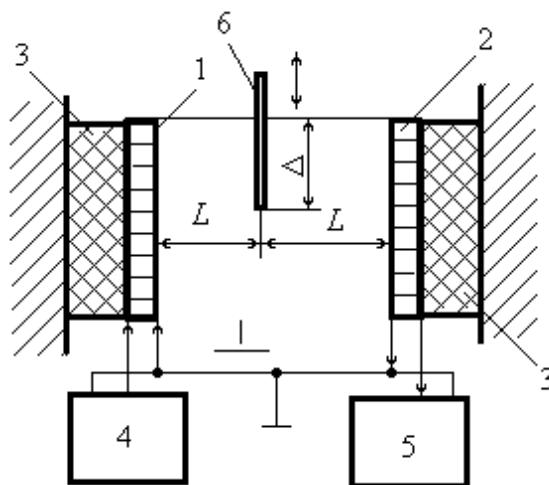


Рис. 4.10. Схема п'єзоелектричного параметричного датчика переміщення: 1 – випромінювач; 2 – приймач; 3 – гумові прокладки; 4 – генератор перемінної напруги; 5 – вольтметр; 6 – алюмінієва шторка

З урахуванням параметричного датчика переміщень була змінена конструкція віскозиметра з ПЕМ на БПЕ і генераторним датчиком переміщення.

У якості ПЕМ був залишений біморфний п'єзоелемент із розмірами 30x10x1 ммЗ, що, при подачі керуючого напруги, починає згинатися під дією зворотного п'єзоефекту. Рухомий циліндр, жорстко скріплений із другим кінцем БПЕ здійснює переміщення.

У якості триботехнічного вузла обраний розпилювач форсунки, для датчика переміщення обрані круглі пластини з розмірами $d=10 \cdot 10^{-3}$ м і $l_3=0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Габаритні розміри вимірювальної камери – $0,1 \times 0,05 \times 0,05$ м³. Вага – 0,15 кг.

На рис. 4.11 представлена структурна схема конструкції віскозиметра з параметричним датчиком переміщення.

Параметричний датчик переміщень [78] складається з випромінювача (8) і приймача (7) і шторки (12), прикріпленої до рухомого циліндру (2). Схема керування складається з блоку (9), що видає сигнал на випромінювач (8), приймає

сигнал із приймача (7), вимірює інтенсивність акустичної хвилі з наступною видачею сигналу на інформаційний вихід, а також на вхід схеми керування (10). Для компенсації коливань БПЕ в крайніх положеннях використовується метод, запропонований у [78], при якому на другий елемент БПЕ сигнал керування подається через схему затримки.

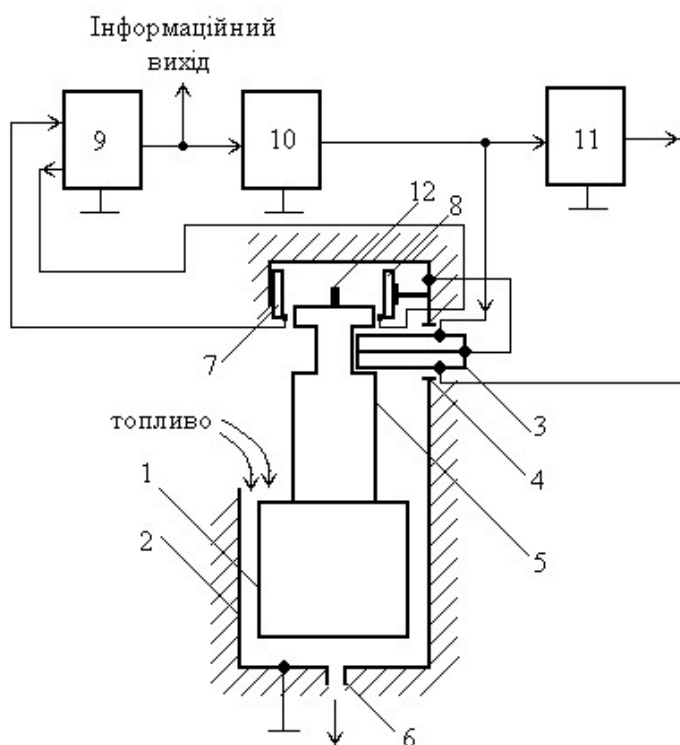


Рис. 4.11. Структурна схема віскозиметра з параметричним датчиком переміщення: 1 – рухомий циліндр; 2 – корпус вимірювального зонда; 3 – БПЕ; 4 – діелектрична втулка; 5 – шток рухомого циліндру; 6 – вихідний штуцер; 7 – приймач; 8 – випромінювач; 9 – схема керування генераторного датчика; 10 – схема керування приводом; 11 – схема затримки; 12 – шторка

Принцип виміру в'язкості полягає в наступному. При подачі двополярних керуючих імпульсів із блоку (10) на БПЕ відбувається заряд його ємності. Під дією зворотного п'єзоефекту БПЕ згинається в напрямку вихідного штуцера (6). Час, витрачений на переміщення рухомого циліндру на фіксовану відстань, залежить від в'язкості палива. Причому, чим вище в'язкість палива, тим більше часу буде потрібно для подолання цієї відстані. Вихідним параметром є час.

Прохідна відстань рухомого циліндру може лежати в діапазоні 10 мм, хоча максимальне переміщення БПЕ складе 0,4 мкм. Для забезпечення 300 подвійних проходів рухомого циліндру віскозиметра частота проходження імпульсів керування склала 5 Гц. Сигнал керування з блоку (9) приймає три значення: негативне значення, що відповідає положенню верхньої мертвої крапки; позитивне значення – нижній мертвій крапці. Нульовий стан відповідає перебуванню рухомого циліндру в стані спокою.

Поряд з таким достоїнством віскозиметра як збільшений діапазон вимірів датчика переміщень цілий ряд недоліків обмежують застосування всього прибору. Це, насамперед:

- сильна залежність швидкості поширення звукової хвилі в повітрі від вологості;
- необхідність акустичної ізоляції випромінювача і приймача;
- висока чутливість до впливу електричних полів, що у величезній кількості присутні в машинному відділенні;
- мале переміщення рухомого циліндру не дозволяє руйнувати омичний контакт, що виникає в процесі адгезії між елементами триботехнічного вузла. Що в підсумку може привести до заклинювання вузла.

4.2.3. Віскозиметр із приводом на складальному стовпі шайб і датчиком коливань

Для збільшення величини зусилля, що розвивається маніпулятором, і з метою виміру в'язкості палива в потоці розроблена конструкція вібраційного віскозиметра з маніпулятором зі складального стовпа шайб (рис. з табл. 3.1).

Матеріал кераміки – ЦТС-19. Кількість шайб у стовпі 100 розмірами $D=0,01$ м і $l_3=0,003$ м. Стовп забезпечує додаток зусилля, що переміщає рухомий циліндр по центрі. У результаті зменшується імовірність заклинювання рухомого циліндру у вимірювальному зонді. Оскільки один елемент складального стовпа здатний переміщати виконавчий орган за рахунок абсолютної зміни товщини на 0,05-0,3 мкм при додатку керуючого напруги 600 В, то сумарне максимальне переміщення складе

0,15 мм. Електроди п'єзопластин, які входять до складу стовпа, з'єднуються паралельно через один. Для того, щоб абсолютна деформація ΔL визначалася сумою деформацій окремих пластин необхідно було забезпечити чергування напрямків поляризації окремих шайб при зборці стовпа.

Нами розроблена конструкція віскозиметра, що складається з вимірювального зонда, схем керування і виміру, із приводом зі складального стовпа п'єзопластин [144] і п'єзодатчиком коливань, структурна схема якого приведена на рис. 4.12.

Усередині вимірювального зонда (1) установлений п'єзоелектричний маніпулятор (3) із приєднаним рухомим циліндром (6), що правою частиною кріпиться до п'єзоелектричного датчика коливань (7). По центрі вимірювального зонда діаметрально розташовуються вхідний (5) і вихідний (10) штуцера, за допомогою яких віскозиметр приєднується до паливної системи.

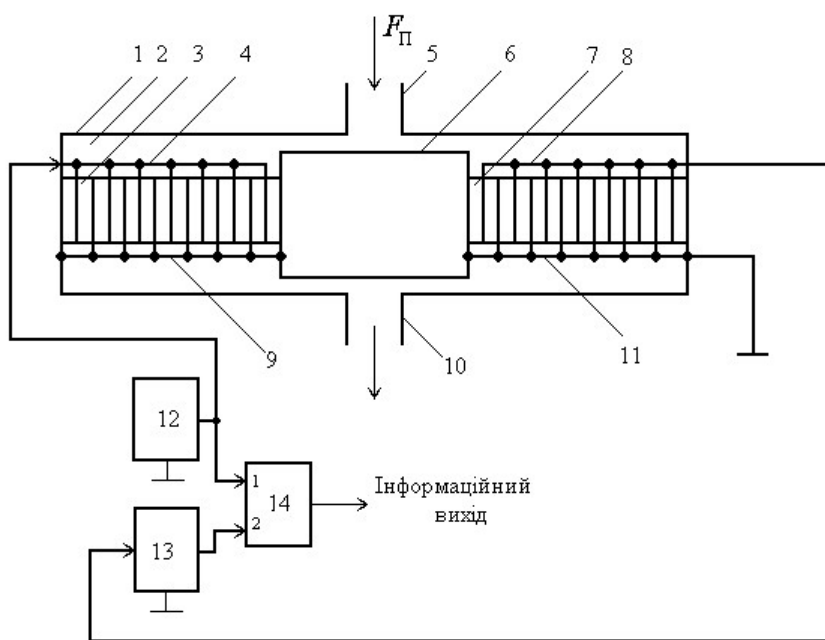


Рис. 4.12. Структурна схема віскозиметра зі складальним стовпом і датчиком коливань: 1 – вимірювальний зонд, 2 – вимірювальна камера, 3 – маніпулятор, 4 – електрод, на який подається напруга, 5 – впускний штуцер, 6 – рухомий циліндр, 7 – датчик переміщення, 8 – електрод, з якого знімається напруга, 9, 11 – спільний електрод, 10 – випускний штуцер, 12 – генератор, 13 – підсилювач, 14 – фазометр

На п'єзоелектричний маніпулятор (3) подаються сигнали по електроду (4), що підводить напругу від генератора сигналів (12). Під дію зворотного п'єзоефекту пластини маніпулятора збільшують чи зменшують товщину складального стовпа, викликаючи переміщення рухомого циліндру (6) усередині циліндричної камери (2), одночасно роблячи силовий вплив і на датчик коливань (7). Датчик коливань під дією прямого п'єзоефекту генерує сигнал, що по знімному електроді (8) подається на підсилювач напруги (13), з виходу якого сигнал надходить на вхід 2 фазометру (14), на вхід 1 якого подається сигнал з генератора сигналів. Електроди (9) і (11) з'єднані між собою і циліндричною камерою.

Робота віскозиметра полягає в наступному. У вихідному стані при виключеному живленні у вимірювальному зонді (1) п'єзоелектричний маніпулятор (2) перебуває в рівноважному стані так, що прикріплений до другого кінця рухомого циліндру (6) розташовується по центрі вимірювальної камери (2). При цьому датчик коливань (7), прикріплений до іншої сторони рухомого циліндру перебуває в стані спокою. До вхідного штуцера (5) підключений вхідний трубопровід з паливом, що надходить, а до вихідного штуцера (10) підключається вихідний трубопровід. Паливо під тиском заповнює об'єм вимірювальної камери (2). Електроди (9) і (11) з'єднані з масою схеми керування.

При вмиканні живлення керований генератор сигналів (11) видає сигнал заданої амплітуди і частоти, що надходить по електроду (4) на п'єзоелектричний маніпулятор, а також на вхід 1 фазометра (13). Під дією керуючої напруги п'єзоелектричний маніпулятор (3) починає здійснювати подовжні коливання, змінюючи товщину. Рухомий циліндр (6) при цьому буде здійснювати переміщення усередині вимірювальної камери, роблячи силовий вплив на датчик коливань (7), що виробляє напругу, яка надходить по електроду (8) на підсилювач напруги (12) і далі на вхід 2 фазометру. Фазометр реєструє зміну зрушення фаз між вхідними сигналами і видає сигнал на інформаційний вихід. При прямованні рухомого циліндру між сигналами буде зрушення фаз. У крайніх положеннях рухомого циліндру зрушення фаз дорівнює нулю. А час, коли зрушення фаз було відмінно від нуля, пропорційний в'язкості палива.

Достоїнства конструкції - п'єзоелементи і рухомий циліндр здійснюють коливання тільки в одному напрямку. У вимірювальному зонді діють тільки сила тертя і сила реакції з боку датчика коливань.

Недолік - малий інтервал робочих температур, що обмежений $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для кераміки ЦТС – 19.

4.2.4. В'язкозиметр із п'єзоелектричним маніпулятором зі складального стовпа шайб і підйомним підсилювачем руху

Для збільшення ходу рухомого циліндру більш 1 мм за допомогою ПЕМ зі складального стовпа був застосований підйомний підсилювач руху.

В'язкозиметр складається з триботехнічного вузла і камери привода, схеми керування і схеми виміру.

Як привод використовується складальної стовп шайб із 40 штук розмірами $D=0,01\text{ м}$ і $l_3=0,005\text{ м}$ з подовжньою поляризацією. Вага маніпулятора в зборі склала 0,12 кг. Одним кінцем ПЕМ кріпиться до нерухомої основи, до іншого кріпиться упор у виді кульки, що діє на важіль Г-образної форми. На рис. 4.13 показана структурна схема конструкції вимірювального зонда в'язкозиметра.

На рис. 4.13 пунктиром позначене крайнє положення важеля при максимальному переміщенні ПЕМ. Підсилювальний важіль коротким плечем кріпиться шарнірно до корпусу камери привода, а другим кінцем давить на шток рухомого циліндру триботехнічного вузла, у якості якого використовується розпилювач форсунки з зазором 10 мкм. Вага циліндру зі штоком становить 0,025 кг. Камера привода відділена за допомогою сальника від камери виміру. До торця штока прикріплена стрілка-упор, що у крайніх положеннях деформує хвилеводи оптичних електронних датчиків положення. По центрі камери виміру симетрично відносно один одного розташовані впускний і випускний штуцера, за допомогою яких вимірювальний зонд підключається до паливної магістралі. Для повернення циліндру у вихідний стан (крайнє ліве по малюнку) і забезпечення постійного контакту важеля і штока рухомого циліндру, усередину вимірювальної камери введена пружина довжиною 10 мм із твердістю 0,1 Н/м. Габаритні розміри

вимірювального зонда - $0,1 \times 0,1 \times 0,04 \text{ м}^3$. Вага – 0,3 кг.

На схемі не показані канали підведення охолодного повітря в камеру привода. А також не приводяться елементи схеми керування і схеми виміру.

Працює схема в такий спосіб. При відсутності вхідного керуючого сигналу маніпулятор (1) перебуває в стані спокою. Рухомий циліндр (6) зі штоком притискаються до важеля (2) і маніпулятора за рахунок зворотного зв'язку, що виконує пружина (8). Упор штока (11) притискається до оптичного каналу датчика положення (12), викликаючи його деформацію. На виході ланцюга виміру формується сигнал лог. "0".

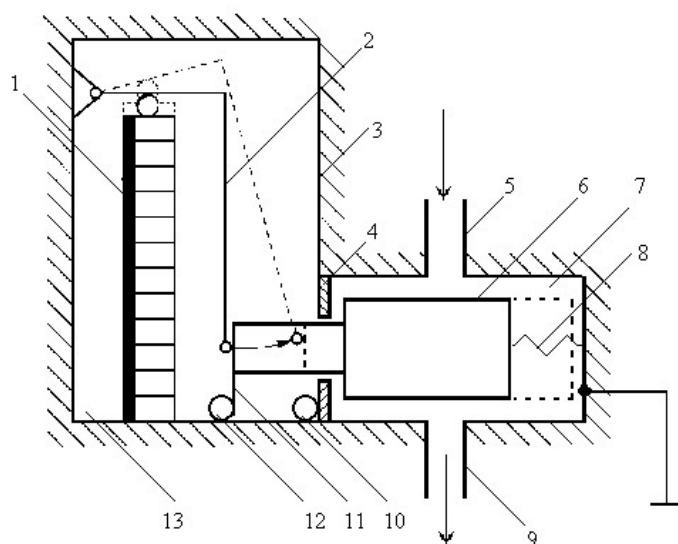


Рис. 4.13. Структурна схема конструкції вимірювального зонда віскозиметра з підйомною передачею посилення руху: 1 – маніпулятор зі складальним стовпа шайб; 2 – важіль; 3 – корпус; 4 – сальник; 5, 9 – впускний і випускний штуцери; 6 – рухомий циліндр із штоком; 7 – вимірювальна камера; 8 – зворотна пружина; 10, 12 – волоконні канали оптичних датчиків кінцевих положень рухомого циліндру; 11 – упор; 13 - камера привода

При подачі керуючої напруги пластини, що входять у складальній стовп, під дією зворотного п'єзоефекту починають збільшувати свою товщину. У результаті

чого починає рухатися важіль. Оптичні властивості хвилеводу (12) відновлюються, і схема виміру починає відлік часу. Незначне переміщення важеля в точці притиснення маніпулятора до +20 мкм приводить до збільшення переміщення до 2 мм у точці притиснення важеля до штока циліндру. У крайнім правому положенні по малюнку упор штока деформує хвилевід (10), викликаючи зміну оптичних властивостей каналу. На виході схеми виміру встановлюється сигнал лог. "1". Одночасно з переміщенням циліндру стискується пружина. Унаслідок чого, сила пружності стисливої пружини буде збільшуватися до величини, достатньої для повернення всього ланцюжка у вихідний стан при знятті напруги.

Вихідним параметром є час проходження циліндру відстані між двома крайніми положеннями.

Крім того, при переміщенні рухомого циліндру буде мінятися точка додатка важеля до штока. Це створює несиметричний додаток сили, у той час як пружина робить осьову протидію. Що може призвести до заклинювання циліндру усередині вимірювальної камери. Однак у випадку використання спеціальних борозен для обертання циліндру і відсутності жорсткого зв'язку з важелем можна зменшити його імовірність. У теж час, своєчасна інформація про заклинювання циліндру віскозиметра дозволяє уникнути відмовлень у роботі ПА.

Самим істотним недоліком цієї конструкції є наявність пружини. Її експлуатація здійснюється при високих температурах і при зупинці двигуна може призвести до нашарування парафіну і смол на поверхні. Для запуску буде потрібно додатковий прогрів вимірювальної камери. У протилежному випадку час введення в роботу може розтягтися до півгодини. Для виключення цього недоліку пружина була переміщена в камеру привода.

Однак позбутися від пружини можна шляхом установки спеціальних скоб, що дозволяють утримувати разом маніпулятор і важіль, важіль і шток. У цьому випадку повернення маніпулятора у вихідний стан повинен здійснюватися схемою керування.

Достоїнством є більший діапазон переміщення і відносна простота конструкції. Висока швидкість переключення ПЕМ, що дозволяє працювати в діапазоні до 500

проходів рухомого циліндру в хвилину.

4.2.5. Віскозиметр із п'єзоелектричним маніпулятором зі складального стовпа шайб і підсилювачем руху у виді паралелограма

З метою зменшення габаритних розмірів при збільшеному ході циліндру віскозиметра була розроблена конструкція з ПЕМ зі складального стовпа і підсилювачем руху у виді паралелограма.

Віскозиметр складається з триботехнічного вузла і камери привода, схеми керування і схеми виміру.

Як привод аналогічно конструкції 4.2.4 використовується складальний стовп шайб із 40 штук розмірами $D=0,01$ м і $l_3=0,005$ м з подовжньою поляризацією. Вага маніпулятора в зборі - 0,12 кг. Одним кінцем ПЕМ кріпиться до нерухомої основи. Інший кінець за допомогою упора у виді кульки діє на підсилювач у виді паралелограма. На рис. 4.14 показана структурна схема конструкції вимірювального зонда віскозиметра.

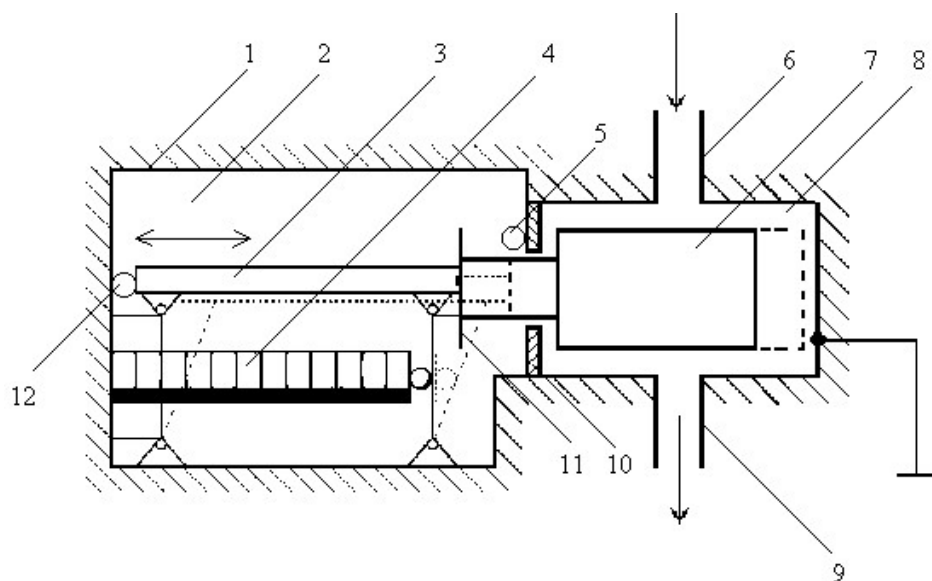


Рис. 4.14. Структурна схема конструкції вимірювального зонда віскозиметра з підсилювачем руху у виді паралелограма: 1 – корпус; 2 - камера привода; 3 – підсилювальний важіль; 4 – маніпулятор; 5, 12 – оптичні датчики переміщення; 6, 9 – впускний і випускний штуцери; 7 – рухомий циліндр із штоком; 8 – вимірювальна камера; 10 - сальник; 11 – упор

У цій конструкції враховані недоліки попередньої, а саме: передбачене сполучення підсилювача зі штоком циліндру за допомогою замка, що дозволяє позбутися зворотної пружини, а також зменшена довжина важеля, що зменшує габаритні розміри віскозиметра.

Відсутність пружини знімає попередню напругу з маніпулятора. У схемі керування передбачена подача двополярних імпульсів керування для повернення рухомого циліндру у вихідний стан, компенсації гистерезиса і повзучості.

Працює пристрій у такий спосіб.

У стані спокою маніпулятор перебуває у вільному положенні так, що важіль своїм кінцем стосується лівого по малюнку хвильоводу оптичного каналу (12). Зв'язаний з важелем рухомий циліндр перебуває в крайнім лівому положенні.

Перший такт: при подачі керуючого напруги позитивної полярності під дією прямого п'єзоефекту розмір маніпулятора збільшується за рахунок зміни товщини пластин, що входять у його склад. Зв'язаний важіль починає переміщатися вправо до точки торкання хвильоводу оптичного каналу (5). Після торкання починається деформація, що викликає зміну оптичних властивостей. Це свідчить про те, що циліндр досяг крайнього правого положення.

Другий такт: відбувається зміна знака керуючої напруги на протилежний. При цьому рухомий циліндр з маніпулятором починають робити рух у напрямку каналу (12). Після того, як торець підсилювача торкнеться оптичного каналу і почне його деформувати, закінчиться цикл із моменту вмикання живлення. Час циклу відповідає в'язкості рідини.

При розмірах паралелепіпеда $0,03 \times 0,065 \text{ м}^2$ переміщення циліндру при переміщенні маніпулятора на 0,1 мм становить 0,6 мм і габаритних розмірах вимірювального зонда $0,1 \times 0,04 \times 0,04 \text{ м}^3$. Для одержання переміщень більше 1 мм не доцільне застосування ПЕМ. Варто використовувати п'єзодвигуни.

Однак жоден привод не зможе розвинути зусилля більше, ніж ПЕМ зі складального стовпа.

4.3. Реометри з п'єзодвигунами

4.3.1. Реометр із приводом на лінійних п'єзодвигунах

З метою збільшення лінійного переміщення для можливості руйнування зон з контактом, де може відбуватися адгезія, були розроблені дві конструкції з ЛПД.

Віскозиметр складається з вимірювального зонда, до складу якого входить триботехнічний вузол і привод, схеми керування і виміру [145].

На рис. 4.15 приведена структурна схема віскозиметра на одному ЛПД і зворотною пружиною.

ЛПД виконаний із двох ПР із поперечною поляризацією з кераміки ЦТС-19, розташованих симетрично щодо штока циліндру. Розміри ПР $l_1=40\cdot 10^{-3}$ м, $l_2=20\cdot 10^{-3}$ м, $l_3=1,9\cdot 10^{-3}$ м, установлені під кутом 45° .

Шток рухомого циліндру являє собою вісь з високоміцного сплаву ВК-6, із двома виступами, що одночасно служать обмежниками ходу штока між двома упорами і замкачами датчиків переміщення. Довжина штока складає 0,07 м. Хід штока між упорами (9) і (10) – 0,01 м.

Використання двох симетрично розташованих ПР обумовлено з метою запобігання нестационарних явищ, коли порушується контакт ПР і штока циліндру. Особливо це характерно в умовах морської хитавиці, куту крен судна може досягати 45° .

Пружина (8) попередньо навантажена зусиллям у 1 Н для упевненого притиску виступу (11) до упора (9). Довжина пружини – 0,01 м. Коефіцієнт твердості 100 Н/м.

Габаритні розміри вимірювальної камери $0,15\times 0,05\times 0,05$ м³.

Робота датчика полягає в наступному. У вихідному стані при виключеному живленні у вимірювальному зонді (1), що складається з першої (2) камери, з'єднаної за допомогою сальника (3) із другою камерою (4), рухомий циліндр із штоком (6) перебувають у положенні спокою поблизу сальника (3). При цьому шток притягнутий до заглушки (7) пружиною (8) до замикання зазорів між упорами (9) виступом (11). Між виступами ПР стосуються штока, забезпечуючи прослизання при зворотному русі. Впускний клапан (14) і випускний (5) перебувають у

закритому стані. Сигнал з упора (9) надходить на датчик (15). Поки виступ (12) не замикає зазор упора (10) на вході датчика (17) сигнал відсутній.

З виходу датчика (15) сигнал лог. «1» надходить на S - вхід тригера (17). У цей час сигнал з виходу датчика (16) логічний «0» надходить на другий вхід R тригера. З виходу тригера сигнал «дозвіл» надходить на перший вхід логічного елемента 2І (19), на другий вхід якого надходить послідовність прямокутних імпульсів від керованого генератора прямокутних імпульсів (УГПІ) (20).

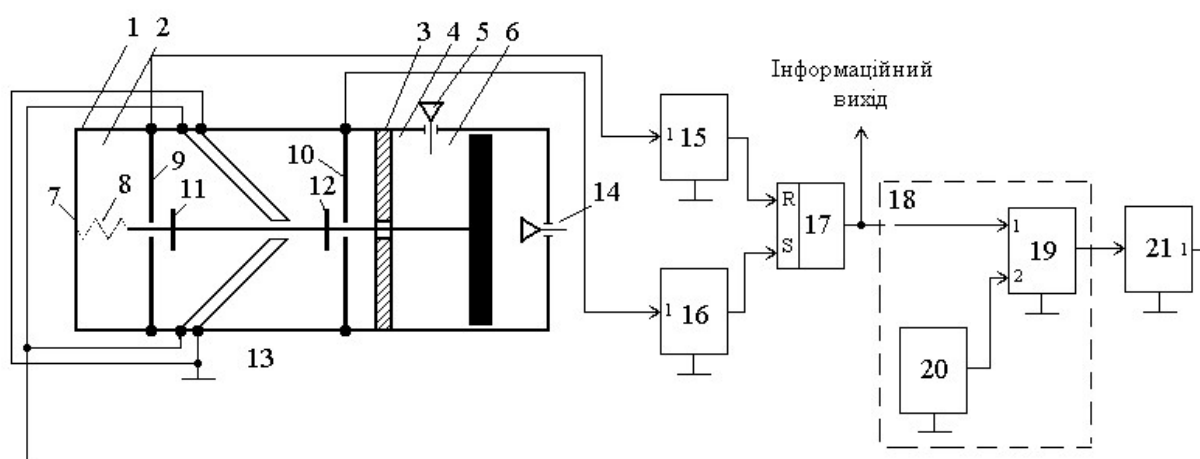


Рис. 4.15. Структурна схема віскозиметра з одним ЛПД і зворотною пружиною: 1 - вимірювальний зонд; 2 - перша циліндрична камера з ізолюючого матеріалу; 3 – сальник; 4 - друга циліндрична камера; 5 - випускний клапан; 6 - рухомий циліндр із штоком; 7 - заглушка першої камери; 8 – пружина; 9, 10 - перший і другий упори зі струмопровідного матеріалу для контролю положення циліндру; 11, 12 - перший і другий виступи зі струмопровідного матеріалу; 13 – ЛПД; 14 - впускний клапан; 15, 16 - перший і другий датчики положення рухомого циліндру; 17 – RS - тригер; 18 - вхід системи керування; 19 – схема &; 20 - генератор прямокутних імпульсів; 21 - регульований підсилювач потужності

З виходу логічного елемента (19) сигнал заданої амплітуди і частоти через регульований підсилювач потужності (21) подається на паралельно включені ПР ЛПД (13).

Перший цикл: під впливом послідовності прямокутних імпульсів ПР починає робити ударні рухи по штоку циліндру, переміщаючи його крок за кроком у напрямку впускного клапана. Одночасно з початком руху штока відбувається розмикання ланцюга датчика (15), на вході якого з'являється сигнал логічного «0». Циліндр робить холостий хід, до замикання виступом (12) зазору упора (10) і замикання ланцюга датчика (16).

З виходу датчика (16) сигнал логічної «1» активує R - вхід і тригер переходить в інший стан, припиняючи проходження прямокутних імпульсів від УГПІ на підсилювач потужності і далі до п'єзоелементів.

Інформація про час переміщення рухомого циліндру в камері привода знімається з виходу тригера. Ударні рухи по штоку припиняються, двигун зупиняється.

Другий етап: під впливом розтягнутої пружини шток з циліндром робить зворотний рух убік вихідного положення. Створюється розрядження і видавлюється повітря через зазор між рухомим циліндром і циліндром у простір між сальником і рухомим циліндром. Відкривається випускний клапан, що перебуває в об'ємі другої камери між рухомим циліндром і впускним клапаном, і пропускає використовувану рідину в камеру. На цьому 1-й цикл роботи завершений.

При наступних циклах роботи, при прямованні рухомого циліндру ЛПД рідина закриває впускний клапан і надходить через зазор 10 мкм у простір між сальником і рухомим циліндром. При поверненні, рідина виходить через випускний клапан.

Вихідний параметр – час двох циклів при заданій швидкості ЛПД і постійної швидкості повернення під дією пружини.

З роботи такої конструкції випливають наступні недоліки:

1. Поділ вимірювальної камери на дві частин за допомогою сальника, що в підсумку приводить до появи додаткового тертя і зниженню ресурсу всього пристрою.

2. Гальванічні контактні пари, що володіють «брязкотом» контактів.

3. Наявність у конструкції пружини, що через якийсь час утрачає свої властивості.

4. Не передбачена можливість виміру омичного опору для відключення вимірювального пристрою.

Однак якщо передбачити регулювання натягу, можна збільшити ресурс до її заміни.

Основним достоїнством даної конструкції є великий хід рухомого циліндру, що дозволяє руйнувати контактні площадки з адгезією.

4.3.2. Реометр із двома лінійними п'єзодвигунами

Для заміни пружини в конструкції (4.3.1) і здійснення можливості переміщення рухомого циліндру в зворотну сторону застосований другий ЛПД.

Нами запропонована конструкція віскозиметра з двома ЛПД, що здійснюють зворотно - поступальне прямування рухомого циліндру (рис. 4.16).

Віскозиметр складається з вимірювального зонда, до складу якого входить триботехнічний вузол і привод, схеми керування і виміру.

На рис. 4.16 позначені: 1 - вимірювальний зонд; 2 - перша циліндрична камера з ізолюючого матеріалу; 3 - лівий упор; 4, 5 - ЛПД; 6 - шпильки кріплення камери привода і триботехнічного вузла; 7 - зовнішній циліндр із фланцем; 8 - ніхромові спіраль; 9 - керамічний ізолятор; 10 - штуцер; 11 - рухомий циліндр із штоком; 12 - правий упор; 13 - піддон для збору палива; 14 - правий оптичний канал; 15 – лівий оптичний канал; 16 – модулятор; 17 - випромінювачі; 18 - приймач від лівого оптичного каналу, 19 - приймач від правого оптичного каналу; 20 – перетворювач опір-напруга; 21, 22 - входи системи керування; 23 – RS - тригер; 24 – схема керування; 25 – генератор коливань; 26 – інвертор; 27, 28, 40 - схема “&”; 29, 30 - регульований підсилювач потужності.

Камера привода кріпиться до триботехнічного вузла за допомогою шпильок з метою забезпечення температурного режиму за допомогою обдування її стисненим повітрям. У середині розташовані 4 ПР розмірами $l_1=40\cdot 10^{-3}$ м, $l_2=20\cdot 10^{-3}$ м, $l_3=1,9\cdot 10^{-3}$

У якості триботехнічного вузла обраний стандартний розпилювач із зазором 10 мкм. У торці розпилювача зроблений вхідний штуцер, що підключається до паливної магістралі. Під дією тиску з боку палива рідина проникає в зону контакту двох циліндрів. Отже, при прямуюванні циліндра на нього діють дві сили: сила тертя і сила тиску. Для відводу палива, що випливає з вузла, передбачена камера збору, з якої паливо повертається назад у магістраль. Таким чином, виключається можливість облітерації. Для прогріву вузла по поверхні зовнішнього циліндра на керамічний ізолятор намотана ніхромової спіраль. Додатково встановлений датчик температури і є шлейф для виміру омичного опору у вузлі.

Схема керування складається з генератора, тригера, схеми “&”, регульованого підсилювача потужності.

Схема виміру складається з перетворювача опору в напругу, датчиків переміщення, підсилювачів, що нормують, датчика температури.

Працює схема в такий спосіб.

У початковий момент часу при відключеному живленні циліндр може перебувати в будь-якій точці. Тому можливий варіант, коли жоден упор не стосується оптичного хвилеводу. Для приведення в робочий стан віскозиметра при вмиканні живлення відразу починає працювати лівий ЛПД, переміщаючи циліндр у напрямку штуцера. У цей час видавлюється повітря з простору під циліндром. При досягненні упором правого хвилеводу спрацьовує тригер і включається правий ЛПД, що починає переміщати циліндр у зворотному напрямку. Одночасно з камери видаляється повітря і затягується паливо. По досягненні лівого хвилеводу робочий цикл повторюється.

Перетворювач опір-напруга за допомогою шлейфа вимірює опір у триботехнічному вузлі. Як тільки опір стає менше 500 Ом (наступила адгезія), на вхід елемента “&” подається заборонний сигнал проходженню інформаційного сигналу.

Слід зазначити, що використання в ЛПД пари симетрично розташованих ПР в умовах суднової хитаєвості і вібрацій дозволяє уникнути умов не стаціонарності.

Таким чином реометр забезпечує 300 ходів рухомого циліндру в хвилину.

4.3.3. Віскозиметр-реометр із приводом на роторному п'єзодвигуні

Для забезпечення постійної швидкості переміщення рухомого циліндру триботехнічного вузла без розгону на початку кожного такту був застосований нереверсивний ПЕД з пасивним ротором. З усього різноманіття двигунів була обрана конструкція [23]. Однак у виготовленні віскозиметра використовувався ПЕД моделі ДЕП-28 (2) у нереверсивному виконанні з діапазоном швидкостей обертання в режимі холостого ходу - 0...300 1/хв. Пусковий момент на валу двигуна – 3 кг×см. Ресурс роботи двигуна - 50000 годин.

Нами розроблений віскозиметр на співвісних циліндрах, структурна схема конструкції якого представлена на рис. 4.17 [146]. Віскозиметр складається з триботехнічного вузла, з'єднаного за допомогою кривошипа з маховиком, посадженим на ротор ПЕД, тахометра й адаптивної схеми керування. На малюнку не показані елементи, зв'язані з виміром омичного контакту у вузлі.

У якості триботехнічного вузла узятий розпилювач, у торець якого врізаний штуцер для подачі палива. З боку кривошипа паливо самопливом надходить у збірну ємність і далі повертається в паливну магістраль. Габаритні розміри 0,15×0,15×0,1 м³. Вага – 0,4 кг.

Працює схема в такий спосіб.

Нехай рухомий циліндр перебуває в крайньому левому по малюнку положенні. При подачі напруги живлення на ПЕД (5) від адаптивної системи керування ПР із поперечною поляризацією під дією зворотного п'єзоефекту починає робити удари по роторі ПЕД. Після 5 секунд двигун набирає задані обороти, що контролюються за допомогою тахометра і виступу (8) на маховику (6). Тахометр може бути виконаний як з оптичними сенсорами, так гальванічними і п'єзоелектричними. Нами використовувався біполярний сенсорний генератор, до поверхні якого приклеєний постійний магніт. На відстані 2 мм від нього розташований ще один магніт, закріплений нерухомо на корпусі. При проходженні немагнітного виступу (8) між магнітами, БПСГ починає робити механічні коливання під дією магнітного поля. У результаті чого в режимі прямого п'єзоефекту БПСГ починає генерувати імпульси напруги.

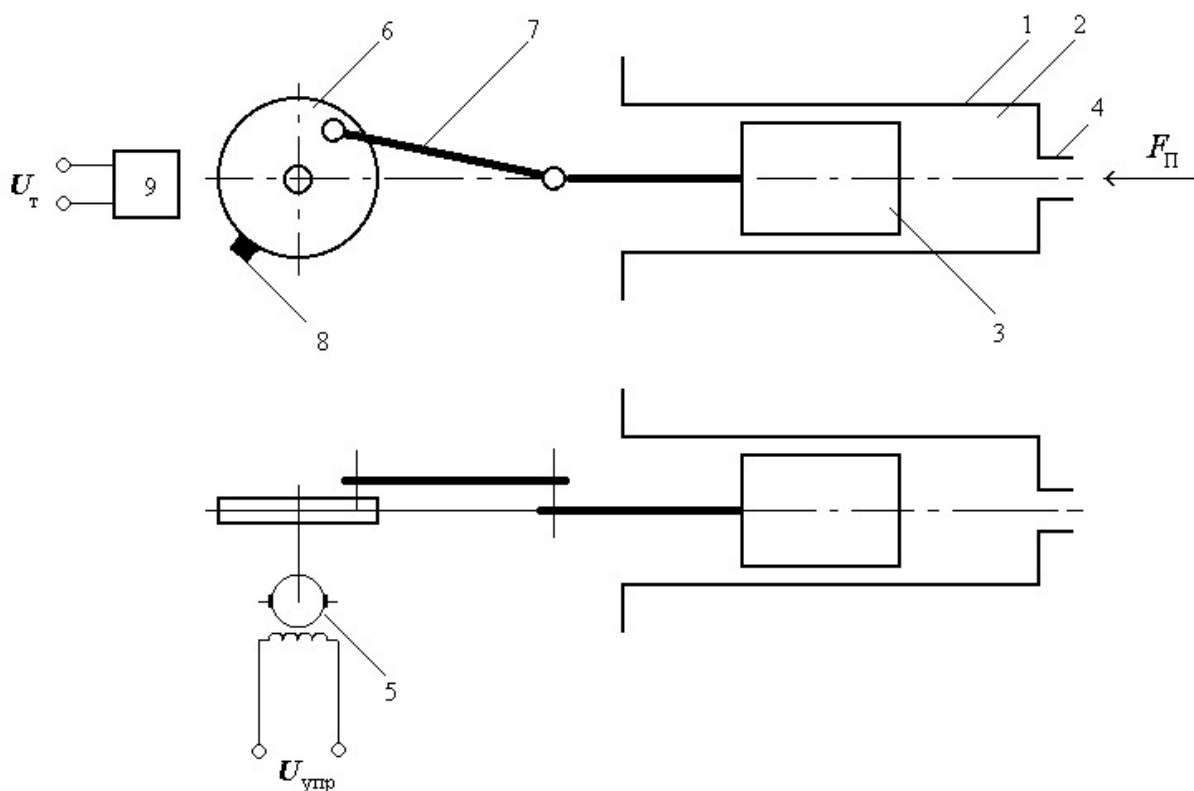


Рис. 4.17. Структурна схема конструкції віскозиметра з роторним ПЕД: 1 - вимірювальний зонд; 2 - вимірювальна камера; 3 - рухомий циліндр; 4 - штуцер; 5 - ПЕД; 6 - диск; 7 - штанга; 8 - магніт; 9 - тахометр

Паливо, що попадає в процесі зворотно-поступального руху циліндру, чинить опір руху циліндру усередині нерухомого циліндра. При збільшенні в'язкості зростає момент навантаження на валу ПЕД, що приводить до зменшення частоти обертання. Величина, на яку змінюється частота, пропорційна зміні в'язкості палива. При зменшенні в'язкості, усі процеси відбуваються в зворотному порядку.

Достоїнством схеми є її універсальність, тому що наближає процеси у віскозиметрі до реальних процесу в прецизійних пар паливної апаратури. При утворенні задирки відбувається блокування показань віскозиметра. Після декількох проходів рухомого циліндру процеси відновлюються, і двигун виходить на робочий режим.

На наш погляд, така конструкція позбавлена принципових недоліків.

4.4. Ротаційний віскозиметр

Для виміру в'язкості палива в потоці з можливістю перебудови робочого зазору в діапазоні $1 \div 25$ мкм був розроблений ротаційний віскозиметр зі співвісними дисками. Первинний перетворювач складається з двох співвісних розташованих дисків: ведучого і відомого (рис. 4.18).

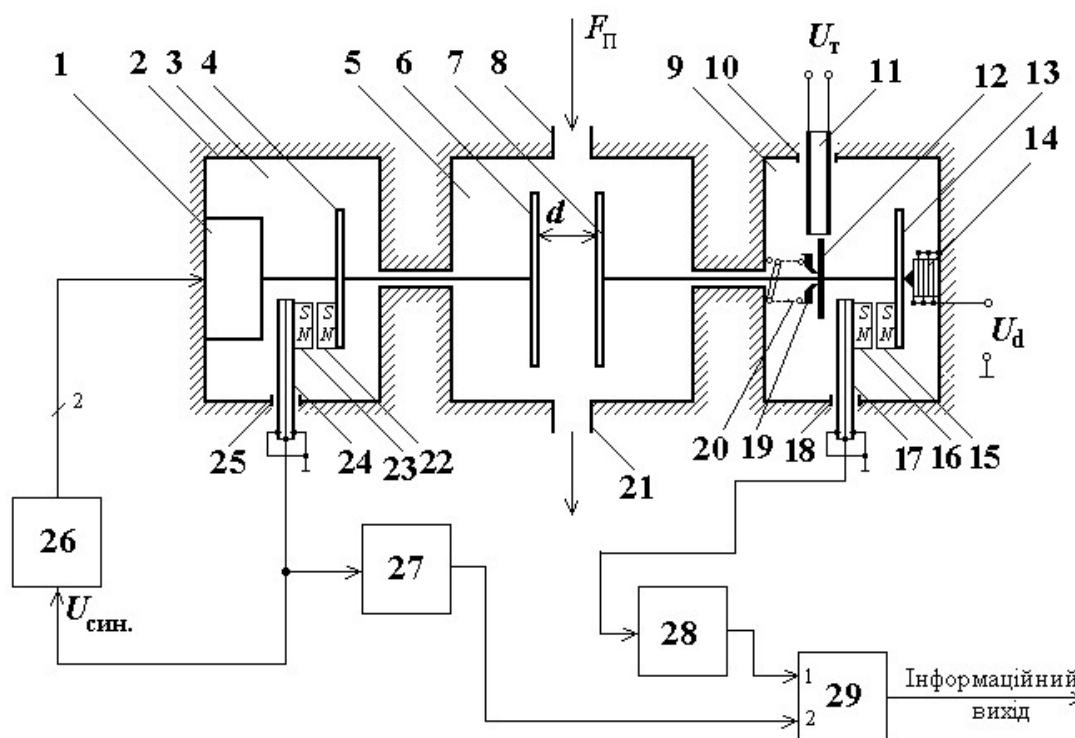


Рис. 4.18. Структурна схема конструкції ротаційного віскозиметра на співвісних дисках: 1 - ПЕД; 2 - вимірювальний зонд; 3 - камера привода; 4, 13 - диск тахометра; 5 - вимірювальна камера; 6 - ведучий диск; 7 - відомий диск; 8 - впускний штуцер; 9 - камера, що реєструє; 10, 18, 25 - ізолююча втулка; 11 - гальмо; 12 - диск; 14 - позиціонер; 15, 16, 22, 23 - постійний магніт; 17, 24 - БПЭ; 19 - стопорне кільце; 20 - пружина; 21 - випускний штуцер; 26 - пристрій керування ПЕД; 27, 28 - ПЧН; 29 - від'ємник

Ведучий диск приводиться в рух нереверсивним п'єзoeлектричним двигуном з пасивним ротором, а з боку відомого створюється навантажувальний момент. По

різниці частот обертання дисків при постійному моменті і зазорі визначають динамічну в'язкість рідини.

Був узятий двигун ДЕП - 28. Габаритний розмір вимірювального зонда $0,25 \times 0,12 \times 0,12$ м³. Вага – 0,5 кг.

Прибор складається з вимірювального зонда і блоку керування. Вимірювальний зонд розділений на три камери: привода, вимірювальної і камери, що реєструє.

Усередині камери привода (3) розташовується ПЕД (1). Ротор ПЕД з'єднаний з віссю, на яку жорстко посаджені диск тахометра (4) і ведучий диск перетворювача (6), розташовані у вимірювальній камері (5). До диска тахометра прикріплений постійний магніт (22). Для реєстрації частоти обертання цього диска в камеру привода введений датчик обертання (24), закріплений в ізольованій втулці (25) у корпусі (2). До другого кінця БПЕ прикріплений постійний магніт (23).

Усередину вимірювальної камери уведений відомий диск (7), що розташовується співвісний з ведучим диском на відстані d від нього. Симетрично по сторонах корпуса розташовуються впускний (8) і випускний (21) штуцера, по яких здійснюється прокачування палива. Відомий диск жорстко посаджений на вісь, до другого кінця якої прикріплений диск тахометра (13) з постійним магнітом (15). На осі також жорстко посаджений обмежувальний диск (12), ліворуч від якого розміщена пружина, яка вижимає, (20) зі стопорним кільцем (19). Правий кінець осі упирається в п'єзоманіпулятор (14), виконаний зі складального стовпа шайб, вершина якого увінчана конусом. Пари пружина-маніпулятор служать для зміни зазору між ведучим і відомим диском. Для реєстрації частоти обертання відомого диска в ізольованій втулці (18) у корпусі закріплений БПЕ (17), до другого кінця якого прикріплений постійний магніт (16). Для зміни моменту, що прикладається, у камеру в ізольованій втулці (10) уведений п'єзоелектричний маніпулятор (11) взаємодіючий з диском (12) і виконаний з монопластини з поперечною поляризацією і фрикційною насадкою на кінці.

Схема керування складається з чотирьох блоків. Пристрій керування ПЕД (26) задає керуючу напругу шляхом завдання амплітуди і частоти. Блоки (27) і (28) – перетворювачі частота – напруга (ПЧН), перетворюють сигнали від датчиків (24) і (17)

відповідно. Напруга з ПЧН надходить на два входи від'ємника (29), на виході якого формується інформаційний сигнал, пропорційний в'язкості палива. Крім того, для керування маніпуляторами (11) і (14) подаються сигнали керування в разі потреби зміни відстані d і моменту на осі відомого диска.

Робота реометра - віскозиметра.

При подачі керуючої напруги на ПЕД ПР із поперечною поляризацією починає робити коливання під дію зворотного п'єзоефекту. Удари по роторі приводять його в обертання, що передається по жорстко зв'язаній осі на тахометр і ведучий диск перетворювача. З виходу ПЧН (27) сигнал зворотного зв'язку надходить на вхід схеми керування для підтримки частоти обертання двигуна з заданим значенням. У вимірювальній камері за рахунок грузлих-пружних сил прямування від ведучого диска передається відомому, частота обертання якого за допомогою ПЧН (28) надходить на вхід від'ємника, куди приходить напруга з ПЧН (27). Сигнал на виході від'ємника пропорційний в'язкості рідини.

У разі потреби перебудови величини зазору на п'єзоманіпулятор (14) подається напруга, під дією якої в режимі зворотного п'єзоефекту відбувається зсув осі з відомим диском у напрямку ведучого диска.

При необхідності зміни зусилля на осі подається напруга на гальмо (11).

Достоїнством схеми є можливість перебудови зазору між відомим і ведучим диском. Однак є і недоліки.

1. Складність виміру омичного контакту, тому що вимагаються вугільні щітки для підключення омметра, що у процесі експлуатації стираються і при низьких струмах у ланцюгу виміру можуть показувати різні значення опору.

2. У випадку влучення різних домішок чи адгезії поверхонь вихід з цього стану перевищує аналогічний час у віскозиметрах на співвісних циліндрах.

3. Процеси у віскозиметрі відрізняються від реальних процесів у вузлах паливної апаратури, де присутні зворотно - поступальні переміщення, а не обертальні, як у підшипниках ковзання.

Крім того, слід зазначити, що розроблені віскозиметри та реометри мають кращі характеристики при оцінці коефіцієнтів в'язкості палива ніж тахометричні

витратоміри [147].

4.5. Висновки. Обговорення отриманих результатів

У результаті проведених досліджень розроблені:

1. Вібраційний віскозиметр на біморфному п'єзоелементі для виміру коефіцієнтів динамічної в'язкості “ньютонівських” рідин у потоці, а також вібраційний віскозиметр із трубчастим п'єзоелементом із зазором 10 мкм.

2. Віскозиметри на співвісних циліндрах (отриманий патент України) із приводом на біморфному п'єзоелементі з п'єзоелектричними параметричним і генераторним датчиками переміщення для виміру коефіцієнтів динамічної в'язкості палива, що транспортується по паливопроводу низького тиску, відрізняються низькою ціною приводу і датчиків переміщення.

3. Віскозиметри на співвісних циліндрах із приводом на складальному стовпі без підсилювача переміщення (отриманий патент України) і з підсилювачами переміщення у виді паралелограма і важеля для виміру коефіцієнтів динамічної в'язкості у всьому діапазоні швидкостей зсуву однорідного шару тиксотропних рідин без використання дорогих оптичних датчиків переміщення.

4. Реометри на співвісних циліндрах з п'єзоелектричним приводом на одному ЛПД і зворотною пружиною (отриманий патент України), двох ЛПД, нереверсивному п'єзоелектричному двигуні з пасивним ротором (отриманий патент України), дозволяють здійснювати виміри коефіцієнтів в'язкості в діапазоні $0,1 \div 160$ стокс і визначати реологічні характеристики тиксотропних рідин у зазорах 10 мкм і лінійною швидкістю $0 \div 0,8$ м/с.

5. Віскозиметр ротаційний з нереверсивним п'єзодвигуном і пасивним ротором, що дозволяє визначати реологічні характеристики тиксотропних рідин у зазорах $1 \div 25$ мкм і частотою обертання $0 \div 5$ Гц.

Основні наукові результати опубліковані в збірниках, приведених у переліку ВАК, [136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 144, 145, 146, 147].

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРИСТРОЇВ П'ЄЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ

Для оцінки можливості побудови реологічних характеристик рідин, використовуваних у СЕУ, була проведена серія експериментів з розробленими в розділі 4 конструкціями віскозиметрів та реометрів на співвісних циліндрах з п'єзоприводом і вібраційними віскозиметрами.

Були обрані наступні конструкції: вібраційні віскозиметри на БПП і циліндрі, реометри - віскозиметри на співвісних циліндрах із ЛПД і нереверсивним ПЭД з пасивним двигуном. Для порівняння реологічних характеристик був використаний ротаційний віскозиметр із ПЕД.

Всі експерименти проводилися при наступних умовах:

- температура навколишнього середовища $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура рідин у діапазоні від $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- коефіцієнт в'язкості рідин лежить у діапазоні від 20 до 190 стокс: олії 90 і 153,4 стокс, олія в автоматичну КПП Dexron III, дизельне паливо, гас; спирт; олія Shell T-17; олія Shell Omalla.
- у якості триботехнічного вузла обраний розпилювач форсунки, у якого діаметр рухливого циліндра $D=7\cdot 10^{-3}\text{ м}$, довжина робочої зони $l=21,5\cdot 10^{-3}\text{ м}$, і загальна довжина поршня зі штоком $l=42,6\cdot 10^{-3}\text{ м}$;
- вимір здійснювався в тупиковій камері й у потоці.

5.1. Дослідження лабораторного вібраційного віскозиметра на біморфному п'єзoelementі

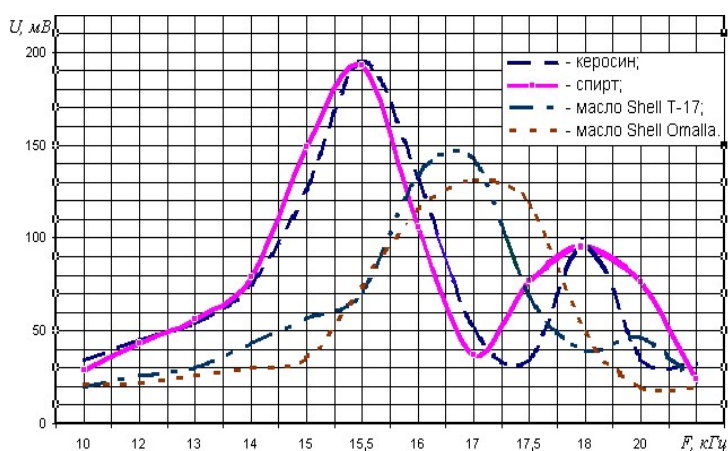
На лабораторному віскозиметрі, описаному в розділі 4, проведена серія експериментів з рідинами, що мають різні коефіцієнти в'язкості: гас; спирт; олія Shell T-17; олія Shell Omalla при температурі не більш $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для обробки результатів використовувалися два персональних комп'ютери

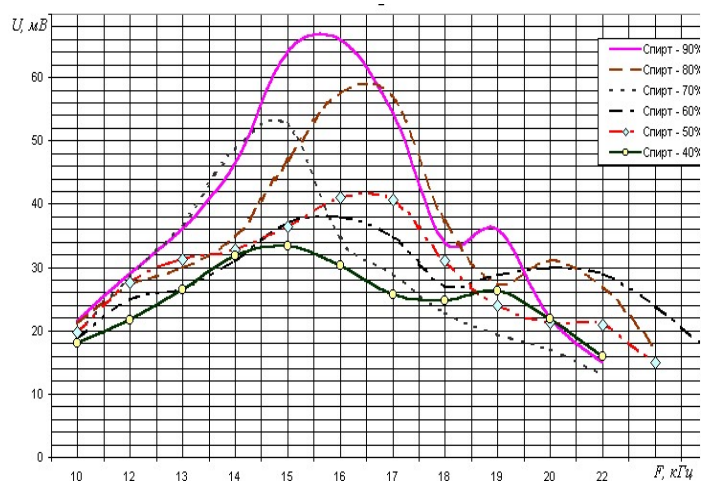
DURON III, на яких був установлений пакет CollEdit, що дозволяє імітувати звукові сигнали амплітудою до 1 В і частотним діапазоном 20 - 44000 Гц на одному комп'ютері і сприймати відповідну реакцію ПП на другому комп'ютері.

Для оцінки залежності між коефіцієнтом в'язкості і сигналом від ПП для різних рідин були зняті АЧХ (рис. 5.1, а).

Наступним кроком було проведення експериментів по оцінці впливу на коефіцієнт в'язкості однієї і тієї ж рідини домішок, що вводяться. Для цієї мети використовувався 96 % спирт, що розбавлявся водою в концентрації від 96° до 40° з інтервалом у 10 %.



а)



б)

Рис. 5.1. АЧХ вібраційного віскозиметра

Після проведення експерименту були отримані дані, по яких була побудована

АЧХ віскозиметра (рис. 5.1, б).

Проведені експерименти показали, що амплітудний метод для даної конструкції недостатньо інформативний, тому що на першому резонансі амплітуда напруги (рис. 5.1) однакова для різних рідин. У той час спостерігається зсув частоти резонансу в залежності від коефіцієнта в'язкості вимірюваної рідини, тобто реалізований резонансний метод виміру.

При дослідженні спирту в різній концентрації виявилось, що зсув відбувається не тільки по частоті, але і змінюється істотно амплітуда. Це, у кінцевому рахунку, приводить при визначеній концентрації спирту до збігу частоти резонансу з рідиною іншого виду.

Слід зазначити, що вимір коефіцієнта в'язкості здійснюється в об'ємі і можливе одержання коефіцієнта в'язкості для палива чи олії не встановленого типу, можливо як для «ньютонівської» рідини. А паливо й олії, як було розглянуто в розділі 2, є тиксотропними рідинами. При використанні в ДВС необхідно проводити контроль в області від 0 до 100 Гц. Особливість конструкції така, що для одержання необхідних частот необхідно збільшувати лінійні розміри п'єзoeлемента і підвищувати напругу керування. Це приводить до значного збільшення маса - габаритних розмірів. Тому, можна затверджувати, що такий віскозиметр можна використовувати тільки для зняття проби на визначеній частоті резонансу при виборі початкових параметрів системи регулювання в'язкості. Місце розташування такого віскозиметра - вихід паливного бака.

З метою наближення процесів у віскозиметрі до реальних процесів у триботехнічному вузлі, зменшували зазор між ПП і стінками корпусу, що були виготовлені з металу. При цьому спостерігалось замикання простору між електродами ПП.

Підвищення температури з $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводило до зсуву АЧХ, що вносило «плутанину» при визначенні коефіцієнта в'язкості випробуваних рідин. Від цього недоліку неможливо позбутися, тому що ПП постійно перебуває в паливі.

5.2. Дослідження віскозиметра на циліндрі

Для проведення експериментів був виготовлений макет на основі трубчастого п'єзoeлемента: висота - 35 мм, зовнішній діаметр - 10 мм, товщина стінки - 1 мм, кількість електродів - вісім (рис. 5.2). Чотири електроди використовуються при двох координатному керуванні, а ще чотири - інформаційні виводи.

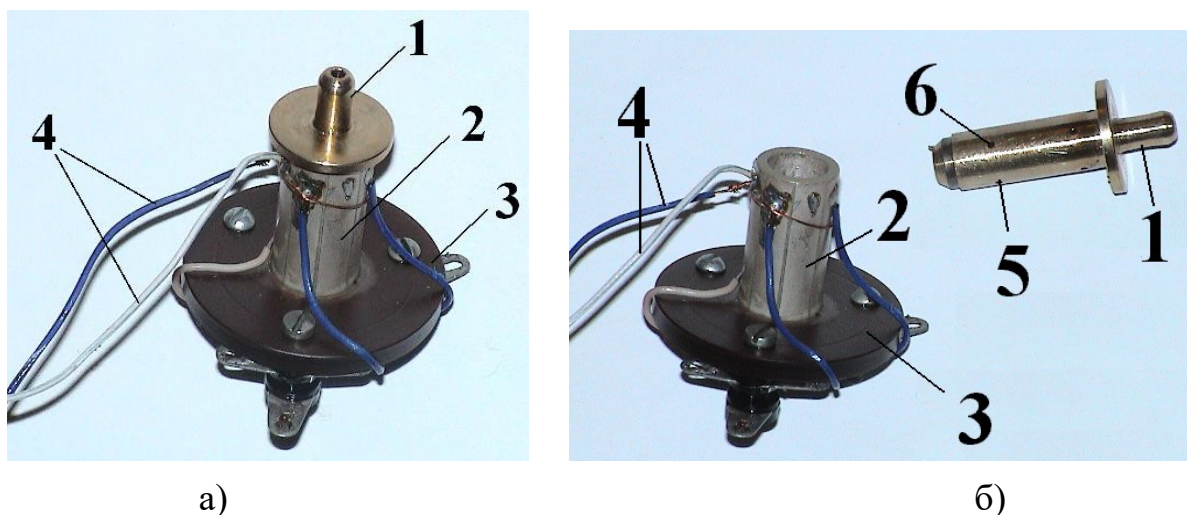


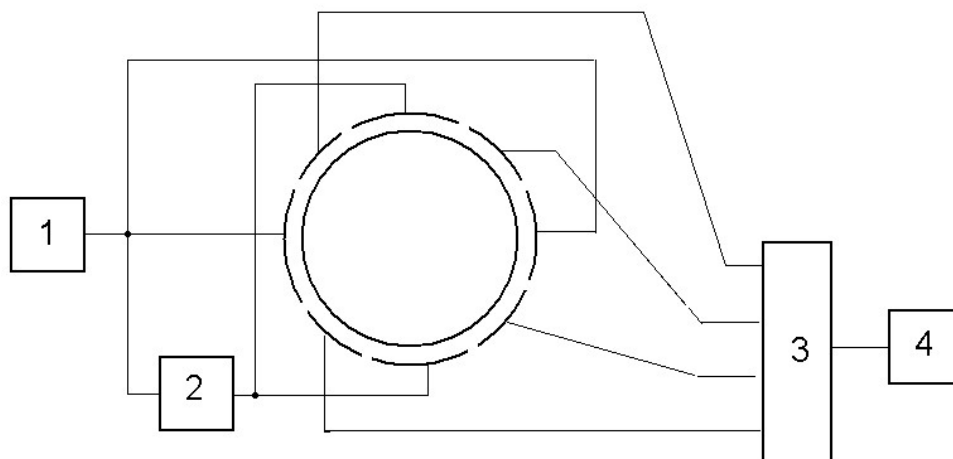
Рис. 5.2. Макет вібраційного віскозиметра: а - у зібраному виді, б - у розібраному; 1 - вхідний штуцер, 2 - електрод циліндричного ПЕ, 3 - основа, 4 - проводи, 5, 6 - отвори для подачі палива

Схема керування і схема виміру представлена на рис. 5.3, а. Тут (1) - генератор прямокутних імпульсів, (2) - пристрій, що зрушує фазу, (3) - комутатор, (4) - осцилограф. На електроди циліндра подавалася напруга від генератора прямокутних імпульсів амплітудою 5 В. Зрушення фаз становить 90 градусів. Паливо подавалося через вхідний штуцер. Іспити здійснювалися для двох олій ТАД-17 і Dextron III.

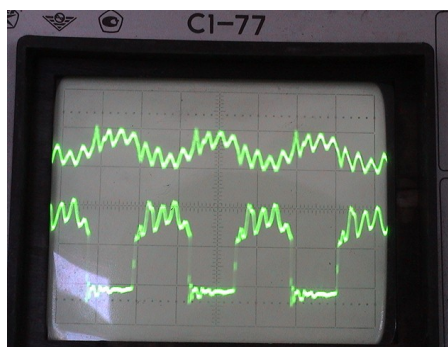
На рис. 5.3, б - г представлені сигнали, отримані з інформаційних електродів на екрані осцилографу (на малюнку зверху).

Дослідження показали, що піки напруги з інформаційних виходів відповідають положенню отворів подачі палива щодо електродів. Спроби встановити відмінність при різних сортах олії не увінчалися успіхом. При подачі напруги керування амплітудою 500 В відбувався вигин вільного кінця таким чином, що наступала

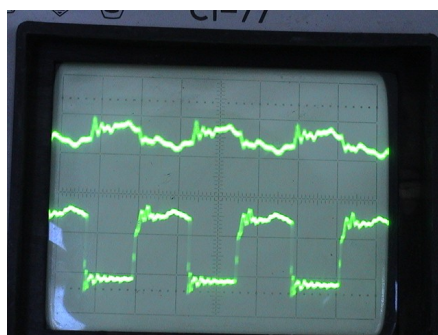
адгезія з внутрішнім циліндром, тим самим порушувалися умови виміру в'язкості.



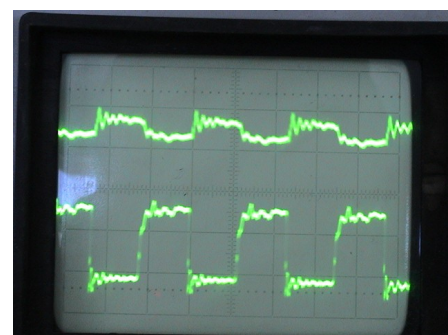
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.3. Електрична схема керування (а), осцилограми сигналів з вихідних електродів ПЕ від кута повороту (б-г)

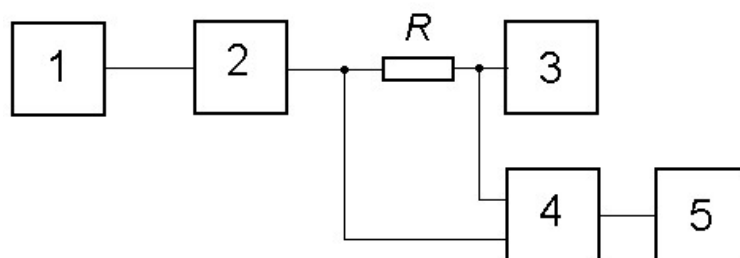
Отримані результати дозволили зробити висновок, що така конструкція не підходить для побудови реологічних характеристик рідин, використовуваних у ДВС. Тому використовувати їх можна для контролю коефіцієнта в'язкості в потоці тільки на визначеній частоті амплітудним методом.

Слід зазначити, що дана конструкція починає працювати як дефектоскоп.

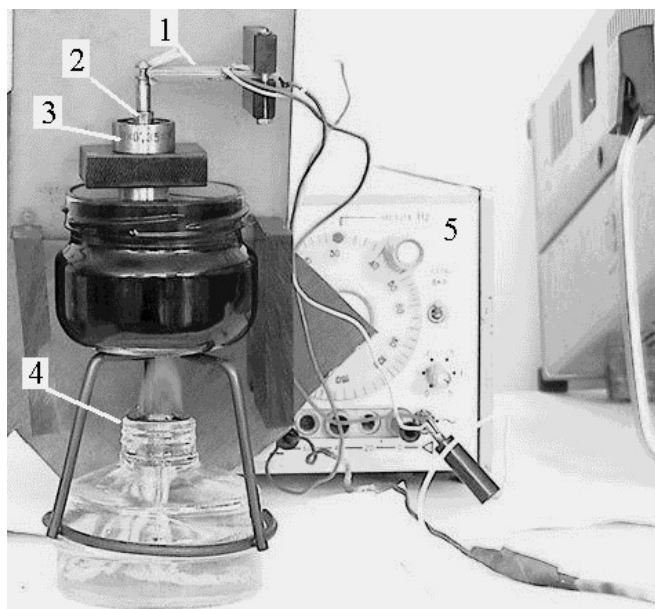
5.3. Дослідження лабораторного вібраційного віскозиметра на біморфному п'єзоелементі з триботехнічним вузлом

Для проведення експериментів була зібрана електрична схема (рис. 5.4, а), що складається з генератора синусоїдальних коливань (1), підсилювача потужності (2),

резистора (R), БПП (3), диференціального підсилювача (4), цифрового вольтметра (5). Макет лабораторного вібраційного віскозиметра представлений на рис. 5.4, б. У якості триботехнічного вузла використаний розпилювач форсунки. Для контролю температури використовувалися ртутні термометри.



а)



б)

Рис. 5.4. Схема електричного вимірювального стенда (а), лабораторний віскозиметр (б): 1 - БПП, 2 - рухливий циліндр, 3 - нерухомий циліндр, 4 - спиртовий пальник, 5 - генератор синусоїдальних коливань

Перший етап досліджень здійснювався для дизельного палива при температурі $+25^{\circ}\text{C}$.

На другому етапі проведення експериментів температура у вимірювальному зонді змінювалася за допомогою спиртового пальника.

На електроди БПП подавалася синусоїдальна напруга амплітудою 600 В та частотою 10 кГц при лінійних розмірах БПП $1 \times 1 \times 3 \text{ см}^3$. Максимальне переміщення внутрішнього циліндра склало 0,5 мкм. Була отримана характеристика для напруги на резисторі від температури палива (рис. 5.5).

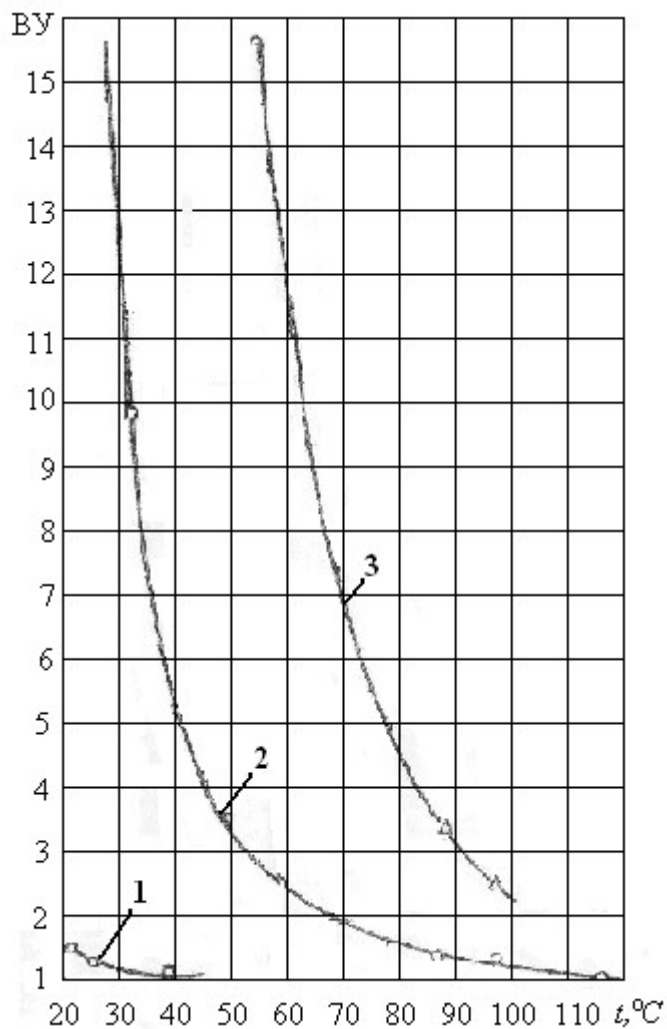


Рис. 5.5. Залежність амплітуди напруги на резисторі від температури: 1 – дизельне паливо; 2 – моторне; 3 – мазут

При зміні частоти керуючої напруги було встановлено, що амплітуда переміщення зменшується. Однак, ці переміщення настільки малі, що відстежити можна тільки за допомогою мікроскопа або оптичних конфокальних датчиків переміщення. Спільне використання цих пристроїв збільшує вартість усього віскозиметра на 100 доларів США.

У процесі виміру спостерігалось явище повзучості, що приводило до

нагромадження помилки. У силу похилого характеру АЧХ ПП переміщення поршня увесь час змінювалося зі зміною частоти. Щоб здійснювати постійне переміщення, проводився контроль переміщення рухливого циліндра. З метою виявлення оптимального датчика переміщення були проведені дослідження віскозиметра з роздільним керуванням і оптичними і п'єзоелектричними акустичними датчиками переміщення.

5.4. Дослідження лабораторного вібраційного віскозиметра на біморфному п'єзoelementі з триботехнічним вузлом і генераторним датчиком переміщення

Для проведення досліджень була зібрана схема, представлена на рис. 5.6.

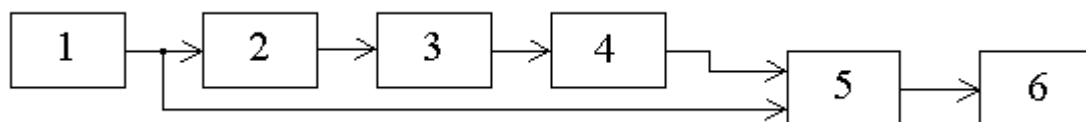


Рис. 5.6. Схема електрична для досліджень роботи генераторного датчика: 1 - генератор синусоїдальних коливань; 2 - випромінювач; 3 - акустична середа, 4 - приймач; 5 - диференціальний підсилювач; 6 - цифровий вольтметр

Експерименти проводилися при температурі навколишнього середовища +25 °С, тиску 742 мм. р.ст. і вологості 40 %. Керуюча напруга 300 В. Ціллю проведених експериментів являлося виявлення залежності вихідної напруги від переміщення штока поршня. Відстань, на яке переміщався шток, склала 10 мкм.

На рис. 5.7 показаний графік залежності напруги на виході приймача від відстані.

З графіка видно, що у випадку перевищення відстані переміщення поршня над довжиною акустичної хвилі необхідно мати додатковий пристрій для підрахунку кількості періодів. В умовах повзучості, що з'являється у БПП, потрібно періодично робити установку в початкове положення. Це помітно ускладнює схему обробки.

Збільшення довжини хвилі з одночасним зменшенням частоти резонансу

випромінювача і приймача приводить до збільшення маси приймача, що може перевершувати масу БПП, і, відповідно, зменшувати переміщення.

Виходячи з того, що генераторний датчик має високу чутливість до вологості і низьку перешкодозахищеність, застосування лабораторного віскозиметра обмежено.

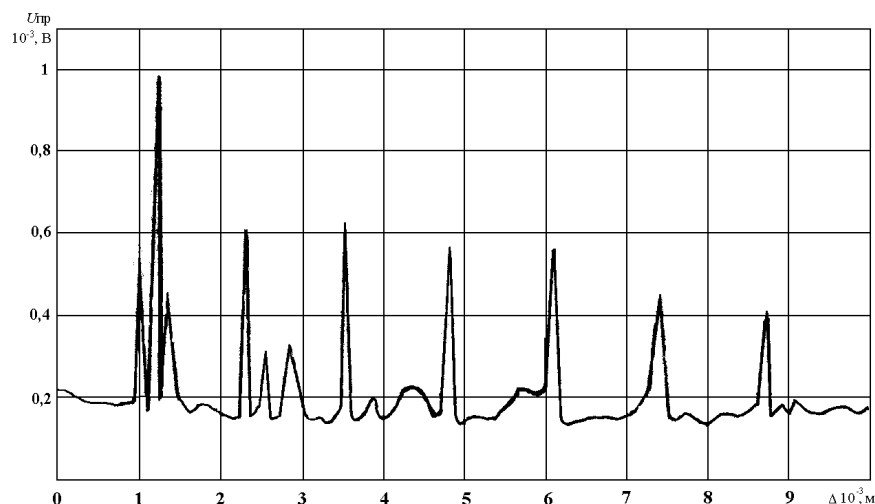


Рис. 5.7. Залежність напруги на виході приймача від величини переміщення випромінювача

5.5. Дослідження лабораторного вібраційного віскозиметра на біморфному п'єзоелементі з триботехнічним вузлом і параметричним датчиком переміщення

Керуюча напруга на маніпуляторі 300 В. Була побудована залежність вихідної напруги з приймача від величини переміщення шторки при різних резонансних частотах, і, відповідно, габаритних розмірах п'єзоелементів.

Наступним етапом проведення експериментів було дослідження впливу співвідношення відстані між шторкою і випромінювачем і приймачем. Відстань між випромінювачем і приймачем склало 4 мм на частоті резонансу 205 кГц.

На рис. 5.8 показана залежність напруги на виході приймача від величини переміщення шторки.

За результатами експериментів можна зробити висновок, що чим нижче частота резонансу, тим більше крута характеристика, і чим далі від випромінювача розташовується шторка, тим більший діапазон переміщень можна реєструвати. У

порівнянні з генераторним датчиком, випромінювач і приймач кріпляться на кронштейнах нерухомо до корпусу і не впливають на масу штока з поршнем.

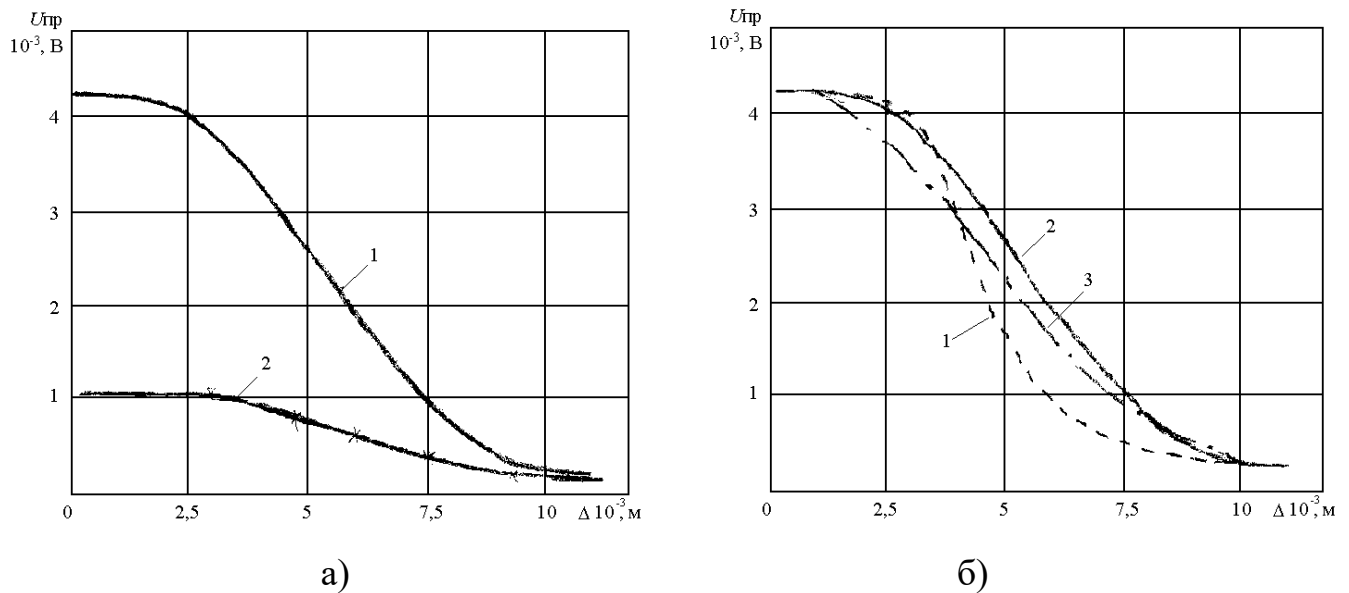


Рис. 5.8. Залежність напруги на виході приймача від величини переміщення шторки: а - 1 - $f_{\text{РЕЗ}} = 205$ кГц; 2 - $f_{\text{РЕЗ}} = 670$ кГц; б - 1 - $L_1 = 1,2$ мм; 2 - $L_1 = 2,0$ мм; 3 - $L_1 = 2,8$ мм

5.6. Оптичний датчик переміщень

Для проведення досліджень була зібрана схема, до складу якої увійшли джерело оптичного сигналу, хвилевід, вимірник рівня потужності оптичного випромінювання.

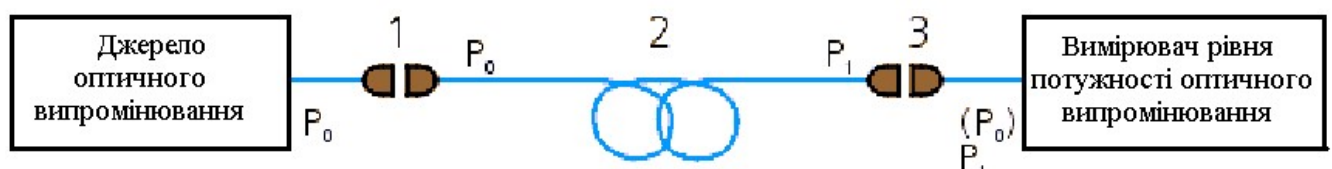


Рис. 5.9. Схема для проведення експериментів

Ціллю проведення експериментів було дослідження впливу зовнішнього тиску на потужність випромінювання на виході хвилеводу.

Були визначені початкові умови стосовно до переміщення БПП віскозиметра. У

результаті було встановлено, що волокно повинне бути прикріплене до основи для виключення впливу вібрацій. Скручування волокна не прийнятно.

Тому, із усіх перерахованих способів переважніше виявився хвилевід, підданий тільки деформації стиску. Діаметральний стиск циліндричного хвилеводу знаходить своє відбиття в «двохполюсній» інтегральній картині смуг оптичних ізоклін, представлений на рис. 5.10, а. Диференціювання по епюрі зміни порядків смуг уздовж радіуса моделі приводить до лінійної епюри різниці квазіголовної напруги. З погляду теорії хвилеводів такий хвилевід здобуває властивості складного хвилеводу, що складається з двох мікрохвилеводів, оточених спільною оболонкою.

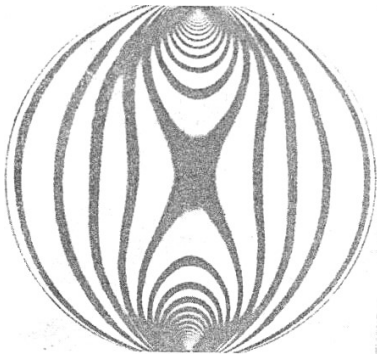
Характер епюри напруги дав підставу апроксимувати такий світловод його електромеханічною аналогією у вигляді лампи тріода, включеної паралельно з двома нелінійними опорами.

При використанні в якості модулятора пристрою стиску, у світловоді буде мати місце сполучення властивостей ответвителя з розподіленим зв'язком і об'ємним резонатором.

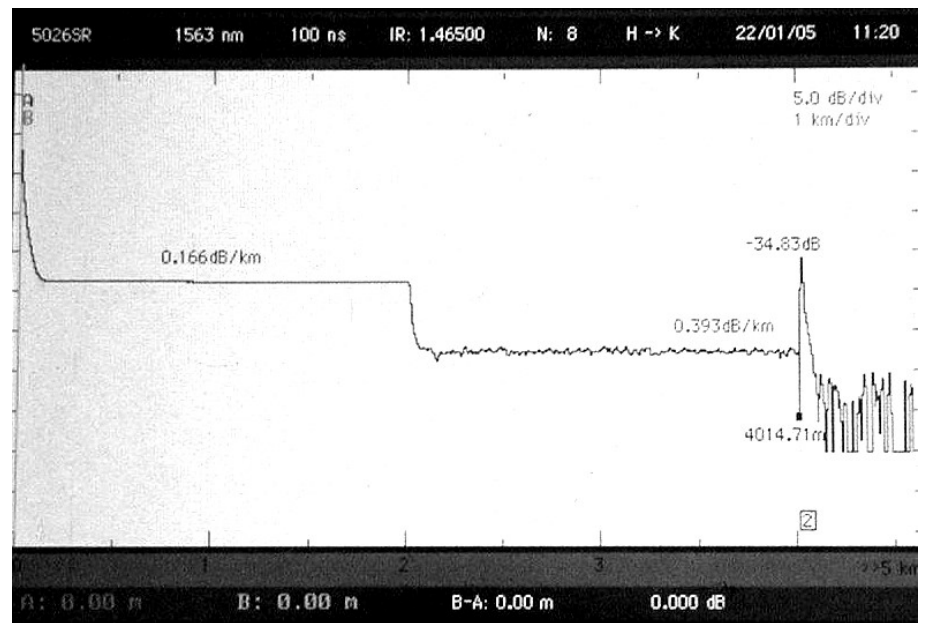
У ході експериментів були досліджені методом розсіяного світла зразки скляних хвилеводів, підданих різним механічним навантаженням. У частині оптичної компоненти модуляції найбільш цікаві результати були отримані при чистому крутінні моделі циліндричного хвилеводу. Смуги при цьому виді деформації мають вид концентричних окружностей, відстань між якими зменшується при наближенні до поверхні моделі. Лінійний характер епюри дозволив визначити закон зміни показника переломлення деформованого хвилеводу, як функцію від моменту, що крутить.

На рис. 5.10, б приведені результати експериментів при деформації стиску [148].

У цілому оцінка результатів іспитів натурної моделі ВОДП виявила його перевагу над датчиками переміщення традиційної конструкції за рівнем метрологічних і маса-габаритних характеристик.



а)



б)

Рис. 5.10. Епюра напруги, що виникає при стиску ділянки світловода (а);
експериментальні характеристики світловода при стиску (б)

5.7. Дослідження реометрів з п'єзоелектричним двигуном і пасивним ротором

Використання нереверсивного ПЕД зажадало проведення досліджень його режимів роботи. За основу була узята модель ДЕП-28 (2) [149, 150].

Основні параметри: діапазон швидкостей обертання в режимі холостого ходу n - 0...300 (1/хв.); пусковий момент на валу двигуна M - 3 (кг·см); параметр ресурсу роботи двигуна a - 50000 (годин).

У комплект постачання входить перетворювач напруги від 0 до +24 В постійної напруги.

П'єзоелектричний двигун, як високочастотна електромеханічна система, має специфічні особливості. Це, насамперед, резонансний характер залежності частоти обертання (швидкості n [с⁻¹]) від частоти вхідного сигналу напруги збудження $U_{ВХ}$; квазілінійне поле навантажувальних характеристик $n(U_{ВХ})$, $n(M_C)$ при різних величинах, відповідно, моменту навантаження M_C і напруги збудження, тобто

вихідний сигнал (n) залежить від багатьох параметрів. Крім залежності від складових керуючого впливу U_{BX} (амплітуди U_M , частоти f_B , фази φ_B) швидкість n залежить також від інших впливів, що обурюють.

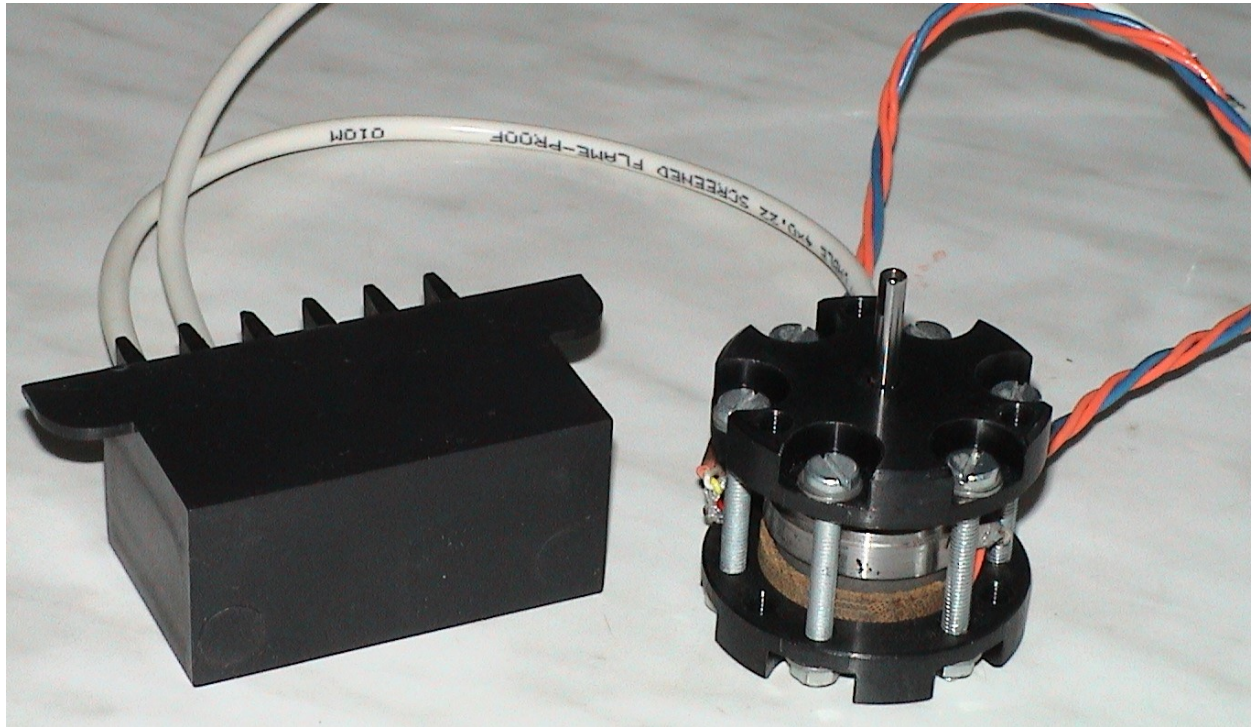


Рис. 5.11. Нереверсивний ПЕД з перетворювачем напруги

При експериментальних дослідженнях була використана схема виміру характеристик ПЕД, приведена на рис. 5.12.

Перш, ніж побудувати механічні характеристики ПЕД, який випускається промислово, був проведений ряд експериментів на двигуні з меншим пусковим моментом з метою підтвердження того, що характер цілого ряду характеристик ПЕД поблизу частоти резонансу однаковий для всіх типів двигунів.

Як було відзначено раніше, параметри і характеристики ПЕД залежать від температури θ , U_{BX} , f_B , фазових співвідношень і величини навантаження. Ці зовнішні впливи відносяться до найбільш сильних збурень, а зміна моменту навантаження M_C є одним з основних.

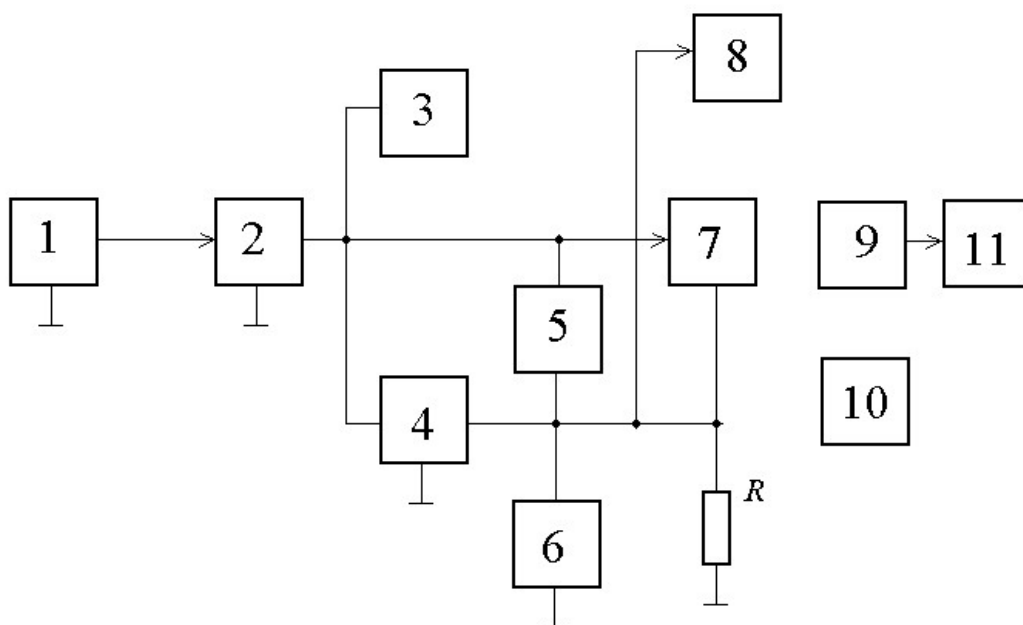


Рис. 5.12. Функціональна схема вимірювального - іспитового пристрою: 1 - регульоване джерело живлення; 2 - перетворювач постійної напруги в частоту з можливістю перебудови частоти; 3 - частотомір; 4 - фазометр; 5, 6 - вольтметр; 7 - ПЕД; 8 - осцилограф; 9 - тахометр; 10 - динамометр; 11 - частотомір

Нижче приводяться результати досліджень за даними однофакторних експериментів по виділеному каналі керування ПЕД "вхід-вихід", а також по каналах передачі збурень. Сімейство залежностей "швидкість-частота" $n=f(f)$ були зняті експериментально при різних фіксованих значеннях амплітуди U_M ($U_{M1}=35\text{ В} > U_{M2}=30\text{ В} > U_{M3}=25\text{ В} > U_{M4}=20\text{ В}$) напруги збудження U_{BX} при постійній величині моменту навантаження $M_C=\text{const}$ на рис. 5.13, а, і на рис. 5.13, б моменту навантаження M_C ($M_{C1}=0 < M_{C2}=15\text{ Г}\cdot\text{см} < M_{C3}=30\text{ Г}\cdot\text{см} < M_{C4}=45\text{ Г}\cdot\text{см} < M_{C5}=60\text{ Г}\cdot\text{см}$) при постійній величині амплітуди U_M напруги збудження U_{BX} ($U_M=35\text{ В}$).

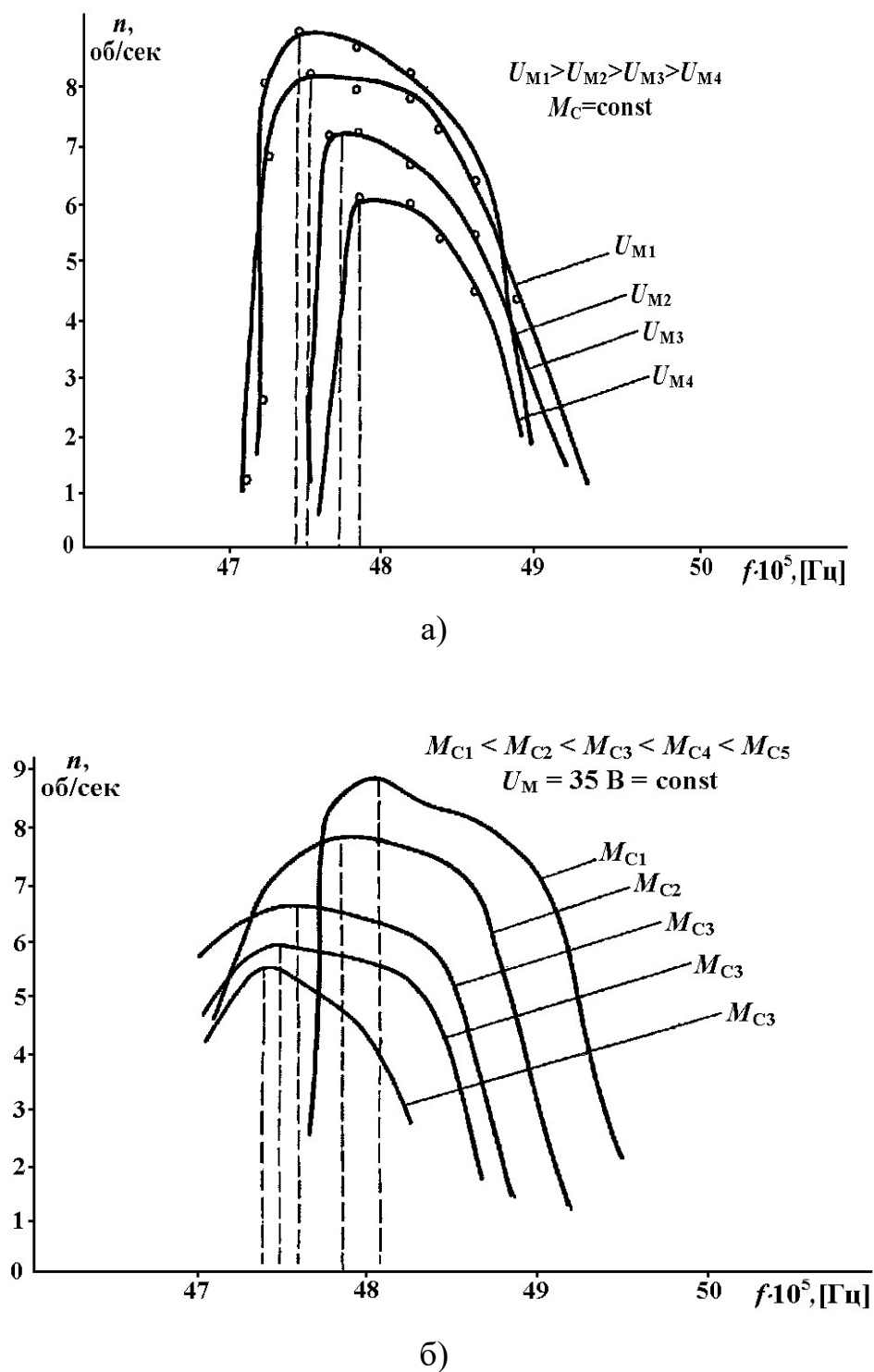


Рис. 5.13. Експериментальні резонансні характеристики

На рис. 5.14 приведена експериментальна резонансна, характеристика "струм збудження - частота" $I(f)$, знята в широкому частотному діапазоні. Отримана характеристика показує, що залежність $I(f)$ (при $f=0 \dots 150$ кГц) має кілька максимумів і мінімумів. Зокрема, на першій і третій гармоніках є яскраво виражений

максимум і мінімум, а на другій гармоніці - слабо виражений.

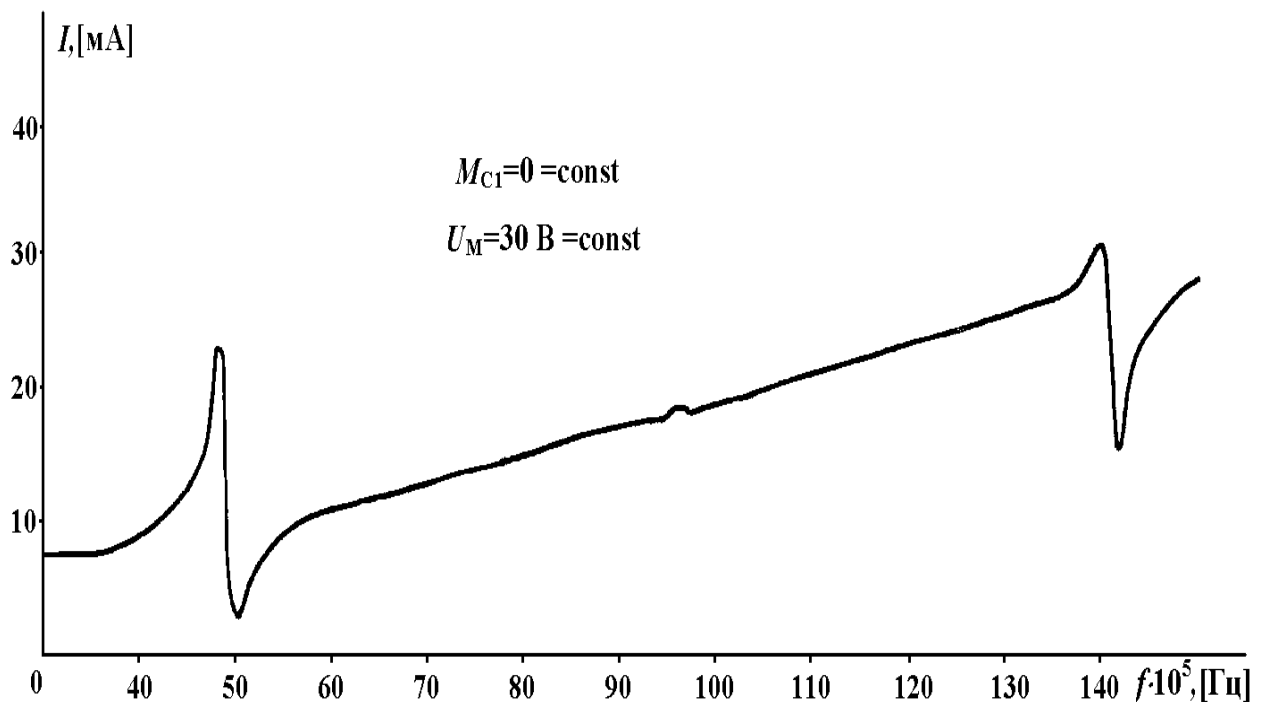


Рис. 5.14. Експериментальна резонансна характеристика

ПЕД «струм збудження - частота»

На рис. 5.15, а приведені експериментальні навантажувальні характеристики ПЕД $n=f(U_{BX})$ при $f=48,6$ кГц $=const$ і $M_C=const$. ($M_{C1}<M_{C2}<M_{C3}<M_{C4}<M_{C5}$), а на рис. 5.15, б - залежності $n=f(M_C)$ при $f=48,45$ кГц $=const$ і $U_M=const$ ($U_{M1}>U_{M2}>U_{M3}>U_{M4}$).

Крім того, зняті експериментальні навантажувальні характеристики ПЕД $n(M_C)$ (подібні приведеним на рис. 5.16) при різних фіксованих значеннях частоти напруги збудження $f=const$ ($f_1 < f_2 < f_3 < f_4 < f_5 < f_6 < f_7 < f_8$, де $f_1=48,25$ кГц, $f_2=48,3$ кГц, $f_3=48,4$ кГц, $f_4=48,5$ кГц, $f_5=48,6$ кГц, $f_6=48,7$ кГц, $f_7=48,8$ кГц, $f_8=48,9$ кГц) і при постійній величині $U_M=35$ В $=const$. Навантажувальні характеристики (рис. 5.16) можна представити (приблизно) у виді прямих ліній. З них можна визначити коефіцієнт жорсткості характеристики виходячи з наступного співвідношення:

$$K_i = \frac{\Delta M_C}{\Delta n} .$$

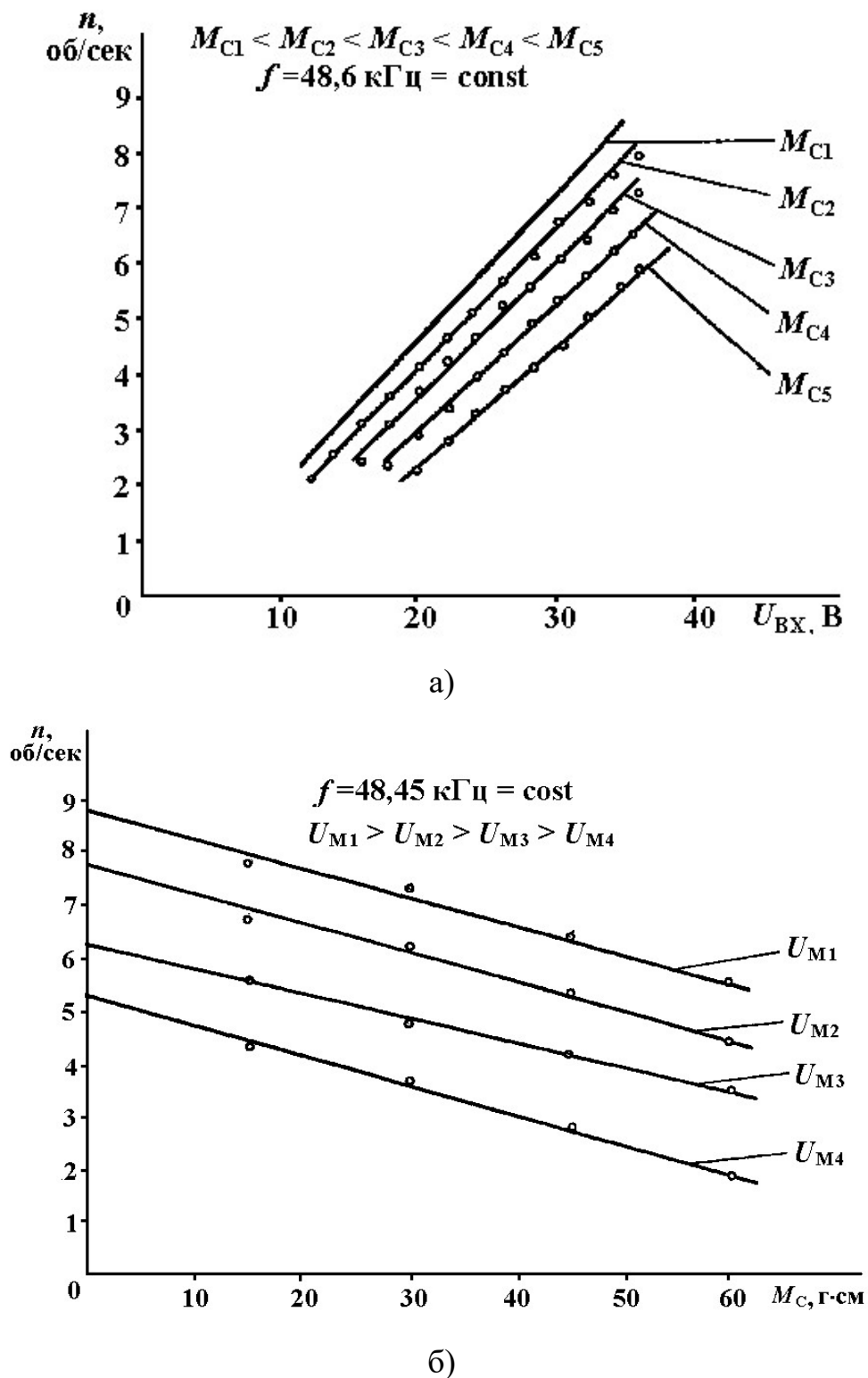


Рис. 5.15. Навантажувальні характеристики ПЕД

Із сімейства експериментальних характеристик (див. рис. 5.14-5.15) визначені і деякі інші залежності ПЕД. Зокрема на рис. 5.17 - характеристики зміни f_p (при $U_{M1} = 35 \text{ В} = \text{const}$) і швидкості n (при $f = f_p$ і $U_{M1} = 35 \text{ В} = \text{const}$) від моменту

навантаження M_C .

Отримані вирази є справедливими (якісно) і для інших типів ПЕД, тому що їхні характеристики у вузькій області частот поблизу резонансу подібні приведеним на рис. 5.13-5.17.

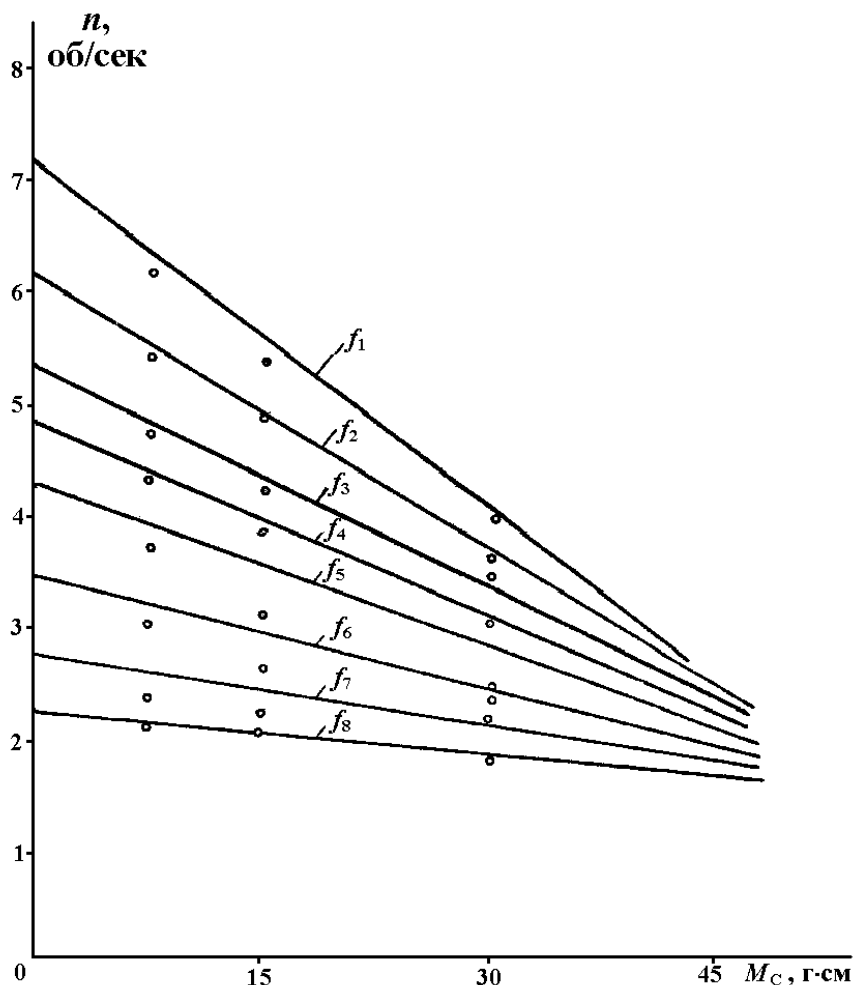


Рис. 5.16. Навантажувальні характеристики ПЕД

Аналіз експериментальних кривих (рис. 5.13-5.17) показує, що при дії сильних збурень, наприклад, моменту навантаження M_C ($M_{C4} > M_{C1}$), у ПЕД має місце дрейф характеристик: при різкому збільшенні навантаження (режим, близький до короткого замикання) характеристика $n=f(f)$ іде вліво по частоті, що супроводжується зменшенням f_p ПЕД (до 2-5 % від f_0) і швидкості n на f (у 1,5-2 рази в порівнянні с n_{MAX} при f_0) (див. рис. 5.13). Резонансні характеристики ПЕД при цьому характеризуються перемінною електромеханічною (ефективною) добротністю $QЭМ = f/\Delta f^{0,707}$ при різних моментах навантаження M_C . Зміна амплітуди U_M збудливої

напруги U_{BX} у ПЕД також викликає деякі зміни резонансної частоти f і швидкості n ; зі збільшенням U_M f трохи зменшується (до 1 % від f), а швидкість n відповідно збільшується на резонансній частоті (у 1,5 рази в порівнянні з n на частоті f_0). Дослідження характеристик ПЕД показали, що параметри ПЕД незмінні лише в слабких електричних полях. З ростом напруженості перемінного електричного поля E властивості п'єзореzonатора (із ЦТС - кераміки) змінюються, причому підвищення E приводить також до змін діелектричних властивостей кераміки (зростання ϵ і $tg\delta$). З ростом амплітуди U_M збудливої напруги параметри ПЕД (швидкість n і струм порушення I) починають лінійно змінюватися, а потім іде їхня нелінійна зміна (рис. 5.17). Основною причиною появи нелінійних явищ при великих U_M є ріст великої механічної напруги, яка викликається при зсуві доменних границь і приводить до руйнування ПР.

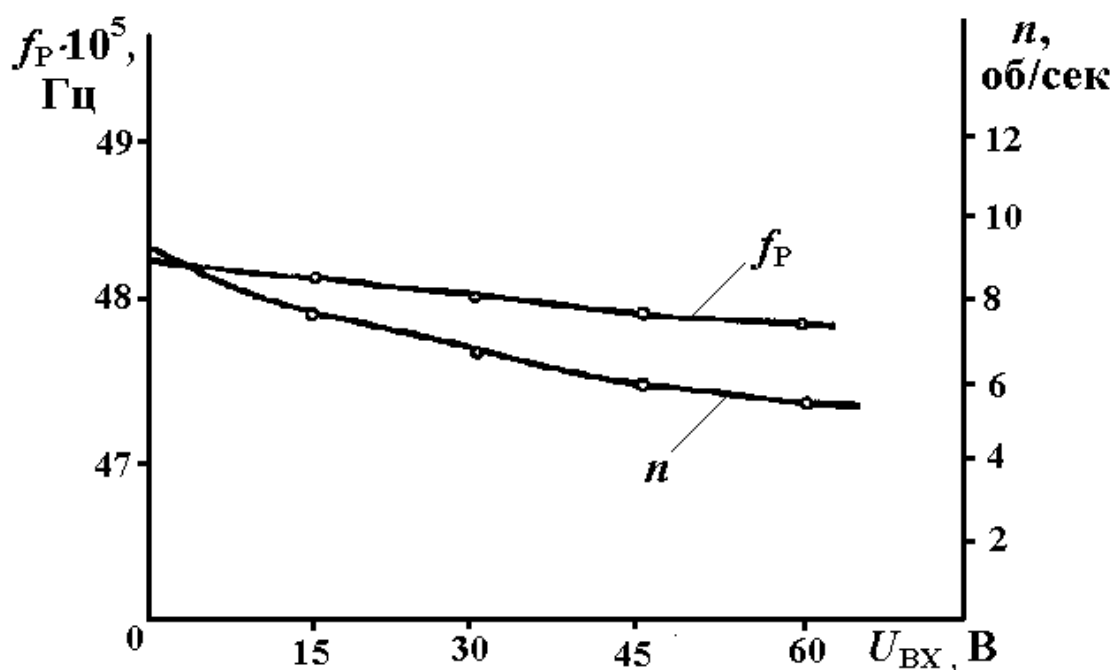


Рис. 5.17. Залежність n та f_p від U_{BX}

Нами була побудована механічна характеристика ДЕП-28 (2) на холостому ходу (рис. 5.18).

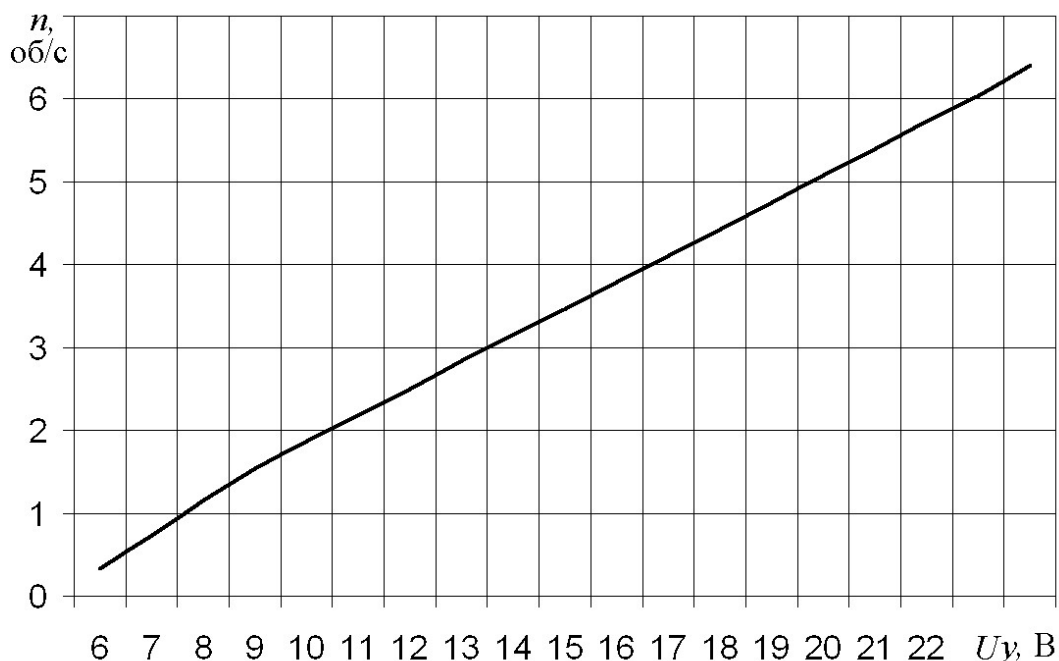


Рис. 5.18. Механічна характеристика ДЕП-28 (2) на холостому ході

Далі була зібрана конструкція реометра на співвісних циліндрах (рис. 5.19) і проведений ряд експериментів по дослідженню моменту навантаження ПЕД при введенні в триботехнічний вузол дизельного палива й олій різного призначення. На рис. 5.20 приведена механічна характеристика ПЕД при іспиті дизельного палива і трансформаторної олії. Крім того, була приготовлена суміш трансформаторної олії і дизпалива в співвідношенні 20:80. Як було визначено в розділі 3, механічна характеристика ПЕД у складі реометра дозволяє побудувати реологічні криві рідин, в'язкість яких досліджується. За отриманими результатами можна упевнитися, що досліджувані рідини мають виражену S - образну форму. Характер реологічної кривої суміші палива і трансформаторної олії дозволяють зробити висновок, що міняється структура рідини. Ми дістаємо підтвердження того, що для виконання ряду задач по поліпшенню експлуатаційних характеристик вузлів і агрегатів ДВС можна змінювати характер рідин шляхом уведення відповідних присадок.

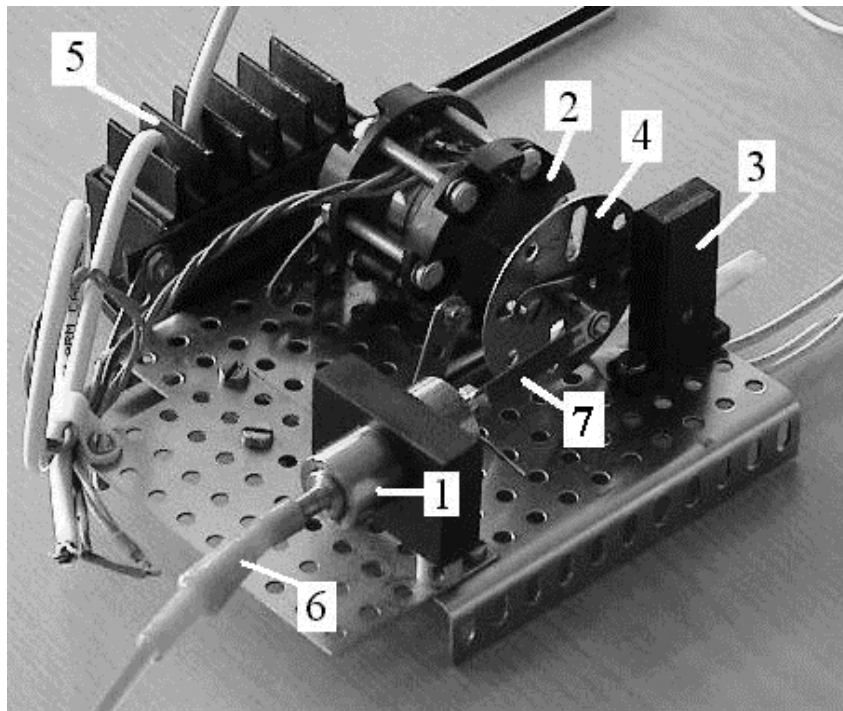
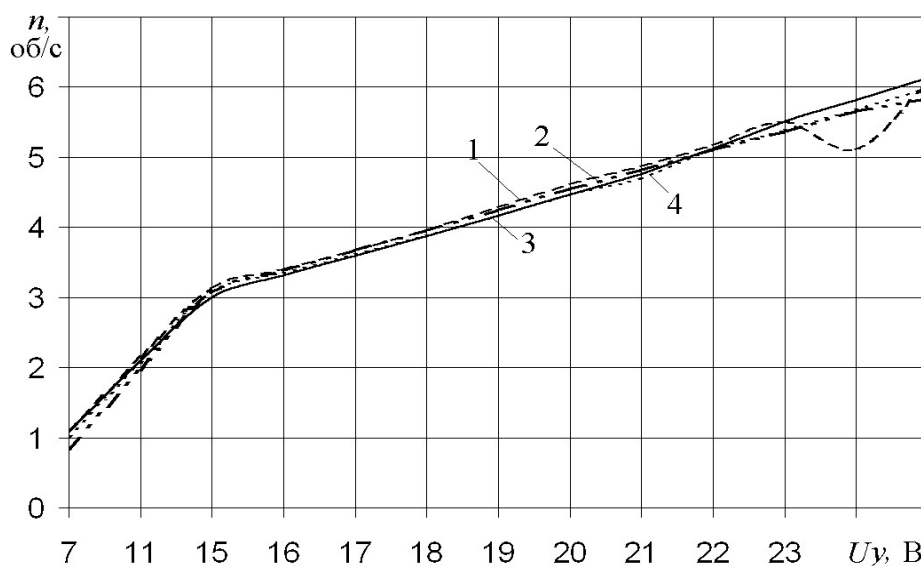


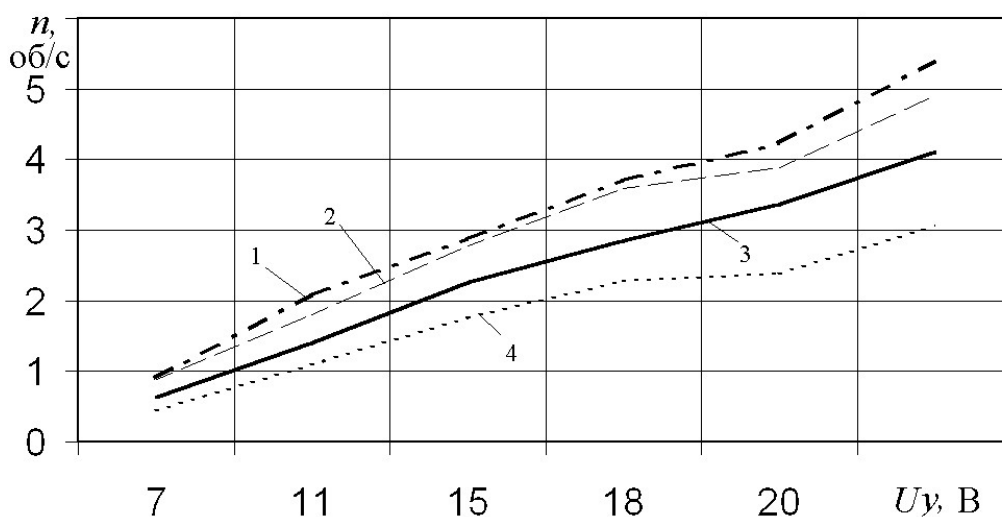
Рис. 5.19. Реометр на співвісних циліндрах з п'єзоелектричним приводом: 1 - нерухомий циліндр; 2 - п'єзоелектричний двигун; 3 – оптична пара; 4 - диск із мітками; 5 - перетворювач напруги; 6 - трубопровід; 7 - шатун

Ціллю проведення наступних експериментів було вивчення поведінки ПЕД разом із триботехнічним вузлом, у який надходять рідини, що різняться по своєму призначенню і мають різні коефіцієнти динамічної в'язкості. Як препарати для досліджень були обрані олії з коефіцієнтами динамічної в'язкості, що відповідають важким сортам рідкого палива. Крім того, реологічна крива олій має більш складний вид у порівнянні з паливом. Для цих цілей були проведені дослідження олій з в'язкістю 90,58 і 153,9 стокс, олії в автоматичну коробку передач DEXRON III і спирт 76 %. Результати проведених експериментів показали, що реометр має високу чутливість до в'язкості. Крім того, отримане підтвердження складного характеру реологічних кривих тиксотропних рідин.

На рис. 5.20 представлені механічні характеристики реометра на співвісних циліндрах з нереверсивним п'єзоелектричним двигуном з пасивним ротором.



а)



б)

Рис. 5.20. Механічна характеристика реометра на співвісних циліндрах: (а) 1 - дизельне паливо при +38 °С, 2 - суміш дизельного палива і трансформаторної олії, 3 - трансформаторна олія, 4 - дизельне паливо при +20 °С; (б) 1 - DEXRON III, 2 - 90,54 олія стокс, 3 - спирт 76 %, 4 - олія 153,9 стокс

У наступних експериментах було одержане підтвердження відмінності коефіцієнтів в'язкості для різних методів виміру, а відповідно і характеру реологічних кривих. Т.ч. використання рідини для певних цілей може призвести до

аварійних ситуацій при неправильно обраному методі виміру в'язкості.

Для цих цілей на базі ДЕП-28 (2) була зібрана конструкція ротаційного реометра (рис. 5.21), де в якості триботехнічного вузла використовувався той же вузол, що й у реометрі на співвісних циліндрах.

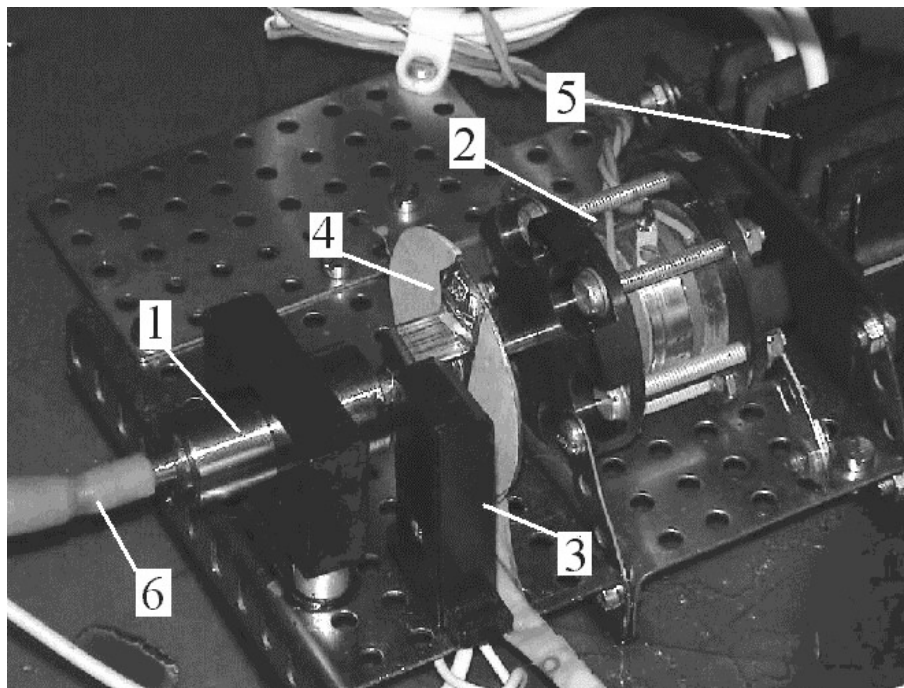
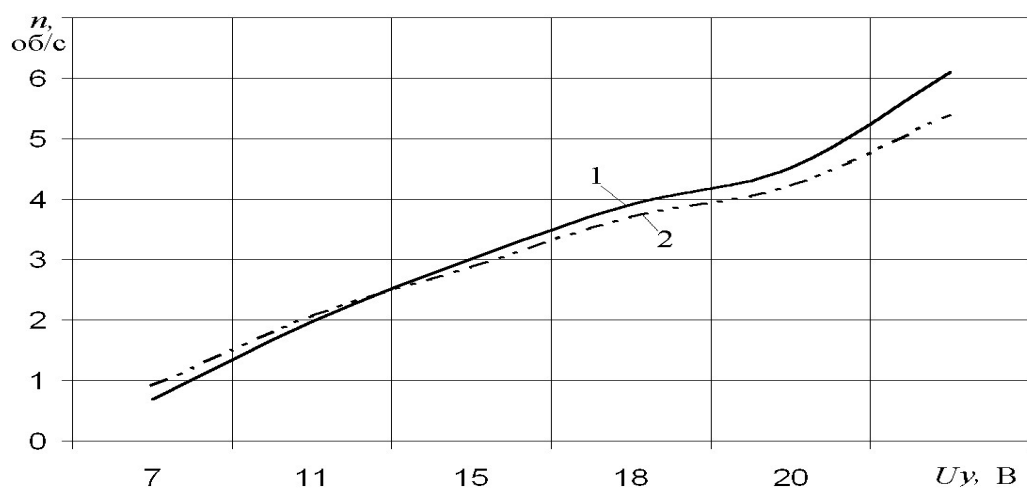


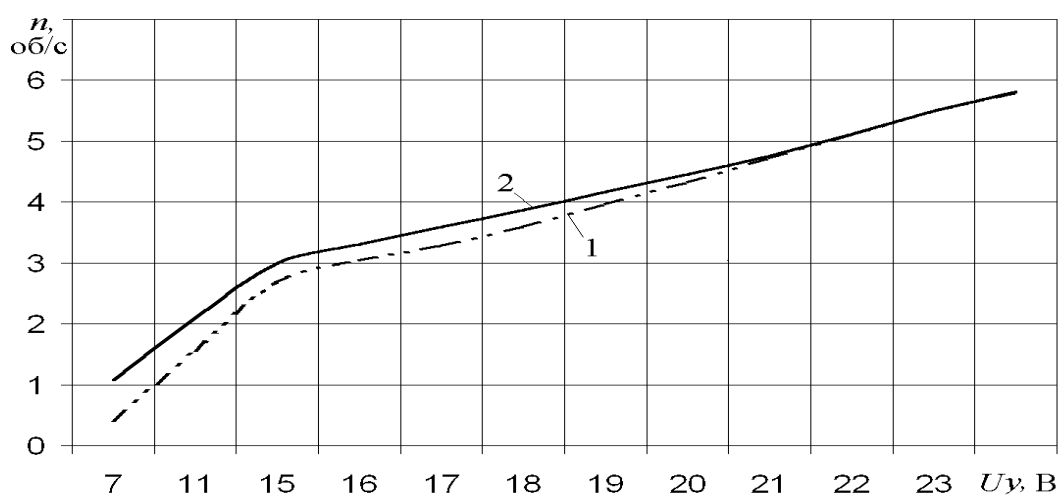
Рис. 5.21. Реометр на співвісних циліндрах з п'єзоелектричним приводом: 1 - нерухомий циліндр; 2 - п'єзоелектричний двигун; 3 – оптична пара; 4 - диск із мітками; 5 - перетворювач напруги; 6 – трубопровід

Для експериментів були обрані рідини: олія в АКПП DEXRON III, трансформаторна олія і дизельне паливо.

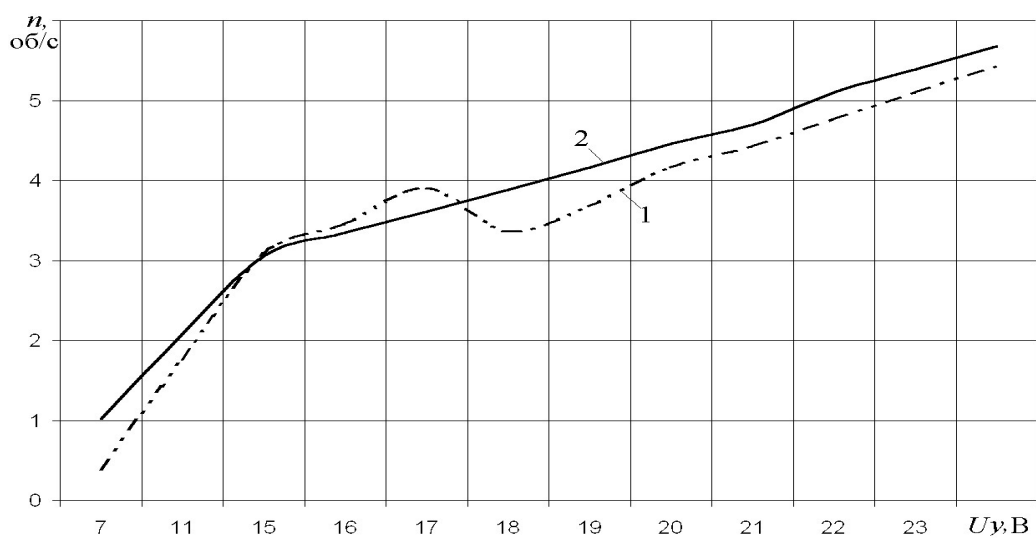
На рис. 5.22, а приведені механічні характеристики олії Dexron III, на рис. 5.22, б - трансформаторної олії і на рис. 5.22, у - дизельного палива, отримані ротаційним методом (1) і методом на співвісних циліндрах (2). З малюнків видно, що для одного значення напруги керування кутова швидкість обертання ротора реометра, що використовують різні методи виміру для однієї і тієї ж рідини, відрізняється.



а)



б)



в)

Рис. 5.22. Механічні характеристики ротаційного (1) і співвісного (2) реометрів

За отриманими результатами можна зробити висновок, що характер реологічних кривих для тиксотропних рідин істотно відрізняється від методу виміру і, відповідно, призначення використання: плунжерні пари чи підшипники ковзання ДВЗ.

Так на кафедрі СЕУ ОНМА була проведена серія експериментів по визначенню реологічних кривих чотирьох рідин для вирішення наступних задач, які зв'язані зі зміною характеристик технологічного процесу:

1. полегшений пуск аварійний дизель - генератора;
2. добір рідин для заміни теплоносія в казанах;
3. вивчення властивостей рідин, що демпфірують, у ДУ.

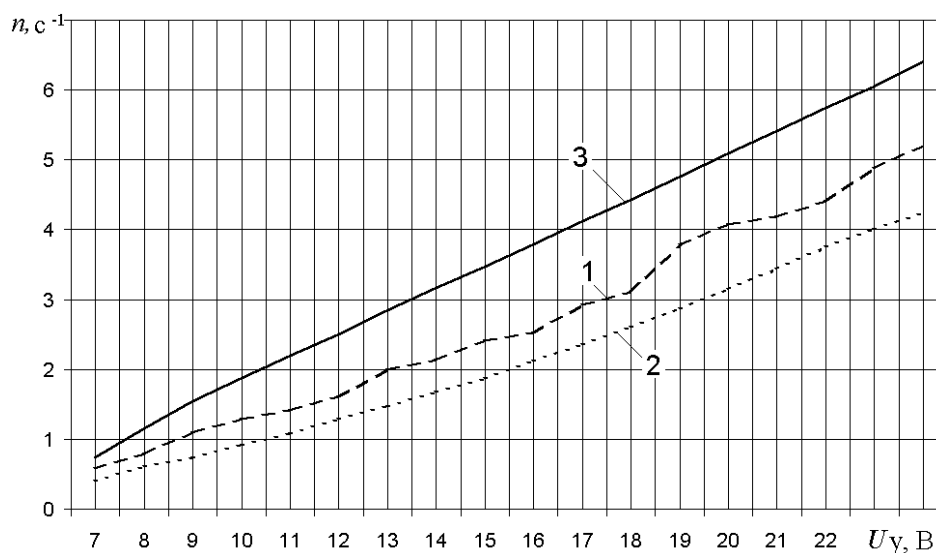
Експерименти здійснювалися при температурі $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ротаційним реометром і реометром на співвісних циліндрах. Як реперні точки були обрані значення коефіцієнта в'язкості для вазелінової олії.

На рис. 5.23, а приведені механічні характеристики для п'єзоприводу, коли у вимірювальну камеру подається вазелінова олія, отримані ротаційним (1) і співвісним методами (2), ПЕД на холостому ході (3).

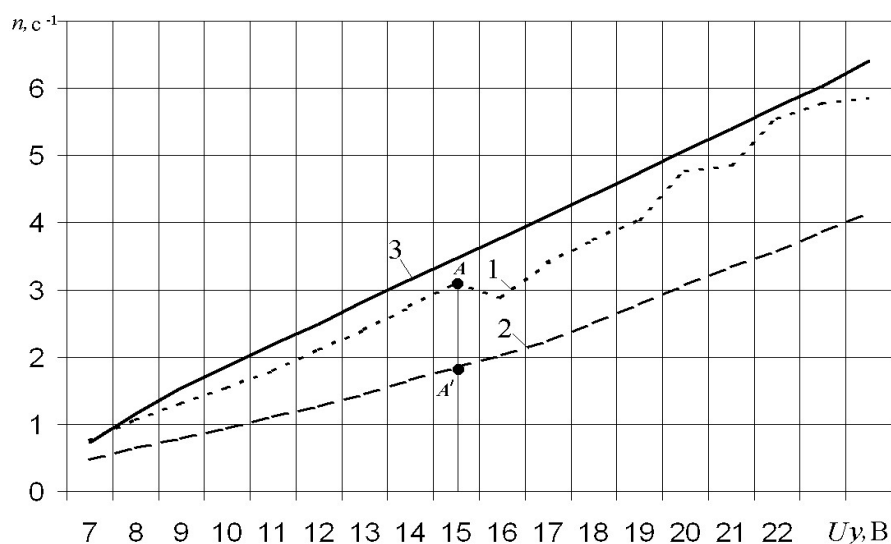
На рис. 5.23. б приведені механічні характеристики для «невідомої» олії з дизеля, отримані ротаційним методом (1) і методом співвісних циліндрів (2), ПЕД на холостому ході (3).

Характер кривих для вазелінової олії і проби з дизеля, отриманих методом співвісних циліндрів, ідентичний. А для кривих, отриманих ротаційним методом, має досить складний вид. Слід зазначити, що коефіцієнти в'язкості для «невідомої» олії можуть змінюватися стрибкоподібно, викликаючи биття в триботехнічному вузлі. Це підтверджується наявністю сторонніх звуків у виді свисту при керуючий напрузі понад 14 В. При збільшенні напруги керування в діапазоні від 16 В до 19 В «свист» пропадає, а після 19,5 В знову з'являється.

На стадії проведення експериментів можна було припустити, що в моменти появи «свисту» відбувається інтенсивний знос поверхонь триботехнічного вузла.



а)

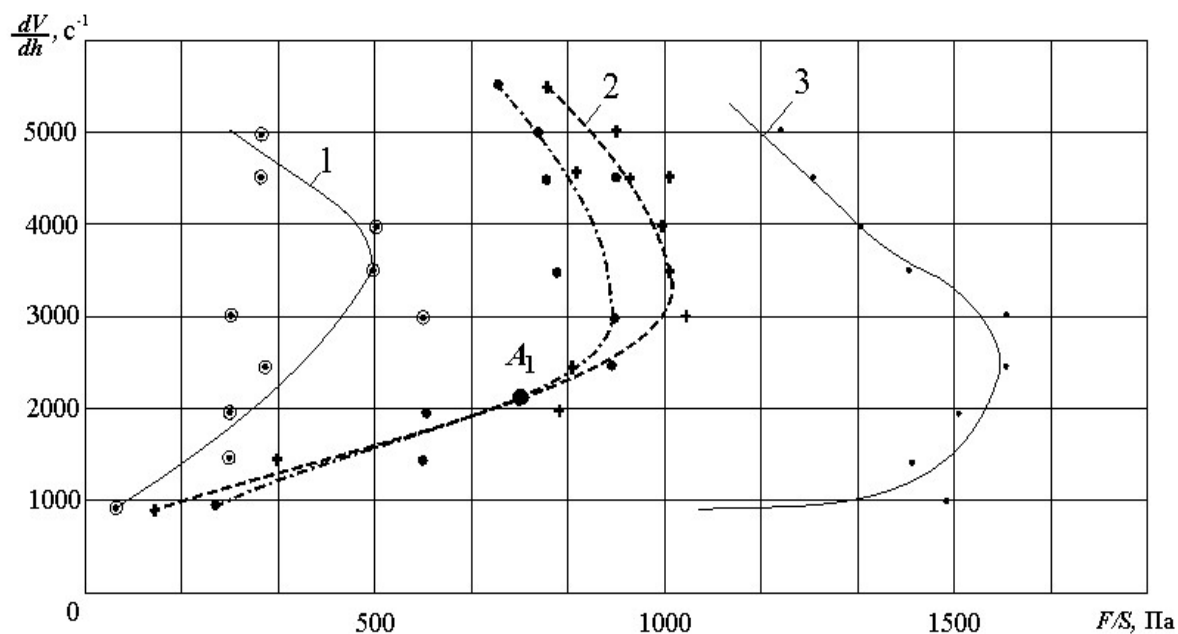


б)

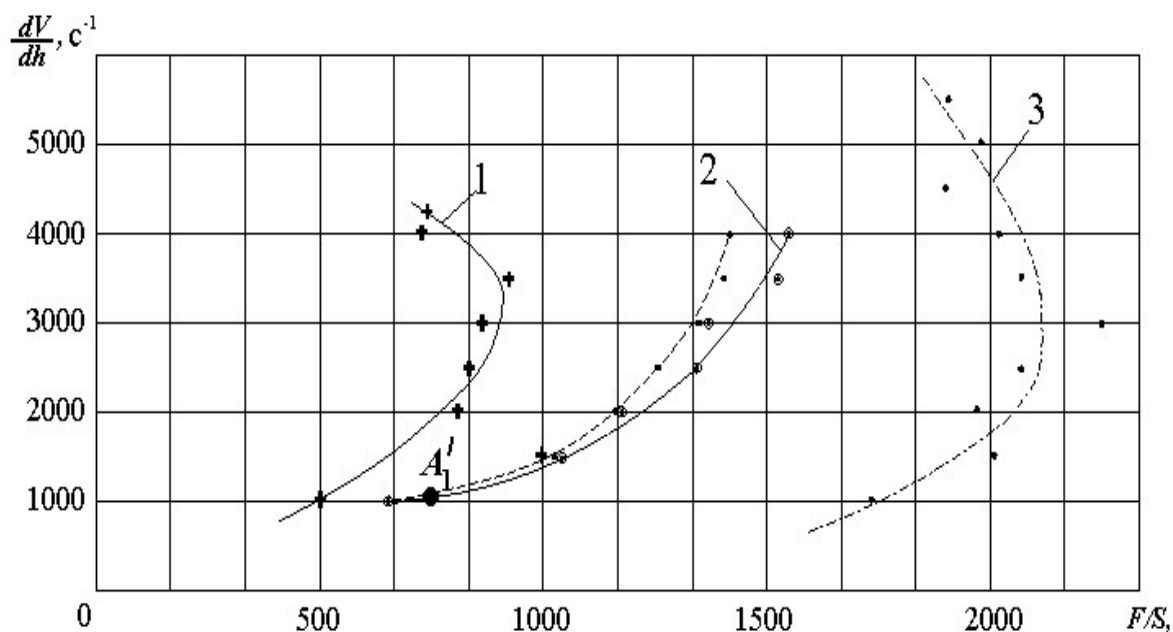
Рис. 5.23. Механічна характеристика: а – при введенні в зазор вазелінового масла, б – проба невідомого масла із МОД; 1 – холостий хід ПЕД, 2 – ротаційний метод, 3 - метод співвісних циліндрів

Відповідно до запропонованої методики в розділі 3 зробимо перерахування отриманих результатів до прийнятих одиниць. Інтерес становлять характеристики олій Termo Oil (3), синтетичного (2) і проба олії (1) з аварійний дизель – генератора, представлені на рис. 5.23, а і б.

Приклад визначення коефіцієнтів динамічної в'язкості по механічній характеристиці показаний на рис. 5.23, б, та рис. 5.24. Крапки А і А', отримані при дії керуючої напруги 15 В (див. рис. 5.23, б) на реологічній кривій будуть відповідати крапки А₁ (див. рис. 5.24, а) і А'₁ (див. рис. 5.24, б), для яких $\eta_{A'} = 0,75/2,2 = 0,34$ Па·с і $\sigma_{A'_1} = 0,75/1,2 = 0,9$ Па·с.



а)



б)

Рис. 5.24. Реологічні характеристики: а - отримані методом співвісних циліндрів; б - ротаційним методом

Аналіз отриманих графіків показав, що в діапазоні від 1,5 до 5 об/с спостерігаються биття, природа яких пояснюється властивостями тиксотропних рідин, а саме, структура руйнується таким чином, що починає у певні моменти передавати частину своєї енергії рухливому циліндру, прискорюючи чи сповільнюючи швидкість обертання ротора п'єзодвигуна при тому ж самому значенні напруги керування. Цим і пояснюється наявність «свисту» і вібрацій на таких обертах.

Тому нами, після проведення експериментів, вимірювальний зонд був підданий розбиранню. Проведено оцінку стану дзеркала поверхні рухливого циліндра. На рис. 5.25 показані задирки і подряпини, що виникли в процесі проведення вимірів [151]. Слід зазначити, що час проведення виміру склав всього 5 годин безупинної роботи.

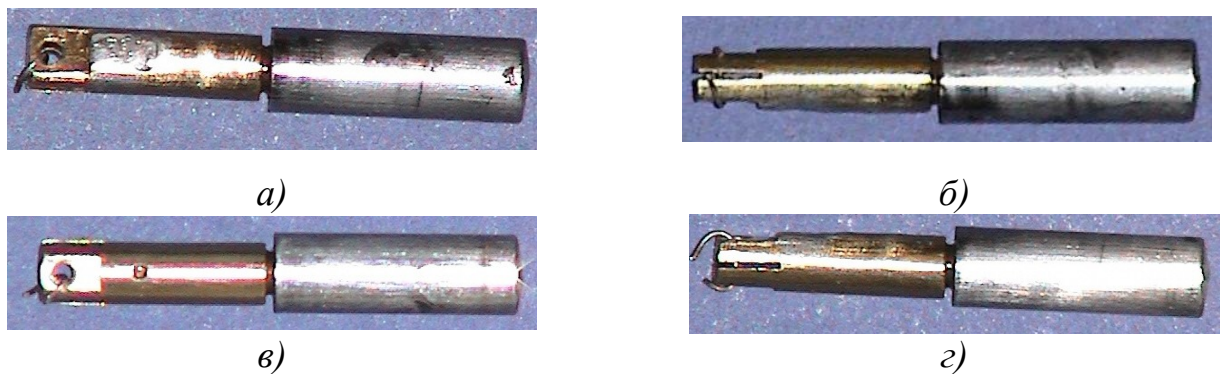


Рис. 5.25. Вид поверхні рухомого циліндра після того, як було розібрано вимірювальний зонд: *а* - 0°, *б* - 90°, *в* - 180°, *г* - 270°

Аналіз виниклих на поверхні рухливого циліндра подряпин дозволив зробити висновок, що їхнє походження обумовлене, в основному, застосуванням ротаційного методу. Оскільки на визначених оборотах спостерігався характерний звук сухого тертя через малий тиск олії, що надходила. На підставі чого, можна зробити висновок, що вимірювальний зонд для ротаційного реометра краще виконувати на співвісних дисках. Однак у цьому випадку, міняється характер взаємодії поверхонь. А ресурс - збільшується. У той же час, даний тип вимірювального зонда дозволяє провести експериментальні дослідження з поведінці

підшипників ковзання в лабораторних умовах і спрогнозувати характер можливих несправностей при експлуатації рідин, використовуваних не тільки в паливній апаратурі ДВЗ, але і масляній і гідравлічній системах.

На наступному етапі розбиранню був підданий п'єзоелектричний двигун. Дефектування поверхонь осцилятора і ротора показало, що зносу немає. Таким чином, була реально підтверджена висунута концепція використання п'єзодвигунів при побудові віскозиметрів і реометрів. Такі відмітні властивості, як висока надійність привода, високий пусковий момент і плавність регулювання швидкості рухливої частини без використання редуктора, відкривають нові можливості в створенні нових пристроїв суднових систем керування.

5.8. Висновки. Обговорення отриманих результатів.

Отримано нові дані про результати функціонування п'єзоелектричних пристроїв: вібраційних віскозиметрів на біморфі і циліндрі, віскозиметрів на співвісних циліндрах із приводом на маніпуляторі з біморфа з п'єзоелектричними генераторним і параметричним датчиком переміщення; ротаційного реометра і реометра на співвісних циліндрах.

Досліджено характеристики п'єзоелектричних двигунів з пасивним ротором, побудовані механічні характеристики на холостому ході для тиксотропних рідин з в'язкістю в діапазоні $30 \div 160$ стокс (олії).

Установлено, що у вібраційних віскозиметрів найбільш інформативним є сигнал про резонансну частоту вихідної напруги.

Вібраційні віскозиметри на трубках поведуться як ультразвукові сканери.

Дослідження показали, що механічні характеристики тиксотропних рідин, отримані ротаційним реометром і реометром на співвісних циліндрах різні.

Перерахування коефіцієнтів динамічної в'язкості показало, що деформації і швидкості, які розвиваються, аналогічні значенням відповідних вузлів паливної апаратури і дозволяють плавно здійснювати зміну швидкості з кроком $0,01$ м/с і частоти обертання – $0,1$ Гц.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що вперше досліджений характер поведінки п'єзоприводу разом із триботехнічним вузлом і зазором $1 \div 25$ мкм.

Основні наукові результати опубліковані в збірниках, приведених у переліку ВАК, [148], та за результатами досліджень підготовлені дві статті: у збірник Суднові енергетичні установки, №12.

РОЗДІЛ 6

ПРИСТРОЇ П'ЄЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ ДЛЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Як відзначалося в розділі 1 ряд параметрів узагалі не вимірюються, чи вимірюються вибірково. Крім того, через некоректну роботу деяких пристроїв можуть виникати аварійні ситуації. До таких пристроїв відносяться пульти керування.

Нами розроблений ряд пристроїв, що дозволяють частково поліпшити ситуацію з пристроями керування і діагностики не тільки ДВЗ, а й СЕУ .

6.1. Сенсорний перемикач каналів

Створення безконтактних сенсорних кнопок є важливою задачею при розробці елементів комутації в різній радіо електронній апаратурі, обчислювальній техніці і судновій автоматичі.

Основні критерії, пропоновані до кнопок: відсутність гальванічної контактної пари; висока надійність; низька собівартість і стійкість до перешкод.

Основною проблемою при створенні сенсорних перемикачів каналів на основі біполярного п'єзоелектричного сенсорного генератора [152] є можливість створення перемикачів тільки лінійного типу [153]. Матричний тип неможливо створити з тієї причини, що при подачі імпульсів сканування, БПСГ починає працювати в режимі зворотного п'єзоефекту, випромінюючи звукові коливання в навколишнє простір. І незалежно від стану, передає сигнал з лінії видачі сигналу сканування на лінію введення.

Нами розроблена структурна схема лінійного сенсорного перемикача каналів на основі БПСГ із виходом коду натиснутого сенсора в послідовному коді [154].

Основні блоки, що входять до складу перемикача (рис. 6.1):

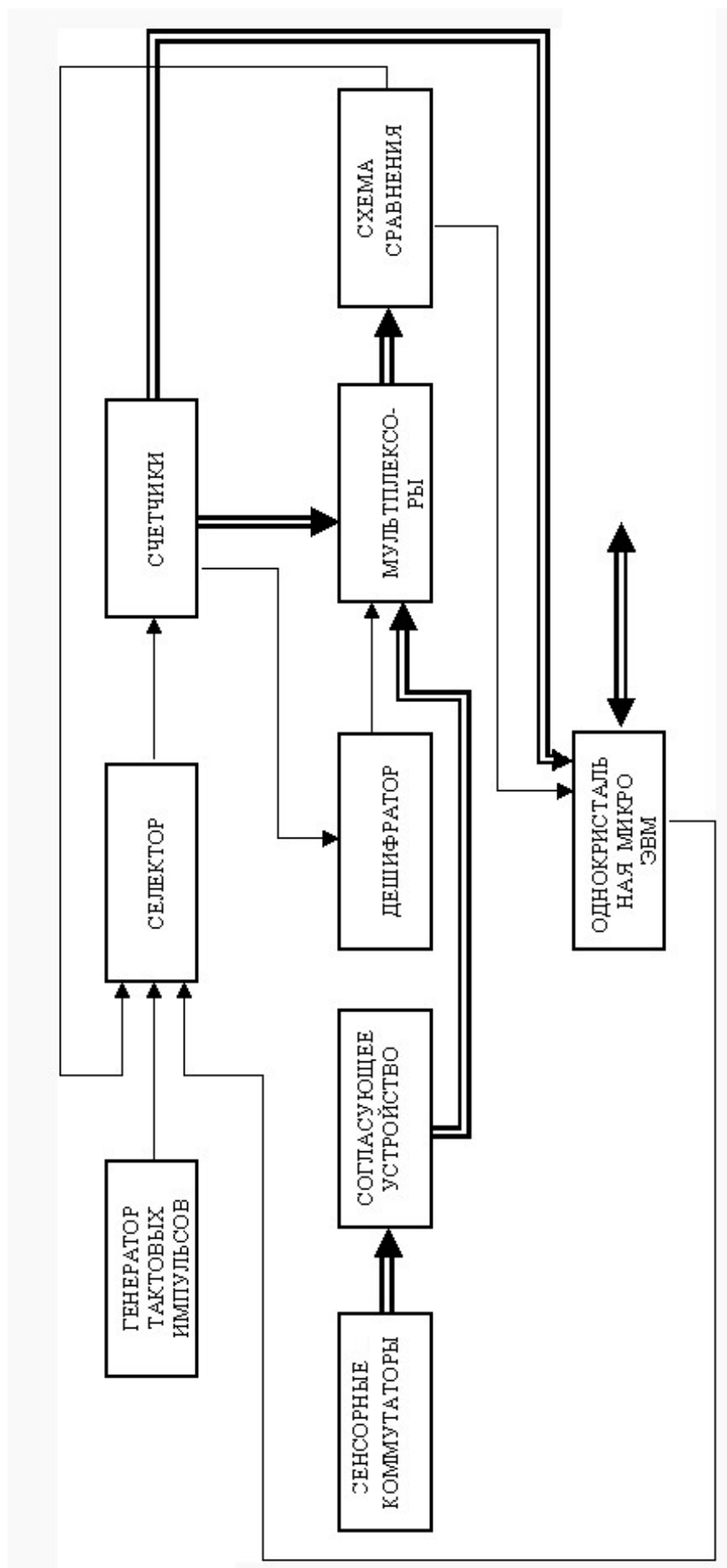


Рис. 6.1. Структурная схема сенсорного переключателя каналов

1. Сенсорні комутатори – служать для перетворення механічного зусилля, що прикладається оператором у процесі роботи, в електричний сигнал.
2. Погоджувальний пристрій - служить для узгодження високого вихідного опору БПСГ із низьким вхідним опором ТТЛ - логіки.
3. Мультиплексори – служать для послідовного опитування сенсорних комутаторів.
4. Генератор тактових імпульсів – видає імпульси прямокутної форми на селектор.
5. Селектор – тимчасові ворота, дозволяє проходження тактових імпульсів у певні моменти часу до лічильників.
6. Лічильники - служать для перетворення послідовності імпульсів у двоїчно-десятковий код чи двоїчний з вагою двоїчних розрядів 8-4-2-1.
7. Дешифратор служить для розширення апаратних можливостей при перевищенні всіх можливих комбінацій включення мультиплексорів.
8. Схема порівняння видає сигнал при спрацьовування сенсорного комутатора і появи сигналу на виходах мультиплексорів.
9. Однокриштална мікро ЕОМ визначає код комутатора і здійснює його передачу інформаційно-вимірювальній системі (ІВС).

Працює пристрій так: при натисканні БПСГ у ньому виникають загасаючі синусоїдальні коливання, і напруга з його електродів надходить на погоджувальний пристрій, що може виконуватися або на польовому транзисторному ключі, або на КМОП - тригерах. Далі з виходів погоджувальних пристроїв, сигнали надходять на входи ТТЛ - мультиплексорів, на входи керування яких надходить двоїчний код з лічильників і дешифратора.

У свою чергу, на лічильники через селектор імпульсів, виконані на логічному елементі «3І-НІ», надходить сигнал з тактового генератора частотою не менш 1мГц.

З виходів мультиплексорів сигнали надходять на входи схеми порівняння, що визначає стан натиснутого комутатора, і може бути виконана на компараторах, або на елементах «І», або «ЩОВИКЛЮЧАЄ ЧИ». При спрацьовуванні БПСГ схема порівняння переходить в інший стан і з її виходу сигнал надходить на селектор

імпульсів, що припиняє проходження імпульсів на лічильники. Крім того, вихідний сигнал схеми порівняння надходить на вхід дозволу переривань однокристальної мікро ЕОМ.

Мікро ЕОМ, у свою чергу, блокує роботу селектора імпульсів. Визначає код натиснутого комутатора і видає інформацію з каналу зв'язку ІВС у послідовній формі.

Розроблений п'єзоелектричний сенсорний комутатор призначений, насамперед, для використання в пультах автоматичного керування виробничими процесами й в ЕОМ, використовуваних в умовах, при яких звичайні комутатори не функціонують, а також на вибухонебезпечних виробництвах.

Корпус сенсорного перемикача каналів має трапецієподібну форму і виготовлений із пластику АБС-2020-32 ясно-сірого кольору. Габаритні розміри $460 \times 200 \times 50$ мм³. Маса складає 450 р.

Основні достоїнства п'єзоелектричного сенсорного перемикача каналів:

- відсутність механічних частин, що переміщуються, і відсутність брязкоту контактів;
- зниження втоми оператора в порівнянні зі звичайними сенсорними перемикачами на основі сенсорних резонансних перетворювачів і на основі антенного ефекту.
- стійкість до вібрацій;
- пожаро і вибухонебезпечність;
- стійкість до впливу агресивних середовищ, таких як плавикова кислота, пил.

До основних недоліків можна віднести неможливість створення напряму матричного типу комутатора і відсутність можливості використання комбінації перемикачів.

Для створення клавіатури з матричною організацією необхідно створити нову конструкцію сенсорної кнопки.

6.2. П'єзоелектрична кнопка з оптичним виходом

Нами були проведені дослідження зі створення спеціальної конструкції сенсорної кнопки на основі БПСГ, що дозволяє вирішити проблему створення матричної клавіатури.

Так, у [78, 155, 156] приводиться кілька варіантів конструкцій п'єзоелектричних перетворювачів зусиль з оптичним виходом. Вихідна інформація про вимірюване зусилля перетворюється в модульований по інтенсивності світловий потік. Області застосування таких перетворювачів - системи з оптичними каналами зв'язку.

На рис. 6.2 зображена конструкція п'єзоелектричної кнопки [157], що складається з БПСГ (1) з електродами (2) і (11), рідкокристалічної (РК) панелі (6) (нематичний рідкий кристал (НРК) МББА) з напівпрозорими електродами (3) і (10), випромінювача (5) і приймача (7) світла, двох волоконно-оптичних світловодів (4) і (9) і контролера клавіатури і дисплея (8), а також джерела опорної напруги (12).

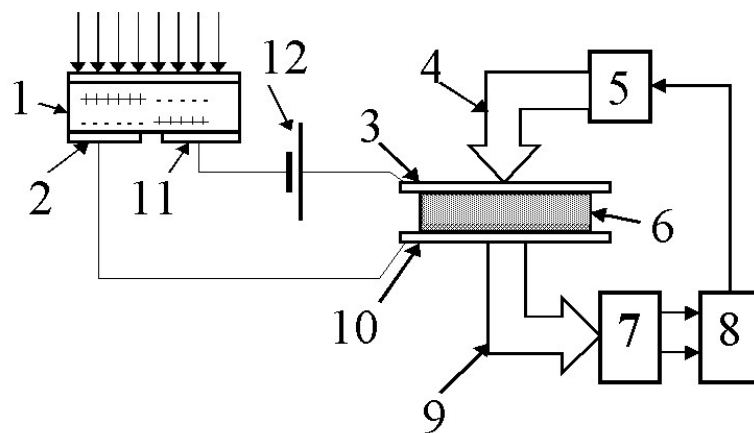


Рис. 6.2. П'єзоелектрична кнопка з оптичним виходом

Робота пристрою. У вихідному стані випромінювач світла (5) випромінює у волоконно-оптичний світловод (4) світловий потік. Джерело опорної напруги споконвічно створює електричне поле для зсуву кристалів рідкокристалічної панелі, щоб світловий потік не проходив через рідкокристалічну панель (6) і не міг попадати через другий світловод (9) на приймач (7) світла, що перетворює світловий потік в електричний сигнал. Контролер клавіатури і дисплея (8) видає скануючі

імпульси на випромінювач світла (5) і приймає зі приймача світла (7) сигнал натиснутої кнопки для визначення її коду.

При тактильному впливі на БПСГ (1) на його електродах (2) і (11) унаслідок прямого п'єзоефекту утвориться електричний заряд, що пропорційний механічній напруженості в п'єзоелементі (1). Різниця потенціалів на напівпрозорих електродах (3) і (10) рідкокристалічної панелі (6), створювана вихідним сигналом БПСГ і джерела опорного сигналу (12), досягає нульового значення напруги і змінює прозорість рідкокристалічної панелі (6). Освітленість приймача світла (7) буде збільшуватися. На вході контролера клавіатури і дисплея (8) з'явиться сигнал, що вказує на спрацювання конкретної кнопки матричної клавіатури.

Висока точність передачі сигналу від БПСГ до РК панелі обумовлена тим, що опір навантаження п'єзоелемента (1) має чисто ємнісний характер, а питомий опір РК складає $10^6 \dots 10^{10}$ Ом.

Перешкодозахищеність пропонованого сенсорного пристрою від наведень електромагнітних полів вище відомих пристроїв за рахунок відсутності електричного кабелю, що з'єднує п'єзоелемент із входом пристрою обробки інформації. У зв'язку з тим, що діапазон резонансних частот п'єзокераміки складає 100 – 500 кГц, вплив вібрацій від суднових механізмів не буде позначатися на усталеній роботі всього пристрою введення.

РК панель (6) розміщена в безпосередній близькості до п'єзоелементу (1) і з'єднується друкованими провідниками, що дозволяє звести до мінімуму вплив зовнішніх електромагнітних полів.

Недоліком описаного пристрою є погрішність, зв'язана з залежністю від температури навколишнього середовища оптичних властивостей рідкокристалічного шару і властивостей п'єзокераміки. Діапазон температур, що рекомендується для роботи, складає $+10 \div +30$ °С. У випадку зниження температури до нуля буде збільшуватися інерція рідкокристалічної панелі.

Довговічність такої конструкції визначається довговічністю п'єзокераміки, що складає 10-15 років, і рідкокристалічної панелі (10-12 років).

Стійкість п'єзокераміки до впливу агресивних середовищ (не руйнується

плавиговою кислотою) дозволяє використовувати таку кнопку в пристроях уведення цифрової інформації в автоматичних системах керування ДВЗ, зокрема, застосовуваних на химовозах і газовозах.

6.3. П'єзооптичний акселерометр

Відомо [158], що проблема діагностичного забезпечення суднових технічних засобів (СТЗ) може бути зведена до рішення двох основних груп задач:

- створення методів формалізації і наступної автоматизації процедур пошуку причин порушення працездатності ДВЗ і формування рекомендацій обслуговуючому персоналу по керуючому впливі на установку;
- розробка методів і створення засобів визначення технічного стану устаткування ДВЗ і прогнозування його зміни в процесі експлуатації без розбирання і демонтажу технічних засобів.

Перша група задач, власне кажучи, доповнює задачі, розв'язувані системою централізованого контролю, її реалізація не вимагає принципових змін в установці, тому що при цьому використовується традиційно вимірюваний масив параметрів робочого процесу.

Складніше обстоїть справа з реалізацією другої групи задач діагностики, тому що тут потрібно поглиблене вивчення устаткування як об'єкта діагностування, що включає:

- визначення параметрів технічного стану (структурних параметрів);
- вибір і обґрунтування фізичних методів і засобів технічного діагностування.

Складність розв'язування задач збільшується нестандартними умовами експлуатації діагностичної апаратури.

Засоби технічного діагностування, що входять до складу сучасних суднових ІВС у процесі експлуатації піддаються цілому ряду негативних впливів. Найбільш характерні з них – це вплив могутніх теплових, вібраційних і електромагнітних полів компактно розташованого устаткування, живлення від єдиної енергетичної мережі, спільна прокладка інформаційних і силових магістралей. Зазначені фактори

сприяють посиленню погрішностей і виникненню адитивних і мультиплікативних перешкод в елементах керуючих систем. З огляду на постійний ріст потужності суднового енергетичного устаткування, можна прогнозувати формування тенденції погіршення роботи ІВС. Підвищення імовірності одержання недостовірної інформації може в остаточному підсумку привести до катастрофічних наслідків [159].

Нами був проведений ряд досліджень, спрямованих на створення волоконно-оптичних датчиків, що володіють високими метрологічними й експлуатаційними характеристиками [160]. Як найбільш доцільне, розглядалося створення датчиків, що вимагають мінімальних матеріальних і тимчасових витрат. До таких, у першу чергу, були віднесені волоконно-оптичні датчики з амплітудною модуляцією (АМ) сигналу. АМ випромінювання найбільш зручна для подальшої обробки вихідного сигналу оптичних датчиків. Датчики з АМ, завдяки простоті і надійності, найбільш поширені і доступні для промислового освоєння. Однак, поряд з явними достоїнствами, їм притаманний загальний недолік – нелінійність функції перетворення. Цей недолік обумовлений методом узгодженості полів двох волнових структур, заснованим на принципі порушення геометрії зв'язку. Оцінивши існуючі варіанти компенсації нелінійності датчиків з АМ, ми знайшли їх малоефективними і запропонували своє рішення проблеми [161, 162, 163].

Модуляція сигналу в датчиках з АМ відбувається за рахунок змін, внесених у процес порушення приймаючого хвильоводу чи співвісним однорідним Гаусовим пучком випромінюючого хвильоводу (рис. 6.3).

Таким чином, з'являється реальна можливість керування процесом АМ за допомогою зміни не геометрії, а умов зв'язку, за допомогою впливу на властивості кварцового скла. Модуляційні процеси, що відбуваються при цьому, з'ясовні в рамках теорії хвильоводів рівного обсягу. Згідно теореми Ліувіля, при деформації порушеного хвильоводу (ділянка 2 рис. 6.3) буде відбуватися зміна числа прийнятих мод випромінювання, які генеруються випромінюючою волноводною структурою (ділянка 1 рис. 6.3). Таким чином, ця ділянка хвильоводу буде відігравати роль структури між випромінюючим і приймаючим елементами (ділянка

1 і 3 рис. 6.3) датчика, яка дроселює. При цьому в цілому, процес передачі оптичної потужності між хвильовдними структурами буде підлеглий лінійному закону. Пропонована схема модуляції еквівалентна схемі датчика на основі перемінних діаметрів чи числових апертур із зовнішньою амплітудною модуляцією сигналу.

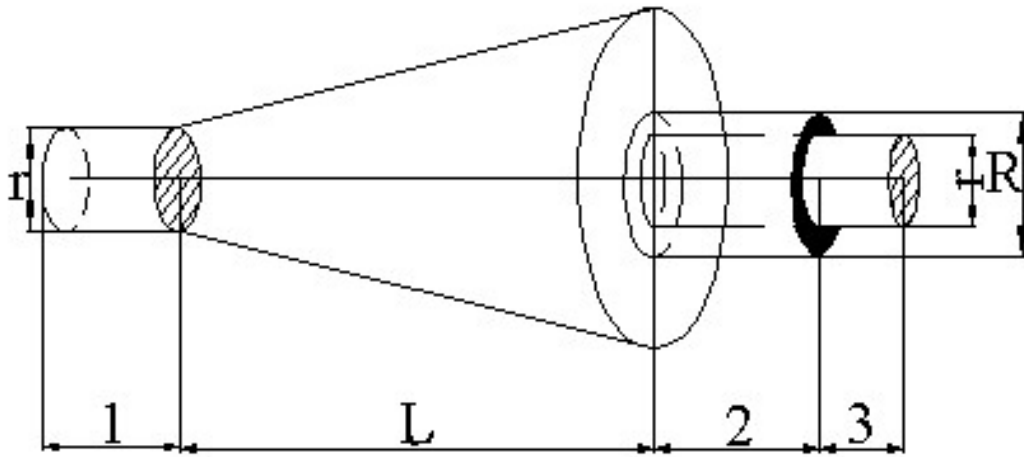


Рис. 6.3. Схема п'єзооптичного датчика амплітудної зовнішньої модуляції:

1 - випромінюючий хвильовід; 2 - порушуваний хвильовід з п'єзоелементом; 3 - хвильовід (аналогічний випромінюючому); r - діаметр випромінюючого (порушуваного) хвильоводу; R - зовнішній діаметр п'єзоелементу; L - відстань між торцями хвильоводів (постійне)

Для оцінки перетворення контрольованого параметра для зміни геометричних характеристик елементів датчика розглядалися механічні, електромеханічні і п'єзоелектричні приводи. У [164, 165] проведене зіставлення потенційних можливостей п'єзоелектричних приводів. При цьому зусилля, що розвивається п'єзоелектричною трубкою при скручуванні настільки велике, що виключає необхідність застосування якого-небудь додаткового механічного пристрою для забезпечення малих дискретних кутових переміщень (від одиниць кутових секунд) без застосування яких-небудь спеціальних мір. Ця властивість зв'язана з квазінеперервним характером роботи п'єзоманіпулятора. Дійсно, п'єзоелемент, що

перетворює електричні коливання в механічні живиться не постійною, а перемінною напругою резонансної частоти. При подачі одного чи двох імпульсів можна одержати дуже маленьке кутове переміщення виконавчого елемента.

Ефективність сполучення п'єзоелектричного привода й оптичних елементів в одному ПП стала передумовою для розробки перетворювача з внутрішньою модуляцією.

Конструкція розробленого п'єзооптичного ПП (рис. 6.4) являє собою хвилевід, коаксіально з'єднаний з елементом на основі НРК. Торець хвилеводу покритий дзеркальним напилюванням. Керування елемента НРК здійснюється сигналами від п'єзoeлементу, пропорційними змінам контрольованого параметра. Зміна показника переломлення елемента НРК приводить до порушення умов повного внутрішнього відображення в хвилеводі. Зміни, що відбуваються, знаходять своє відображення у величині інтенсивності випромінювання. Перетворений світловий потік відбивається від дзеркального торця і повертається до фотодетектора по тому ж волокну.

П'єзооптичний ПП такої конструкції відрізняється технологічністю і простотою виготовлення.

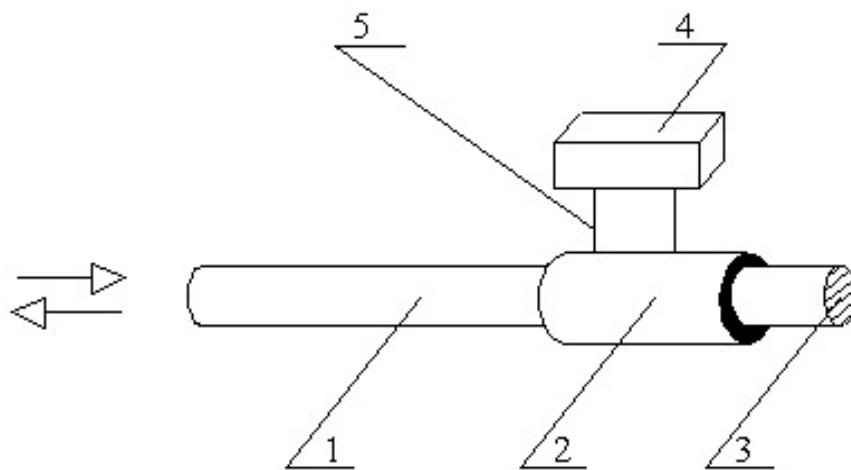


Рис. 6.4. Схема ПП амплітудної внутрішньої модуляції: 1 - хвилевід; 2 – елемент НРК; 3 - дзеркальне покриття; 4 - ПЭ; 5 – керуючі електроди

На базі розроблених п'єзооптичних ПП нами розроблена конструкція п'єзооптичного акселерометра [166], в основу якого покладене керування оптичними

властивостями світловодів за допомогою п'єзоелектричних маніпуляторів. Область застосування такого віскозиметра - дослідження вібрації в агрегатах і вузлах суднових дизелів в умовах термічних і вібраційних полів підвищеної інтенсивності, що створюються елементами енергетичних установок судів [167, 168].

Відомі конструкції акселерометрів, де в одного чутливим елементом є складальної стовп шайб [111, 169], а в іншого випромінюючий і два приймаючих світловода з п'єзоелектричним модулятором у виді біморфної пластини, які володіють рядом недоліків:

- наявність елементів, виконаних з матеріалів з різними коефіцієнтами теплового розширення;
- необхідність залучення до складу акселерометра антивібраційних спеціальних кабелів;
- високий вихідний електричний опір.
- складність точного позиціювання випромінюючого світловода щодо приймаючих світловодів.

На рис. 6.5 приведена конструкція п'єзооптичного акселерометра, до складу якого входять циліндрична камера (1) з герметичними введеннями для випромінюючого (3) і приймаючого (4) світловодів, розташованих по торцях, U – образна основа (2) із кварцового скла, керований світловод (5), п'єзоелектричний модулятор (6), первинний п'єзоелемент (7), що сприймає коливання U – образної основи, як інерційної маси, і генерує електричні сигнали керування, що передаються по електродах (8) до п'єзоелектричного модулятора (6) з радіальною поляризацією. П'єзоелектричний модулятор жорстко закріплений з керованим світловодом одним кінцем у U – образну основу. Керований світловод торцем жорстко закріплений до приймаючого світловоду, а з іншої сторони розташований співвісно з випромінюючим світловодом і віддалений від нього на довжину хвилі випромінювання. Деформації приводять до порушення умов повного внутрішнього відображення світла в керованому світловоді і модуляції інтенсивності світлового потоку пропорційно амплітуді вібрації.

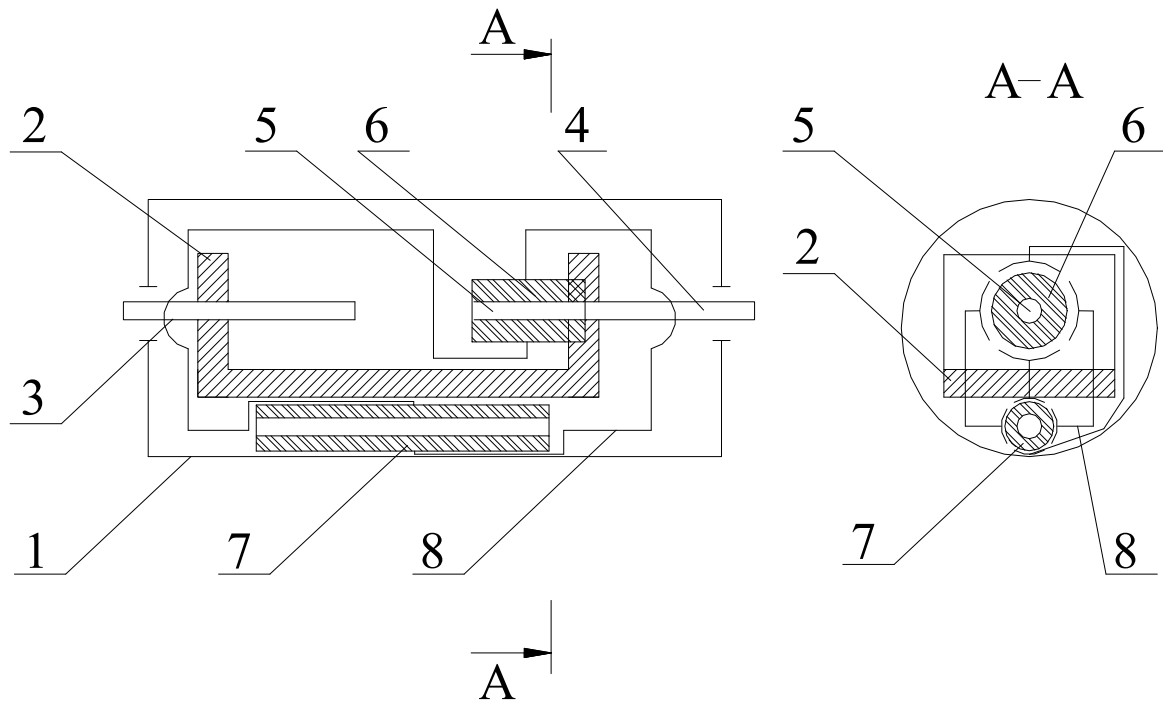


Рис. 6.5. П'єзооптичний акселерометр (розріз у діаметральній площині): 1 - циліндрична камера, 2 - U – образна основа, 3 – випромінюючий світловод, 4 - приймаючий світловод, 5 - керований світловод, 6 - п'єзоелектричний модулятор, 7 - первинний п'єзоелемент, 8 – електроди

Працює акселерометр у такий спосіб. У вихідному стані при відсутності механічних коливань первинний п'єзоелемент знаходиться в стані спокою, напруга на його електродах дорівнює нулю, керований світловод не змінює своїх якостей.

З появою механічних коливань, U – образна основа викликає деформацію зрушення. У результаті дії прямого п'єзоефекту на електродах циліндра генерується напруга, що подається на маніпулятор. Унаслідок дії зворотного п'єзоефекту відбувається скручування керованого світловода, що викликає порушення умов повного відображення світла в ньому і змінює умови зв'язку випромінюючого і приймаючого світловодів.

Елементи акселерометра реалізовані відповідно до відомих схем: у [170] - U – образна основа; [171] - випромінюючий, приймаючий, керований світловод; [26, 78] - циліндричний п'єзоелемент із радіальною поляризацією.

Достоїнствами розробленої конструкції є:

- можливість використання матеріалів з однаковим коефіцієнтом теплового розширення;
- можливість відмовлення від використання кабелів електричного живлення перетворювача, а також економія міді;
- можливість використання волоконно - оптичних ліній, стійких до впливу температури і вібрації як інформаційний канал, і створення на їхній базі розгалужених систем;
- високу надійність і ресурс (більш 2000 г.);
- пожежа і вибухонебезпечність;
- відсутність випромінюючих магнітних полів;
- мала маса і габарити.

6.4. Ультразвуковий п'єзотрансформаторний датчик вологості

Вологість повітря є одним з найважливіших технологічних параметрів, що використовується в багатьох областях промисловості (вентиляційних, сушильних і холодильних установках), де актуальні задачі контролю і регулювання мікроклімату при одержанні і збереженні матеріалів у виробничих приміщеннях. Важливе місце в забезпеченні нормальних умов роботи екіпажа судна займають питання створення мікроклімату і, зокрема, кондиціонування повітря. Так взаємодія функціональних систем в організмі здійснюється на основі принципів ієрархічного домінування, багато параметричної і послідовної взаємодії, системогінеза і системного квантування процесів життєдіяльності. Принцип послідовної взаємодії функціонально різних систем в організмі людини чітко виявляється в континуумі процесів кровообігу, травлення, подиху, виділення і т.д. Для опису терморегуляції в організмі людини, здійснюваної гомеостатичними механізмами, такими як відділення поту $Q_{\text{н}}(t_{\text{об}})$, тепловий опір одягу $R_{\text{од}}(t_{\text{с}}, S)$, теплопередача середовищ і оболонки $K_{\text{о}}(S)$ і теплопродукція $MT(H_{\text{Т}})$, були отримані передатні функції [172, 173].

Вважаючи, що всі динамічні характеристики організму людини залежать тільки від часу, для розглянутого об'єкта і проміжку часу $d\tau$ рівняння теплового балансу кожної крапки запишемо у виді:

$$\begin{cases} c_{\text{я}} d(m_{\text{я}} t_{\text{я}}) = (M_{\text{я}} - Q_{\text{д}} - Q_{\text{об}}) d\tau, \\ c_{\text{к}} d(m_{\text{к}} t_{\text{об}}) = (Q_{\text{об}} + M_{\text{об}} - Q_{\text{об}}^{\text{в}} - Q_{\text{об}}^{\text{од}}) d\tau, \\ c_{\text{о}} d(m_{\text{о}} t_{\text{од}}) = (Q_{\text{од}}^{\text{од}} - Q_{\text{од}}^{\text{п}} - Q_{\text{од}}^{\text{н}}) d\tau, \end{cases}$$

де $c_{\text{я}}$, $c_{\text{к}}$, $c_{\text{о}}$ - теплоємність ядра, шкіри (оболонки) і одягу, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; $m_{\text{я}}$, $m_{\text{к}}$, $m_{\text{о}}$ - маса ядра, шкіри й одягу, кг; $t_{\text{я}}$, $t_{\text{к}}$, $t_{\text{од}}$ - температура ядра, шкіри й одягу; $M_{\text{я}}$, $M_{\text{об}}$ - теплопродукція внутрішніх джерел ядра і шкіри (оболонки), кВт; $Q_{\text{од}}^{\text{вн}}$ - тепловий потік від оболонки тіла до одягу, кВт; $Q_{\text{од}}^{\text{п}}$, $Q_{\text{од}}^{\text{к}}$ - радіаційний і конвекційний теплові потоки через одяг, кВт; $Q_{\text{об}}$ - тепловий потік від ядра до шкіри, кВт; $Q_{\text{об}}^{\text{в}}$, $Q_{\text{об}}^{\text{од}}$ - теплові потоки до поверхні шкіри від одягу і навколишнього середовища, кВт; $Q_{\text{д}}$ - тепловий потік у навколишнє середовище через органи подиху, кВт; $Q_{\text{об}}^{\text{п}}$ - радіаційний потік з поверхні одягу, кВт; $Q_{\text{од}}^{\text{н}}$ - сумарний тепловий потік (конвенція і випари з поверхні одягу), кВт.

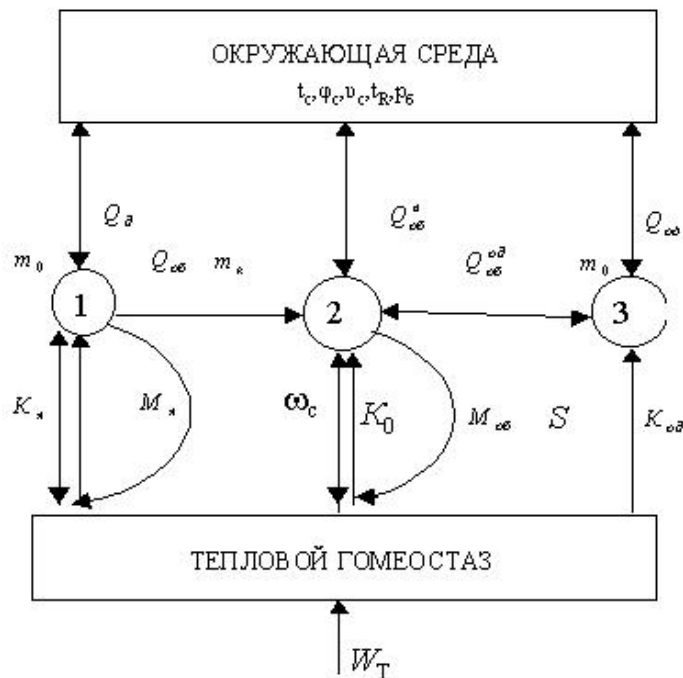


Рис. 6.6. Умовно прийнята схема розподілу енергії в організмі людини для запису рівнянь теплового балансу

З рівняння теплового балансу випливає, що для вибору параметрів мікроклімату, необхідно робити виміри наступних параметрів: вологості, тиску, температури, хімічного складу і швидкості повітряного потоку. В даний час до застосовуваних датчиків пред'являються наступні вимоги: висока надійність в експлуатації, низька собівартість, висока чутливість і уніфікованість. Усім цим вимогам задовольняють п'єзоелектричні датчики.

Слід зазначити, що унікальні властивості п'єзокераміки дозволяють створювати датчики, що в одному конструктивному виконанні можуть визначати 2-3 параметра. Так при побудові характеристик датчиків тиску роблять аналіз характеристик при зміні температури. Датчики вологості дозволяють визначати густину речовини при зміні швидкості повітря в замкнутому просторі, якими є каюти членів екіпажа, машинне відділення і трюм. На рис. 6.8 показаний графік зміни самопочуття від декількох параметрів, що залежить від трьох параметрів.

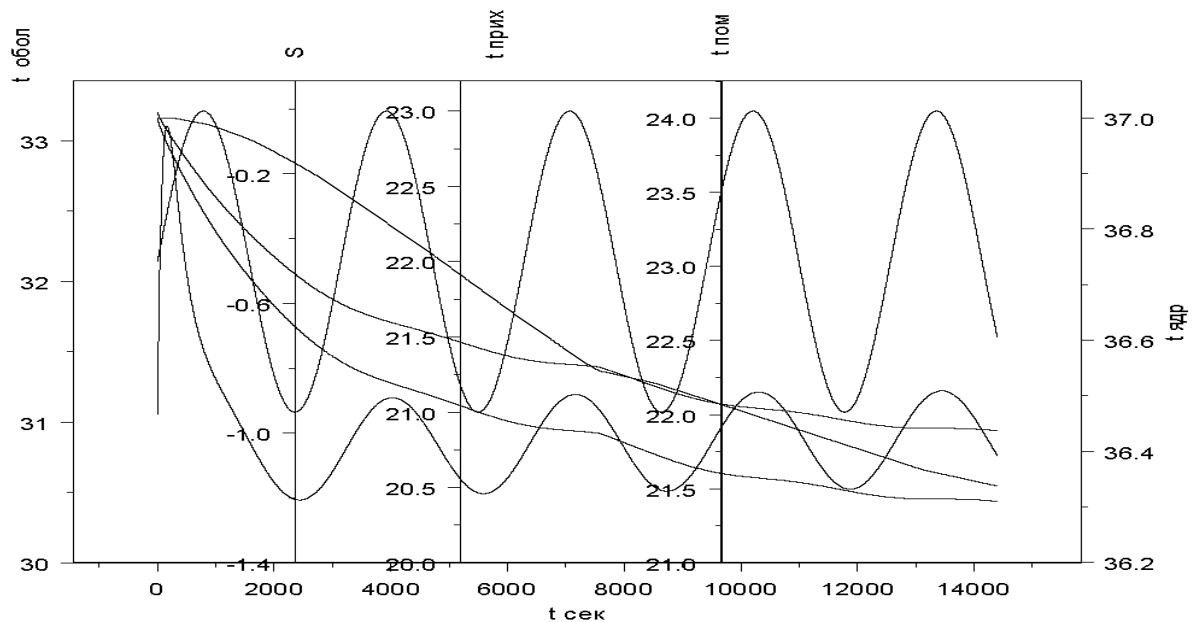


Рис. 6.7. Динаміка зміни $t_{\text{я}}$, $t_{\text{к}}$, $t_{\text{од}}$ — температура ядра, шкіри й одягу в стані відпочинку людини при зміні температури прихованого повітря

Аналогічно можна побудувати графіки залежності частоти коливань датчиків з частотним виходом від температури, тиску і такого параметра як інтенсивність магнітного поля. Так на рис. 6.8 представлені залежності частоти вихідної напруги п'єзоелектричного датчика від температури і тиску [174].

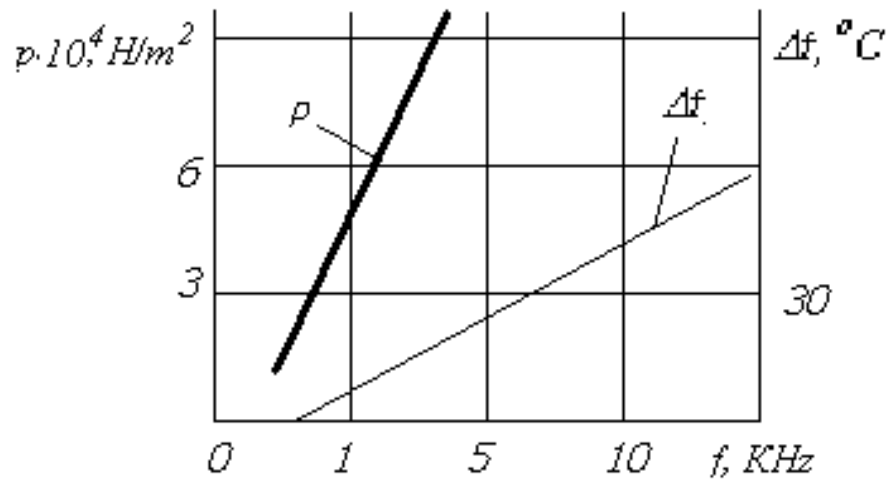


Рис. 6.8. Залежність частоти датчика від тиску p і температури Δt

Слід зазначити, що за останнє десятиліття намітився ріст діапазону задач і вимог, пропонованих до датчика вологості, а саме:

- підвищення швидкодії і точності виміру вологості;
- виміру вологості при низьких негативних температурах;
- контролю і регулювання вологості суміші пару і повітря чи газів при високих температурах;
- виміру вологості газів при високих тисках;
- збільшення надійності і терміну служби гігрометрів.

У [175] розглядається питання створення ультразвукових п'єзотрансформаторних датчиків вологості, що, являють собою резонатор, зібраний на основі п'єзоелектричного трансформатора, вхідна і вихідна секції якого з'єднані між собою за допомогою грузло-пружної зв'язки у виді повітряного зазору. У найпростішому варіанті датчик складається з чотирьох елементів (рис. 6.9, а): первинної і вторинної секцій ПЕТ (п'єзоелектричний випромінювач (1) і п'єзоелектричний приймач (2)) у формі диска чи будь-якої іншої форми; досліджуваної грузло-пружного середовища (повітряного зазору (3)) і несучої конструкції зі звуконепроникного матеріалу (кристалотримачів (4)).

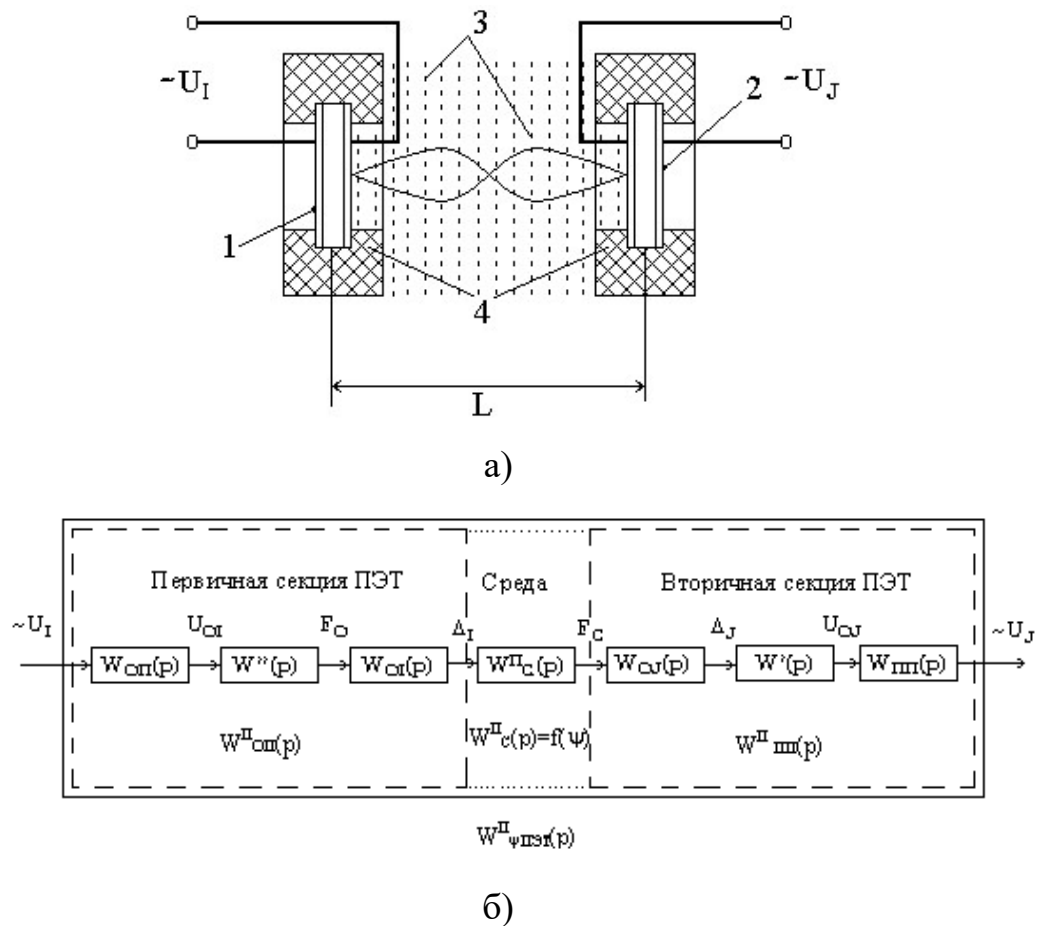


Рис. 6.9. П'єзoeлектричний трансформатор (ПЕТ) з грузло-пружним зв'язком (а),
Структурна схема ПЕТ з грузло-пружним зв'язком (б)

Досліджуване середовище являє собою визначений об'єм повітря, що розташований між первинною і вторинною секціями ПЕТ. Випромінювач і приймач, зроблені з однієї і тієї ж п'єзокераміки, мають однакові розміри й одну резонансну частоту:

$$f_p = \frac{\vartheta_{II}}{2l}, \quad (6.1)$$

де $\vartheta_{II} = \sqrt{E_y / \rho}$ - фазова швидкість поширення подовжньої чи поперечної хвилі в п'єзoelementі, м/с; E_y - модуль Юнга для п'єзокераміки в напрямку поширення відповідної хвилі, Н/м²; ρ - щільність п'єзокераміки, кг/м³; l - частотний чи хвильовий розмір ПЕ (один з розмірів тіла), м.

Відстань L між випромінювачем і приймачем вибирається таким, щоб об'єм повітря резонував на тій же частоті і дотримувалася умова утворення стоячої акустичної хвилі (див. рис. 6.3), тобто

$$L = \frac{z\lambda_p}{2}, \quad (6.2)$$

де z - ціле число; $\lambda_p = c/f_p$ - довжина стоячої акустичної хвилі на частоті резонансу, м; c - швидкість звуку в повітрі [176], м/с.

Зі зміною вологості середовища, відбувається відповідна зміна вологості резонуючого обсягу. Це приводить до зміни параметрів резонуючого обсягу стосовно резонансної частоти f_p випромінювача і приймача. У результаті, при незмінній частоті f_p і напрузі живлення $\sim U_1$ первинної секції ПЕТ, вихідна напруга $\sim U_2$, що знімається з вторинної секції ПЕТ, буде змінюватися пропорційно зміні вимірюваної відносної вологості ψ досліджуваного середовища [177, 178].

ПЕТ з грузло-пружним зв'язком можна представити у виді структурної схеми, зображеної на рис. 6.9, б.

Відповідно до структурної схеми, передатна функція ПЕТ з грузло-пружним зв'язком у загальному випадку:

$$W^{\Pi}_{\text{пПЭТ}}(p) = W^{\Pi}_{\text{оп}}(p) W^{\Pi}_c(p) W^{\Pi}_{\text{пп}}(p), \quad (6.3)$$

де $p = j\omega$ - оператор Лапласа; $W^{\Pi}_{\text{оп}}(p)$ - передатна функція п'єзoelementa, що працює в режимі зворотного п'єзoeфекту і виконуючого роль первинної секції ПЕТ (п'єзoeлектричного випромінювача).

$W^{\Pi}_{\text{оп}}(p)$ складається з трьох послідовно з'єднаних ланок:

$$W^{\Pi}_{\text{оп}}(p) = W_{\text{оп}}(p) W'_{\text{оп}}(p) W_{\text{oi}}(p), \quad (6.4)$$

де $W_{\text{оп}}(p)$ - зв'язує вихід і вхід інтегруючої ланки, що складається з опору джерела $R_{\text{и}}$ і ємності ПЭ первинної секції ПЕТ $C^1_{\text{пэ}}$; $W'_{\text{оп}}(p)$ - зв'язує електричні і механічні параметри ПЕ.

Для виділення пружних і інерційних властивостей ПЕ, вводиться ланка:

$$W_{\text{oi}}(p) = \Delta_l / F_0 = 1 / (k_{\text{oi}}(T_{\text{oi}}^2 p^2 + 2\xi_{\text{oi}} T_{\text{oi}} p + b_{\text{oi}})), \quad (6.5)$$

де Δ_l - значення абсолютної лінійної деформації ПЕ по хвильовому розмірі l , м; k_{oi} - коефіцієнт пружності ПЭ, Н/м; T_{oi} - період коливань ПЕ, с; m_{oi} - маса п'єзoelementa, кг; ξ_{oi} - коефіцієнт загасання коливань у ПЕ; b_{oi} - коефіцієнт внутрішнього тертя п'єзoкeрaміки, Н·с/м.

У вираженні (6.3) $W^{\Pi}_{\text{пп}}(p)$ є передатною функцією ПЕ, що працює в режимі

прямого п'єзоефекту і виконуючого роль вторинної секції ПЕТ (п'єзоелектричного приймача). $W_{\text{III}}^{\text{II}}(p)$ також складається з трьох послідовно з'єднаних ланок, які можна записати аналогічно (6.4) у наступному виді:

$$W_{\text{III}}^{\text{II}}(p) = W_{\text{OI}}(p)W'(p)W_{\text{III}}(p), \quad (6.6)$$

де $W_{\text{OI}}(p)$ - описує пружні й інерційні властивості ПЕ вторинної секції ПЕТ при впливі на нього сили пружності F_C з боку коливного середовища; $W'(p)$ - зв'язує електричні і механічні параметри ПЕ; $W_{\text{III}}(p)$ - зв'язує вихід і вхід ланки, що диференціює і складається з опору навантаження і ємності вторинної секції ПЕТ.

У перспективі актуальною є розробка акустичних мостових резонаторних схем на основі ПЕТ з грузло-пружним зв'язком, що дадуть можливість піти від розгляду досліджуваного середовища як бінарної (пароповітряної) суміші газів, що залежить від температури і, забезпечивши термічну компенсацію, дозволять контролювати відразу два параметри: температуру і вологість середовища, тобто інтегральний параметр.

Основний недолік такої конструкції – спосіб кріплення випромінювача і приймача, як варіант: одним електродом кріпиться до поверхні плати, а до другого – провідником за допомогою об'ємного монтажу, що приводить до зниження надійності конструкції. У результаті впливу вібрацій і відцентрових прискорень можливе відшарування електродів п'єзокераміки.

Для усунення цього недоліку була розроблена нова конструкція випромінювача.

6.5. Ультразвуковий біполярний п'єзоелектричний випромінювач

Нами розроблений ультразвуковий п'єзоелектричний випромінювач, виготовлений з уніполярної чи біморфної пластини [179].

У [180, 181] запропонована конструкція біполярного п'єзоелектричного сенсорного генератора, що працює в режимі прямого п'єзоефекту. Пропонований ультразвуковий біполярний п'єзоелектричний випромінювач (УБПВ) – це той же БПСГ, тільки п'єзоелемент працює в режимі зворотного п'єзоефекту. На рис. 6.10

показана конструкція УБПВ.

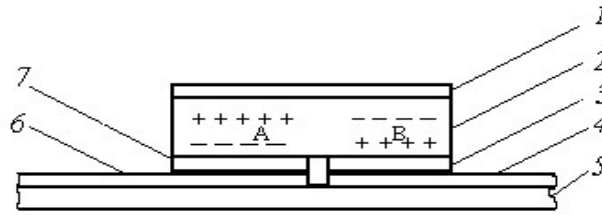


Рис. 6.10. УБПВ: 1 – загальний електрод областей A і B ; 2 – п'єзокераміка; 3, 7 – електроди, до яких підводиться напруга; 4, 6 – контактні площадки; 5 - друкована плата

Можливі два варіанти монтажу УБПВ: консольне кріплення і по всій поверхні електродів. Унаслідок чого, у навколишній простір будуть випромінюватися акустичні коливання: у першому випадку - подовжні і поперечні; у другому - подовжні.

При аналітичному описі роботи УБПВ можна скористатися диференціальним рівнянням зворотного п'єзоефекту [78]:

$$a_0 \frac{d^3 \Delta(t)}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 \Delta(t)}{dt^2} + a_2 \frac{d\Delta(t)}{dt} + a_3 \Delta(t) = U_0 f(t) ,$$

де $a_0 = \frac{RCm}{k_U}$; $a_1 = \frac{RCb + m}{k_U}$; $a_2 = \frac{RCk_0 + b_0}{k_U}$; $a_3 = \frac{k_0}{k_U}$; $b_0 = \frac{m}{k_U}$; $k_U = \frac{F}{U_{op}}$; $\Delta(t)$ – переміщення; R – опір і C - ємність УБПВ; m – маса п'єзокераміки; b – коефіцієнт внутрішнього тертя; $f(t)$ – сила; U_0 – напруга, що прикладається.

Робота УБПВ здійснюється на частоті резонансу $\omega = \sqrt{k_U / m}$.

6.6. Датчик коливань тиску в трубопроводі високого тиску

Як відомо, у трубопроводі високого тиску ПС виникають пряма і зворотна хвиля. У результаті виникають ситуації, коли може виникнути порив трубопроводу, що приводить до пожежі.

З метою запобігання яких, необхідно мати засоби, що дозволяють діагностувати стан трубопроводу і вимірювати тиск палива. На рис. 6.11 приведені осцилограми

тиску палива в робочій порожнині ПНВТ - P_H і каналі форсунки, що підводить паливо - P_Φ , зняті разом з осцилограмами підйому голки [12].

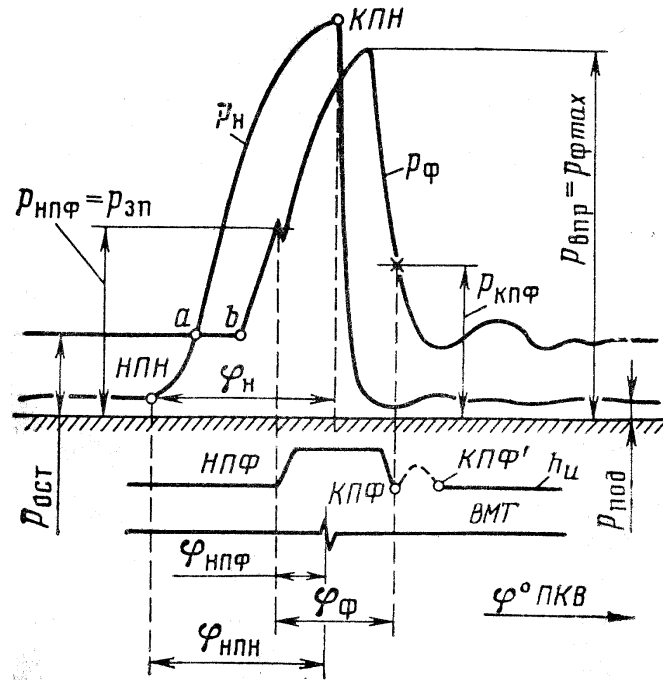


Рис. 6.11. Осцилограми процесу упорскування

Основна особливість полягає в тім, що в цьому трубопроводі немає можливості розмістити датчик, тому що в даний час кераміка, яка б витримувала такі коливання тиску при високих температурах, відсутня. Як відзначалося в розділі 2, зміна тиску приводить до руйнування ЧЕ віскозиметра. Крім того, діагностику необхідно проводити по всій довжині трубопроводу.

Усе це і накладає обмеження на використання датчиків тиску. Тому були розроблені дві конструкції датчиків тиску. Перша конструкція (рис. 6.12, а) являє собою прямокутний концентратор (2) з вирізом під трубопровід (1), до бічних граней якого прикріплені ПЕ (3) і (4) з подовжньою поляризацією. За допомогою провідників (5) і (7) здійснюється підключення до осцилографу. Вивід (6) – загальний. Чутливі елементи виготовлені з кераміки ЦТС – 19 у виді шайби з розмірами $D=10$ мм і $h=0,5$ мм. Конструкція (рис. 6.12, б) розроблена на основі п'єзоелектричного циліндра з подовжньо – радіальною поляризацією, з якого вирізаний сектор (2). Матеріал кераміки – ЦТС-19. Розмір - $D=10$ мм, $l=10$ мм і $h=0,5$ мм. Зовнішній електрод розділений на дві частини (3) і (4) з метою зручності

кріплення до трубопроводу.

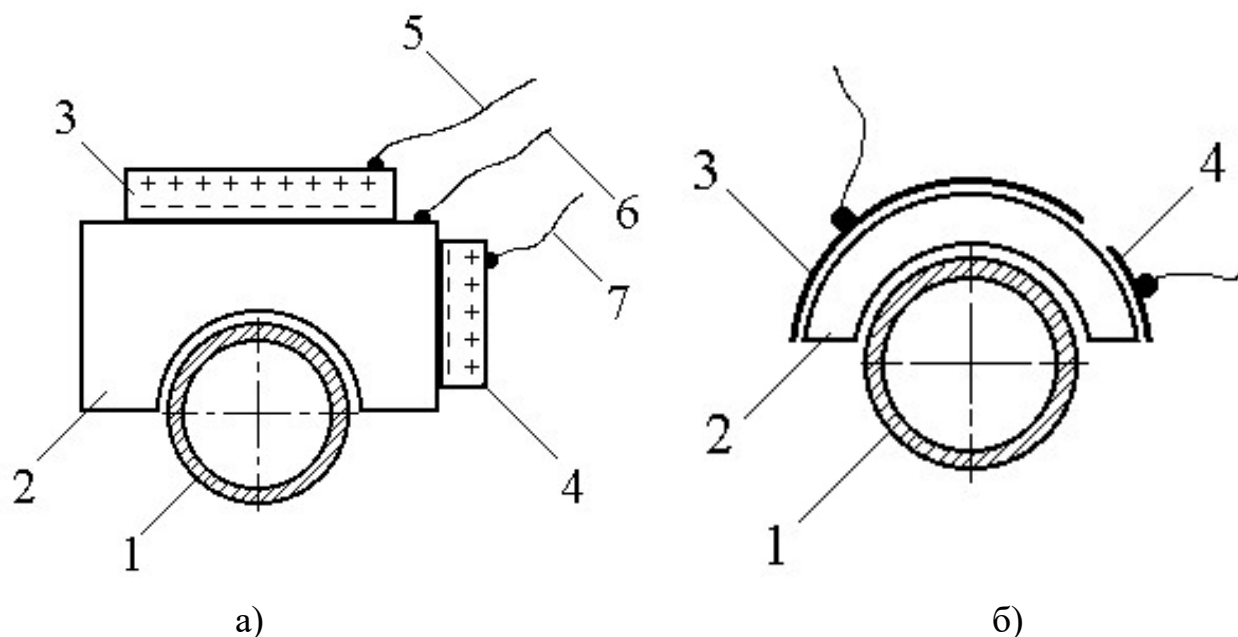


Рис. 6.12. Конструкції датчиків тиску палива в трубопроводі високого тиску ПС

Однак, усім конструкціям притаманний один недолік – нелінійність АЧХ. Для боротьби з цим явищем можна використовувати методи лінеаризації амплітудно-частотних характеристик, які приведені [27, 182].

6.7. Висновки. Обговорення отриманих результатів

Методологія проектування реометрів і віскозиметрів з п'єзоелектричним приводом дозволила створити цілий комплекс пристроїв п'єзоактивної механіки:

1. Розроблено конструкцію сенсорного комутатора з лінійною організацією і можливістю розширення функціонального призначення до 102 клавіш, високою перешкодозахищеністю, призначеного для роботи в умовах вібрацій, вологості й електромагнітних полів.
2. Установлено, що створення матричної клавіатури можливо при спільному використанні п'єзоелементів і оптичних хвилеводів.
3. Розроблено конструкцію п'єзооптичного акселерометра, на яку отриманий патент України, що дозволяє позбутися від кабелів, які захищені від брязкоту, і не чутлива до впливу високого тла перешкод.

4. Розроблено конструкцію датчиків тиску палива в паливопроводі високого тиску, що дозволяє здійснювати виміри без упродовження датчика в паливопровід.

5. Розроблено датчик вологості, що дозволяє здійснювати інтегральні виміри з урахуванням наступних параметрів: тиску, швидкості повітряного потоку і температури.

Основні наукові результати опубліковані в збірниках, приведених у переліку ВАК, [152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 166, 174, 175, 179, 180, 181].

ВИСНОВКИ

У дисертації приведені теоретичне узагальнення і нові рішення науково-технічної проблеми розвитку основ створення первинних перетворювачів, що мають високі якісні й експлуатаційні показники, на базі елементів і пристроїв п'єзоактивної механіки в інтересах підвищення ефективності використання важких моторних палив і їхніх сумішей у ДВЗ за рахунок оцінки реологічних властивостей цих тиксотропних рідин.

Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи наступні.

1. Одним зі шляхів ефективного використання палива для ДВЗ є можливість безупинної оцінки реологічних властивостей тиксотропних рідин, якими є важкі моторні палива й олії. Рішення даної задачі може бути здійснене за допомогою первинних перетворювачів на пристроях п'єзоактивної механіки.

2. Концепція створення п'єзоелектричних пристроїв для паливних систем ДВЗ базується на двох основних феноменах:

- подібність процесів у триботехнічних вузлах паливних систем із зазором 1-25 мкм і вимірювальних зондах віскозиметрів і реометрів;
- використанні п'єзоелектричних елементів у приводах вимірювальних зондів для збільшення діапазону вимірів і забезпечення плавного регулювання швидкості рухомого циліндра вимірювального зонда;

3. Удосконалювання структури віскозиметрів на співвісних циліндрах, у яких камера приводу і вимірювальна камера розділені повітряним зазором з метою забезпечення робочої температури п'єзокераміки не вище $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ при зміні температури підігрітого рідкого важкого палива в діапазоні $+70\div+130\text{ }^{\circ}\text{C}$, дозволяє постійно вимірювати коефіцієнти динамічної в'язкості тиксотропних рідин у трубопроводі низького тиску.

4. Запропоновано структури реометрів, призначені для комплексної оцінки реологічних властивостей тиксотропних рідин, у яких камера приводу і вимірювальна камера розділені повітряною подушкою з метою вирішення

протиріччя між робочою температурою п'єзокераміки ($+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) і температурою підігрітого важкого палива ($+70\div+130\text{ }^{\circ}\text{C}$).

5. Математичні моделі віскозиметрів із приводом на маніпуляторах, виконаних на: п'єзошайбі, біморфі і складальних стовпах, а також і реометрів із приводом на п'єзоелектричних двигунах: лінійному і нереверсивному з пасивним ротором, дозволяють реалізувати електронне моделювання пристроїв для ефективного їхнього проектування.

6. Запропоновано метод проектування п'єзоелектричних реометрів на співвісних циліндрах, що дозволяє врахувати особливості конструктивного виконання триботехнічних вузлів ДВЗ для вимірювального зонда.

7. Розроблено структури:

а) сенсорного комутатора, що володіє високими стійкістю до перешкод, надійністю і дозволяє використовувати комбінації клавіш;

б) п'єзооптичної кнопки, що дозволяє створити матричну клавіатуру з оптичним виходом з метою збільшення перешкодозахищеності від наведень електромагнітних полів, які присутні у машинному відділенні;

в) п'єзооптичного акселерометра.

8. Запропоновано спосіб одержання інформації про коливання тиску в трубопроводі високого тиску шляхом установки датчика коливання на трубопровід без порушення його герметичності.

9. Фізико-технічні параметри розроблених реометрів і віскозиметрів з п'єзоелектричним приводом, що дозволяють здійснювати безупинну оцінку реологічних характеристик палива і підвищити ефективність його використання, забезпечують діапазони напруг зрушення однорідного шару $\tau=0,1\div10^4\text{ мПа}$ і градієнта швидкості $\dot{\gamma}=1\div10^3\text{ с}^{-1}$ без застосування додаткових насадок і редукторів, а також мають високу чутливість у порівнянні з існуючими.

10. Висока ефективність виконаних розробок підтверджена результатами іспитів віскозиметра на співвісних циліндрах у ЗАТ “Харчопромавтоматика”, у системі підготовки палива заводського парового котла ОСРЗ “Україна”. Реометр на співвісних циліндрах випробуваний у теплотехнічній лабораторії НПЦ

“Енергетика”, про що мають відповідні акти.

Запропоновані конструкції п'єзоелектричних віскозиметрів і п'єзооптичного акселерометра захищені патентами України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизация судовых энергетических установок. / Под ред. Р.А. Нелепина. Л.: Судостроение. 1975. - 534 с.
2. Артемов Г. А., Бойков В. П., Гильмутдинов А. Г. Судовые газотурбинные установки. Л.: Судостроение, 1978. – 246 с.
3. Захаров Ю.В., Есин И.П. Судовые машины и механизмы. – Л.: Судостроение, 1982. - 456 с.
4. Ланчуковский В. И., Козьминых А. В. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок. Учебник - М.: Транспорт, 1983.-320 с.
5. Фомин Ю. Я. и др. Топливная аппаратура дизелей: Справочник / Ю. Я. Фомин, Г. В, Никонов, В. Г. Ивановский. – М.: Машиностроение, 1982. - 168 с., ил.
6. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / С.И. Ефимов, Н.А. Ивашенко, В.И. Ивин и др.; Под общ. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 456 с.
7. Марденский В.П. Топливная аппаратура судовых дизелей. - Изд. 2-ое. - М.: Транспорт, 1973. - 168 с.
8. Эксплуатационные характеристики судовых малооборотных дизелей. Фомин Ю.Я. Изд-во «Транспорт», 1968. – 304 с.
9. Овсянников М.К., Петухов В.А. Судовые дизельные установки: Справочник. – Л.: Судостроение, 1986. – 424 с.
10. Большаков В.Ф., Фомин Ю.Я., Павленко В. И. Эксплуатация судовых среднеоборотных дизелей. - М.: Транспорт. 1983.-160 с.
11. Судовые двигатели внутреннего сгорания: Учебник / Ю. Я. Фомин, А. И. Горбань, В. В. Добровольский, А. И. Лукин и др. - Л.: Судостроение, 1989. - 344 с.
12. Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей: Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1990. – 344 с.

13. Справочник судового механика (в двух томах). Изд. 2-е, перераб. и доп. Под общей редакцией канд. техн. наук Л. Л. Грицяя. - М.: «Транспорт», 1973. – 1376 с.
14. Ханмамедов С.А. Совершенствование функциональных свойств систем смазывания судовых энергетических установок: Дис. ...докт. техн. наук: 05.08.05. – Николаев, 1990. – 382 с.
15. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. - М.: Наука, 1985 - 399 с.
16. Ландау Л.Д. Лившиц Е.Н. Механика сплошных сред. - М. Наука, 1988. – 215 с.
17. Дерягин.Б.В. Трение и смазка. - М., ГТТИ, 1937 – 290 с.
18. Заблоцкий Ю.В. Повышение эксплуатационной надежности топливной аппаратуры судовых малооборотных дизелей: Дис. ... канд.. техн. наук: 05.08.05. - Одесса, 1995. - 163 с.
19. Ахматов А.А. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
20. Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. - М.; Наука, 1978 - 191 с.
21. Джагулов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. – Л.: Машиностроение, 1986. – 265 с.
22. Джагулов Р.Г., Глазева О.В., Никольский В.В. Современные элементы и устройства пьезоактивной электромеханики // Придніпровський науковий вісник. Фіз.-мат. науки - Дніпропетровськ, 1998. - №6(73). - С. 31-48.
23. Измерительные преобразователи: Учебное пособие / Р.Г. Джагулов, Е.Б. Плавинский, В.В. Никольский, А.М. Веретенник - Одесса: Астропринт, 2002. - 216 с.
24. Пьезоэлектрические преобразователи / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ю.Ю. Бондаренко, Т.Ю. Кисиль, М.П. Мусиенко, С.В. Роттэ, И.Б. Чудаева / Под ред. В.М. Шарапова. – Черкасы: ЧГТУ, 2004. – 435 с.: ил.

25. Плавинский Е.Б., Глазева О.В., Никольский В.В. Пьезоэлектронные преобразователи физико - химических величин // Міжнародна конференція з управління (Автоматика 2001). Одеса: ОНПУ, 2001. - Т.1. - С. 170 - 171.
26. Патент 34149А Україна, МПК7 G 01 F 3/12 Пьезоэлектронный витратомір рідких та газоподібних середовищ / Глазева О.В., Плавинський Є.Б.; ОДПУ - №99063/64. Заявл. 09.06.1999. Опубл. 15.02.2001, Бюл. №1.
27. Малеев П.И. Новые типы гироскопов. – Л.: Судостроение, 1971. – 160 с.
28. Никольский В.В., Плавинский Е.Б., Потёмкин А.Э. Перспективы применения и развития твердотельных пьезокерамических гироскопов // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. - Одесса: ОГМА, 2002. - Вып. 7. - С. 107 - 108.
29. Кисиль Т.Ю. Канд. Диссертация. Ультразвуковой метод, пьезоэлектрические преобразователи и устройства контроля вязкости жидкости повышенной точности для систем управления. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 137 с.
30. Лавриненко В.В. Пьезоэлектрические трансформаторы. – М.: Энергия, 1975 – 100 с.
31. Никольский В.В. Биполярные пьезоэлектрические сенсорные генераторы: Дис. ... канд.. техн. наук: 05.13.08. - Одесса, 1997. - 162 с.
32. Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С. Пьезоэлектрические двигатели. – М.: Энергия, 1980. – 112 с.
33. Ерофеев А.А., Смирнов А.Б., Уланов В.Н. Волновые пьездвигатели. – Л.: ЛДНТП, 1989. – 28 с.
34. Бансявичюс Р.Ю., Рагульскис К.М. Вибродвигатели. – Вильнюс: Мокслас, 1981. – 193 с.
35. Жуков С. О пьезокерамике и перспективах ее применения - http://compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_01/stat-48.htm.
36. Виброреология / П.Ф.Овчинников – Киев: Наук. думка, 1983. – 272 с.
37. Вискозиметры. – М., 1966. – 66 с. – (Тр. ЦНИИПИ. Сер.2).
38. Степанов Л.П. Измерение вязкости жидкостей. – М.: Наука, 1966. – 43 с.

39. Стекланные капиллярные вискозиметры,

<http://spb.org.ru/christmas/pribors/4204.html>.

40. Барр Г. Вискозиметрия. – М.; Л.: Изд-во иностр. лит., 1938. – 274 с.

41. Белкин И.М., Виноградов Г.В., Леонов А.И. Ротационные приборы: Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 272 с.

42. Вискозиметр ротационный цифровой (ВРЦ),

<http://www.sstu.edu.ru/research/ractivity/28.html>.

43. Соловьев А. И., Каплун А. Б. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. - Новосибирск - Наука, 1970. - 358 с.

44. Кремлевский В.П., Степичев А.А. Новые автоматические вибрационные вискозиметры. – Л.: Машгиз, 1969. – 26 с.

45. Овчинников П.Ф. О резонансном режиме работы вибрационных машин. – Изв. вузов. Стр-во и архитектура, 1968, №10. - С. 171-177.

46. Урьев Н.Б., Михайлов Н.В. Реологические свойства цементно-водных суспензий в условиях вибрации. – Докл. АН СССР, 1963, 153, №4. - С. 828-831.

47. Носков С.К., Михайлов Н.В. Влияние вибрирования на структурно механические свойства асфальтобетона как тиксотропной коллоидной системы. – Коллоид. журн., 1956, 18, №4. - С. 426-432.

48. www.cambridgeapplied.com/tech/viscometers.html 14.03.2003.

49. Алтоиз Б.А., Ханмамедов С.А. Трибологические особенности граничных смазочных слоев судовых топлив и масел // Судовые энергетические установки: научн.-техн. Сб. – 2003. – Вып. 9. – Одесса: ОНМА. – С. 80-86.

50. Вискозиметры ротационные - www.eurolab.ru/vlajnost.htm.

51. Вискозиметр ротационный ВСН-3 -

http://www.clo.ru/Catalog/Pribor/GasNefteHim/vsn3_.htm.

52. Вискозиметр ротационный цифровой (ВРЦ) -

<http://samgtu.ru/research/ractivity/28.html>

53. OFI Testing Equipment, Inc. - <http://www.ofite.ru/?gid=70&pid=2#70-1>.

54. ТТ-200 поточный вискозиметр погружного типа http://www.argosy-tech.ru/in2_8_tt200.html.
55. ТТ-220 поточный вискозиметр зондового типа http://www.argosy-tech.ru/in2_8_tt220.html.
56. ТТ-100 поточный вискозиметр для установки на обводном канале http://www.argosy-tech.ru/in2_8_tt100.html.
57. Подробное описание поточных вискозиметров Brookfield - <http://www.argosy-tech.ru/doc/viscosity.pdf>.
58. Сыромятников В.Ф. Основы автоматики и комплексная автоматизация судовых пароэнергетических установок. Учебник. – М.: Транспорт, 1983. – 312 с.
59. А. Г. Жданов, А. П. Пятаков Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, 119899, Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет (<http://heritage.sai.msu.ru/astrosh/index.html>).
60. Смагин А.Г., Ярославский М.И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. - Москва: Энергия, 1970. - 200 с.
61. Справочник по кварцевым резонаторам / Под ред. Позднякова П.Г. - Москва - Связь, 1978. - 276 с.
62. K. Sittel, P.E. Rouse Appl. Phys, 1954, 24.
63. P. E. Rouse, K. Sittel. J. Appl. Phys, 1953, 24, 7, 940-950.
64. W. P. Mason, W. O. Baker, H. J. Skimin, Heiss Phvs Rev. 1948, 74,12,1973.
65. W. P. Mason, J. Colloid Sci, 1948 3, 2,147-163.
66. Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы - Ростов-на-Дону. - РГУ, 1983. - 156 с.
67. Кисиль Т.Ю. Канд. диссертация. Ультразвуковой метод, пьезоэлектрические преобразователи и устройства контроля вязкости жидкости повышенной точности для систем управления. - Одесса, 2003. - 137 с.
68. Патент України №58785А. G01N11/00. Спосіб вимірювання в'язкості рідини / Кісіль Т.Ю. Опубл. 15.08.2003. Бюл. №8.
69. Шарапов В.М. и др. О влиянии давления на внутреннее трение пьезокерамики ЦТС // Известия ВУЗов СССР - Физика, 1976. - №9.

70. Ультразвук // Мал. энц.под ред И.П. Голяминой. - М.: Сов. энциклопедия, 1979.-400 с.
71. Кисиль Т.Ю. Измерение вязкости жидкости с помощью асимметричных биморфных пьезоэлементов // Оптимизация производственных процессов. - Севастополь: СевГТУ, 2002. - №6 - С. 20-25
72. Шарапов В.М., Кисиль Т.Ю. Ультразвуковой метод измерения вязкости жидкости // Вісник Черкаського державного технологічного університету -2002.- №3.-С. 17-21.
73. Патент України №б1320А, G01N11/00, Бюл. №11, 2003. Пристрій для вимірювання в'язкості рідини // Шарапов В.М., Кісіль Т.Ю.
74. Патент України №58788А G01N11/00, Бюл. №8, 2003. Пристрій для вимірювання в'язкості рідини // Шарапов В.М., Кісіль Т.Ю., Шарапова О.В.
75. Патент України №56889А, G01N11/00, Бюл. №5, 2003. Пристрій для вимірювання в'язкості рідини // Шарапов В.М., Кісіль Т.Ю.
76. Патент України №б1326А, G01N11/00, Бюл. №11, 2003. Пристрій для вимірювання в'язкості рідини // Шарапов В.М., Кісіль Т.Ю.
77. Революция в измерении вязкости от VAF Instruments // Судоходство - Одесса, 2000. - №1-2. - С. 66 – 67.
78. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник / - Спб.: Политехника, 1994. — 608 с.
79. Реометр с преобразованием Фурье GBC MFR 2100 – <http://neolabllc.ru/third.php?id=97>.
80. Никольский В.В. Анализ применения пьезоэлектрических вискозиметров // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: наук. - техн. журнал - 2003. - №2 - Хмельницький - С. 64-66.
81. Никольский В.В. Ротационные вискозиметры // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: збірник матеріалів конференції. - Хмельницький: ПП Ковальський, 2003. - Вип. №10. - С. 10 - 11.

82. Никольский В.В., Ханмамедов С.А., Ядрова М.В. Пьезоэлектрический привод вискозиметра // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. - Одесса: ОНМА, 2003. - Вып. 8. - С. 64 - 71.

83. Никольский В.В. Пьезоэлектрические вискозиметры // Материалы 10-й международной конференции по автоматическому управлению. - Севастополь: СевГТУ, 2003. - С. 82.

84. Никольский В.В., Ханмамедов С.А. Ротационные вискозиметры // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: наук. - техн. журнал - Хмельницький, 2003. - №1 - С. 38-41.

85. Никольский В.В. Моделирование процессов в вискозиметрах с пьезоэлектрическим приводом // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы: науч. - техн. журнал - Херсон: ХГТУ. - 2004. - №2 (14) - С. 60 - 67.

86. Никольский В.В., Сандлер А.К. Моделирование процессов в вискозиметре с пьезоэлектрическим приводом // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы: науч. - техн. журнал - Херсон: ХГТУ, 2003. - №1(11) - С. 95-100.

87. Алахвердиев А.М., Кулиев Е.Н. Связанные неустановившиеся колебания пьезокерамических дисковых колец. - В кн: Газовая волновая динамика. М., МГУ, 1979. - С. 153-159.

88. Катц Г.В. Магнитные и диэлектрические приборы. - М.: Энергия, 1965. - 416 с.

89. Кулиев Ю.Н., Усов А.А., Шермергор Т.Д. К теории связанных колебаний толстых пьезокерамических пластин. - В кн.: Физика микроэлектронных приборов. М.: МИЭТ, 1981. - С. 20-40.

90. Мэзон У. Физическая акустика. - М.: Мир, 1966. - Т.1, Ч.А. - 592 с.

91. Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке. / Пер. с англ. под ред. А.В. Шубникова и С.Н. Ржевского. - М.: И.Л., 1952. - 448 с.

92. Афонин С.М. Частотные характеристики пьезопреобразователей, совершающих продольные колебания по длине. - Труды МИЭТ, 1978. - Вып. 39. - С. 97-103.
93. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. - М.: Энергия, 1976. - 336 с.
94. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. - Л.: Машиностроение, 1986. - 295 с.
95. Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. - Л.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
96. Ерофеев А.А. Динамические свойства пьезоэлектрических трансформаторов и систем на их основе. - Автоматика и телемеханика, №2, 1979. - С. 163-172.
97. Ерофеев А.А., Ушаков А.А., Акопян В.С. и др. Разработка и исследование систем электропитания и устройств автоматики на базе пьезоэлектронных трансформаторов и пьезокерамических матриц. Научно-технический отчет по теме «Финиш - «РВО» (№801705). ЛПИ им. М.И. Калинина. - Л.: ЛПИ, 1982. - 430 с.
98. Плужников В.М., Семенов В.С. Пьезокерамические твердые схемы. - М.: Энергия, 1971. - 168 с.
99. Климов В.В., Дидковская О.С., Савенкова Г.Е. и др. Разработка и исследование новых пьезокерамических материалов. - В кн.: Титанат бария. - М.: Наука, 1973, - С. 209-214.
100. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. - М.: Энергия 1978. - 248 с.
101. Растринин А.А. Системы экстремального управления. - М.: Наук, 1974. - 630 с.
102. Рубашкин И.Б. Адаптивные системы взаимосвязанного управления электроприводами. - М.: Энергия, 1975. - 160 с.
103. Тихонов А.А. Проектирование систем управления старт-стопным приводом. - Известия ВУЗов. Сер.: Приборостроение, т.24, №4, 1981, С. 26-29.
104. Высокоэффективные пьезокерамические материалы (Справочник). - Ростов н/Д: Книга, 1994. - 32 с.

105. НКТБ "Пьезоприбор" РГУ - <http://piezo.rsu.ru/>.

106. ОАО "Элпа" - <http://www.elpapiezo.ru>.

107. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.

108. Зенкович О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. /Под ред. Б.Е. Победри. - М.: Мир, 1975. - 250 с.

109. Щербин А.М. Исполнительные элементы прецизионных пьезоэлектрических приводов с увеличенным диапазоном перемещения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / МГТУ им. Н.Э. Баумана. - Москва, 1997. - 19 с.

110. Александровский Н.М., Кузин Р.Е., Егоров С.В. Адаптивные системы автоматического управления технологическими процессами. - М.: Машиностроение, 1970. - 272 с.

111. Ерофеев А.А., Мижжиддорж Н. Многомерное управление в пьезополупроводниковых преобразователях напряжения. - Ученые записки МГУ, №2(60), 1977, с. 87-107.

112. Виталинская Г.Н. и др. Исследование температурной стабильности свойств пьезокерамики на основе ЦТС. - Акустический журнал, т. 21, № 6, 1975, с. 845-849.

113. PI Ceramic GmbH Lindenstrasse / www.piceramic.de.

114. Вишневский В.С., През А.А. К вопросу о природе шумов пьезоэлектрического двигателя. В кн.: Надежность микроэлектронных схем и элементов. - Киев: Наукова думка, 1978, с. 179 - 182.

115. Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С. Пьезоэлектрические двигатели. - М.: Энергия, 1980. - 112 с.

116. Смажевская Е.Г., Фельдман А.Б. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Советское радио, 1971. - 199 с.

117. Зайцев Е.А., Морозов Е.М., Савенкова Г.Е. Влияние облучения на диэлектрические и электромеханические свойства пьезокерамики на основе ЦТС. - В кн.: Новые пьезо- и сигнетоматериалы и их применение. - М.: МДНТП, 1975, - с. 128-131.

118. Глоzman И.А. Пьезокерамика. - М.: Энергия, 1972. - 288 с.

119. Майерс Дж.К., Действие ядерного излучения на полупроводниковые приборы. - Электроника, т. 51, № 6, 1978, с. 53-57.
120. Под редакцией Ладычина Е.А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. - М.: Советское радио, 1980. - 224 с.
121. Порицкий О.В., Сытник А.Т., Михалец П.М. и др. Справочник по технике магнитной записи. / Под ред. Порицкого О.В., Травникова Е.Н. - Киев: Техніка, 1981, - 319 с.
122. Пасынков Р.Е., Серова И.А., Буянов Е.А. и др. Стабильность параметров пьезокерамики на основе ЦТС. - В кн.: Современные достижения в области конденсаторных сегнето- и пьезоэлектрических материалов и опыт по их использованию в промышленности. Л., ЛДНТП, 1981, с. 52-58.
123. Никольский В.В. Сандлер А.К. Моделирование свойств тиксотропных жидкостей в среде ELECTRONICS WORKBENCH // Вестник СевНТУ Автоматизация процессов и управление: науч. - техн. сб. - Севастополь: СевНТУ, 2004. - Вып. 57. - С. 159 - 162.
124. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1972. - 768 с.
125. Гузенко А.И. Основы теории автоматического регулирования. - М.: Высшая школа, 1967. - 408 с.
126. Иващенко Н.И. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. - М.: Машгиз, 1962. - 628 с.
127. Алтоиз Б.А., Ханмамедов С.А. Трибологические особенности граничных смазочных слоев судовых топлив и масел // Судовые энергетические установки: научн.-техн. Сб. - 2003. - Вып. 9. - Одесса: ОНМА. - С. 80-86.
128. Лавриненко В.В. Теория фрикционного контакта пьезоэлектрического двигателя // Диэлектрики и полупроводники: науч.-техн. сб. - Киев: КПИ, 1985. - Вып. 28. - С.26-33.
129. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов. - 10 - е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1986. - 416 с.

130. Бать М.И., Джанилидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. / Под ред. Д.Р. Меркина. Т. 1. Статика и кинематика. - 8 -е изд., перераб. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. - 504 с.

131. Бать М.И., Джанилидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. / Под ред. Д.Р. Меркина. Т. 2. Динамика. - 7 -е изд., перераб. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. - 560 с.

132. Кириченко В.А., Терещенко Г.Г. Расчет пьезоэлемента привода аппаратуры магнитной записи. // Диэлектрики и полупроводники: науч.-техн. сб. - Киев: КПИ, 1977. - Вып. 12. - С. 27-32.

133. Кириченко В.А. Физические явления, протекающие в пьезоэлектрическом двигателе и методика его расчета. // Техника средств связи. Сер.: Общетеchnическая. - 1982. - Вып. 2(14). - С. 124-132.

134. Электромагнитные и электромашинные устройства автоматики / В.С. Подлипенский, В.Н. Петренко. - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. - 592 с.

135. Давлеталиев Д.А. Исследование пьезодвигателей и разработка устройств адаптивного управления на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / ЛПИ. - Л.: 1985. - 217 с.

136. Плавинский Е.Б., Никитенко И.В., Никольский В.В., Поповский А.Ю., Крохмаль Д.Ю., Глазева О.В. Измерения вязкости жидких сред пьезоэлектрическим вискозиметром // Судовые энергетические установки: науч. - техн. сб. - Одесса: ОГМА, 2001. - Вып. 6. - С. 61 - 62.

137. Плавинский Е.Б., Никольский В.В., Цубенко А.С. Пьезоэлектрический вискозиметр // Судовые энергетические установки: науч. - техн. сб. - Одесса: ОНМА, 2003. - Вып. 8. - С. 130 - 132.

138. Кромм Е.Б., Никольский В.В., Цубенко А.С. Пьезоэлектрический вискозиметр // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки: зб. наук. праць. - Одеса: ОДАУ, 2004. - Вип. 24. - С. 125 - 128.

139. Нікольський В.В. Деклараційний патент України, МКІ 7 G01N11/10 Вискозиметр. - № 20031211819; Заявл. 18.12.2003; Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.

140. Никольский В.В. Датчики контроля размера // 4 - та Українська конференція з автоматичного керування (Автоматика -97). - Черкаси: ЧІТІ, 1997. - Т.4 - С. 107.

141. Никольский В.В. Датчики контроля размеров деталей // Перша міжнародна конференція "Наука і освіта 98". - Дніпропетровськ, 1998. - Т.9 - С. 378.

142. Никольский В.В., Сандлер А.К., Стеценко М.С. Пьезоэлектрические датчики перемещений // Материалы 11-й международной конференции по автоматическому управлению. - Киев: НУХТ, 2004. – Т.2. - С. 46.

143. Николенко А.А., Ядрова М.В., Никольский В.В. Пьезоэлектронная система управления лазерным лучом // Вісник Черкаського державного технологічного університету: збірник наук. праць. - Черкаси: ЧДТУ, 2005. - №3. - С. 193 – 195.

144. Нікольський В.В. Деклараційний патент України, МКІ 7 G01N11/10 П'єзоелектричний віскозиметр. - № 2003109671; Заявл. 28.10.2003; Опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9.

145. Нікольський В.В. Деклараційний патент України, МКІ 7 G01N11/10 Віскозиметр. - № 2003054350; Заявл. 15.05.2003; Опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1

146. Нікольський В.В. Деклараційний патенту на корисну модель України, МКІ 7 G01N11/10 Віскозиметр. - №u2005 00629; Заявл. 24.01.2005; Опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.

147. Тодорцев Ю.К., Никольский В.В. Оценка вязкости топлива в судовых энергетических установка при использовании тахометрических расходомеров // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. – Ів.-Франковськ, 200. – С. 64.

148. Сандлер А.К. Моделирование процессов в волоконно-оптическом акселерометре // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы: науч. - техн. журнал - Херсон: ХГТУ. - 2004. - №2 (14) - С. 68 - 73.

149. Пьезоэлектрические безредукторные низкооборотные двигатели общего назначения - www.ee.ntu-kpi.kiev.ua

150. Петренко С.Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. – К.: «Корнійчук», 2002. – 96 с.

151. Никольский В.В. Оценка реологических свойств тиксотропных жидкостей реометрами с пьезоприводом // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. - Одесса: ОНМА, 2005. - Вып. 10. - С. 61 - 64.
152. Никольский В.В. Телефонные номеронабиратели // Придніпровський науковий вісник. Технічні науки. - Дніпропетровськ, 1998. - №6(73). - С. 48-49.
153. Никольский В.В., Джагунов Р.Г. К вопросу о повышении эффективности электромеханических кнопок // Придніпровський науковий вісник. Технічні науки. - Дніпропетровськ, 1998. - №90(157). - С. 40-42.
154. Никольский В.В. Сенсорный переключатель каналов. // Придніпровський науковий вісник. Технічні науки: Наук. журнал. – 1998. - №123 (190). – Дніпропетровськ: Наука і освіта – С.96 – 99.
155. Джагунов Р.Г., Никольский В.В. Биполярные пьезоэлектрические сенсорные генераторы // 4 - та Українська конференція з автоматичного керування (Автоматика -97). -Черкаси: ЧІТІ, 1997. - Т.4 - С. 81.
156. Джагунов Р.Г., Никольский В.В. Пьезоэлектрические коммутаторы // Информатика и связь: Збірник наукових праць. - Київ: Техніка. - 1997. - С. 126-128.
157. Никольский В.В. Пьезоэлектрическая кнопка с оптическим выходом // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. - Одесса: ОГМА, 2000. - Вып. 5. - С. 54 - 56.
158. Никольский В.В., Сандлер А.К., Антощук С.Г., Глазева О.В. Безразборная видеодиагностика // Інформаційно-керуючі системи і комплекси: Матеріали 1-ї Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених. - Миколаїв: НУК, 2004. - С. 43-45.
159. Сандлер А.К., Никольский В.В. Использование волоконно-оптических устройств для предотвращения техногенных катастроф на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. - Одесса: ОНМА, 2004. - Вып. 9. - С. 82 - 90.
160. Сандлер А.К. Применение нового метода модуляции в волоконно-оптических датчиках // Судовые энергетические установки: науч. - техн. сб. - Одесса: ОГМА, 2000. - Вып. 5.- С. 108 – 110.

161. Никольский В.В. Сандлер А.К. Пьезооптические устройства как средство повышения достоверности диагностической информации // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы: науч. - техн. журнал - Херсон: ХГТУ. - 2003. - №2 (12) - С. 49 - 53.

162. Сандлер А.К., Никольский В.В. Разработка пьезооптического акселерометра для диагностирования энергоустановок // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: збірник наук. праць. - Кіровоград: КДТУ, 2004. - Вип. 14. - С. 329-338.

163. Сандлер А.К., Никольский В.В. Оптимизация процесса модуляции в волоконно-оптических акселерометрах // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. - Одесса: ОНМА, 2004. - Вып. 9. - С. 73 - 81.

164. Никольский В.В., Плавинский Е.Б., Ерофеев С.А. Области применения пьезокерамики в судовых автоматизированных системах управления // Матеріали 54 наук.-метод. конференції проф.-виклад. складу та курсантів. - Одеса: ОНМА, 2002 - С. 44.

165. Стерлинг Д.Д. Волоконная оптика. - М.: Лори, 1998. - 288 с.

166. Никольский В.В., Сандлер А.К. Деклараційний патент України, МКІ 7 G01N11/00 П'єзооптичний акселерометр № 20031211820; Заявл. 18.12.2003; Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.

167. Моек Е., Штрикерт Х. Техническая диагностика судовых машин и механизмов. - Л.: Судостроение, 1986. - С. 97-103.

168. Попков В.И., Мышинский Э.Л., Попков О.И. Виброакустическая диагностика в судостроении- Л.: Судостроение, 1986. – С. 236-246.

169. Новицкий П.В. Электрические измерения неэлектрических величин. - Л.: Энергия, 1975. – С. 272-280.

170. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

171. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 302 с.

172. Голиков В.А. Научные основы управления микроклиматом судна. – Одесса: ОГМА, 1999. - 321 с.
173. Голиков В.А., Бурденко А.Ф. Цюпко Ю.М. Математическое моделирование процессов теплообмена организма человека с окружающей средой // Судовые энергетические установки: науч. - техн. сб. - Одесса: ОГМА, 2003. - Вып. 8. - С. 104-115.
174. Никольский В.В., Цюпко Ю.М. Применение пьезоэлектрических датчиков в системе кондиционирования воздуха судовых систем микроклимата // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы: науч. - техн. журнал - Херсон: ХГТУ. - 2003. - №2 (12) - С. 135 - 137.
175. Джагулов Р.Г., Борисюк А.М., Никольский В.В. Ультразвуковой пьезотрансформаторный датчик влажности // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. –1999. – Вып. 4. – Одесса: ОГМА. – С.58-64.
176. Пьезоэлектрические резонаторы: Справочник /В.Г. Андросова, Е.Г. Бронникова, А.М. Васильев и др.; Под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Позднякова. - М.: Радио и связь, 1992. - 392 с.: ил.
177. Джагулов Р.Г., Борисюк А.М. Акустические мостовые датчики влажности и температуры // Международная научно-техническая конференция "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления(Датчик - 93)": Тезисы докладов. - Гурзуф, май 1993. - Часть 2. - С. 258-259.
178. Джагулов Р.Г., Борисюк А.М. Акустические измерительные преобразователи для управления экологическим состоянием окружающей среды // 1-я Украинская конференция по автоматическому управлению (Автоматика - 94): Тез. докл. - Киев, май 1994. - Часть 2. - С. 273.
179. Никольский В.В. Ультразвуковой биполярный пьезоэлектрический излучатель // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. - Одесса: ОГМА, 2001. - Вып. 6.- С. 79 – 80.
180. Джагулов Р.Г., Никольский В.В. Биполярные пьезоэлементы // Матеріали першої міжнародної конференції “Наука і освіта 98”. - Дніпропетровськ, 1998. - Т. 9. - С. 379.

181. Джагунов Р.Г., Никольский В.В. Биполярные пьезоэлементы // Матеріали Міжнародного науково-практичного симпозіуму “Проблеми суднобудування: стан, ідеї, рішення”. - Миколаїв: УДМТУ, 1997. - С. 219 - 220.

182. Балковська Ю.Ю. Методи лінеарізації амплітудно-частотних характеристик пьезоелектричних перетворювачів механічних величин: Автореф. Дис. ...канд. Техн. наук: 05.13.05 / ОНПУ. – Одеса, 2003. – 19 с.

ДОДАТКИ

Додаток А



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 71294 A

(51) 7 G01N11/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на винахід

видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного Департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) 20031211819
(22) 18.12.2003
(24) 15.11.2004
(46) 15.11.2004. Бюл. № 11

(72) Нікольський Віталій Валентинович
(73) Нікольський Віталій Валентинович

(54) ВІСКОЗИМЕТР



Додаток Б



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 2925

(51) 7 G01N11/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на корисну модель

видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) 2003109671

(22) 28.10.2003

(24) 15.09.2004

(46) 15.09.2004. Бюл. № 9

(72) Нікольський Віталій Валентинович

(73) Нікольський Віталій Валентинович

(54) П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ВІСКОЗИМЕТР



Додаток В



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 63619 A

(51) 7 G01N11/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на винахід

видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного Департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) 2003054350

(22) 15.05.2003

(24) 15.01.2004

(46) 15.01.2004. Бюл. № 1

(72) Нікольський Віталій Валентинович

(73) Нікольський Віталій Валентинович

(54) ВІСКОЗИМЕТР

УКРАЇНА

Додаток Д



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) **8128**

(51) 7 G01N11/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ**Деклараційний патент
на корисну модель**видано в відповідь до Закону України
"Про захорону прав на винаходи і корисні моделі"Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) u 2005 00629

(22) 24.01.2005

(24) 15.07.2005

(46) 15.07.2005. Бюл. № 7

(72) Нікольський Віталій Валентинович

(73) Нікольський Віталій Валентинович

(54) ВІСКОЗИМЕТР

Додаток Ж



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 71295 A

(51) 7 G01M11/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на винахід

видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного Департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) 20031211820

(22) 18.12.2003

(24) 15.11.2004

(46) 15.11.2004. Бюл. № 11

(72) Нікольський Віталій Валентинович, Сандлер Альберт Кирилович

(73) Нікольський Віталій Валентинович, Сандлер Альберт Кирилович

(54) П'ЄЗООПТИЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

УКРАЇНА

Додаток 3



ПРОТОКОЛ сравнительных испытаний вискозиметров

С 1 по 12 декабря 2004 г. в аналитической лаборатории по разработке приборов контроля качества ЗАО НПО «Пищепромавтоматика» представителем Одесской национальной морской академии к.т.н. Никольским В.В. и заведующим лабораторией ЗАО НПО «Пищепромавтоматика» к.т.н. Багдасарян Л.Б. были проведены сравнительные испытания опытного образца вискозиметра ВП.1, разработанного в Одесской национальной морской академии.

Целью испытаний является сравнительное определение метрологических характеристик вискозиметра ВП.1, а также возможности использования вискозиметра ВП.1 для измерения вязкости моторных топлив и машинных масел, использующихся для работы в судовых энергетических установках в тонком слое не более 20 мкм.

Вискозиметр ВП.1 является вискозиметром на соосных цилиндрах, в котором использован неререверсивный пьезоэлектрический двигатель ДЭП-28(2), выпускаемый НИИ Прикладной электроники НТУУ «КПИ», отличительной особенностью и преимуществом которого является высокая надежность, изменение частоты вращения в диапазоне 0-300 об/мин, что позволяет конструктивно разработать и использовать его вискозиметре на соосных цилиндрах для измерения вязкости в тонких слоях (10-20 мкм).

Испытания проводились в следующем порядке:

В соответствии с РД 50-416 «Вискозиметры стеклянные капиллярные образцовые». Методы и средства поверки были подготовлены пробы различной вязкости в диапазоне от 30 до 170 стокс.

В качестве образцовых средств использовались масла для прокатных станков П-28-60,6, электроизоляционное синтетическое масло октол – 39,4, масло для прокатных станков П-28-41,4.

В качестве сравнительного средства измерения был использован ротационный вискозиметр ВА.1, выпускаемый в НПО «Пищепромавтоматика» для определения вязкости пищевых сред.

Результаты сравнительных измерений приведены в таблице 1.

В результате проведенных испытаний установлено следующее:

1. Технические характеристики разработанного вискозиметра соответствуют требованиям, необходимым для измерения вязкости масел и топлив в тонких слоях в судовых энергетических установках.

Абсолютная погрешность измерения по диапазону составила не более 4 стокса;

Время измерения вязкости не более 20 с;

Потребляемая мощность не более 5 Вт.

2. Разработанный вискозиметр может быть использован для измерения вязкости тиксотропных жидкостей в тонких слоях (10-20 мкм).

Зав. отделом приборов контроля качества
ЗАО НПО «Пищепромавтоматика»

Зав. лабораторией ЗАО НПО
«Пищепромавтоматика», к.т.н.

Доцент кафедры ТАУ и ВТ ОНМА, к.т.н.

В.М. Добрепкий

Л.Б. Багдасарян

В.В. Никольский

Додаток К

Таблица 1. Результаты сравнительных измерений ВП.1 и ВА.1

Тип жидкости	Вязкость среды, стокс	ВП.1, стокс	ВА.1, стокс	Абсол. погрешность		t среды, °C
				ВП.1	ВА.1	
П-28 – 60,6	40	38	47	2	7	20
П-28 – 60,6	40	43	45	3	5	20
П-28 – 60,6	40	36	44	4	4	20
П-28 – 60,6	31	35	35	4	4	25
П-28 – 60,6	31	33	35	2	4	25
П-28 – 60,6	31	35	31	4	0	25
П-28 – 60,6	31	33	33	2	2	25
П-28 – 60,6	31	27	33	4	2	25
П-28 – 60,6	31	31	27	0	4	25
Октол – 39,4	170	166	165	4	5	25
Октол – 39,4	170	168	162	2	8	20
Октол – 39,4	170	169	179	1	9	20
Октол – 39,4	170	174	170	4	0	20
Октол – 39,4	170	174	178	4	8	20
Октол – 39,4	170	171	175	1	5	20
Октол – 39,4	170	166	166	4	4	20
Октол – 39,4	170	168	167	2	3	20
Октол – 39,4	170	174	173	4	3	20
Октол – 39,4	170	174	171	4	1	20
П-28-41,4	60	64	62	4	2	20
П-28-41,4	60	63	52	3	8	20
П-28-41,4	60	56	53	4	7	20
П-28-41,4	60	57	65	3	5	20
П-28-41,4	60	58	60	2	0	20
П-28-41,4	60	64	59	4	1	20
П-28-41,4	60	64	66	4	6	20
П-28-41,4	60	62	61	2	1	20
П-28-41,4	60	56	67	4	7	20
П-28-41,4	60	56	67	4	7	20

Зав. лабораторией ЗАО НПО
«Пищепромавтоматика», к.т.н.

Доцент кафедры ТАУ и ВТ ОНМА, к.т.н.



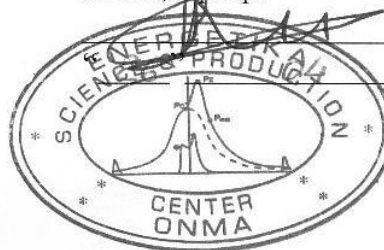
Л.Б. Багдасарян

В.В. Никольский

Додаток Л

"УТВЕЖДАЮ"
директор НПЦ "Энергетика"
к.т.н., проф.

А.А. Голиков
2005



АКТ

о внедрении реометра на соосных цилиндрах с пьезоэлектрическим приводом, разработанного Никольским Виталием Валентиновичем в диссертационной работе "ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПРИСТРОЇВ П'ЕЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ ДЛЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ".

Настоящий акт составлен в том, что в период с декабря 2004 г. по настоящее время реометр на соосных цилиндрах с пьезоэлектрическим приводом, выполненном на нереверсивном пьезодвигателе с пассивным ротором с рабочим зазором между цилиндрами в 10 мкм внедрен в теплотехнической лаборатории НПЦ "Энергетика" ОНМА для определения реологических характеристик топлива и масел в диапазоне $\tau=0,1\div 10^4$ мПа, $\dot{\gamma}=1\div 10^3$ с⁻¹, используемых в судовых энергетических установках.

Настоящий акт не является основанием для взаимно-финансовых расчетов.

Зам. директора НПЦ "Энергетика"
по науке д.т.н., профессор

С.А. Ханмамедов

Нач. теплотехнической лаборатории
НПЦ "Энергетика"

Л.П. Царев

Додаток М

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
директор ОСРЗ „Україна”



Ю. В. Фуртатов

04 2005 р.

АКТ

впровадження результатів дисертації
Нікольського Віталія Валентиновича

ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПРИСТРОЇВ П'ЕЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ ДЛЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ в систему паливо підготовки заводського парового котла

Складено в тому, що результати докторської дисертації Нікольського В.В., а саме розроблена конструкція віскозиметру з п'єзоелектричним приводом, на яку подана заява на отримання патенту на корисну модель України № u200500629, була застосована в систему підготовки палива заводського парового котла, що дозволило використовувати паливо низької в'язкості та зберігати до 3000 грн. на рік за рахунок використання важкого пального.

Цей акт не є основою для взаємно-фінансових розрахунків.

Начальник котельної

 /В.К. Пустомельник/

Економіст I кат.

 /І.П. Максимов/

Додаток Н

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший проректор ОНМА

Професор

В.К. Голубєв

04 2005

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача
Нікольського Віталія Валентиновича

на тему

**ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПРИСТРОЇВ П'ЕЗОАКТИВНОЇ МЕХАНІКИ ДЛЯ
СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

Складен в тому, що результати докторської дисертації Нікольського В.В. впроваджено в учбовий процес на кафедрі "Теорія автоматичного управління і обчислювальна техніка", а саме:

- в лекційному і лабораторному практикумі "Електроніка та мікросхемотехніка"
- елементи функціональної електроніки: п'єзоелектричний привід виконуючих механізмів, прямий та зворотній режим роботи п'єзоелементів;
- в лекційному і лабораторному практикумі "Інформаційно-вимірювальні системи"- віскозиметр на співвісних циліндрах з п'єзоелектричним приводом для вимірювання в'язкості палива та мастил.

Декан факультета автоматики
д.т.н., професор

Л.В. Вишнівський

Завідуючий кафедрою ТАУ і ОТ
д.т.н., професор

С.І. Горб

доцент кафедри ТАУ і ОТ, к.т.н.,
викладач дисципліни
"Інформаційно-вимірювальні системи"

Д.Ю. Крохмаль

доцент кафедри ТАУ і ОТ, к.т.н.,
викладач дисципліни
"Електроніка та мікросхемотехніка"

В.В. Нікольський



Додаток Р

АКТ

реализации результатов диссертации
Никольского Виталия Валентиновича
на соискание ученой степени доктора технических наук

«Основы создания устройств пьезоактивной механики для систем управления
двигателями внутреннего сгорания»

« 7 » 12 2005 г.

г. Одесса

Настоящим подтверждается перспективность применения на транспортных судах разработанных Никольским В.В. реометров на соосных цилиндрах с пьезоэлектрическим приводом в системах топливоподготовки судовых малооборотных дизелей, использующих тяжелые моторные топлива. Это позволит снизить расход топлива, уменьшить выброс вредных веществ в окружающую среду и увеличить ресурс работы элементов топливной аппаратуры.

Внедрение реометра планируется в регуляторе вязкости судна «Виктор Кибенок».

Председатель правления
судоходной компании «УКРТАНКЕР»



Т.А. Султанов