

# АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ ГЕНЕРУВАННЯ, ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА СПОЖИВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

SEARCH

ANALYSIS

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

**Апаратно-програмне  
забезпечення моніторингу  
об'єктів генерування,  
транспортування та  
споживання теплової енергії**

*За редакцією чл.-кор. НАН України,  
В.П. Бабака*

КИЇВ 2016

УДК 681.518.5:504.064.36

ББК 31.3

A741

Автори:

В.П. Бабак, В.С. Берегун, З.А. Бурова, Л.Й.Воробйов,  
Л.В. Декуша, О.Л. Декуша, А.О.Запорожець, С.І.Ковтун,  
О.І. Красильніков, О.О.Назаренко, Т.А. Полобюк

Рецензенти:

В.П. Малайчук, д-р техн. наук, проф.,  
Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара;  
М.В. Мислович, д-р техн. наук, проф.,  
Інститут електродинаміки НАН України

*Рекомендовано до друку вченою радою Інституту технічної теплофізики  
НАН України*

A741 Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування,  
транспортування та споживання теплової енергії: Монографія /  
В.П. Бабак, В.С. Берегун ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака  
/ - К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2016. – 298 с.  
ISBN 978-966-02-7967-4

В монографії розглянуті сучасні методи і засоби моніторингу теплоенергетичного обладнання на етапах генерування, транспортування та споживання теплової енергії, методи та засоби контролю якості палива, нові перетворювачі теплового потоку для систем моніторингу та діагностики енергетичного обладнання, моделі акустичних діагностичних сигналів та методи їх статистичного опрацювання, можливості створення систем шумової діагностики на прикладі пошуку витоку рідини в трубопроводах, викладені основні результати дослідження їх характеристик, розглянуті особливості програмного забезпечення розроблених систем та приклади апаратурної реалізації.

Для наукових співробітників, інженерів, а також викладачів, аспірантів і студентів вищих навчальних закладів, що займаються проблемами моніторингу та діагностики технічних об'єктів.

УДК 681.518.5:519.218

ББК 31.3

ISBN 978-966-02-7967-4

© В.П. Бабак, В.С. Берегун, З.А. Бурова,  
Л.Й.Воробйов, Л.В. Декуша, О.Л. Декуша,  
А.О.Запорожець, С.І.Ковтун, О.І. Красильніков,  
О.О.Назаренко, Т.А. Полобюк, 2016

© Інститут технічної теплофізики НАН України, 2016

## Зміст

Передмова .....	5
<b>Розділ 1. Стан та проблематика моніторингу об'єктів теплоенергетики .....</b>	<b>8</b>
1.1. Система тепlopостачання та експлуатаційна надійність її складових .....	8
1.2. Принципи побудови систем моніторингу в теплоенергетиці .....	19
1.3. Теплометричні прилади та системи моніторингу.....	27
1.4. Акустичні прилади та системи діагностування модулів теплоенергетичних установок .....	35
Література.....	46
<b>Розділ 2. Моделі діагностичних сигналів та методи їх статистичного опрацювання .....</b>	<b>51</b>
2.1. Моделі і діагностичні характеристики шумових сигналів .....	51
2.2. Моделі і діагностичні характеристики ритмічних сигналів.....	61
2.3. Оцінювання моментів і кумулянтів .....	70
2.4. Оцінювання щільності ймовірностей .....	78
2.5. Оцінювання кореляційно-спектральних характеристик .....	87
Література.....	98
<b>Розділ 3. Моделювання сенсорів теплового потоку та їх реалізація .....</b>	<b>102</b>
3.1. Моделювання температурного і теплового полів в сенсорах теплового потоку.....	102
3.2. Методи розрахунку параметрів сенсорів теплового потоку .....	110
3.3. Реалізація сенсорів теплового потоку .....	117
Література .....	129
<b>Розділ 4. Апаратно-програмний комплекс моніторингу .....</b>	<b>131</b>
4.1. Система збирання, реєстрування та опрацювання акустичних сигналів .....	131
4.2. Акустичні сенсори для шумової та вібродіагностики.....	142

4.3. Магніострикційні ультразвукові сенсори .....	153
4.4. Комп'ютерне моделювання шумових та ритмічних сигналів .....	161
4.5. Програмнезабезпечення систем моніторингу.....	170
Література.....	183
<b>Розділ 5. Методи та засоби моніторингу модулів теплогенеруючих установок.....</b>	<b>186</b>
5.1. Методи та засоби контролю якості палива .....	186
5.2. Моніторинг процесів спалювання палива .....	193
5.3. Методи і засоби моніторингу теплотехнічних (теплофізичних) параметрів і характеристик теплогенеруючих установок .....	206
Література .....	224
<b>Розділ 6. Моніторинг трубопроводів і теплових мереж .....</b>	<b>226</b>
6.1. Методи і засоби контролю втрат теплових мереж.....	226
6.2. Моделі акустичних сигналів витоків рідини в трубопроводах .....	235
6.3. Статистичний аналіз сигналів витоків рідини в трубопроводах .....	245
Література .....	262
<b>Розділ 7. Методи та засоби моніторингу теплоспоживання</b>	<b>265</b>
7.1. Методи і засоби моніторингу огорожувальних конструкцій будівель .....	265
7.2. Системи керування теплоспоживанням будівель.....	279
7.3. Побудова систем моніторингу теплоспоживання в масштабах мікрорайону та міста .....	291
Література .....	296

## ПЕРЕДМОВА

Забезпечення експлуатаційної надійності, довговічності і безпеки теплоенергетичного устаткування – складне завдання, яке пов'язане з організацією достовірного контролю роботи енергоустановок і з забезпеченням оптимальних умов їх експлуатації.

У монографії розглядаються теоретичні засади створення систем функціональної діагностики для контролю і діагностування теплоенергетичного устаткування в процесі його експлуатації, джерелом інформації в яких є шумові сигнали, що виникають у результаті природного функціонування об'єктів. Шумові сигнали є наслідком механічних, аеродинамічних, гідродинамічних і трибомеханічних процесів, що супроводжують роботу вузлів теплоенергетичного обладнання, і проявляються у вигляді акустичного, магнітного, електричного, теплового шуму або широкосмугових вібрацій.

Більшість сучасних пасивних систем функціональної діагностики базується на кореляційно-спектральних методах статистичного аналізу діагностичних сигналів, які є вичерпними для гауссівських сигналів. Однак аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень показав, що шумові сигнали, як правило, є негауссівськими випадковими процесами і часто мають рівномірну спектральну щільність. Це обмежує можливості існуючих пасивних систем діагностики, заснованих на методах кореляційного і спектрального аналізу.

Показано, що один із перспективних напрямів подальшого розвитку методів і засобів контролю і діагностування об'єктів теплоенергетики полягає у вдосконаленні існуючих та розробці нових пасивних систем діагностики, які базуються на сучасних методах теорії випадкових процесів і статистичної обробки шумових сигналів.

Розглянуті шляхи створення нових систем шумової діагностики для визначення технічного стану елементів теплоенергетичного обладнання, підвищення їх чутливості та достовірності діагностування потребує вирішення таких основних завдань:

- побудові адекватних математичних моделей шумових сигналів, що супроводжують роботу елементів теплоенергетичного обладнання та відображають фізику їх виникнення;
- визначенні найбільш інформативних характеристик та параметрів, які дозволяють контролювати та діагностувати технічний стан елементів теплоенергетичного обладнання;

- розробленні статистичних методів та програмного забезпечення для експериментального визначення нових інформативних характеристик та параметрів.

Під час проектування та розробки систем моніторингу, ядром яких є інформаційно-вимірювальні системи, одним з основних питань є обґрунтування множини діагностичних ознак. Аргументовано вибрати такі ознаки дозволяє побудова і аналіз математичних моделей об'єктів моніторингу та діагностики або фізичних процесів, що супроводжують роботу цих об'єктів. Такі моделі розробляються на основі апріорних даних доповнених певними припущеннями. Іншими словами, модель досліджуваного процесу є первинною категорією, а опрацювання та аналіз результатів експериментальних даних – вторинною.

Моніторинг на основі аналізу випадкових процесів та полів, включаючи і шумову діагностику, базується, в першу чергу, на відповідним чином побудованих математичних моделях, які встановлюють зв'язок між фактичним технічним станом об'єкта і деякими характеристиками та параметрами, отриманими в результаті опрацювання вимірювальної інформації. Ця математична модель є випадковим процесом або випадковим полем з деякого класу, якій притаманні певні властивості, що дозволяють оцінити дану модель за допомогою статистичних чи інших методів на основі вимірювання та опрацювання однієї або більше реалізацій процесу (поля). При побудові імовірнісних математичних моделей фізичних процесів у вузлах теплоенергетичного обладнання найзручніше використовувати класи лінійних випадкових процесів. Такі моделі є конструктивними, тобто кожен їх параметр має конкретний фізичний зміст. Крім того, властивості лінійних випадкових процесів дозволяють отримувати аналітичні вирази для моментів розподілу досліджуваного процесу, будувати його скінченномірні функції розподілу або характеристичні функції. На основі аналізу таких моделей можна теоретично обґрунтувати діагностичні ознаки, визначати допустимі межі їх зміни (діагностичні простори), будувати ефективні вирішальні правила щодо виявлення та класифікації дефектів. Крім того такі моделі дозволяють скористатися методами імітаційного комп'ютерного моделювання. Такий підхід дозволяє скоротити витрати часу і коштів на проведення фізичного моделювання процесів моніторингу або експериментальних досліджень на реальному обладнанні. В роботі проаналізовані математичні моделі шумових і ритмічних сигналів, які виникають при роботі об'єктів теплоенергетики, викладені основні результати дослідження їх характеристик; розглянуті методи і засоби моніторингу об'єктів теплоенергетики.

Виробничий цикл тепlopостачання складається з багатьох елементів, відповідно, системи моніторингу та засоби вимірювальної техніки повинні охоплювати та вирішувати широкий спектр завдань, починаючи з контролю якості палива і процесу його спалювання, передавання теплової енергії та закінчуючи визначенням тепловтрат у будинках і керуванням теплоспоживання.

Монографія складається з семи розділів.

У розділі 1 наведена коротка характеристика об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії, розглянуті принципи побудови систем моніторингу теплоенергетичного обладнання, проведений порівняльний аналіз апаратного забезпечення на базі теплометричних та акустичних приладів.

У розділі 2 розвинуті теоретичні засади шумової діагностики, систематизовані основні конструктивні моделі ритмічних та шумових сигналів, розглянуті їх основні імовірнісні характеристики та наближені методи визначення щільності ймовірностей інформаційних сигналів.

У розділі 3 розглянуті методи моделювання сенсорів теплового потоку на прикладі сенсорів виду допоміжної стінки та методи розрахунку їх параметрів.

У розділі 4 описується апаратно-програмний комплекс моніторингу. Наведені приклади використання акустичних та магнітострикційних сенсорів і програмного забезпечення систем.

У розділі 5 наведені методи та засоби моніторингу модулів теплогенеруючих установок, в тому числі для контролю якості палива, процесів спалювання палива в котлоагрегатах, теплотехнічних (теплофізичних) параметрів і характеристик.

У розділі 6 розглянуто моніторинг трубопроводів і теплових мереж.

У розділі 7 розглянуті питання моніторингу огорожувальних конструкцій будівель та побудови інтелектуальних систем керування теплоспоживанням. Наведені приклади реалізації таких систем.

Автори висловлюють щире подяку рецензентам – д. т. н., проф. В.П. Малайчуку (Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара) та д. т. н., проф. М.В. Мисловичу (Інститут електродинаміки НАН України) за зауваження, рекомендації та допомогу у формуванні рукопису.

*Київ, осінь 2016*

*Від авторів*



## 1. СТАН ТА ПРОБЛЕМАТИКА МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

### 1.1. Система теплопостачання та експлуатаційна надійність її складових

**Система теплопостачання.** Одне із головних завдань теплоенергетики полягає в забезпеченні економіки та населення країни тепловою енергією. Споживачами тепла є підприємства, організації, територіально відособлені цехи, будівельні майданчики, квартири [1–4]. В табл. 1.1 наведено дані щодо споживання теплової енергії в Україні за секторами споживання [5].

Таблиця 1.1. Споживання теплової енергії в Україні (млн Гкал)

Сектор споживання	Роки								
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Промисловість	78,4	74,6	69,5	71,0	55,3	65,6	80,7	80,1	77,5
Комунальний сектор	27,3	28,5	27,0	28,2	28,3	31,5	33,2	35,6	36,6
Населення	143,5	150,5	134,6	136,3	136,6	146,6	148,4	153,8	146,8
Інші галузі	24,0	23,5	24,6	25,2	26,7	28,6	35,0	36,8	36,6
<b>Всього</b>	<b>273,2</b>	<b>277,1</b>	<b>255,7</b>	<b>260,7</b>	<b>247,0</b>	<b>272,3</b>	<b>297,3</b>	<b>306,4</b>	<b>297,5</b>

Забезпечення споживачів теплом здійснюється *системою теплопостачання*, яка є сукупністю взаємозв'язаних енергоустановок (ГОСТ 19431–84) і має такі основні складові [2–4]:

- об'єкти генерування теплової енергії;
- об'єкти транспортування теплової енергії споживачам;
- система управління і регулювання постачанням теплової енергії.

Зупинимось на характеристиці основних складових системи теплопостачання.

**Об'єкти генерування теплової енергії.** До основних джерел теплової енергії належать теплові електричні станції, атомні електростанції, котельні установки, когенераційні установки, а також нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії.

*Теплова електрична станція* (ТЕС) – це сукупність взаємозв'язаних установок, загальним технологічним призначенням яких є перетворення хімічної енергії палива в електричну енергію або в електричну енергію та тепло (ГОСТ 19431–84). Основними елементами ТЕС є котельна установка, парова або газова турбіна та генератор еле-

ктроенергії. У наш час переважають паротурбінні ТЕС. Розрізняють два типи паротурбінних теплових станцій – *конденсаційні електричні станції* (КЕС), призначені для виробництва електричної енергії, і *теплофікаційні станції*, або *теплоелектроцентралі* (ТЕЦ), в яких здійснюється комбіноване виробництво електричної енергії та тепла.

Одержання теплоти можливо також на *атомних електростанціях* (АЕС), в яких енергія поділу ядер атомів перетворюється в електричну енергію або в електричну енергію та тепло. Пара на АЕС може бути отримана як у самому реакторі (одноконтурні АЕС), так і в парогенераторі (двоконтурні та триконтурні АЕС).

*Котельна установка* є пристроєм для одержання водяної пари або гарячої води [1, 2] і складається з одного або декількох котлів та допоміжного устаткування.

Котел – це конструктивно об'єднаний в одне ціле комплекс пристроїв для одержання пари або для нагрівання води під тиском за рахунок теплової енергії від спалювання палива, при протіканні технологічного процесу або перетворення електричної енергії в теплову енергію (ГОСТ 23172–78). До основних елементів котла відносяться [1, 3] топка, теплообмінні поверхні, пароперегрівник, економайзер, повітропідігрівник. У водогрійному котлі теплообмінні поверхні, пароперегрівник і економайзер відсутні.

До допоміжного устаткування котельних установок відносяться система паливоподачі, тягодуттьові установки, водопідготовчі пристрої, живильні пристрої, живильні трубопроводи, паропроводи, арматури трубопроводів, пристрій для видалення шлаків і золи, золоуловлюючі пристрої, пристрої для теплового контролю, пристрої для автоматичного керування роботою котельної установки.

Стаціонарні котли, призначені для вироблення пари, яка використовується технологічними та побутовими споживачами, стандартизовані за параметрами і потужністю. До основних параметрів котлів відносяться (ГОСТ 3619–89) номінальна продуктивність, номінальний тиск пари, температура перегрітої пари, номінальна температура живильної води, коефіцієнт корисної дії (ККД) брутто.

*Когенераційні установки* призначені для комбінованого виробництва електричної та теплової енергії [6]. В когенераційних установках здійснюється одночасне ефективне виробництво в єдиному технологічному процесі декількох видів енергії та енергетичних товарних продуктів – електричної та теплової енергії, промислового холоду, стиснених газів та ін., необхідних для потреб окремих підприємств, поселень, міст, регіонів.

Основними вузлами базової схеми когенераційної установки є [6, 7] тепловий двигун, електричний генератор і теплоутилізатор. Електрична енергія виробляється тепловим двигуном і електричним генератором, тепла – тепловим двигуном і теплоутилізатором. До складу когенераційної установки входить також допоміжне устаткування – тягодуттьові машини, трубопроводи та системи керування.

До основних параметрів когенераційної установки відносяться тепла та електрична потужність установки, ККД при виробленні електроенергії, коефіцієнт використання палива, температура вихлопних газів та їх кількість при номінальній потужності [6, 8].

У табл. 1.2 наведено дані по розподілу загального обсягу виробленої в Україні теплової енергії в системі теплопостачання між різним тепловими джерелами [5].

Таблиця 1.2. Розподіл загального обсягу виробленої теплової енергії в Україні (млн Гкал)

Теплові джерела	Роки								
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Електростанції усіх типів, у т.ч. ТЕЦ та КГУ	59,8	58,7	56,3	55,9	55,2	54,3	51,8	48,6	43,9
Котельні	126,7	121,9	105,9	102,5	87,5	99,3	118,1	121,1	113,7
Електричні котли та теплові насоси	12,0	15,3	20,4	26,9	33,7	41,8	50,4	59,7	69,4
Індивідуальні генератори теплової енергії	76,2	84,2	73,0	76,4	74,9	79,6	78,6	80,2	73,2
Вторинні енергетичні ресурси	14,5	13,2	14,5	13,1	8,6	10,9	12,7	11,4	10,3
Інші джерела	3,1	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,2	4,3
<b>Всього</b>	<b>292,4</b>	<b>296,6</b>	<b>273,5</b>	<b>278,2</b>	<b>263,5</b>	<b>289,9</b>	<b>315,6</b>	<b>325,3</b>	<b>314,9</b>

Залежно від потужності джерела теплової енергії системи теплопостачання розділяються на централізовані, помірно централізовані, децентралізовані та автономні системи (ДБН В.2.5–39:2008).

В системах теплопостачання джерелами теплової енергії є:

- у централізованих системах теплопостачання – ТЕЦ і районні котельні потужністю більше 20 МВт;
- у системах помірно централізованого теплопостачання – квартальні котельні потужністю не менше 3 МВт і не більше 20 МВт;
- у системах децентралізованого теплопостачання – місцеві або групові котельні потужністю не менше 1 МВт і не більше 3 МВт;
- у системах автономного теплопостачання – котельні потужніс-

тю менше 1 МВт.

Потужність ТЕЦ по тепловому навантаженню складає 1000...2000 МВт [9]. На великих ТЕЦ електрична потужність може досягати 1500 МВт, а тепла – до 6000 МВт (5000 Гкал/год).

Джерела тепла при централізованому теплопостачанні від великих котельних обладнані паровими, водогрійними або комбінованими котельними установками. Теплова потужність міських і районних котельних складає від 116 (100) до 580...700 (500...600) МВт (Гкал/год), а квартальних і групових теплогенеруючих установок – від 23 (20) до 116 (100) МВт (Гкал/год) [4]. Потужність теплових джерел промислових підприємств складає від десятків до сотень МВт.

Централізоване теплопостачання від ТЕЦ називається *теплофікацією*. Завданням централізованого теплопостачання є виробництво теплової енергії та забезпечення нею споживачів, включаючи опалення, вентиляцію, гаряче водопостачання та технологічні потреби. Централізоване теплопостачання забезпечує тепловою енергією низького (до 150 °С) і середнього (до 350 °С) потенціалу декількох споживачів від одного або декількох джерел. Теплова енергія відпускається споживачам житлово-комунального господарства у вигляді гарячої води, а для промислових підприємств разом з водою часто використовується водяна пара [2, 4].

До споживачів надходить не вся вироблена тепла енергія, зокрема та, що постачається від систем централізованого теплопостачання. Частина виробленої енергії використовується її виробниками на власні потреби, а частина втрачається під час транспортування до споживачів.

В табл. 1.3 наведено дані по загальній кількості та встановленої теплової потужності основних джерел теплової енергії централізованих систем теплопостачання (ЦСТ) в Україні у 2013 р. [5].

Джерелами тепла в децентралізованих системах теплопостачання є будинкові котельні, котли поквартирного опалювання, котли-плити, печі та інші вогняні прилади. Будинкові і котеджні (квартирні) котельні потужністю до 3 МВт розміщуються безпосередньо в житловому будинку або в прибудовах до нього. В них, як правило, використовується газоподібне або рідке паливо, іноді електрообігрів. До таких систем відносяться також блоково-модульні і дахові котельні потужністю 1...1,5 МВт, що працюють на газоподібному або рідкому котельно-пічному паливі.

**Об'єктами транспортування теплової енергії споживачам є теплові мережі та абонентські установки.**

Таблиця 1.3. Кількість та теплова потужність джерел теплової енергії в Україні у 2013 р.

Теплові джерела ЦСТ	Кількість, одиниці	Встановлена теплова потужність, млн кВт
1. Конденсаційні ТЕС	15	6,3
2. Опалювальні ТЕЦ	30	9,9
3. Промислові ТЕС	495	18,7
4. Атомні ЕС	4	3,0
5. Промислові і опалювальні котельні	35402	132,6
6. Теплоутилізаційні установки	722	2,95
<b>Всього</b>	<b>36668</b>	<b>173,45</b>

Теплова мережа є системою трубопроводів (теплопроводів), насосних станцій і теплообмінних апаратів, які забезпечують безперервну подачу та розподіл теплової енергії у вигляді гарячої води або пари споживачам та її повернення до джерела. Протяжність теплових та парових мереж в Україні на кінець 2010 р. у двотрубному обчисленні становила 34,6 тис. км [10].

Згідно ДБН В.2.5-39 розрізняють наступні теплові мережі:

- магістральна теплова мережа – комплекс трубопроводів (теплопроводів) і споруд, що забезпечують транспортування теплоносія від джерела теплової енергії до теплових пунктів та (або) розподільної теплової мережі;

- розподільна теплова мережа – трубопроводи зі спорудами на них, які забезпечують транспортування теплоносія від центрального теплового пункту, або магістральної теплової мережі, або джерела теплової енергії до теплового вводу споживача;

- мережа гарячого водопостачання – комплекс трубопроводів (теплопроводів), обладнання та споруд, що забезпечують подачу гарячої води від теплового пункту або від джерела теплової енергії до вводу гарячої води споживача.

Магістральні трубопровідні системи для випуску теплоти з великих ТЕЦ мають діаметри труб 1400...2000 мм, довжина магістральних теплових мереж по радіусу може досягати десятків кілометрів, а загальна їх довжина – сотні кілометрів [4].

Транспортування теплової енергії від джерел енергії до споживачів здійснюється по мережних трубопроводах, в яких теплоносієм є вода з температурою 95...150 °С. Діаметр труб лежить у межах від 50 до 800 мм [8].

Теплові мережі прокладені переважно в непрохідних залізобетонних каналах з підвісною ізоляцією з мінеральної вати. Основним типом антикорозійного покриття трубопроводів є ізол на ізольній мастиці [8].

У містах теплові мережі виконують за однією зі схем: тупиковою (радіальною), кільцем – за наявності декількох джерел тепла, і змішаною [2, 4].

Тупикова схема, як правило, виконується за наявності одного джерела і характеризується тим, що з віддаленням від нього поступово знижується теплове навантаження, що приводить до зменшення діаметру трубопроводів, спрощення конструкції, складу устаткування самої мережі. Для запобігання аваріям і керування перемикачними подачі тепла до споживачів, встановлюють перемички між суміжними магістралями, а також між тупиковими схемами або при теплопостачанні від декількох джерел тепла: ТЕЦ, районних і квартальних котельних.

Кільцева схема характеризується тим, що за рахунок декількох джерел тепла підвищується надійність теплопостачання при меншій сумарній резервній потужності котельного устаткування.

*Абонентські установки* здійснюють сполучення теплових мереж систем централізованого теплопостачання з місцевими системами теплового споживання. Абонентські установки – це комплекс устаткування, за допомогою якого системи опалення, гарячого водопостачання та вентиляції, а також технологічні установки підприємств приєднуються до теплових мереж. В абонентських установках здійснюються наступні основні функції [2, 4]:

- перетворення виду теплоносія або його параметрів;
- контроль параметрів теплоносія і захист місцевих систем теплопостачання від аварійного перевищення їх значень;
- регулювання витрат і розподіл теплоносія по системах споживання теплоти;
- відключення систем споживання теплоти;
- заповнення та підживлення місцевих систем споживання теплоти;
- облік витрат теплоносія;
- водопідготовка для систем гарячого водопостачання.

Склад абонентської установки визначається схемами підключення систем опалення та гарячого водопостачання, параметрами теплоносія, режимами споживання тепла та ін.

Абонентські установки оснащені підігрівачами гарячого водопостачання, елеваторами, насосами, арматурою, контрольно-вимірвальними приладами для регулювання параметрів і витрат теплоносія по місцевих опалювальних і водорозбірних приладах, тому їх

часто називають місцевим тепловим пунктом. Абонентський ввід, споруджений для окремої технологічної установки, називають індивідуальним тепловим пунктом.

Приєднання споживачів тепла до джерела тепла може бути [2, 4] безпосереднє – одноступеневі системи, або через центральні теплові пункти чи контрольно-розподільні пункти – багатоступеневі системи. Одноступінчаті системи обмежені межею допустимого тиску в теплових мережах, оскільки високий тиск, що забезпечує транспортування теплоносія, небезпечний для радіаторів опалення.

**Експлуатаційна надійність теплоенергетичного устаткування.** При експлуатації теплоенергетичних установок і систем повинні бути забезпечені надійність, довговічність і безпека як системи в цілому, так і устаткування, що входить у систему. Надійність теплоенергетичного устаткування повинна бути забезпечена на всіх стадіях його існування [11–13] – проектування, виготовлення, експлуатації. Розрізняють технічну та експлуатаційну надійність [14].

*Технічна надійність* визначає тільки технічні можливості, обумовлені конструкторськими рішеннями та якістю виготовлення. Показники технічної надійності характеризують рівень розробки й дозволяють ухвалювати рішення щодо необхідності доведення або модернізації устаткування.

Під *експлуатаційною надійністю* елементів і вузлів розуміють їх властивість виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників у допустимих межах, відповідних до заданих режимів і умов експлуатації. Інакше кажучи, експлуатаційна надійність – це стійкість якості устаткування стосовно всіх можливих збурень, які можуть виникнути при його корисному функціонуванні.

Експлуатаційна надійність визначається реальними умовами використання установок з урахуванням впливу всіх факторів, які залежать від якості проектування, виготовлення й експлуатації. На показники експлуатаційної надійності, довговічності й безпеки теплоенергетичного устаткування впливають дві групи факторів [12, 13] – технологічні й експлуатаційні (табл. 1.4).

Найнебезпечнішими експлуатаційними факторами, що впливають на довговічність елементів теплоенергетичного устаткування, є температурні коливання [15, 16]. Вони призводять до короткочасних і тривалих перегрівів металу і є причиною зміни властивостей і структури, збільшення швидкості повзучості, зниження тривалої міцності й тривалої пластичності, прискорення корозійних процесів і, як наслідок,

Таблиця 1.4. Фактори, що впливають на показники експлуатаційної надійності

Технологічні фактори	Експлуатаційні фактори
<ul style="list-style-type: none"> <li>– помилки проектування;</li> <li>– недоліки конструкції устаткування;</li> <li>– неточності в проектних розрахунках при виборі матеріалу;</li> <li>– металургійні дефекти;</li> <li>– дефекти виготовлення;</li> <li>– дефекти складання й монтажу устаткування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– невідповідність умов роботи устаткування проектним (розрахунковим) режимам;</li> <li>– коливання основних режимних параметрів при експлуатації устаткування в базових режимах;</li> <li>– спрацювання устаткування, старіння ізоляції;</li> <li>– дефекти при проведенні ремонтних робіт;</li> <li>– помилки чергового, ремонтного, керуючого персоналу і порушення виробничих інструкцій;</li> <li>– неточності інструкцій і регламентів</li> </ul>

інтенсивного розвитку термічної втоми. Коливання температур, особливо в області 450 °С і вище, дуже впливають на залишкову деформацію повзучості, яка збільшує діаметр трубопроводів, зменшує товщину стінки, в результаті чого відбуваються розтріскування й руйнування труб.

Поряд із циклічністю дії навантажень на передчасні експлуатаційні пошкодження металу теплоенергетичного устаткування, що характеризують крихкі руйнування, впливають:

- наявність середовищ, що сприяють виникненню й розвитку корозійно-втомних процесів (води, конденсату, пари, продуктів згоряння);
- високий рівень механічних напружень від внутрішнього тиску при підвищених температурах в умовах повзучості;
- нелінійний напружений і деформований стан різних конструктивних елементів.

Водно-хімічні режими впливають на фізико-хімічні властивості внутрішньотрубних утворень, які є основними причинами перегріву труб котлів, що працюють на мазуті.

Розглянемо детальніше основні несправності й пошкодження вузлів і елементів систем тепlopостачання.

**Несправності котельних установок.** Основними причинами несправностей котельних установок є пошкодження поверхонь нагрівання котлів, систем паливоподачі, допоміжного устаткування, автоматики та ін. [17, 18]. В табл. 1.5 наведено розподіл відмов обладнання енергоблоків потужністю 300 МВт [12, 13].



Таблиця 1.5. Розподіл відмов обладнання енергоблоків

Елементи	Частка відмов, %
Поверхні нагрівання	79,2
Допоміжне устаткування	3,5
Паливоподача, газопроводи	2,0
Регенеративні повітропідігрівники	0,1
Обмуровування	0,3
Арматура	4,9
Автоматика	7,4
Інші	2,6

До основних причин відмов *котлів* відносяться [12, 13, 17] несправності пароперегрівника (стельового, ширмового, конвективного), екранних труб (випарні екрани), економайзера, труб, що не обігріваються, та інше. В табл. 1.6 наведено розподіл відмов елементів котлів електростанцій [12, 13].

Таблиця 1.6. Розподіл відмов елементів котлів електростанцій

Елементи	Частка відмов, %
Економайзер	30–35
Випарні екрани	14–30
Пароперегрівник	20–40
Труби, що не обігріваються	3–8
Інші елементи	5–6

Пошкодження *кип'ятильних і екранних труб* відбувається найчастіше через порушення водного режиму, викликані незадовільною роботою ділянки хімічної водопідготовки, потрапляння сирої води з конденсатом та інше [17].

Основними причинами розривів труб є:

- перевищення тиску;
- порушення температурних умов роботи;
- корозія або зношування труб;
- удар факела в екранні панелі;
- шлакування.

*Пароперегрівник* відноситься до числа найменш надійних елементів котельного агрегату. Основним пошкодженням у пароперегрівнику є прогорання змієвиків через надмірне підвищення температури відносно розрахункової величини. Пошкодження сталевих змієвикових *водяних економайзерів* відбувається головним чином внаслідок внутрішньої й зовнішньої корозії труб і зношування їх летючою золою.

Крім того, нерідко спостерігаються свищі й розриви в місцях зварювання змійовиків при незадовільній якості зварювальних робіт.

Пошкодження *живильних трубопроводів і паропроводів* спостерігаються набагато рідше, ніж розриви труб поверхонь нагрівання, однак за своїми наслідками ці пошкодження набагато не безпечніші. До основних причин, що приводять до руйнування живильних трубопроводів і паропроводів, відносяться:

- перевищення тиску робочого середовища;
- корозійні (внутрішні) процеси;
- ерозійне (внутрішнє) зношування в місцях встановлення регулюючої арматури;
- розвиток втомних тріщин;
- поява підвищених напруг при заземленнях трубопроводів або при різкій зміні температури, як робочого тіла, так і зовнішнього середовища;
- неякісність основного металу, зварних з'єднань і конструкцій у цілому;
- невідповідність матеріалу труб.

До основних причин відмов *допоміжного устаткування* котельних установок відносяться [12, 13, 17] несправності димососів, дуттьових вентиляторів, регенеративних повітропідігрівників та ін., розподіл яких наведений в табл. 1.7 [12, 13].

Таблиця 1.7. Розподіл відмов елементів допоміжного обладнання котельних установок

Елементи	Частка відмов, %
Димососи	35–40
Дуттьовий вентилятор	19–20
Регенеративний повітропідігрівники	18–20
Кульовий млин	10–12
Молотковий млин	4–5
Живильники вугілля, транспортери	3–14

*У топці й газоходах* можливі вибухи й стуки через скупчення значної кількості незгорілого палива.

Причинами цього можуть бути осадження палива на підлогу або в холодну вирву, віднесення в газоходи внаслідок недосконалої організації горіння в топці.

*У газоповітряному тракті* при роботі тягодуттьових машин можливі перегрів і пошкодження підшипників, вібрації та поломки роторів. *Перегрів і пошкодження підшипників* відбувається найчастіше внаслі-

док порушення режимів змащення, зниження рівня масла або через його відсутність у системі маслозабезпечення, погіршення або припинення охолодження підшипників, а також через погану якість ремонту й складання. Причинами *вібрації або поломки роторів* є їх неправильне початкове балансування, виникнення розбалансування ротора через зношування, відкладання золи (пилу) на лопатках, особливо при мокрому золовидаленні.

**Несправності теплових мереж.** Основна причина пошкоджень тепломереж і мереж гарячого водопостачання ЖКГ в Україні [8] – електрохімічна корозія, яка обумовлена:

- фізичним зношуванням трубопроводів внаслідок тривалої експлуатації, що може привести до пошкодження теплоізоляції, герметизації каналів, антикорозійного покриття, руйнування перекриття каналів;

- періодичним підтопленням і замулюванням ґрунтовими, поверхневими водами та водами несправних інженерних комунікацій ділянок теплових мереж під час пошкоджень;

- недостатньою надійністю та довговічністю теплової ізоляції та антикорозійного покриття трубопроводів;

- незадовільним станом будівельних конструкцій (каналів, камер та ін.), внаслідок чого має місце потрапляння вологи в трубопроводи та інше устаткування;

- наявністю кабельних мереж поблизу тепломережі.

Низька надійність теплотрас приводить до аварій і великих втрат теплоти і, як наслідок, до істотних економічних втрат і значних обсягів ремонтних робіт. Статистика пошкоджень у тепломережах «Київенерго» [19] наведена в табл. 1.8.

Таблиця 1.8. Статистика пошкоджень в тепломережах «Київенерго»

Рік	Кількість пошкоджень	
	Після випробувань	Під час експлуатації
2005	448	1391
2009	589	1875

Загалом по Україні у 2013 р. втрати теплоти в теплових мережах склали 14,8 %, а протяжність зношених і аварійних теплових та парових мереж складала 14,7% (2011 р.), 18,1% (2012 р.), 19,0% (2013 р.) від загальної протяжності мереж [20].

Найефективнішим способом підвищення надійності теплотрас є використання в транспортуючих системах трубопроводів з попередньо ізолюваними трубами із застосуванням пінополіуретану. Такі труби

мають в два рази кращі теплотехнічні показники ізоляції, тепловтрати становлять 3–5 %, термін служби – більше 30 років, не вимагають особливих профілактичних заходів [8].

## 1.2. Принципи побудови систем моніторингу в теплоенергетиці

*Загальні принципи моніторингу об'єктів теплоенергетики.* Забезпечення експлуатаційної надійності, довговічності і безпеки теплоенергетичного устаткування – складне завдання, яке пов'язане з організацією достовірного контролю роботи енергоустановок і з забезпеченням оптимальних умов їх експлуатації.

Для розв'язання цього завдання необхідна наявність спеціальних систем моніторингу [15, 21–24], що дозволяють неперервно контролювати технологічні процеси вироблення, транспортування та споживання теплоти; вимірювати основні параметри теплотехнічних установок, обладнання, машин, механізмів та ін.; діагностувати та прогнозувати технічний стан установок та їх вузлів. Сформулюємо загальні принципи побудови систем моніторингу в теплоенергетиці [25, 26].

*Моніторинг у загальному випадку* – це процес досліджень різних об'єктів у часі і просторі, їх взаємодії з оточуючим довкіллям при виконанні об'єктами заданих функцій для отримання поточних і прогнозованих характеристик, параметрів їх стану за даними спостережень, вимірювань, контролю, діагностики з метою подальшого використання цих характеристик для підвищення ефективності та безпеки роботи об'єктів [25, 26]. Процес моніторингу забезпечує постійне оперативне отримання достовірної інформації про функціонування об'єктів теплоенергетики. Слід розрізняти моніторинг параметрів та моніторинг технічного стану об'єктів.

*Моніторинг параметрів* – це процес спостережень та вимірювань будь-яких поточних параметрів, зокрема параметрів, що характеризують технологічні процеси вироблення, транспортування та споживання теплоти; основних параметрів теплотехнічних установок, обладнання, машин та ін.

Результатом моніторингу параметрів є сукупність вимірних значень параметрів, які в подальшому використовуються для контролю функціонування та ефективності роботи об'єктів та їх складових; управління технологічними процесами вироблення, транспортування та споживання теплоти; визначення технічного стану об'єкту та ін.

*Моніторинг технічного стану об'єкту* – це комплексна система спостереження, діагностування та прогнозу технічного стану об'єктів.

Моніторинг технічного стану об'єкту принципово відрізняється від моніторингу параметрів наявністю інтерпретатора вимірних параметрів в термінах технічного стану – експертної системи для прийняття рішення про стан об'єкту та прогнозування стану.

Результатом моніторингу технічного стану об'єкту є діагноз об'єкту в цілому та сукупність діагнозів складових його частин (установок, вузлів, елементів, машин, механізмів тощо) і прогнозування часу зміни стану об'єкту та (або) його складових частин.

*Технічний стан об'єкта* характеризується у визначений момент часу і за визначених умов зовнішнього середовища значеннями параметрів, встановлених технічною документацією на об'єкт. Технічний стан складного об'єкта визначається технічним станом його складових частин – вузлів, механізмів, машин або конструкцій. Розрізняють наступні види технічного стану об'єкта (ГОСТ 27.002–89) – справний, працездатний, правильного функціонування, граничний, неправильно функціонування, непрацездатний, несправний.

Порушення справності, працездатності або правильності функціонування об'єкта є наслідком появи в об'єкті або в його складових частинах дефектів, пошкоджень або відмов. *Дефект* – кожна окрема невідповідність властивостей об'єкта заданим, необхідним або очікуваним його властивостям. *Пошкодження* – подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта при збереженні працездатного стану. *Відмова* – подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

Дефекти, пошкодження та відмови є наслідком конструктивних, виробничих, експлуатаційних і деградаційних причин [11, 13, 15]. Експлуатаційні причини пов'язані з порушенням установлених правил і (або) умов експлуатації. Деградаційні причини обумовлені природними процесами старіння, зношування, корозії та втоми при дотриманні всіх установлених правил і норм проектування, виготовлення та експлуатації.

Технічний стан кожного об'єкта характеризують різні фізичні величини – механічні, гідромеханічні, аеромеханічні, термодинамічні, електричні, електромагнітні, оптичні, акустичні та ін., з яких обирають множину діагностичних параметрів [27]. Значення діагностичних параметрів дозволяють визначити технічний стан та зміну технічного стану об'єкта без його розбирання. Основними критеріями при виборі тих чи інших фізичних величин як діагностичних параметрів є використання тих фізичних полів і явищ, які максимально реагують на зміну стану матеріалу, умов навантаження, експлуатації та ін.; максимальна зміна значень фізичного параметра при зміні технічного стану об'єкта;

можливість визначення фізичних параметрів без руйнування зразків.

Інформативність ознак, сформованих на обраних діагностичних параметрах, визначає склад вимірюваних фізичних величин, які використовуються надалі для визначення технічного стану об'єктів. Вимірювання обраних як діагностичні параметри фізичних величин є основою різних методів і засобів технічного діагностування.

*Технічне діагностування* – це визначення технічного стану будь-якого об'єкта (ДСТУ 2389–94). Діагностування здійснюється засобами діагностування, які являють собою відповідну апаратуру і програми. Система діагностування – це сукупність засобів діагностування, об'єкта і виконавців, необхідна для проведення діагностування за правилами, встановленими у технічній документації.

Завданнями технічного діагностування є контроль функціонування або технічного стану; пошук місця і визначення причин відмови (несправності); прогнозування технічного стану. *Контроль функціонування* полягає у перевірці виконання об'єктом частини або всіх властивих йому функцій. *Контроль технічного стану* полягає в перевірці відповідності значень параметрів об'єкта вимогам технічної документації і визначенні на цій основі одного із заданих видів технічного стану в цей момент часу. *Прогнозування технічного стану* – визначення технічного стану об'єкта із заданою ймовірністю на майбутній інтервал часу.

Основними показниками якості систем діагностування є повнота діагностування, достовірність діагнозу і глибина пошуку місця відмови (несправності).

Розрізняють *системи тестового і функціонального діагностування*. У системах тестового діагностування на об'єкт подаються спеціально організовані тестові впливи, а системи функціонального діагностування працюють у процесі застосування об'єкта за призначенням і на об'єкт подаються тільки робочі впливи, передбачені алгоритмом його функціонування.

Технічне діагностування об'єктів теплоенергетики здійснюється методами неруйнівного контролю [27], після застосування яких об'єкти можна і надалі використовувати за їх прямим призначенням. Клас фізичних методів неруйнівного контролю (ДСТУ 2865–94) ґрунтується на дії фізичних полів або речовин на об'єкт, а також на реєстрації полів, що створюються самим об'єктом контролю.

Неруйнівний контроль в залежності від фізичних явищ, що покладені в його основу, поділяється на види (табл.1.9), кожен з яких може бути використаний для моніторингу об'єктів теплоенергетики [27].

Таблиця 1.9. Види та об'єкти неруйнівного контролю

Види НК	Об'єкти НК
Магнітний	Вироби з феромагнітних матеріалів. Дозволяє знаходити макродефекти – гартівні і втомні тріщини, раковини, непровари, розшарування розміром більше 0,1 мм на глибині до 10 мм
Електричний	У виробках з електропровідних матеріалів дозволяє знаходити тріщини на глибині 0,5...100 мм; застосовується також для контролю якості неелектропровідних захисних покриттів виробів з металу
Вихрострумний	Вироби з електропровідних матеріалів. Дозволяє знаходити в металевих виробках поверхневі дефекти – тріщини, раковини, волосовини глибиною більше 0,1 мм і грубі підповерхневі дефекти, розташовані на глибині до 10 мм
Радіохвильовий	Вироби з матеріалів, в яких радіохвилі не сильно згасають. Застосовується для виявлення дефектів в різних неметалевих матеріалах, а також поверхневих дефектів металів
Тепловий	Вироби з теплопровідних матеріалів. Застосовується для контролю теплових навантажень поверхонь нагріву, теплових втрат в захисних конструкціях і трубопроводах теплових мереж, дозволяє знаходити в металах поверхневі та підповерхневі дефекти
Оптичний	Вироби з матеріалів, прозорих для оптичного діапазону хвиль. Застосовуються для виявлення у важкодоступних місцях поверхневих дефектів розміром більше 0,01 мм, слідів течі та ін.
Радіаційний	Вироби з різних матеріалів. Дозволяє виявляти різноманітні дефекти – раковини, непровари, розшарування та ін. Застосовується для контролю якості зварювання
Акустичний	Вироби з металів і діелектриків. Застосовується для контролю якості зварювання, корпусів, судин тиску, великих литих деталей, товстостінних заготовок, вібраційного стану об'єктів та ін.
Проникними речовинами	Методи течошукання – тільки для виявлення наскрізних дефектів
	Капілярні методи – для виявлення невидимих або слабо видимих неозброєним оком поверхневих і наскрізних дефектів в об'єктах контролю

В рамках кожного виду неруйнівного контролю існує велика кількість різних методів, які класифікуються за наступними ознаками – характером взаємодії фізичних полів або речовин з об'єктом контролю; первинним інформативним параметром; способом отримання первинної інформації.

В теплоенергетиці основними об'єктами технічного діагностуван-

ня є котельні установки, парові турбіни і теплотраси [2, 11–13, 17].

У *котельних установках* елементами діагностування є топка; кип'ятильні та екранні труби; пароперегрівники; економайзери; парові, живильні та допоміжні трубопроводи; арматури трубопроводів; газоходи; вентилятори; димососи.

У *парових турбінах* діагностуються такі елементи: циліндри; обойми та діафрагми; ротори; диски та робочі лопатки; підшипники; регулюючі й стопорні клапани, їх корпуси; напівмуфти та ін.

Основними напрямками діагностування технічного стану *теплотрас* є визначення корозійної обстановки та місць наскрізних пошкоджень ізоляції; виявлення корозійних пошкоджень, тріщин, ерозійного зношування та інших дефектів металу труб; виявлення місць витоків теплоносія в трубопроводах.

До основних параметрів теплоенергетичного устаткування, що діагностується, відносяться [28]:

– загальні параметри – коефіцієнти економічності, пов'язані з факторами технологічного процесу;

– характеристики властивостей металоконструкцій – твердість, повзучість, тріщиностійкість, наявність раковин, непроварів, утворення окалини поверхонь нагрівання;

– геометричні параметри конструкцій – діаметр і товщина труб, відносні зміщення окремих вузлів;

– параметри теплофізичних процесів – температура зон перегрівів поверхонь нагріву й паропроводів;

– параметри хімічних процесів – стан води охолоджуючих середовищ;

– параметри шумових процесів – поява сигналів акустичної емісії, акустичних сигналів витоків, шуми закипаючої рідини, шуми в трубопроводах та ін.;

– параметри вібраційних процесів – вібрації котла, трубопроводів, вентиляторів, димососів.

**Види та склад систем моніторингу теплоенергетичного обладнання.** Процеси моніторингу реалізуються *системами моніторингу*, що включають об'єкт моніторингу, апаратно-програмні засоби та виконавців.

Системи моніторингу повинні забезпечувати одержання інформації про виконання об'єктом всіх або частини властивих йому функцій; технічний стан устаткування і його небезпечність з необхідними коментажами (місце та можливі причини відмови або несправності; прогноз технічного стану та залишкового ресурсу; вказівки та розпорядження



персоналу на невідкладні дії та ін.).

За результатами спостереження системи моніторингу повинні завчасно виробляти керуючі впливи, які забезпечують необхідний запас стійкості технологічної системи, якість її функціонування, створюють необхідний запас її техногенної, екологічної та економічної безпеки. Узагальнена класифікація систем моніторингу в теплоенергетиці наведена на рис. 1.1.

В найпростішому випадку системи моніторингу можуть бути *спеціалізованими*, якщо використовують лише один із видів неруйнівного контролю. Перспективними в теплоенергетиці є *комплексні системи*, що здійснюють моніторинг на базі різних видів неруйнівного контролю.

*Системи з ручним управлінням* виконують більшість функцій моніторингу під управлінням людини-оператора. *Автоматизовані системи* повинні виконувати основні функції моніторингу автоматично, а допоміжні – під управлінням людини-оператора. *Автоматичні системи* моніторингу повинні виконувати всі функції моніторингу автоматично. Людина в автоматичних системах може використовуватися як ланка управління для видачі керуючих дій на об'єкт.

Сучасні системи моніторингу теплоенергетичного обладнання повинні здійснювати моніторинг в автоматичному або автоматизованому режимі та у реальному часі.

Апаратно-програмні засоби системи моніторингу можуть мати різноманітні структури і в загальному випадку складаються з таких основних блоків – збору та реєстрації діагностичних сигналів; формування діагностичних характеристик та параметрів; інформаційної бази даних і знань; прийняття рішень; реєстрації, відображення і сповіщення персоналу; управління і синхронізації; інтерфейсів.

*Блок збору та реєстрації* діагностичних сигналів формує масиви вихідних даних для моніторингу і включає датчики, попередні підсилювачі, аналогово-цифровий перетворювач та цифровий накопичувач. Зазвичай системи моніторингу в теплоенергетиці є багатоканальними.

*Блок формування діагностичних характеристик та параметрів* на основі методів та алгоритмів цифрової обробки сигналів здійснює перетворення масиву вихідних даних в масив діагностичних параметрів, пов'язаних із станом об'єктів моніторингу.

*Інформаційні бази даних і знань* забезпечують процес моніторингу необхідною інформацією. База даних включає конфігурацію устаткування, що діагностується, конфігурацію системи моніторингу, бази апріорних даних значень діагностичних характеристик і параметрів та

## Стан та проблематика моніторингу об'єктів теплоенергетики

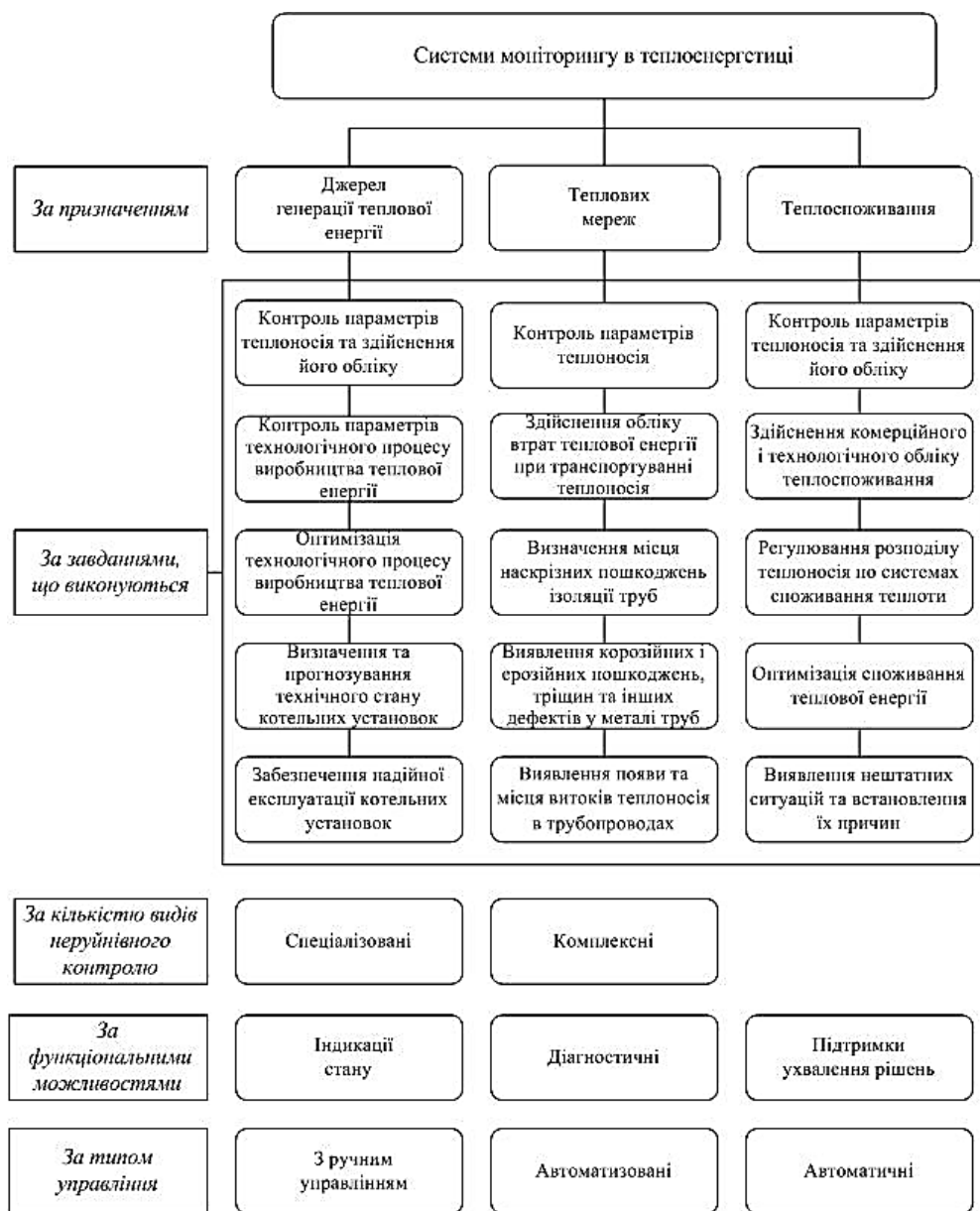


Рис. 1.1. Узагальнена класифікація систем моніторингу в теплоенергетиці

їх межі, що визначають певний технічний стан того чи іншого об'єкта моніторингу.

База знань зберігає за певний період реалізації зареєстрованих діагностичних сигналів, результати вимірювань діагностичних характеристик, параметрів, графіки зміни значень параметрів в часі (тренди);

результати визначення технічного стану як установки в цілому, так і її вузлів та елементів; журнали, протоколи подій, ремонтів та інші необхідні для роботи системи дані.

*Блок прийняття рішень* є експертною системою, яка на підставі вихідного масиву діагностичних параметрів і експлуатаційних даних, що зберігаються в інформаційній базі даних і знань, визначає стан об'єктів і видає необхідну діагностичну інформацію та (або) вказівки персоналу по приведенню об'єкту в допустимий стан. Експертна система повинна автоматично визначати і прогнозувати несправність контрольованого устаткування і видавати вказівки та рекомендації персоналу щодо подальших його дій.

*Блок реєстрації, відображення і сповіщення персоналу* доводить необхідну інформацію про стан устаткування до персоналу з використанням візуальних і звукових пристроїв та здійснює друкування протоколів на паперовому носії. Блок відображає дату і час включення (відключення) агрегату, веде підрахунок загального, місячного напруження, напруження між поточними, середніми і капітальними ремонтами та інше.

*Блок управління і синхронізації* здійснює загальне управління роботою всієї системи моніторингу за певними алгоритмами та (або) наборами адаптивних алгоритмів. Прив'язка апаратних і програмних засобів системи моніторингу до конкретного устаткування здійснюється шляхом конфігурації устаткування, що діагностується, та конфігурації системи моніторингу. Синхронізація здійснюється прив'язкою всіх блоків системи до реальної дати і часу. Блок управління може забезпечувати блокування аварійних агрегатів по комплексу параметрів, як безумовне, так і за наслідками діалогу з оператором.

*Блок інтерфейсів* здійснює обмін інформацією між блоками системи та забезпечує зв'язок з користувачами. За допомогою мережних інтерфейсів інформація про результати моніторингу та стан устаткування передається зовнішнім зацікавленим службам по стандартних каналах зв'язку.

При побудові систем моніторингу теплоенергетичного устаткування в першу чергу *необхідно визначити:*

- об'єкт моніторингу та відповідне призначення системи;
- загальні параметри моніторингу об'єкта та його складових – виробничі параметри, параметри технологічних процесів, режимні параметри вузлів і елементів та ін.;
- діагностичні сигнали;
- діагностичні параметри і характеристики;

- види і методи технічного діагностування;
- вимоги до функціональних можливостей системи та типу управління нею.

### 1.3. Теплометричні прилади та системи моніторингу

Експлуатація об'єктів теплоенергетики нерозривно пов'язана з процесами генерації, транспортування та споживання теплової енергії [8, 29]. На кожному етапі завданням моніторингу об'єктів теплоенергетики, з посеред інших, є визначення теплових навантажень поверхонь нагріву, дослідження процесів спалювання палива в топках котлоагрегатів, теплових втрат в захисних конструкціях і трубопроводах теплових мереж, тощо (табл.1.8), тобто тепловий контроль теплогенеруючих установок, агрегатів, теплопроводів, огорожуваних конструкцій.

Таблиця 1.8. Перелік параметрів і характеристик об'єктів теплоенергетики, що визначаються при тепловому контролі

Об'єкт контролю	Параметри і характеристики
Теплогенеруючі установки і агрегати (паливо + процеси згорання палива)	Теплота згорання палива Теплові втрати крізь обмурування котлоагрегату Теплове навантаження поверхонь топкових екранів котлоагрегату
Теплопроводи	Локальні теплові втрати теплопроводів Інтегральні тепловтрати магістральних ділянок тепломереж Кількість теплоти Тепловий опір теплоізоляції і цілісність трубопроводів Вологість теплоізоляційних матеріалів Температура
Будівлі	Тепловий потік Температура Теплові втрати через огорожувальні конструкції будівель (стіни, вікна, двері, стелі, підлога) Тепловий опір будівельних конструкцій Терморадіаційні характеристики скла Тепловий опір склопакетів Теплопровідність будівельних і інших матеріалів

Джерелом інформації при цьому є температура та тепловий потік, останній характеризує процес передавання теплової енергії (теплообмін) та його інтенсивність.

В загальному розумінні *тепловий потік* – це фізична величина, яка визначає кількість теплоти, що проходить крізь задану і нормальну до напрямку поширення теплоти ізотермічну поверхню в одиницю часу.

За способами поширення теплової енергії в просторі розрізняють кондуктивний, конвективний та радіаційний тепловий потік.

*Кондуктивний* тепловий потік характеризує процес передавання теплової енергії при молекулярному переносі теплоти між безпосередньо дотичними тілами або частинками одного тіла з різною температурою, при якому відбувається обмін енергією коливального руху структурних частинок (молекул, атомів, вільних електронів).

*Конвективний* тепловий потік – це тепловий потік, який виникає внаслідок переміщення в просторі нерівномірно нагрітих об'ємів середовища (рідин і газів), при цьому перенесення теплоти нерозривно пов'язане з переносом самого середовища.

*Радіаційний* тепловий потік – це теплове випромінення, що характеризується перенесенням теплової енергії від одного тіла до іншого електромагнітними хвилями.

Для проведення оцінки теплового стану об'єктів теплоенергетики в якості інформативного параметру використовують питоме значення теплового потоку – *поверхневу густину теплового потоку* – відношення теплового потоку, що проходить через поверхню теплообміну, до площі цієї поверхні.

Тепловий метод контролю базується на реєстрації збурень, що вносяться дефектами в характер розповсюдження теплової енергії в об'єкті контролю, та подальшому аналізуванні розподілу полів температури та теплового потоку на поверхні об'єкта контролю у порівнянні з таким розподілом, характерним для бездефектного об'єкту. Розрізняють активний та пасивний методи теплового контролю. *Активний* тепловий контроль передбачає нагрів об'єкта зовнішніми джерелами енергії. *Пасивний* тепловий контроль не потребує зовнішнього джерела теплової дії – теплове поле в об'єкті контролю виникає при його експлуатації. При діагностиці об'єктів теплоенергетики, як правило, застосовують пасивний тепловий контроль.

Принцип дії засобів теплового контролю заснований на взаємодії теплового поля об'єкта з термодинамічними чутливими елементами системи моніторингу, внаслідок чого відбувається перетворення параметрів поля (інтенсивності, температурного градієнта та ін.) в електричний сигнал.

В системах теплової діагностики та приладах для контролю теплотехнічних параметрів і характеристик теплоенергетичного обладнання

в якості чутливого елемента найчастіше застосовують первинні термоелектричні перетворювачі (сенсори) теплового потоку і температури. За способом взаємодії теплового поля об'єкта з термодинамічними чутливими елементами системи діагностики розрізняють дистанційний та контактний методи теплового контролю.

При *дистанційному тепловому контролі* інформативним параметром є власне випромінення об'єкта під час його експлуатації.

Зокрема, в системах автоматичного регулювання вимірювальна інформація про густину потоку теплового випромінення використовується для вирішення завдання стабілізації тепловиділення в топці котлоагрегату [30, 31]. Зі зміною теплового режиму роботи котла і з огляду на нерівномірності нагріву різних зон радіаційних екранних поверхонь нагріву в топковому просторі значення локальної густини потоку теплового випромінення може змінюватися на порядок і більше. Обмеження максимальних теплових навантажень та визначення їхнього розподілу по екранах забезпечується тільки при постійному контролі локальних густин потоку випромінювання в найбільш теплонапружених ділянках радіаційних поверхонь нагріву.

Розробкою та виготовленням теплотричних приладів і систем контролю теплового випромінювання в топковому просторі займаються ряд організацій і фірм, серед яких, Bergemann GmbH (Німеччина), Hukseflux (Нідерланди) [32], Інститут технічної теплофізики НАН України [33], ВАТ "НПО ЦКТИ" спільно з СПбПУ (Росія) [34].

Для теплотричного контролю потоку випромінювання призначені пристрої із приймачем випромінювання кінчної конфігурації та кільцевого сопла для створення газової завіси, що сприяє стабільності їх характеристик при безвідмовному тривалому функціонуванні [33]. Конструкція приладу дозволяє застосовувати його і як стаціонарний засіб вимірювання, і в якості зонду. Основний елемент приладу – термоелектричний сенсор теплового потоку, що працює за принципом допоміжної стінки. Приймач випромінювання - кінчна порожнина (модель абсолютно чорного тіла), що поглинає більше 99% падаючої енергії, забезпечений водо-охолоджуванним корпусом; при роботі в агресивних середовищах додатково захищається струменем повітря.

Вимірювання густини потоку теплового випромінювання дозволяє організувати безупинний контроль локальних теплових потоків, що відкриває можливість поточного коректування режимних факторів: загальної витрати повітря, розподілу витрат палива й повітря по пальниках, співвідношення первинного та вторинного повітря, кута повороту пальників та ін.

Для визначення локальних сприйнятих теплових потоків на топкових екранах котла компанією Bergemann GmbH (Німеччина) розроблено сенсор теплового потоку SMART FLUX™, який застосовується в системах моніторингу та діагностування технічного стану котлоагрегатів, зокрема, набір таких сенсорів входить до складу інтелектуальної системи контролю рівня забруднення і стану шлакування поверхонь нагріву в топці котла [35]. Система аналізу і діагностики представляє всі отримані інформаційні дані на моніторі управління або ж на іншому інтерфейсі, а також автоматично аналізує ступінь забруднення екранів і приймає рішення яку область топки необхідно чистити і коли. Крім цього, система представляє інформацію про температуру на поверхні мембранних труб, що в свою чергу дає можливість провести оцінку теплового навантаження.

Застосування теплометричних пристроїв в системі контролю дозволяє отримати експериментальні дані не лише за значеннями температурного навантаження на поверхні топкових екранів, а й виміряти, безпосередньо, значення густини сприйнятого теплового потоку, за якими визначають ступінь зашлакованості (забрудненості) топки або частку накопиченої пошкоджуваності екранів [34]. Так, збільшення частки вторинного повітря у поєднанні зі зменшенням фракційного розміру помелу палива призводить до підвищення температурного максимуму в зоні активного горіння і інтенсифікації шлакування топкових екранів, про що свідчить різке зниження сигналу перетворювачів теплового потоку. Зниження частки вторинного повітря і, особливо, збільшення фракційного розміру помелу палива сприяє зниженню температури в ядрі горіння і процесу самоочищення топкових екранів від забруднень, при цьому відбувається підвищення сигналу перетворювачів теплового потоку.

Теплометричні системи контролю дають можливість проводити діагностику положення факела в топковому об'ємі, адже різному положенню факела відповідають різні значення падаючих і сприйнятих теплових потоків на огорожувальних стінках топки; таким чином, отримавши розподіл сприйнятих теплових потоків по ширині і глибині топки, можна ідентифікувати положення факела.

Ефективність роботи енергетичного обладнання значною мірою залежить від якості палива, що використовується. У свою чергу, якість палива визначають по його теплоті згорання (теплотворній здатності). Провідні фірми Західної Європи, США, Росії та Японії випускають широку гаму калориметрів для визначення теплоти згорання, для яких характерна висока точність вимірювань (відтворюваність на рівні

0,05...0,3%) та високий рівень автоматизації підготовки проби та вимірювань [36-42]. В останні роки калориметри для визначення теплоти згоряння почали випускати і фірми інших країн – Китаю, ПАР, Білорусі [43]. Нажаль, ціна закордонних приладів, що перевищує 20 тис. євро та їх ремонт та обслуговування і є занадто великими для українського споживача. В Україні розробляють, виготовляють та обслуговують ізоперіболічні калориметри марки КТС [44], що побудовані на базі термоелектричних перетворювачів теплового потоку.

При *контактному* тепловому контролі вимірювання значень поверхневої густини теплового потоку та температури проводять із застосуванням накладних сенсорів, які безпосередньо контактують із об'єктом контролю.

Моніторинг і діагностика стану теплоізоляції енергетичного обладнання включає вимірювання локальних теплових потоків у різних точках поверхні цього обладнання, наприклад, на обмурівці котлів, ізоляції теплопроводів і т.п. Виявлення локальних місць різкого підвищення теплового потоку свідчить про наявність пошкодження поверхні об'єкту контролю. Дані про теплові потоки крізь теплоізоляцію необхідні також для складення енергетичних балансів обладнання та визначення його коефіцієнту корисної дії.

Для оперативних вимірювань локальних значень густини теплового потоку крізь теплоізоляцію енергетичного і технологічного обладнання застосовують цифрові прилади, які в залежності від комплектації можуть містити один або кілька (до 5 шт.) сенсорів теплового потоку, температури і (або) різниці температури, а також цифровий пристрій з автономним електроживленням [45]. Такі прилади представляють інформацію безпосередньо в одиницях вимірюваної величини: густини теплового потоку у Вт/м<sup>2</sup>, температури і (або) різниці температури у °С.

На етапі транспортування теплової енергії від теплогенеруючих агрегатів до споживача також необхідний моніторинг тепловтрат та стану теплопроводів.

Теплометричні системи моніторингу із застосуванням накладних витратомірів дозволяють проводити контроль витрат теплоносія в теплових мережах. Основною перевагою теплових витратомірів є те, що вони можуть застосовуватися як стаціонарні системи контролю витрати рідких хімічно складних середовищ, оскільки в місцях установки перетворювачів не відбувається активізація хімічних процесів, а отже не зростає корозія металу труби. Покази теплових витратомірів обумовлені залежністю між швидкістю руху рідини та коефіцієнтом теплоо-



бміну. Тому гідродинаміка потоку й характер руху рідини істотно впливають на покази витратоміра. Витратоміри конструюють таким чином, щоб вони були застосовні або для турбулентного режиму, або для ламінарного, причому довжина ділянки стабілізації потоку повинна бути не менше 50 еквівалентних діаметрів труби. Стосовно тепломереж варто враховувати, що для них, головним чином, характерний турбулентний режим руху теплоносія.

Теплометричний метод визначення витрати теплоносія полягає у вимірюванні густин теплового потоку крізь дві ідентичних ділянки зовнішньої поверхні трубопроводу й температур у центрах цих ділянок. До однієї з цих ділянок підводиться додатковий тепловий вплив фіксованої потужності за допомогою електричного нагрівника. Інформативним параметром в такому випадку є відношення різниці між значеннями теплового потоку на збуреній ділянці і незбуреній до різниці відповідних значень температури. Об'ємну витрату теплоносія знаходять за швидкістю руху теплоносія в трубопроводі, що має функціональну залежність від інформативного параметра. Використання диференціальної схеми вимірювання дозволяє виключити похибку, обумовлену допущенням про те, що температура поверхні стінки труби дорівнює температурі теплоносія [46].

Залежність між інформативним параметром (сигналами сенсорів теплового потоку і термопар) та швидкістю потоку знайдена за допомогою розв'язку рівняння теплопровідності для нескінченної труби при локальному тепловому впливі. Дана математична модель дозволяє визначити габаритні розміри витратоміра та відстань між контрольними ділянками поверхні труби, що гарантує відсутність викривлення температурного поля, спричинене присутністю витратоміра. При наявності інформації про значення густини теплового потоку, що проходить через ділянки контакту двох сенсорів теплового потоку із зовнішньою поверхнею стінки труби, визначають швидкість та витрату рідини, що рухається з визначеною температурою в трубі, яка має конкретні значення діаметра і товщини стінки.

На магістральних ділянках теплотрас при великих значеннях переданої енергії відносні тепловтрати значно менші ніж похибка вимірювання сучасних промислових теплотічильників, а різниця температури теплоносія на початку та в кінці ділянки трубопроводу довжиною в кілька кілометрів в експлуатаційному режимі складає декілька десятих або навіть сотих часток градусу.

Важливими передумовами надійної роботи систем теплопостачання є мінімальні втрати теплоти й теплоносія в мережі. Великий витік

теплоносія приводить до зниження тиску в окремих точках мережі, недостатнього напору на ввіді до споживача, потрапляння повітря в системи споживання та порушення циркуляції в них, а великі теплові втрати – до значного охолодження теплоносія на шляху від джерела до споживача та недогріву системи останнього.

Теплометричні системи моніторингу дозволяють на ділянках діючих тепломереж визначати локалізацію місць течії теплоносія та виявляти ділянки мереж з ушкодженою або сильно зволоженою ізоляцією теплопроводів, а також з незадовільним станом їхніх огорожувальних конструкцій [47, 48].

Будь-яке порушення стану теплової ізоляції трубопроводів, а також режиму їхньої роботи приводить до зміни теплових (температурних) полів у поверхневому шарі ґрунту (покриття) над прокладкою. У випадку зволоження ізоляції або її повного руйнування на поверхні ґрунту виникає підвищений, але рівномірний тепловий слід. Аналогічна ситуація виникає й у ряді випадків, не пов'язаних з якими-небудь порушеннями (наприклад, при підвищенні температури теплоносія, викликаному технологічними вимогами та ін.). Вплив різних факторів може призводити до однакового розподілу теплових (температурних) полів у поверхневому шарі над теплотрасою. У таких випадках кількісно оцінюють тепловіддачу з контрольованої поверхні та аналізують розподіл теплового випромінювання (температур) по поздовжньому перетину трубопроводу в ґрунті, що виконується з урахуванням усіх природних та експлуатаційних факторів, які можуть впливати на його формування.

Для контролю стану підземних теплових мереж також застосовують дистанційний метод вимірювання поля температури на поверхні ґрунту над теплотрасою шляхом інфрачервоної-термографічної зйомки теплових мереж. Найбільший досвід застосування таких систем моніторингу накопичений в скандинавських країнах, особливо в Данії та Фінляндії [49, 50]. Місця прихованих витоків теплоносія ідентифікують або по спотворенню регулярних температурних профілів, або шляхом порівняння вимірених значень температури з розрахунковими, отриманими методом математичного моделювання можливих порушень теплового режиму мереж (дефектів). Такий метод теплового контролю придатний для виявлення ділянок теплотрас з підвищеними тепловтратами, зумовленими збільшенням коефіцієнта тепловіддачі внаслідок зволоження або руйнування теплової ізоляції, затоплення каналу водою і т.д.

Теплометричний метод визначення стану теплової ізоляції трубопроводів полягає у вимірюванні поверхневих значень густини потоку теплового випромінювання або температури ґрунту (покриття) над прокладкою обстежуваної ділянки теплотраси, подальшому розрахунку теплових або температурних полів, що оточують діючу теплотрасу, виконаному з урахуванням визначальних технологічних і метеорологічних факторів, зафіксованих у процесі проведення вимірювань, та порівнянні отриманих результатів, на підставі якого робиться висновок про стан теплоізоляційної конструкції теплопроводів даної ділянки мережі. Сутність виявлення місць течії теплоносія в навколишнє середовище полягає у визначенні аномальних значень сигналу засобу діагностики [47], використовуваного при обстеженні даної ділянки тепломережі. Неруйнівний спосіб виявлення пошкоджених ділянок підземних теплопроводів проводиться вимірюванням поверхневих розподілів густини потоку теплового випромінювання над прокладкою теплотраси. У процесі теплової діагностики теплометричний індикатор переміщується оператором вздовж вісі прокладки теплотраси, зчитуються покази, за якими будуються епюри розподілу густин потоку теплового випромінювання або температури над віссю теплотраси (рис. 1.2).

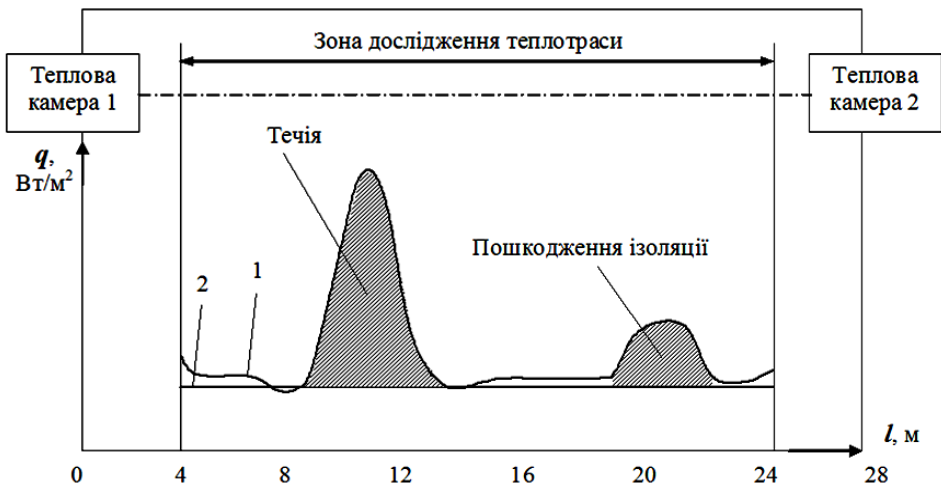


Рис. 1.2. Розподіл теоретичних та експериментальних даних при обстеженні теплотраси: 1 – епюра за експериментальними даними, 2 – розрахункові значення контрольованої величини.

Аналогічні епюри будуються за довідковими даними для конкретного виду прокладки. Аналіз епюр дозволяє виявляти місця течії й ушкодження ізоляції. Пікове відхилення характерне для місць течії

теплоносія. Незначне відхилення від лінії 2 характерне для ділянок теплопроводів з порушеною або сильно зволоженою теплоізоляцією. У результаті процес обстеження ділянок діючих тепломреж зводиться до простих дій одного оператора і здійснюється без розкриття насипного ґрунту над прокладкою мережі.

Значна частка теплової енергії може неефективно витрачатися вже безпосередньо у споживача. Тому важливим є моніторинг тепловтрат та контроль якості теплозахисних матеріалів та виробів, що застосовуються при новому будівництві та термомодернізації будинків і споруд.

Для вирішення задач моніторингу і діагностування об'єктів теплоенергетики необхідно розробити:

- теоретичні основи створення проектування перетворювачів теплового потоку з розширеним температурним діапазоном;
- засоби контролю теплоти згоряння палива з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками;
- методи та засоби моніторингу теплотехнічних параметрів і характеристик теплогенеруючих установок;
- методи і засоби моніторингу огорожувальних конструкцій;
- методи і засоби моніторингу теплових втрат на ділянках теплових мереж.

#### **1.4. Акустичні прилади та системи для діагностування модулів теплоенергетичних установок**

В останні десятиріччя для контролю і діагностування теплоенергетичного устаткування в процесі їх експлуатації важливу роль відіграють пасивні системи функціональної діагностики, джерелом інформації в яких є шумові та ритмічні сигнали (табл. 1.11), що виникають у результаті природного функціонування об'єктів [25].

*Шумові сигнали* є наслідком механічних, аеродинамічних, гідродинамічних і трибомеханічних процесів, що супроводжують роботу вузлів теплоенергетичного обладнання, і проявляються у вигляді акустичного, магнітного, електричного, теплового шуму або ширококугових вібрацій.

*Ритмічні сигнали* є результатом взаємодії деталей у кінематичних парах газових турбін, газопоршневих двигунів, електричних машин, компресорів та ін., і проявляються, як правило, у вигляді вузькосмугових багаточастотних вібрацій.

Пасивні системи діагностики, що базуються на застосуванні шумових та ритмічних сигналів, широко використовуються для контролю

Таблиця 1.11. Джерела і види шумових та ритмічних сигналів

Джерела сигналів	Види сигналів
Котли	Флуктуації температури
Газові турбіни	Аеродинамічні шуми та вібрації турбін, компресорів, електричних машин
Парові турбіни	Гідродинамічні шуми та вібрації в насосах, трубопроводах
Газопоршневі двигуни	Сигнали акустичної емісії
Електричні генератори	Акустичні сигнали витoku
Електричні двигуни	Шуми тертя-ковзання
Трубопроводи котельних установок	Контактні шуми в колекторно-щіткових вузлах електричних машин
Насоси, компресори	Магнітні шуми електричних машин
Вентилятори	Магнітні шуми Баркгаузена при перемагнічуванні
Трубопроводи тепломереж	Магнітострикційні шуми в трансформаторах
Високовольтне устаткування	Часткові розряди у високовольтному устаткуванні

та визначення технічного стану об'єктів теплоенергетики [27, 28, 51].

Найбільш розповсюдженими системами діагностування теплоенергетичного обладнання, що використовують шумові сигнали є акустико-емісійні системи та системи акустичного контактного течешукування, а ритмічні сигнали – віброакустичні системи [25].

**Акусто-емісійні системи** [27, 28, 51-53]. В твердих тілах під дією напружень, які створюються зовнішнім навантаженням, відбувається динамічна перебудова структури матеріалу на мікроскопічному або макроскопічному рівні, внаслідок чого виникає неперервна та дискретна акустична емісія (АЕ).

*Неперервна акустична емісія* з'являється при пластичній деформації тіл в результаті руху дислокацій, двійникування, бездифузійних фазових переходів. *Дискретна емісія* виникає в результаті утворення мікротріщин, а при перевищенні межі текучості матеріалу є наслідком динамічної перебудови структури матеріалу під дією високих внутрішніх напружень, викликаних скупченням дислокацій. Поява дискретної емісії характеризує початковий етап руйнування і пов'язана з утворенням, розвитком і поширенням тріщин.

Акусто-емісійні сигнали, що реєструються при пластичній деформації і зростанні тріщин, суттєво різняться. При пластичній деформації різні метали і сплави випромінюють велику кількість експоненціальних імпульсів АЕ малої амплітуди. Акусто-емісійні сигнали такого

типу реєструється як неперервний процес, а його реалізації схожі на реалізації теплового шуму електронних приладів.

При утворенні мікротріщин, виникненні і розвитку втомних тріщин проявляються як пластична деформація, так і зростання тріщин в результаті когерентних мікророзривів у суцільному матеріалі. При розвитку тріщини кожний стрибок тріщини породжує окремий експоненціальний імпульс дискретної АЕ великої амплітуди. Розвиток тріщини відбувається нерівномірно і призводить до формування дискретного акустико-емісійного сигналу у вигляді хаотичної послідовності коротких окремих імпульсів або імпульсів, що частково перекриваються, і мають високий енергетичний рівень. Реалізації сигналу дискретної АЕ схожі з реалізаціями дробового шуму електронних приладів.

Характеристики сигналів АЕ залежать від багатьох факторів, насамперед від фізико-механічних і акустичних властивостей контролюваного об'єкту, його геометрії, характеру зовнішнього навантаження і характеристик електроакустичного приймача. Основні вимірювані параметри (ГОСТ 27655–88) сигналів АЕ наведені в табл. 1.12.

Таблиця 1.12. Основні вимірювані параметри сигналів АЕ

Параметр	Позначення	Визначення
Кількість імпульсів АЕ	$N_{\Sigma}$	Кількість зареєстрованих імпульсів дискретної АЕ за інтервал часу спостереження
Сумарний рахунок АЕ	$N$	Кількість зареєстрованих перевищень імпульсами акустичної емісії встановленого рівня дискримінації за інтервал часу спостереження
Активність АЕ	$\Sigma$	Кількість зареєстрованих імпульсів АЕ за одиницю часу
Швидкість рахунку АЕ	$i$	Відношення сумарного рахунку АЕ до інтервалу часу спостереження
Енергія АЕ	$E$	Енергія, що виділяється джерелом АЕ і переноситься хвилями, які виникають в матеріалі
Параметр класифікації	$n$	Показник степені у виразі, що описує залежність сумарного рахунку АЕ $N$ від коефіцієнта інтенсивності напруг $K$ , $N = aK^n$ , де $a$ – константа, що відображає умови випробувань

Розробленням та виробництвом акусто-емісійних систем діагностики займається багато фірм і організацій, серед яких найбільши є Dunegan / Endevco, Trodyne, PAC, DWC (США); Brüel & Kjaer (Данія); AVT (Великобританія); Setim (Франція); Vallen-Systeme GmbH (Німеччина); АТ «ИНТРОСКОП», «ВНИИНК» (Молдова); ТОВ «НДТ Инже-

ниринг» (Білорусь); ЗАТ «НПО «Алькор», ЗАТ «НПФ «Диатон», ЗАТ «Специальные диагностические системы» (Росія); Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона (Україна) та ін.

Сучасні акустико-емісійні системи є цифровими, забезпечують реєстрацію сигналів АЕ та вимірювання як окремих параметрів сигналів АЕ, так і їх імовірнісних характеристик – розподілу миттєвих значень, кореляційно-спектральних характеристик (табл. 1.13).

Аналіз сукупності параметрів послідовності акустико-емісійних сигналів дозволяє визначати місце розташування джерела, його тип і ступінь небезпеки.

З табл. 1.13 видно, що базовий універсальний модуль акустико-емісійних систем діагностування повинен містити до 8 каналів, повний динамічний діапазон повинен бути не менше 60 дБ, нижня межа частотного діапазону лежить в діапазоні 20...50 кГц, верхня межа – в діапазоні 2...3 МГц.

**Системи акустичного контактного течощукання** [27, 51, 53, 54]. Акустичні сигнали витіку є наслідком гідродинамічних процесів, що протікають в течі напірних трубопроводів під дією перепаду тисків. Властивості акустичних сигналів витіку суттєво залежать від режимів витікання рідини, які визначаються в першу чергу величиною перепаду тисків і геометричними параметрами щілини.

Розрізняють наступні основні режими витікання рідини в повітря – краплинне, суцільного заповнення каналу, кавітаційне, повного відриву потоку від стінок каналу, внутрішньоканального розпаду струменя.

**Краплинне витікання.** Для води при перепаді тисків рівному 0,75 МПа і діаметрі щілини менш 0,04 мм в каналі відсутній рух і, як наслідок, будь-які акустичні сигнали.

Рух рідини в течі починається при перепаді тисків, достатньому для подолання поверхневого натягу. При цьому у вихідному перерізі утворюються або окремі краплі рідини, або окремі пухирці газу.

**Суцільне заповнення каналу** рідиною відбувається за малих перепадів тиску та нормальній температурі. У разі досягнення швидкості руху рідини в течі значення, яке відповідає критичному числу Рейнольдса, виникає турбулентна течія в каналі, що супроводжується акустичними сигналами. Зокрема, турбулентний режим течії має місце за перепадів тиску 1 МПа, товщині стінки трубопроводу 8 мм і діаметрі щілини 0,08 мм.

**Кавітаційний режим** виникає з ростом перепаду тисків. Наприклад, кавітація виникає в коротких щілинах 5...10 мм з діаметром щілини 0,1...1,0 мм за перепадів тиску близько 0,1 МПа.

Таблиця 1.13. Порівняльні характеристики акустико-емісійних систем контролю та діагностики

Назва, виробник	Кількість каналів у блоці	Параметри АЦП	Частотний діапазон, кГц	Динамічний діапазон, дБ	Рівень власних шумів, мкВ	Присутність вхідної фільтрації	Кількість зареєстр. актів в секунду	Віддалене керування	Кількість параметрів, що реєстр.
<b>AMS5</b> , Vallen-Systeme (Ні-)	36 (до 254)	16 біт, 10 МГц	10...2000	82	3	так	30 000	так	10
<b>DiSP</b> , «Physical Acoustics»	8...52	16 біт, 10 МГц	10...2100	82	3	так	10 000	так	10
<b>ГАЛІС-1</b> , Асоціація «ОКО» (Укра-)	1...100	16 біт, 2,5 МГц	10...800	95	5	так	52 000	так	11
<b>АЕС-USB</b> , Introscope (Молдова)	1...32	–	10...500	–	5	так	–	так	7
<b>Aline-32D</b> , ТОВ «ИНТЕ-РЮНИС» (Бі-)	64	16 біт, 2 МГц	1...500	84	5	ні	15 000 подій/кан.	ні	7
<b>Експерт 2014</b> , ЗАТ НВО «АЛЬКОР»	4...64	–	5...600	–	3	так	10 000	так	7
<b>Малахит 12 АС</b> , НІФ «Диагон» (Росія)	1 ... 112	14 біт, 5 МГц	10...300	80	3	так	5 000	так	6
<b>ЛОКУС-Д</b> , ЗАТ «ЭЛТЕСТ»	4...32 (до 80)	1 МГц	25...200	80	4	так	–	ні	8



В околі вихідної течії відбувається відрив рідини від стінок каналу і утворення кавітаційних бульбашок – каверн. Кавітаційний режим течії через нестабільність хвостової частини каверни супроводжується сильними акустичними сигналами, які на порядок перевищують шуми турбулентності.

При подальшому зростанні перепаду тисків спостерігається збільшення довжини каверни, її вихід з кінця каналу та руйнування, внаслідок чого починається *режим повного відриву струменя рідини* від стінок. Акустичні сигнали при цьому мінімальні.

*Режим внутрішньоканального розпаду* струменя виникає тільки в окремих випадках і при досить великих перепадах тиску. В цьому режимі струмінь рідини є нестійким, може відбуватися його скривлення і розпад на окремі краплі (розпилення). Якщо розпад струменя відбувається в середині каналу і траєкторії руху часток нестійкого струменя або крапель рідини, що відірвалися від струменя, перетинають стінки каналу, то виникають значні акустичні сигнали, причиною яких є бомбардування стінок каналу окремими частинками рідини.

Корисні акустичні сигнали (*псевдозвук*) можуть виникнути також у стінці об'єкта випробувань у разі невеликих швидкостей витікання за рахунок пульсацій тиску на стінці каналу, обумовлених нестационарністю потоку.

Для акустичного контактного течешування найбільший інтерес представляють режими суцільного заповнення каналу та кавітаційний. В цих режимах акустичні сигнали, які генеруються за рахунок турбулентності й кавітації, мають широкосмуговий неперервний спектр з верхньою частотою до декількох мегагерц. В низькочастотній частині діапазону (до 60 кГц) спектр акустичних сигналів, що реєструються при витокі, може мати локальні максимуми, відповідні до власних частот щілини.

Методи та засоби акустичного контактного течешування засновані на аналізі характеристик і параметрів акустичних сигналів витокі, реєстрація яких здійснюється за допомогою приймальних перетворювачів, що мають безпосередній контакт зі стінкою об'єкта контролю. Основними характеристиками засобів течешування є точність локації та дистанційність контролю. Точність локації розуміють як похибку у визначенні місця розташування течі, дистанційність – максимально можливу відстань від місця витокі до приймального перетворювача.

Більшість відомих приладів і систем акустичного контактного течешування базується на кореляційній обробці акустичних сигналів витокі. Принцип цих приладів заснований на вимірюванні часової за-

тримки максимуму взаємної кореляційної функції між акустичними сигналами, зареєстрованими двома рознесеними приймальними перетворювачами. Відстань від течі до одного з перетворювачів обчислюється за формулою з урахуванням знайденої затримки, відстані між датчиками і вимірної або заданої швидкості поширення звуку трубопроводом.

В деяких приладах закладена обробка акустичних сигналів витоку в частотній області. На основі аналізу спектрів і функції когерентності визначається інформативна ділянка, після чого виконується обробка сигналів у часовій області.

В Україні розробкою приладів і систем акустичного течешукування, що серійно випускаються, займаються в МП «ДИСИТ» НАН України і в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України. Широке застосування отримали течешукачі ряду російських фірм і організацій – НДІ інтроскопії Томського політехнічного університету, ТОВ «ТЕХНО-АС» підрозділ фірми «ИНТЕКО», НПК «Вектор», ТОВ «ИНКОТЕС», ТОВ «ИНТЕРЮНИС», ФГУП ОНИИП, НДЦ «Охрана» МВС. За кордоном течешукачі виробляють також фірми Seba KMT (Seba Dynatronic), Intereng Messtechnik GmbH, FAST (Німеччина); Primayer Ltd, Palmer Environmental (Великобританія); Gutermann (Швейцарія); Metrovib (Франція); Fuji Tecom Inc. (Японія); Echologics Engineering (Канада) та ін.

В табл. 1.14 наведені основні характеристики відомих течешукачів, які призначені для пошуку витоків рідини в сталевих або чавунних напірних трубопроводах з мінімальним діаметром 20 мм (риска означає, що інформація відсутня). Необхідний мінімальний перепад тиску між трубопроводом і навколишнім середовищем повинен бути не менш 0,2 МПа, мінімальне для виявлення розкриття наскрізного дефекту не менш 0,1 мм.

Дані прилади течешукування є переносними і складаються з декількох модулів – п'єзоелектричних приймальних перетворювачів, каналу передачі даних, вимірювальної станції для збору даних, блоку обробки інформації. Попередній підсилювач або вбудований у датчик, або виконаний у вигляді окремого блоку. Динамічний діапазон становить 60...70 дБ, робоча температура: -30...+70 °С.

**Вібродіагностичні системи** [27, 28, 51, 53, 55]. Вібродіагностика – один з основних і найбільш перспективних методів технічної діагностики вузлів теплоенергетичного обладнання, зокрема газотурбінних і паротурбінних установок, електрогенераторів, електричних машин, трубопроводів.

Таблиця 1.14. Порівняльні характеристики течепокачів

Назва, виробник	Точність локації, м	Частотний діапазон, кГц	Труби з ПВХ	Діаметр трубопроводу, м	Наявність вхідної фільтрації	Відстань між датчиками	Кількість датчиків
<b>SeCorr-08</b> , InterEng Messtechnik GmbH (Німеччина)	—	0,001...10	так	—	—	—	2
<b>MicroCorr-6 DKL 1506</b> , Seba KMT (Німеччина)	—	0,005...5	так	25...1500	так	250	2
<b>Correlux P-250</b> , Seba KMT (Німеччина)	—	0...4	—	—	так	—	2
<b>LC-2500</b> , Fuji Tescom Inc. (Японія)	—	0,02...5	так	—	так	—	2
<b>Eureka3</b> , Primauser Ltd. (Великобританія)	—	0,001...22	так	—	так	—	2
<b>КОРШУН –11</b> , МП «Дисит» НАНУ (Україна)	± 0,1	0,005...4,5	так	до 1400	так	—	2
<b>К-10.3М</b> , ШПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАНУ (Україна)	± 0,5 (з імов. 0,95)	—	так	до 1200	—	100	3
<b>ТКР-4102</b> , «Інкотес» (Росія)	0,1 % від розміру	0,001...9	НІ	50...1200	—	—	2
<b>А-Корр «АККА-Гео»</b> , (Росія)	± 0,2	0,3...3,5	—	25...1500	—	300	2
<b>ТАК-2005</b> , «НИИ Интроскопии» (Росія)	± 2	0,1...20	—	—	так	200	2

Цей метод базується на дослідженні характеристик віброакустичних сигналів та їх параметрів, які є найбільш чутливими до змін технічного стану об'єктів, появи й розвитку ушкоджень і можуть визначатися безпосередньо на працюючому об'єкті.

Параметрами вібрації є частота періодичних вібрацій, амплітуда і період вібрацій, пікове значення та середнє квадратичне значення коливальної величини.

Первинними величинами, які характеризують вібрацію, є вібропереміщення, віброшвидкість та віброприскорення.

Сучасні прилади і системи вібродіагностики базуються на імовірнісному аналізі віброакустичних сигналів, зокрема, на аналізі форми сигналу і його розподілу, спектральному, кореляційному, кепстральному аналізі, вейвлет-аналізі та ін. Найпоширенішим є спектральний аналіз вібрацій, який дозволяє виявляти різноманітні дефекти в елементах тепломеханічного обладнання – дисбаланс ротора, робочого колеса; неспіввісність валів; нежорстке кріплення; дефекти електродвигунів, компресорів, насосів, вентиляторів, приводних муфт, зубчастих і пасових передач, підшипників кочення та ковзання.

Вібродіагностика здійснюється за допомогою спеціалізованого обладнання – вібродіагностичної апаратури, вимоги до якої визначаються відповідними нормативними документами. На сучасному ринку апаратури для вібродіагностики вагоме місце займають віброаналізатори – портативні прилади для вимірювання безпосередньо параметрів вібрації та здійснення обробки вібраційних сигналів. На ринку України найбільш поширеними є віброаналізатори виробництва Росії та України: НПП «КонТест», ІПЦ «Вібродіагностика» (Україна); ТОВ «ИНКОТЕС», НВП «Интерприбор», ТОВ ПФФ «Вібро-Центр», «ДИАМЕХ 2000», ТОВ «Асоціація ВАСТ», Група «ОКТАВА - Електрондизайн», ТОВ «Глобал Тест», ТОВ «ТД «Технекон», ЗАТ «Алгоритмакустика» (Росія); а також Brüel & Kjaer (Данія); Emerson, Fluke Corporation (США).

Усі представлені в табл. 1.15 віброаналізатори здійснюють спектральний аналіз сигналів у діапазоні частот від одиниць Гц до десятків кГц за допомогою швидкого перетворення Фур'є, кількість ліній спектра якого становить від 50 до 51200. Дисплеї віброаналізаторів виконані за технологіями електронних трубок (VGA), рідких кристалів (LCD, TFT) або світлодіодів (LED). Окремі прилади (ВД-1852, AP1013) використовують монітор комп'ютера. Усі віброаналізатори мають інтерфейс зв'язку з персональним комп'ютером, найпоширенішим серед яких є USB.

Таблиця 1.15. Порівняльні характеристики віброаналізаторів

Назва, виробник	Кількість каналів	Частотний діапазон ШПФ	Кількість ліній спектра	Дисплей, пікселі	Інтерфейс зв'язку	Маса, кг
<b>2260</b> , Brüel & Kjær (Данія)	2	8...20000	>400	PK, 192x128	RS-232	1,2
<b>CSI 2140</b> , Emerson (США)	4	0...80000	100...12800	TFT, 640x480	USB 2.0, Ethernet	1,79
<b>Fluke 810</b> , Fluke Corporation (США)	4	2...20000	800	¼ VGA, 320x240	USB 2.0	1,9
<b>ВД-1852</b> , ІПЦ «Вибродіагностика» (Україна)	2	0,3...40000	50...12800	ПК	Ethernet	0,8
<b>795МС911</b> , НПП «КонТест» (Україна)	2	2...10000	400...6400	PK, 160x160	USB	1,4
<b>ЕКОФІЗИКА-110А</b> , Група «ОКТАВА - Електрондизайн» (Росія)	1	25...48000	200	OLED, 320x240	USB	0,55
<b>Кварц/Топаз-В</b> , ТОВ «ДИАМЕХ 2000» (Росія)	1	0,3...40000	100...1600	PK, 240x128	RS-232	2,5
<b>Онникс</b> , ТОВ «ДИАМЕХ 2000» (Росія)	2	0,5...40000	—	WVGA, 800x480	USB, Ethernet	2,5
<b>STD-3300</b> , ТОВ «ГД «Технекон» (Росія)	2	0...32000	3200...25600	LCD, 320x240	USB	0,7
<b>СД-21</b> , ТОВ «Ассоциация ВАСТ» (Росія)	2	0,5...256000	400...1600	LCD, 320x240	RS-232	0,7
<b>АДП-3101</b> , ТОВ «ИНКОТЕС» (Росія)	4	0,5...20000	200...16000	VGA, 320x240	USB	2
<b>SVAN 958</b> , ЗАТ «Алгоритм-Акустика» (Росія)	4	0,1...20000	400...1600	LCD, 128x64	RS-232, USB, IrDA, GPRS	0,5
<b>ViAna-4</b> , ТОВ ПВФ «Вибро-Центр» (Росія)	4	3...10000	до 51200	TFT, 640x480	USB 2.0, Ethernet	2
<b>Диана-2М</b> , ТОВ ПВФ «Вибро-Центр» (Росія)	2	3...10000	до 51200	PK, 320x240	USB	1,5
<b>ВИБРАН-3</b> , НВП «Интерприбор» (Росія)	4	0,5...1000	200...800	—	USB	0,34

Таким чином, статистичний аналіз діагностичних сигналів в більшості сучасних пасивних акустичних систем функціональної діагностики базується на кореляційно-спектральних методах, які є вичерпними для гауссівських сигналів. Однак аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень показав [25], що шумові та ритмічні сигнали, як правило, є негауссівськими випадковими процесами і часто мають рівномірну спектральну щільність. Це обмежує можливості існуючих пасивних систем діагностики, заснованих на методах кореляційного і спектрального аналізу.

Один із перспективних напрямів подальшого розвитку методів і засобів моніторингу об'єктів теплоенергетики полягає у вдосконаленні існуючих та розробці нових пасивних систем діагностики, які базуються на сучасних методах теорії випадкових процесів і статистичного опрацювання шумових та ритмічних сигналів.

Створення нових пасивних систем діагностики для визначення технічного стану елементів теплоенергетичного обладнання, підвищення їх чутливості та достовірності потребує вирішення таких основних завдань:

- побудови адекватних математичних моделей шумових та ритмічних сигналів, що супроводжують роботу елементів теплоенергетичного обладнання та відображають фізику їх виникнення;

- визначення найбільш інформативних характеристик та параметрів, які дозволяють контролювати та діагностувати технічний стан елементів теплоенергетичного обладнання;

- розроблення статистичних методів та програмного забезпечення для експериментального визначення нових інформативних характеристик та параметрів.

**Література**

1. *Ларииков Н.Н.* Теплотехника: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.
2. *Соколов Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети: Учеб. для вузов. – 7-е изд., стереот. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
3. *Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 588 с. – (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 4).
4. *Варфоломеев Ю.М., Кокорин О.Я.* Отопление и тепловые сети: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 480 с.
5. *Білодід В.Д.* Вироблення та споживання теплової енергії в Україні у 2005-2013 роках // Проблеми загальної енергетики. – 2015. – № 1 (40). – С. 39–46.
6. *Когенерационные системы с тепловыми двигателями: Справ. пособие: В 3 ч. / В. Н. Клименко, А.И. Мазур, П.П. Сабашук; Под ред. А.И. Мазура; Ин-т прикладных исслед. в энергетике.* – Ч. 1: Общие вопросы когенерационных технологий. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2008. – 560 с.
7. *Манушин Э. А.* Комбинированные энергетические установки с паровыми и газовыми турбинами // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Турбостроение. – 1990. – Т. 4. – 184 с.
8. *Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації: Монографія: В 2 т. / За ред. А.А. Долінського.* – Т. 1. – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2007. – 394 с.
9. *Тепловые и атомные электрические станции: Справочник / Под ред. чл.-корр. АН СССР В.А. Григорьева, В.М. Зорина.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с. – (Теплоэнергетика и теплот-ка. Кн. 3).
10. *Стан та перспективи реформування системи теплозабезпечення в Україні. Аналітична доповідь / Шевцов А.І., Бараннік В.О., Земляний М.Г., Рязова Т.В.* – Дніпропетровськ: Регіональний філіал Національного інституту стратегічних досліджень у м. Дніпропетровську. – 2010. – 66 с.
11. *Беляев С.А., Литвак В.В., Солод С.С.* Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 218 с.
12. *Казаков А.В.* Надежность, диагностика элементов энергетического оборудования. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. – 224 с.

13. *Надежность* теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: Учеб. пособие для вузов / Г. П. Гладышев и др.; Под ред. А.И. Андрущенко. – М.: Высш. шк., 1991. – 301 с.
14. *Дуров В.С., Рахмилевич А.З., Черняк Я.С.* Эксплуатация и ремонт компрессоров и насосов: Спр. пособие. – М.: Химия, 1980. – 272 с.
15. *Мадоян А.А., Канцедалов В.Г.* Дистанционный контроль оборудования ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 200 с.
16. *Судаков А.В., Трофимов А.С.* Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. – 176 с.
17. *Баранов П.А.* Предупреждение аварий паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
18. *Соколов Б.А.* Котельные установки и их эксплуатация: Учеб. для нач. проф. образования. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 432 с.
19. *Про затвердження Міської цільової програми «Гаряча вода у місті Києві» на 2011 - 2015 роки: Рішення від 25 травня 2011 року № 200/5587: Прийнято на VII сесії VI скликання Київської Міськради.* – Режим доступу: [http://kmr.ligazakon.ua/SITE2/1\\_docki2.nsf/alldocWWW/5294AC27D7F31EBEC225790B0068685C?OpenDocument](http://kmr.ligazakon.ua/SITE2/1_docki2.nsf/alldocWWW/5294AC27D7F31EBEC225790B0068685C?OpenDocument)
20. *Фігурка М.В.* Аналіз зношеності теплових мереж в Україні: проблеми й шляхи вирішення // Економічний аналіз. – 2015. – Т. 20. – С. 306–311. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/esan\\_2015\\_20\\_44](http://nbuv.gov.ua/UJRN/esan_2015_20_44).
21. *Поливанов В.И., Рыков В.А., Зленко В.Ф.* и др. Мониторинг длительной прочности котельных труб работающего энергооборудования // Электрические станции. – 2001. – № 1. – С. 5–12.
22. *Смирнов А.Н., Герике Б.Л., Муравьев В.В.* Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.
23. *Хейфец А.И.* Внедрение системы мониторинга состояния технологического оборудования тепловых сетей, опыт и перспектива использования // Энергосовет. – 2010. – №7(12). – С. 16–21.
24. *Стогній Б.С., Сопель М.Ф.* Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 62–69.
25. *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія / за ред. В.П. Бабака.* – К.: Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015. – 512 с.



26. *Бабак В.П., Красильников О.И.* Принципы побудови систем моніторингу в теплоенергетиці // Промышленная теплотехника. – 2015. – т. 37, № 6. – С. 82–92.
27. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева.* – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
28. *Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева.* – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
29. *Энергетика: история, настоящее и будущее: Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики / [Базеев Е. Т. и др. ; науч. ред.: Клименко В. Н., Ландау Ю. А., Сигал И. Я.].* - К. : [б. и.], 2011. - 400 с.
30. *Алеханович А.Н.* Коэффициент тепловой эффективности применительно к нормативному методу теплового расчета котлов // Теплоэнергетика, 2007. – №9. – С.23-29
31. *Пилипко А.Н.* Теплометрические средства диагностики процесса горения и управления энергетическими котлами / Дис-ция на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Киев: ИТТФ АН УССР, 1988. – 247 с.
32. *Heat flux sensors / The website of Hukseflux Thermal Sensors B.V., The Netherlands.* – The access mode to the website: <http://www.hukseflux.com/product> – Title screen.
33. *Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И.* и др. Комплекс аппаратуры для измерения и регистрации тепловых параметров пламени / Промтеплотехника, 2002, т. 24. – № 1. – С 113-117.
34. *Diagnostics / The website of Clyde Bergemann Power Group, Germany.* – The access mode to the website: <http://www.cbpg.com/en-gb> – Title screen.
35. *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* Основы градиентной тепломерия. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 202 с.
36. *Воробьев, Л.И.* Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива / Л.И. Воробьев, Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т. 70, № 5. – С. 828–839.
37. *Корчагина, Е.Н.* Сравнительный анализ технических и метрологических характеристик бомбовых калориметров, применяемых в России / Е.Н. Корчагина, Е.В. Ермакова, В.И. Беляков // Измерительная техника. – 2011. – № 2. – С. 51–57.

38. Корчагина, Е.Н. Калориметрия сгорания топлив / Е.Н. Корчагина, Е.В. Ермакова, В.П. Варганов // Мир измерений. – 2012. – № 2. – С. 32–39.
39. Корчагина Е.Н. Современное состояние и тенденции развития калориметрии сжигания // Измерительная техника.-1998.-№11.-С.49-54.
40. *Calorimeters* / The website of IKA®-Werke GmbH & Co, Germany / Deutschland. – The access mode to the website: <http://www.ika.com> – Title screen.
41. *AC600 Semi-Automatic Isoperibol Calorimeter* / The website of LECO Corporation, USA (Michigan). – The access mode to the website: <http://www.leco.com> – Title screen.
42. *Oxygen Bomb Calorimeters* / The website of Parr Instrument Company, USA (Illinois). – The access mode to the website: <http://www.parrinst.com> – Title screen.
43. Максимук Ю.В. Метрологическое обеспечение измерений теплоты сгорания твердых и жидких топлив / Максимук Ю.В., Фесько В.В., Васаренко И.В., Дубовик В.Г. // Приборы и методы измерений, № 2 (9), 2014 – с.67-74
44. Воробьев Л.И. Исследование влияния параметров конструкции кондуктивного бомбового калориметра на погрешности измерения/ Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. // Промышленная теплотехника.- 2001, №6, Т.23, с.141-146.
45. Дмитриев Ю. Ф. , Никоненко В. А. Датчики и приборы для энергетики и энергосбережения // Электротех-ка. – 2004.–№3. – С. 62-64.
46. Зонова А. Д., Черепанов В. Я. Исследование теплотрического метода неразрушающего контроля параметров теплоносителя в системах теплоснабжения // Интерэкспо Гео-Сибирь. –2011. №2. – С.124-129
47. *Аппаратура* и метод определения теплотерь на участках теплотрасс / А.А.Долинский, Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Л.И. Воробьев // Інновації. Промисловість, 2007. – № 2. – С. 63-69
48. *Haldane D., F. van der Graaf, Lankhorst A.M.* A direct measurement system to obtain the thermal conductivity of pipeline insulation coating systems under simulated service conditions // Offshore Technology conference (Houston, Texas, 3–6 May 1999).– 16 p.
49. *Неразрушающий контроль* : справочник в 8 т. / под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.

50. *Gregory R. Stockton. Advances in Applications and Methodology for Aerial Infrared Thermography // Proc. SPIE 5405, Thermosense XXVI, 124 (April 12, 2004).*
51. *Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич и др. – М.: Наука, 1998. – 304 с.*
52. *Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / Артюхов В.И., Вакар К.Б., Макаров В.И. и др. / Под ред. К.Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.*
53. *Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др.: Вибродиагностика. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.*
54. *Дробот Ю.Б. Грешников В. А., Бачегов В.Н. Акустическое контактное течеискание. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.*
55. *Вибродиагностика: Монография / Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др.; Под ред. Г.Ш. Розенберга. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 284 с.*

## 2. МОДЕЛІ ДІАГНОСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ТА МЕТОДИ ЇХ СТАТИСТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

### 2.1. Моделі і діагностичні характеристики шумових сигналів

Математичні моделі шумових сигналів повинні віддзеркалювати найбільш суттєві сторони фізичних процесів, що досліджуються, а для практичного застосування моделі необхідним є наявність математичного апарату, що дозволяє знаходити імовірнісні характеристики шумових сигналів. Розглянемо основні моделі шумових сигналів [1].

**Білі шуми.** Найпростішою моделлю, що відображає широкосмуговість шумових сигналів, є білий шум [2, 3]. Розрізняють білий шум в широкому сенсі і білий шум у вузькому сенсі.

*Білим шумом в широкому сенсі* називається нестационарний випадковий процес  $\xi(t)$  з некорельованими миттєвими значеннями, у якого кореляційна функція дорівнює

$$R(t_1, t_2) = \frac{D_0(t_1, t_2)}{2} \delta(t_2 - t_1), \quad (2.1)$$

де  $D_0(t_1, t_2) > 0$  – інтенсивність білого шуму;  $\delta(t)$  – дельта-функція.

*Стационарним білим шумом в широкому сенсі* називається стаціонарний випадковий процес  $\xi(t)$  з некорельованими миттєвими значеннями, що має кореляційну функцію

$$R(\tau) = \frac{D_0}{2} \delta(\tau),$$

а спектральна щільність якого рівномірна в усьому частотному діапазоні, тобто

$$S(f) = \frac{D_0}{2}, \quad f \in (-\infty, \infty),$$

де  $D_0 > 0$  – інтенсивність білого шуму.

Дисперсія білого шуму нескінченна, а інтервал кореляції дорівнює нулю, тому білий шум з неперервним часом не є таким, що фізично реалізується. На практиці модель білого шуму використовується для опису широкосмугових стаціонарних випадкових процесів зі скінченною дисперсією, в якого ширина спектру набагато більша за смугу пропускання системи, на яку впливає цей процес.

Використання моделі білого шуму в широкому сенсі обмежує можливість розв'язку задач дослідження шумових сигналів та їх функціональних перетворень рамками кореляційно-спектральної теорії. Ана-

лізувати більш повні імовірнісні характеристики шумових сигналів – їх закони розподілу, моментні функції високих порядків та ін., дозволяє застосування моделі білого шуму у вузькому сенсі [2–4].

*Білим шумом у вузькому сенсі* називається випадковий процес  $\xi(t)$  з незалежними значеннями, у якого функція розподілу дорівнює

$$F(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) = \prod_{k=1}^n F(x_k, t_k). \quad (2.2)$$

Безпосереднє використання формули (2.2) дозволяє коректно визначити тільки білий шум у вузькому сенсі з дискретним часом  $t_1, \dots, t_n \in T$ , який є послідовністю незалежних однаково розподілених випадкових величин  $\xi_1, \dots, \xi_n$  з одновимірною функцією розподілу  $F(x, t)$ . Білий шум у вузькому сенсі з неперервним часом не може бути визначений за формулою (2.2). В теорії випадкових процесів строге визначення білого шуму у вузькому сенсі базується на зв'язку між процесами з незалежними значеннями і процесами з незалежними приростами [2–4].

*Білим шумом у вузькому сенсі* називається узагальнена похідна  $\eta'(t)$  від процесу з незалежними приростами  $\eta(t)$

$$\eta'(t) = \frac{d\eta(t)}{dt}. \quad (2.3)$$

Відмітимо, що якщо в наведеному визначенні  $\eta(t)$  – випадковий процес з некорельованими приростами, то формула (2.3) визначає білий шум в широкому сенсі. Визначення (2.3) білих шумів не суперечить визначенням (2.1) і (2.2) та дозволяє в залежності від властивостей процесів з незалежними приростами [4] розрізняти стаціонарні і нестаціонарні білі шуми, класифікувати їх за законами розподілів, аналізувати структуру їх реалізацій. Зокрема, якщо в формулі (2.3)  $\eta(t)$  – процес з незалежними гауссівськими приростами  $w(t)$ , то процес  $w'(t)$  є гауссівським білим шумом, в загальному випадку нестаціонарним. Якщо у формулі (2.3)  $\eta(t)$  – узагальнений процес Пуассона  $\pi(t)$ , то процес  $\pi'(t)$  є пуассонівським білим шумом

$$\pi'(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} \eta_k \delta(t - t_k). \quad (2.4)$$

Довільний процес з незалежними приростами є сумою гауссівського процесу з незалежними приростами  $w(t)$  та зліченною або незлі-

ченною сумою узагальнених процесів Пуассона  $\pi(t)$  [4]. Тому білий шум у вузькому сенсі можна трактувати як потік дельта-імпульсів, які виникають у випадкові моменти часу  $t_k$  і мають випадкові амплітуди  $\eta_k$ .

**Процеси Бунімовича – Райса.** Вважається, що флуктуаційний сигнал  $\xi(t)$  в момент часу  $t$  в точці прийому є результатом накладання деякої випадкової кількості  $\nu(t)$  елементарних імпульсів:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{\nu(t)} \eta_k h(t-t_k), \quad t > 0, \quad (2.5)$$

де випадкові моменти часу  $t_k$  є однорідним пуассонівським потоком подій з параметром  $\lambda$ , форма елементарних імпульсів однакова для всіх моментів часу  $t_k$  і описується невідповідною функцією  $h(t)$ , а амплітуди імпульсів  $\eta_k$  є взаємно незалежними однаково розподіленими випадковими величинами, які не залежать від  $t_k$ .

Відмітимо, що якщо форма елементарних імпульсів описується дельта-функцією  $\delta(\tau)$ , то модель (2.5) є стаціонарним пуассонівським білим шумом (2.4).

Систематичне вивчення імовірнісних характеристик моделі (2.5) бере свій початок з фундаментальних робіт В. І. Бунімовича [5] і С. Райса [6] по вивченню дробового шуму в електронних лампах. В цих роботах отримані характеристичні функції процесу (2.5), його одновимірні кумулянти, кореляційно-спектральні характеристики, вирішений ряд задач аналізу лінійних і нелінійних перетворень процесу (2.5) і задача перетинів. Процес (2.5) є стаціонарним у вузькому сенсі випадковим процесом, а його одновимірні кумулянти  $\kappa_s$ , кореляційна функція  $R_\xi(\tau)$  і спектральна щільність  $S_\xi(f)$  дорівнюють:

$$\kappa_s = \lambda \alpha_s \int_{-\infty}^{\infty} h^s(t) dt; \quad R_\xi(\tau) = \lambda \alpha_2 \int_{-\infty}^{\infty} h(t) h(t+\tau) dt; \quad S_\xi(f) = \lambda \alpha_2 |H(f)|^2,$$

де  $\alpha_s$  –  $s$ -й початковий момент амплітуд  $\eta_k$  імпульсів;

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi ft} dt.$$

Одновимірна характеристична функція процесу (2.5) дорівнює

$$f_\xi(u) = \exp \left\{ \lambda \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\exp(iux h(t)) - 1] dF_\eta(x) dt \right\}, \quad (2.6)$$

де  $F_{\eta}(x)$  – функція розподілу амплітуд  $\eta_k$  імпульсів.

В роботі [7] доведено, що характеристична функція (2.6) процесів (2.5) безмежно подільна і може бути подана в канонічній формі Колмогорова

$$f_{\xi}(u) = \exp \left\{ ium_{\xi} + \int_{-\infty}^{\infty} (e^{iux} - 1 - iux) x^{-2} dK_{\xi}(x) \right\}. \quad (2.7)$$

Математичне сподівання  $m_{\xi}$  в поданні (2.7) дорівнює

$$m_{\xi} = \lambda m_{\eta} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt,$$

де  $m_{\eta} = \mathbf{M}[\eta_k]$ , а пуассонівська спектральна функція  $K_{\xi}(x)$  обчислюється за формулою

$$K_{\xi}(x) = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} K_h(x, y) dF_{\eta}(y),$$

де  $K_h(x, y)$  – ядро перетворення, яке дорівнює

$$K_h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) E[x - yh(t)] dt.$$

При виконанні умови  $\lambda\tau_0 \gg 1$ , де  $\tau_0$  – тривалість (ефективна тривалість) елементарного імпульсу, розподіл процесів (2.5) можна вважати гауссівським.

Модель (2.5) знайшла широке використання в радіофізиці, статистичній радіотехніці, електроніці, в дослідженнях феромагнетизму, акустичної емісії, кавітаційного шуму, морської реверберації. Результати робіт [5, 6] явились основою для дослідження імовірнісних характеристик процесів (2.5) та їх різноманітних узагальнень.

**Пуассонівські імпульсні процеси.** Одним з узагальнень моделі (2.5) є пуассонівські імпульсні процеси [7, 8]:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} h(t, t_k, \mathbf{\epsilon}_k), \quad t > 0, \quad (2.8)$$

де  $v(t)$  – неоднорідний процес Пуассона з математичним сподіванням  $\Lambda(t)$ , яке при  $t > 0$  не спадає та неперервне, а при  $t \leq 0$  дорівнює нулю;  $\mathbf{\epsilon}_k$  – послідовність незалежних  $n$ -вимірних однаково розподілених випадкових величин, що не залежать від  $t_k$ ; форма імпульсів  $h(t, t_k, \mathbf{\epsilon}_k)$  – детермінована функція, що залежить від випадкових величин  $t_k$  і  $\mathbf{\epsilon}_k$ .

Математичне сподівання  $m_{\xi}(t)$ , кореляційна функція  $R_{\xi}(t_1, t_2)$  і характеристична функція  $f_{\xi}(u, t)$  процесів (2.8) визначаються наступними виразами [8]:

$$m_{\xi}(t) = \int_0^{\infty} \lambda(\tau) \mathbf{M}[h(t, \tau, \xi)] d\tau; \quad (2.9)$$

$$R_{\xi}(t_1, t_2) = \int_0^{\infty} \lambda(\tau) \mathbf{M}[h(t_1, \tau, \xi) h(t_2, \tau, \xi)] d\tau; \quad (2.10)$$

$$f_{\xi}(u, t) = \exp\left\{ \int_0^{\infty} \lambda(\tau) \left[ \mathbf{M}\left\{ \exp[iu h(t, \tau, \xi)] \right\} - 1 \right] d\tau \right\}, \quad (2.11)$$

де  $\lambda(\tau) \geq 0$  – інтенсивність процесу  $v(t)$ ,  $\lambda(\tau) = \Lambda'(\tau)$ ;  $\xi$  – випадковий вектор, що має такий же розподіл, що і  $\varepsilon_k$  в формулі (2.8).

В роботі [9] доведено, що характеристична функція (2.11) процесів (2.8) безмежно подільна і допускає канонічне подання у формі Колмогорова

$$f_{\xi}(u, t) = \exp\left\{ iu m_{\xi}(t) + \int_{-\infty}^{\infty} (e^{iux} - 1 - iux) x^{-2} dK_{\xi}(x, t) \right\}, \quad (2.12)$$

в якому  $m_{\xi}(t)$  визначене за формулою (2.9), а пуассонівська спектральна функція  $K_{\xi}(x, t)$  дорівнює

$$K_{\xi}(x, t) = \int_{R^n} K_h(x, y, t) dF_{\varepsilon}(y),$$

де  $F_{\varepsilon}(y)$  – функція розподілу випадкового вектору  $\varepsilon$ ;  $K_h(x, y, t)$  – ядро перетворення,

$$K_h(x, y, t) = \int_0^{\infty} h^2(t, \tau, y) E[x - h(t, \tau, y)] \lambda(\tau) d\tau.$$

Пуассонівські імпульсні процеси (2.8) мають великі можливості для опису та дослідження флуктуаційних сигналів, однак реалізація цих можливостей при розв'язанні практичних задач наштовхується на непереборні обчислювальні труднощі навіть при знаходженні їх математичного сподівання (2.9). Тому зазвичай використовується спрощений варіант моделі (2.8):

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} \eta_k h(t - t_k, \varepsilon_k), \quad t > 0, \quad (2.13)$$

де  $v(t)$  – однорідний процес Пуассона з параметром  $\lambda$ ;  $\eta_k$  і  $\varepsilon_k$  – скалярні незалежні випадкові величини.



Очевидно, що модель (2.13) відрізняється від моделі (2.8) тільки присутністю випадкової величини  $\varepsilon_k$ . В даному випадку формули (2.9) – (2.11) суттєво спрощуються та приймають вигляд

$$m_{\xi}(t) = \lambda \alpha_1 \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau, y) dF_{\varepsilon}(y) d\tau;$$

$$R_{\xi}(t_1, t_2) = \lambda \alpha_2 \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(t_1-\tau, y) h(t_2-\tau, y) dF_{\varepsilon}(y) d\tau;$$

$$f_{\xi}(u, t) = \exp \left\{ \lambda \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ e^{i u x h(t-\tau, y)} - 1 \right] dF_{\eta}(x) dF_{\varepsilon}(y) d\tau \right\},$$

де  $\alpha_s$  –  $s$ -й початковий момент амплітуд  $\eta_k$  імпульсів;  $F_{\eta}(x)$  і  $F_{\varepsilon}(y)$  – функції розподілу випадкових величин  $\eta_k$  і  $\varepsilon_k$ .

В загальному випадку процес (2.13) нестационарний, однак для  $t \gg \tau_0$  його можна вважати стаціонарним [8]. В монографіях [10, 11] детально досліджені багатовимірні кумулянтні функції різних порядків процесу (2.13), його лінійних і нелінійних перетворень. Результати робіт [12–15] показали, що закон розподілу процесів (2.13) суттєво відрізняється від гауссівського, однак при виконанні умови  $\lambda \tau_0 \gg 1$  його розподіл можна вважати гауссівським. Модель (2.13) використовувалась в радіофізиці, статистичній радіотехніці, електрозв'язку, при аналізі магнітних шумів, морській реверберації та ін.

**Лінійні випадкові процеси.** Іншим узагальненням моделі Бунімовича – Райса (2.5) є лінійні випадкові процеси, які систематично досліджуються, починаючи з базових робіт Б.Г. Марченка [16, 17], і визначаються наступним чином:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) d\eta(\tau), \quad (2.14)$$

де  $h(t, \tau)$  – не випадкова функція, яка називається ядром процесу (2.14), а  $\eta(\tau)$  – стохастично неперервний однорідний випадковий процес з незалежними приростами, який називається породжуючим процесом.

Вираз (2.14) формально можна переписати в наступному вигляді:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) \eta'(\tau) d\tau, \quad (2.15)$$

де  $\eta'(t)$  – білий шум у вузькому сенсі (2.3). З виразу (2.15) випливає, що лінійний випадковий процес можна розглядати як результат фільтрації негауссівського білого шуму  $\eta'(t)$  лінійною параметричною сис-

темою з імпульсною характеристикою  $h(t, \tau)$ .

Відмітимо окремі випадки моделі лінійних випадкових процесів (2.14). Якщо у формулі (2.14) ядро є дельта-функцією, тобто  $h(t, \tau) = \delta(t - \tau)$ , то лінійний випадковий процес є білим шумом у вузькому сенсі. Якщо в процесі (2.14) ядро задовольняє умові  $h(t, \tau) = h(t - \tau)$ , а породжуючим є однорідний узагальнений процес Пуассона, тобто

$$\pi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} \eta_k E(t - t_k), \quad (2.16)$$

то процес (2.14) співпадає з моделлю (2.5) Бунімовича – Райса.

Імовірнісні характеристики лінійних випадкових процесів на сьогоднішній день досліджені достатньо добре. В роботах [16, 17] отримані загальні формули для знаходження багатовимірних характеристичних функцій процесів (2.14), їх багатовимірних кумулянтних функцій; розроблено метод кореляційного аналізу нелінійних перетворень лінійних випадкових процесів. В роботах [16–18] розглянуто задачі лінійних і нелінійних перетворень лінійних випадкових процесів; в роботах [19–23] досліджено властивості їх одновимірної характеристичної функції.

Розглянемо основні імовірнісні характеристики лінійних випадкових процесів.

*Характеристична функція.* Найбільш повною імовірнісною характеристикою лінійних випадкових процесів є їх багатовимірна характеристична функція [16, 17], але в більшості практичних задач можна обмежитись одновимірною характеристичною функцією, яка в формі Колмогорова визначається виразом:

$$f(u, t) = \exp \left\{ iu m_{\eta} \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [e^{iuxh(t, \tau)} - 1 - iuxh(t, \tau)] d\tau \frac{dK_{\eta}(x)}{x^2} \right\} \quad (2.17)$$

де  $m_{\eta} = \mathbf{M}[\eta(1)]$  – математичне сподівання породжуючого процесу  $\eta(\tau)$  в точці  $\tau = 1$ ,  $K_{\eta}(x)$  – його пуассонівська спектральна функція.

Характеристична функція (2.17) лінійних випадкових процесів (2.14) безмежно подільна [22] і може бути представлена в канонічній формі Колмогорова

$$f_{\xi}(u, t) = \exp \left\{ iu m_{\xi}(t) + \int_{-\infty}^{\infty} (e^{iux} - 1 - iux) x^{-2} dK_{\xi}(x, t) \right\}, \quad (2.18)$$

де  $m_{\xi}(t)$  – математичне сподівання процесу (2.14), яке дорівнює:

$$m_{\xi}(t) = m_{\eta} \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) d\tau, \quad (2.19)$$

а пуассонівські спектральні функції Колмогорова  $K_{\xi}(x, t)$  лінійних випадкових процесів і  $K_{\eta}(y)$  породжуючого процесу зв'язані формулою [22]:

$$K_{\xi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} K_h(x, y, t) dK_{\eta}(y), \quad (2.20)$$

де  $K_h(x, y, t)$  – ядро перетворення лінійних випадкових процесів, яке дорівнює:

$$K_h(x, y, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t, \tau) E[x - yh(t, \tau)] d\tau. \quad (2.21)$$

Відмітимо основні властивості лінійних випадкових процесів.

1. Якщо породжуючий процес  $\eta(\tau)$  є однорідним гауссівським процесом з незалежними приростами, то лінійний випадковий процес також є гауссівським з одновимірною характеристичною функцією

$$f(u, t) = \exp \left\{ ium_{\eta} \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) d\tau - \frac{u^2 \sigma_{\eta}^2}{2} \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t, \tau) d\tau \right\},$$

де  $\sigma_{\eta}^2 = \mathbf{D}[\eta(1)]$  – дисперсія породжуючого процесу  $\eta(\tau)$  в точці  $\tau=1$

2. Нехай на лінійну систему з імпульсною характеристикою  $h_1(t, \tau)$  впливає лінійний випадковий процес  $\xi_0(t)$ . Тоді відгуком  $\xi(t)$  системи є лінійний випадковий процес

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, s) d\eta(s)$$

з еквівалентним ядром  $h(t, s)$ , визначеним формулою

$$h(t, s) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(t, \tau) h_0(\tau, s) d\tau. \quad (2.22)$$

Таким чином, лінійні випадкові процеси замкнуті відносно лінійних перетворень, що дозволяє застосовувати єдиний підхід, як при аналізі самих лінійних випадкових процесів, так і їх лінійних перетворень.

2. Нехай ядро  $h(t, \tau)$  задовольняє умові  $h(t, \tau) = h(t - \tau)$ . Тоді процес

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) d\eta(\tau) \quad (2.23)$$

є стаціонарним у вузькому сенсі, формула (2.17) набуває вигляду

$$f(u, t) \equiv f_{\xi}(u) = \exp \left\{ ium_{\eta} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ e^{iuxh(\tau)} - 1 - iuxh(\tau) \right] d\tau \frac{dK_{\eta}(x)}{x^2} \right\},$$

а ядро перетворення (2.21) дорівнює

$$K_h(x, y, t) = K_h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) E[x - yh(t)] dt.$$

З наведених результатів видно, що отримання характеристичної функції лінійних випадкових процесів та їх лінійних перетворень є розв'язаною задачею. Однак точне знаходження функції розподілу (або щільності імовірностей) процесів (2.14) в загальному випадку є суттєвою проблемою [3, 16, 24], яка є наслідком безмежної подільності їх характеристичної функції. Тому для знаходження щільності імовірностей лінійних випадкових процесів в більшості випадків необхідно застосовувати відомі наближені методи.

Для точного знаходження і дослідження законів розподілу лінійних випадкових процесів є доцільним використовувати безпосередньо їх характеристичну функцію, зокрема, параметри  $\{m_{\xi}(t), K_{\xi}(x, t)\}$  канонічного подання характеристичної функції (2.18), які повністю визначають розподіл процесів (2.14).

*Кумулянтні функції.* При вирішенні багатьох практичних задач можна обмежитись  $n$ -вимірними кумулянтними функціями, які для лінійних випадкових процесів (2.14) визначаються за формулою [16, 17]

$$\kappa_s[\xi(t_1), \dots] = \kappa_s[\eta(1)] \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{k=1}^s h(t_k, \tau) d\tau, \quad (2.24)$$

де  $\kappa_s[\eta(1)]$  – значення кумулянтної функції породжуючого процесу в точці  $\tau=1$ .

Зокрема, одновимірні кумулянтні функції  $\kappa_s[\xi(t)]$  та кореляційна функція  $R_{\xi}(t_1, t_2)$  лінійних випадкових процесів (2.14) дорівнюють:

$$\begin{aligned} \kappa_s[\xi(t)] &= \kappa_s[\eta(1)] \int_{-\infty}^{\infty} h^s(t, \tau) d\tau; \\ R_{\xi}(t_1, t_2) &= \sigma_{\eta}^2 \int_{-\infty}^{\infty} h(t_1, \tau) h(t_2, \tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.25)$$

де  $\sigma_{\eta}^2 = \mathbf{D}[\eta(1)]$  – дисперсія породжуючого процесу  $\eta(\tau)$  в точці  $\tau=1$

Із формули (2.24) для стаціонарного процесу (2.23) отримуємо кумулянтні функції

$$\begin{aligned} \kappa_s [\xi(t)] &= \kappa_s [\eta(1)] \int_{-\infty}^{\infty} h^s(t) dt; \\ \kappa_s [\xi(t_1), \dots] &= \kappa_s [\eta(1)] \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{k=1}^s h(t_k - \tau) d\tau. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Кореляційна функція  $R_{\xi}(\tau)$  і спектральна щільність  $S_{\xi}(f)$  процесу (2.23) дорівнюють:

$$R_{\xi}(\tau) = \sigma_{\eta}^2 \int_{-\infty}^{\infty} h(t)h(t+\tau) dt; \quad S_{\xi}(f) = \sigma_{\eta}^2 |H(f)|^2, \quad H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi ft} dt.$$

Конкретні вирази для знаходження одновимірних кумулянтів, кореляційних функцій і спектральних щільностей деяких типових моделей наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Діагностичні параметри типових моделей шумових сигналів

Форма імпульсу $h(t), A > 0,$ $\tau_0 > 0, v > 0$	Кумулянти $\kappa_s [\xi(t)]$	Кореляційна функція $R_{\xi}(\tau)$	Спектральна щільність $S_{\xi}(f)$
$AE(t)E(\tau_0 - t)$	$\kappa_s [\eta] A^s \tau_0$	$\begin{cases} \sigma_{\eta}^2 A^2 \tau_0 \left(1 - \frac{ \tau }{\tau_0}\right), &  \tau  \leq \tau_0; \\ 0, &  \tau  > \tau_0 \end{cases}$	$\frac{\sigma_{\eta}^2 A^2}{(\pi f)^2} \sin^2(\pi f \tau_0)$
$Ae^{-vt}E(t)$	$\kappa_s [\eta] \frac{A^s}{sv}$	$\frac{\sigma_{\eta}^2 A^2}{2v} e^{-v \tau }$	$\frac{\sigma_{\eta}^2 A^2}{v^2 + (2\pi f)^2}$
$Ae^{-(vt)^2}E(t)$	$\kappa_s [\eta] \frac{A^s}{2v} \sqrt{\frac{\pi}{s}}$	$\frac{\sigma_{\eta}^2 A^2}{v} \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{(v\tau)^2}{2}}$	$\pi \frac{\sigma_{\eta}^2 A^2}{v^2} e^{-2\left(\frac{\pi f}{v}\right)^2}$
$A(vt)e^{-vt}E(t)$	$\frac{\kappa_s [\eta] A^s \Gamma(s+1)}{vs^{s+1}},$ $\Gamma(x)$ – гамма-функція	$\frac{\sigma_{\eta}^2 A^2}{4v} (1+v \tau ) e^{-v \tau }$	$\frac{\sigma_{\eta}^2 A^2 v^2}{[v^2 + (2\pi f)^2]^2}$

Наведені результати показують, що використання моделі лінійних випадкових процесів дозволяє досить повно досліджувати імовірнісні характеристики шумових сигналів, що мають негауссівський розподіл. Таким чином, як діагностичні параметри шумових сигналів, що описуються моделлю лінійних випадкових процесів (2.14), доцільно використовувати пуассонівську спектральну функцію, щільність імовірностей, одновимірні кумулянтні функції, кореляційні функції та спектральні щільності.

Модель лінійних випадкових процесів використовувалась при ана-

лізі віброакустичних шумів підшипників, кавітаційного шуму, сигналів акустичної емісії, акустичних сигналів витоку рідини в трубопроводах, динаміки навантаження в енергосистемах, гідроакустичних шумів, відбитих радіолокаційних сигналів, біомедичних сигналів.

## 2.2. Моделі та діагностичні характеристики ритмічних сигналів

**Кореляційно-спектральні моделі.** Ритмічні сигнали є результатом взаємодії деталей у кінематичних парах працюючих машин і механізмів та проявляються, як правило, у вигляді вузькосмугових багаточастотних вібрацій. В задачах технічної діагностики ритмічні сигнали досліджуються, як правило, в рамках енергетичної теорії сигналів методами гармонічного аналізу, які базуються на спектральних поданнях цих сигналів у різних формах. Конкретні форми спектрального подання визначаються прийнятими математичними моделями ритмічних сигналів, які поділяються на детерміновані та стохастичні.

**Детерміновані моделі.** Основними детермінованими моделями ритмічних сигналів є періодичні та майже періодичні процеси [24, 25].

1. *Спектральні подання періодичного процесу.* Періодичний процес  $x(t)$  із періодом  $T_0 > 0$  можна розкласти в комплексний ряд Фур'є

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{i2\pi k f_1 t}, \quad (2.27)$$

де  $f_1 = 1/T_0$  – частота першої (основної) гармоніки; коефіцієнти  $C_k$  – комплексні числа, які обчислюються на періоді й дорівнюють

$$C_k = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) e^{-i2\pi k f_1 t} dt. \quad (2.28)$$

Точка  $t_0$  вибирається довільно, зазвичай  $t_0 = 0$  або  $t_0 = -T_0/2$ .

Ряд (2.27) називається *спектральним поданням періодичного процесу в комплексній формі*. Коефіцієнти  $C_k$ , які відіграють роль амплітуд базисних функцій, зручно подати в такому вигляді  $C_k = |C_k| e^{-i \arg C_k}$ . Оскільки розглядаються частоти з діапазону  $f \in (-\infty; \infty)$ , то набір коефіцієнтів  $C_k$  називається *математичним спектром періодичного процесу*,  $|C_k|$  – його *амплітудним спектром*,  $\arg C_k$  – *фазовим спектром*.

Для практичного використання ряд (2.27) зручно перетворити до вигляду

$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(2\pi k f_1 t - \varphi_k). \quad (2.29)$$

Ряд (2.29) називається *спектральним поданням періодичного процесу в дійсній формі* і дозволяє трактувати періодичний процес як суму постійної складової  $A_0$  та нескінченної кількості гармонік з кратними частотами  $f_k = k f_1$ , кожна з яких має свою амплітуду  $A_k$  та початкову фазу  $\varphi_k$ . Ряд (2.27) тотожний поданню (2.29), тому що коефіцієнти  $C_k$  та  $C_{-k}$  – комплексно спряжені пари,  $C_k + C_{-k} = 2 \operatorname{Re}\{C_k\}$ ,  $C_k = A_k e^{-i\varphi_k} / 2$ ,  $C_{-k} = A_{-k} e^{i\varphi_k} / 2$ ,  $\varphi_{-k} = -\varphi_k$ ,  $A_k = 2|C_k|E(f)$ ,  $\varphi_k = \arg(C_k)E(f)$ .

Діагностичними параметрами періодичного процесу є період  $T_0$ , набори коефіцієнтів  $A_k$  і  $\varphi_k$ , що називаються відповідно амплітудним і фазовим фізичними спектрами періодичного процесу.

Для подання (2.27) справедлива рівність Парсеваля

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} |C_k|^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} |x(t)|^2 dt = P_{\text{cp}}. \quad (2.30)$$

З фізичної точки зору рівність (2.30) показує, що середня на періоді потужність  $P_{\text{cp}}$  процесу дорівнює сумі квадратів амплітуд гармонічних складових.

2. *Спектральне подання майже періодичного процесу.* Подання (2.27) можна узагальнити, якщо кратні частоти  $f_k = k f_1$  замінити на впорядковану за зростанням послідовність  $f_k$ . Тоді

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{i2\pi f_k t}. \quad (2.31)$$

Процеси, що описуються виразом (2.31), відносяться до класу майже періодичних процесів, які в найпростішому випадку визначаються наступним чином [25].

Число  $\tau$  називається  *$\varepsilon$ -майже періодом* ( $\varepsilon$ -зміщенням) процесу  $x(t)$ , якщо для всіх  $t$  виконується нерівність  $|x(t + \tau) - x(t)| < \varepsilon$ . В цьому випадку частоти  $f_k$  гармонік не визначають одного основного періоду і для знаходження коефіцієнтів  $C_k$  замість формули (2.28) використовується наступна формула:

$$C_k = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) e^{-i2\pi f_k t} dt.$$

Ряд (2.31) називається *спектральним поданням майже періодичного процесу в комплексній формі*. Для подання (2.31) рівність Парсеваля має вигляд

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} |C_k|^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt.$$

Діагностичні параметри майже періодичних процесів – частоти  $f_k$  та коефіцієнти  $C_k$ .

**Стохастичні моделі.** В рамках енергетичної теорії основними стохастичними моделями ритмічних сигналів є гармонізовані випадкові процеси [26] та їх підмножини – стаціонарні і періодично корельовані випадкові процеси.

1. *Спектральне подання гармонізованих випадкових процесів.* Гільбертів комплексний випадковий процес  $\xi(t)$ ,  $t \in (-\infty, \infty)$  називається *гармонізованим*, якщо його можна подати у вигляді стохастичного інтегралу

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi ft} d\gamma(f), \quad (2.32)$$

де  $f \in (-\infty, \infty)$  – дійсна змінна, що має сенс частоти;  $\gamma(f)$  – комплексна випадкова функція з нульовим математичним сподіванням і кореляційною функцією

$$G(f_1, f_2) = \mathbf{M} \left[ \gamma(f_1) \overline{\gamma(f_2)} \right].$$

Кореляційна функція гармонізованого випадкового процесу  $\xi(t)$  називається *гармонізованою* і визначається за формулою

$$R(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi(f_1 t_1 - f_2 t_2)} d_{f_1} d_{f_2} G(f_1, f_2). \quad (2.33)$$

Функція  $G(f_1, f_2)$  називається *спектральною функцією* процесу  $\xi(t)$  і задовольняє умові

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |d_{f_1} d_{f_2} G(f_1, f_2)| < \infty \quad (2.34)$$

та характеризує кореляційний зв'язок між елементарними гармонічними коливаннями  $e^{i2\pi f_1 t} d\gamma(f_1)$  і  $e^{i2\pi f_2 t} d\gamma(f_2)$  із частотами  $f_1$  та  $f_2$  [27].

В загальному випадку гармонізовані процеси є нестаціонарними випадковими процесами. Важливими в прикладному плані підмножинами цих процесів є класи стаціонарних в широкому сенсі випадкових процесів і періодично корельованих випадкових процесів.



2. *Спектральне подання стаціонарних випадкових процесів.* Припустимо, що спектральна функція  $G(f_1, f_2)$  гармонізованого процесу  $\xi(t)$  відмінна від нуля тільки на діагоналі  $f_1 = f_2$ , де вона дійсна, додатна і дорівнює:

$$G(f) = \mathbf{M} \left[ |\gamma(f)|^2 \right].$$

Тоді кореляційна функція процесу  $\xi(t)$  залежить лише від різниці аргументів  $\tau = t_2 - t_1$ , і формула (2.33) прийме вигляд

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi f\tau} dG(f). \quad (2.35)$$

В цьому випадку  $\xi(t)$  є стаціонарним в широкому сенсі процесом, в спектральному поданні (2.32) якого  $\gamma(f)$  – випадкова функція з ортогональними приростами, що має наступні властивості:

- 1)  $\mathbf{M}[\gamma(f)] = 0$ ;
- 2)  $\mathbf{M} \left\{ [\gamma(f_2) - \gamma(f_1)] \overline{[\gamma(f_4) - \gamma(f_3)]} \right\} = 0$  для будь-яких  $f_1 < f_2 < f_3 < f_4$ ;
- 3)  $\mathbf{M} \left\{ |\gamma(f + \Delta f) - \gamma(f)|^2 \right\} = G(f + \Delta f) - G(f)$ .

У цьому випадку елементарні гармонічні коливання  $e^{i2\pi f_1 t} d\gamma(f_1)$  і  $e^{i2\pi f_2 t} d\gamma(f_2)$  некорельовані між собою при будь-яких  $f_1, f_2 \in (-\infty, \infty)$ , а спектральна функція  $G(f)$  характеризує розподіл середньої потужності стаціонарного процесу  $\xi(t)$  по частоті.

В загальному випадку функція  $G(f)$  є неперервною зліва неспадною функцією, причому  $G(-\infty) = 0$ ,  $G(\infty) = R(0) = \mathbf{D}[\xi(t)]$ , і може бути подана у вигляді суми трьох монотонно неспадних функцій – функції стрибків, абсолютно неперервної функції і сингулярної функції.

1. Нехай  $G(f)$  – функція стрибків, тобто

$$G(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2 E(f - f_k),$$

де  $E(t)$  – одинична функція. Тоді стаціонарний випадковий процес  $\xi(t)$  є процесом з *дискретним спектром* і може бути поданий в наступному вигляді:

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k e^{i2\pi f_k t}, \quad (2.36)$$

де  $\gamma_k$  – незалежні однаково розподілені комплексні випадкові величини, у яких [4]  $\mathbf{M}[\gamma_k] = 0$ ,  $\mathbf{D}[\gamma_k] = \sigma_k^2$ .

Формула (2.35) в цьому випадку матиме вигляд

$$R(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2 e^{i2\pi f_k \tau}. \quad (2.37)$$

З формули (2.37) випливає, що кореляційна функція процесів з дискретним спектром є майже періодичною функцією, для якої рівність Парсеваля має вигляд

$$\mathbf{D}[\xi(t)] = R(0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2. \quad (2.38)$$

В окремому випадку, коли випадкові величини  $\gamma_k$  та  $\gamma_{-k}$  утворюють комплексно спряжені пари, а частоти  $f_k = f_{-k}$ ,  $f_0 = 0$ , процес (2.36) є дійсним, а його кореляційна функція дорівнює

$$R(\tau) = \sigma_0^2 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \sigma_k^2 \cos 2\pi f_k \tau.$$

Якщо додатково частоти  $f_k$  є кратними, тобто  $f_k = k f_1$ , то кореляційна функція є періодичною функцією з періодом  $T_0 > 0$ , тобто  $R(\tau) = R(\tau + T_0)$  і

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} R(\tau) e^{-i2\pi k f_1 \tau} d\tau.$$

2. Нехай спектральна функція  $G(f)$  є абсолютно неперервною. В цьому випадку існує функція  $S(f) = G'(f)$ , яка називається спектральною щільністю стаціонарного випадкового процесу  $\xi(t)$ , представленого формулою (2.32). Процес  $\xi(t)$  в даному випадку називають процесом з *неперервним спектром*, а формула (2.35) набуває вигляду

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{i2\pi f \tau} df.$$

Спектральна щільність  $S(f)$  знаходиться за відомою кореляційною функцією за допомогою формули обернення

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau.$$

Таким чином, діагностичними параметрами стаціонарних випадкових процесів з дискретним спектром можуть бути частоти  $f_k$  і дисперсії  $\sigma_k^2$  амплітуд  $\gamma_k$ .

2. *Спектральне подання періодично корельованих випадкових процесів.* Нехай  $\xi(t)$  – періодично корельований випадковий процес з періодом  $T_0 > 0$ , тобто для нього

$$m(t + T_0) = m(t); \quad R(t_1 + T_0, t_2 + T_0) = R(t_1, t_2).$$

Тоді його кореляційна функція може бути подана в наступному вигляді [27]:

$$R(t + \tau, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} R_k(\tau) e^{i2\pi k t / T_0}, \quad (2.39)$$

де  $R_k(\tau)$  – кореляційні компоненти, які дорівнюють

$$R_k(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} R(t + \tau, t) e^{-i2\pi k t / T_0} dt. \quad (2.40)$$

Припустимо, що спектральна функція  $G(f_1, f_2)$  періодично корельованого випадкового процесу  $\xi(t)$  є абсолютно неперервною по обох аргументах  $f_1$  і  $f_2$ . Тоді існує функція

$$S(f_1, f_2) = \frac{\partial^2 G(f_1, f_2)}{\partial f_1 \partial f_2},$$

яка називається *двочастотною спектральною щільністю* періодично корельованого випадкового процесу і може бути подана наступним чином [27]:

$$S(f_1, f_2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S_k(f_2) \delta\left(f_1 - f_2 - \frac{k}{T_0}\right), \quad (2.41)$$

де  $\delta(f)$  – дельта-функція, а  $S_k(f)$  – спектральні компоненти, які дорівнюють

$$S_k(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_k(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau. \quad (2.42)$$

З наведених співвідношень (2.39) – (2.42) випливає, що у періодично корельованих випадкових процесів корельовані гармоніки, частоти яких задовольняють умові  $f_2 = f_1 - k / T_0$ . Тому, для будь-якого моменту часу  $t_0$  миттєві значення  $\xi(t_k)$ ,  $t_k = t_0 + kT_0$ ,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , періо-

дично корельованого випадкового процесу є стаціонарною в широкому сенсі випадковою послідовністю.

Таким чином, основними діагностичними характеристиками періодично корельованих випадкових процесів є період  $T_0$ , кореляційні компоненти  $R_k(\tau)$  та спектральні компоненти  $S_k(f)$ .

**Моделі випадкових коливань.** Використання теорії випадкових коливань при розрахунках механічних систем є необхідною умовою для створення обґрунтованих методів проектування надійних і оптимальних конструкцій. Необхідно зазначити, що серед прикладних задач теорії випадкових процесів значне місце займають задачі, пов'язані з аналізом випадкових коливань. Це пояснюється тим [28, 29], що методи класичної механіки, що базуються на понятті детермінізму, недостатні для розуміння і пояснення окремих фізичних ефектів, зокрема пов'язаних з випадковими збуреннями.

Розглянемо моделі випадкових коливань, серед яких виділимо лінійні системи із зосередженими параметрами з  $n$  степенями свободи.

Рівняння системи з  $n$  степенями свободи [28] має вигляд

$$\mathbf{A}(t) \frac{d^2 \boldsymbol{\xi}(t)}{dt^2} + \mathbf{B}(t) \frac{d \boldsymbol{\xi}(t)}{dt} + \mathbf{C}(t) \boldsymbol{\xi}(t) = \boldsymbol{\eta}(t), \quad (2.43)$$

де  $\boldsymbol{\xi}(t)$  – матриця-стовпчик узагальнених зміщень (відгуків);  $\boldsymbol{\eta}(t)$  – матриця-стовпчик узагальнених сил (впливів).

Квадратні матриці розмірності  $n \times n$   $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{B}(t)$  і  $\mathbf{C}(t)$  мають відповідно сенс інерційної, дисипативної і квазіпружної матриць. Якщо всі елементи матриць  $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{B}(t)$  і  $\mathbf{C}(t)$  не залежать від часу, то система є непараметричною.

При детермінованому впливі  $\boldsymbol{\eta}(t)$  випадкові коливання виникають, якщо [29]:

- 1) хоча б один з елементів матриць  $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{B}(t)$  і  $\mathbf{C}(t)$  є випадковою величиною чи випадковою функцією;
- 2) хоча б одна з початкових умов рівняння (2.43) є випадковою величиною.

Вважаємо матриці  $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{B}(t)$  і  $\mathbf{C}(t)$  детермінованими, початкові умови – нульовими; вплив  $\boldsymbol{\eta}(t)$  – випадковою функцією (не обов'язково часу).

В теорії випадкових коливань [28, 29] розглядаються наступні види впливів:

- 1) білий шум, зазвичай стаціонарний і гауссівський;
- 2) гауссівські випадкові процеси, найчастіше стаціонарні.

В роботі [28] відмічено, що стаціонарні гауссівські випадкові процеси з дробово-раціональними спектральними щільностями можна розглядати як відгук непараметричної лінійної системи на вплив гауссівського білого шуму.

Зазвичай при розв'язанні теоретичних і прикладних задач теорії випадкових коливань замість рівняння (2.43) розглядають [3, 30] два еквівалентних варіанта диференціальних рівнянь:

- 1) систему  $2n$  рівнянь першого порядку;
- 2) одне рівняння  $2n$  порядку.

Розглянемо ці варіанти докладніше.

1. Система  $2n$  рівнянь першого порядку. Нехай є система з одним ступенем свободи, рівняння для якої має вигляд:

$$a(t) \frac{d^2 \xi(t)}{dt^2} + b(t) \frac{d \xi(t)}{dt} + c(t) \xi(t) = \eta(t). \quad (2.44)$$

Рівнянню (2.44) еквівалентна [31] наступна система рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{d \gamma_1(t)}{dt} = f_{11}(t) \gamma_1(t) + f_{12}(t) \gamma_2(t) + g_1(t) \eta(t); \\ \frac{d \gamma_2(t)}{dt} = f_{21}(t) \gamma_1(t) + f_{22}(t) \gamma_2(t) + g_2(t) \eta(t); \end{cases} \quad (2.45)$$

$$\xi(t) = q_1(t) \gamma_1(t) + q_2(t) \gamma_2(t), \quad (2.46)$$

де невідповідні функції  $f_{kj}(t)$ ,  $g_k(t)$  і  $q_k(t)$  однозначно виражаються [31] через функції  $a(t)$ ,  $b(t)$  і  $c(t)$  рівняння (2.44).

Процеси  $\gamma_1(t)$  і  $\gamma_2(t)$  називаються [31] змінними станами системи, (2.45) – рівнянням стану системи, (2.46) – вихідним рівнянням системи.

Загальному рівнянню (2.43) системи з  $n$  степенями свободи відповідають [3, 31]  $2n$ -вимірні векторні рівняння в стандартній формі:

$$\frac{d \boldsymbol{\chi}(t)}{dt} = \mathbf{F}(t) \boldsymbol{\chi}(t) + \mathbf{G}(t) \boldsymbol{\eta}(t); \quad (2.47)$$

$$\boldsymbol{\xi}(t) = \mathbf{Q}(t) \boldsymbol{\chi}(t), \quad (2.48)$$

де  $\boldsymbol{\chi}(t)$  – матриця змінних станів розмірності  $2n \times 1$ ;  $\mathbf{F}(t)$  – матриця розмірності  $2n \times 2n$ ;  $\mathbf{G}(t)$  – матриця розмірності  $n \times 1$ ;  $\mathbf{Q}(t)$  – матриця розмірності  $1 \times 2n$ ;  $\mathbf{Q}(t) = [1 \ 0 \ 0 \dots 0]$ .

Методи отримання матриць, що входять в рівняння (2.47) і (2.48) докладно розглянуто в роботі [31].

2. *Одне рівняння порядку  $N = 2n$ .* Систему рівнянь (2.43) можна привести [30] до одного еквівалентного рівняння порядку  $N = 2n$  відносно будь-якого з процесів (відгуків)  $\xi_k(t)$ ,  $k = \overline{1, n}$ . В загальному випадку таке рівняння має вигляд

$$v_N(t) \frac{d^N \xi(t)}{dt^N} + v_{N-1}(t) \frac{d^{N-1} \xi(t)}{dt^{N-1}} + \dots + v_0(t) \xi(t) = \zeta(t), \quad (2.49)$$

де  $\xi(t) = \xi_k(t)$  – одна з компонент вектора відгуків  $\xi(t)$ ;  $v_j(t)$ ,  $j = \overline{0, N}$ , – детерміновані функції, які виражаються через елементи матриць  $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{B}(t)$  і  $\mathbf{C}(t)$ ;  $\zeta(t)$  – випадковий процес, який визначається впливами  $\eta_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , і елементами матриць  $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{B}(t)$  і  $\mathbf{C}(t)$ .

На основі принципу суперпозиції в рівнянні (2.43) можна враховувати лише один вплив  $\eta_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , вважаючи решту рівними нулю. У цьому випадку права частина рівняння (2.49) має вигляд [30]

$$\zeta(t) = w_M(t) \frac{d^M \eta(t)}{dt^M} + w_{M-1}(t) \frac{d^{M-1} \eta(t)}{dt^{M-1}} + \dots + w_0(t) \eta(t), \quad (2.50)$$

де  $M \leq N$ ,  $\eta(t) = \eta_i(t)$ ;  $w_k(t)$  – детерміновані функції, які виражаються через елементи матриць  $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{B}(t)$  і  $\mathbf{C}(t)$ .

Для отримання перетворень рівняння (2.43) у рівняння (2.49), (2.50) можна використовувати [30] два методи:

- 1) метод вирівнюючих коефіцієнтів;
- 2) метод послідовного диференціювання.

*Розв'язок рівняння (2.43).* Загальний розв'язок при нульових початкових умовах має вигляд

$$\xi(t) = \mathbf{Q}(t) \int_{-\infty}^t \Phi(t, \tau) \mathbf{G}(\tau) \boldsymbol{\eta}(\tau) d\tau, \quad (2.51)$$

де  $\mathbf{Q}(t)$ ,  $\mathbf{G}(\tau)$  – матриці, що входять в рівняння (2.47) і (2.48),  $\hat{\mathbf{O}}(t, \tau)$  – детермінована матриця, яка називається [31] перехідною матрицею стану лінійної системи.

Вводячи позначення

$$\mathbf{h}(t, \tau) = \mathbf{Q}(t) \hat{\mathbf{O}}(t, \tau) \mathbf{G}(\tau) E(t - \tau), \quad (2.52)$$

формулу (2.51) можна записати в наступному вигляді:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}(t, \tau) \boldsymbol{\eta}(\tau) d\tau. \quad (2.53)$$

Матрична функція  $\mathbf{h}(t, \tau)$  в теорії систем [31] називається *матричною імпульсною характеристикою лінійної системи*, а в теорії коливань [28] – *функцією Гріна*.

Розглянуті моделі (2.43), (2.47), (2.49), (2.53) не накладають обмежень на вплив  $\eta(t)$ . В теорії випадкових коливань [28, 29] виходячи з фізичних припущень часто вважають, що вплив – білий шум, зазвичай гауссівський. Враховуючи загальне визначення білого шуму як узагальненої похідної від процесу з незалежними приростами, тобто

$$\eta(t) = \frac{d\mathbf{\eta}(t)}{dt},$$

формулу (2.53) можна переписати в наступному вигляді

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}(t, \tau) d\mathbf{\eta}(\tau). \quad (2.54)$$

Строгий перехід від рівняння (2.43) до рівняння (2.54) на основі моделей (2.47), (2.48) наведено в роботі [32].

Матричну функцію  $\mathbf{h}(t, \tau)$  можна розглядати як імпульсну характеристику формуючого фільтра, який визначається властивостями досліджуваної коливальної системи. З виразу (2.54) випливає, що випадкові коливання лінійних систем із зосередженими параметрами з  $n$  степенями свободи при вхідних впливах у вигляді білого шуму в вузькому сенсі являють собою вектор лінійних випадкових процесів, які в загальному випадку є нестационарними і негауссівськими.

Таким чином, для аналізу імовірнісних характеристик випадкових коливань лінійних систем в загальному випадку доцільно використовувати математичний апарат теорії лінійних випадкових процесів, що розглянутий в підрозділі 2.1. Зазначимо, що такий підхід був використаний [2] для імовірнісного аналізу віброакустичних шумів підшипників в системах діагностики електроенергетичного обладнання.

### 2.3. Оцінювання моментів і кумулянтів

Одномірні моменти (початкові та центральні) і кумулянти шумових та ритмічних сигналів є найпростішими, але досить інформативними діагностичними параметрами, що характеризують стан вузлів теплоенергетичного обладнання.

**Оцінки моментів.** Якщо стаціонарний процес  $\xi(t)$ , який спостерігається на інтервалі  $[0; T]$ , має властивість ергодичності відносно математичного сподівання, то оцінку його математичного сподівання

можна знайти за однією реалізацією (2.4), тобто

$$\hat{m} = \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) dt.$$

Якщо в ергодичного процесу  $\xi(t)$  існують моменти  $\alpha_s$  порядку  $s$ ,  $s=1,2,\dots$ , то відповідні оцінки початкових  $\hat{\alpha}_s$  і центральних  $\hat{\mu}_s$  моментів визначаються формулами:

$$\hat{\alpha}_s = \frac{1}{T} \int_0^T \xi^s(t) dt; \quad \hat{\mu}_s = \frac{1}{T} \int_0^T [\xi(t) - \hat{m}]^s dt.$$

В процесі цифрової обробки, досліджуваний ергодичний процес  $\xi(t)$  зазнає дискретизації з кроком  $T_d$ , в результаті чого отримуємо вибірку  $\xi_1, \dots, \xi_N$  об'ємом  $N$ , і формули для оцінок початкових  $\hat{\alpha}_s$  і центральних  $\hat{\mu}_s$  моментів порядку  $s$  мають вигляд:

$$\hat{\alpha}_s = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_k^s; \quad \hat{\mu}_s = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\xi_k - \hat{\alpha}_1)^s, \quad (2.55)$$

де  $\hat{\alpha}_1 = \hat{m}$  – оцінка математичного сподівання.

Розглянемо властивості оцінок (2.55), вважаючи елементи вибірки  $\xi_1, \dots, \xi_N$  незалежними однаково розподіленими випадковими величинами.

Математичне сподівання і дисперсія оцінок  $\hat{\alpha}_s$  і  $\hat{\mu}_s$  відповідно дорівнюють [33]

$$\begin{aligned} \mathbf{M}[\hat{\alpha}_s] &= \alpha_s; \quad \mathbf{M}[\hat{\mu}_s] = \mu_s + O(N^{-1/2}); \quad \mathbf{D}[\hat{\alpha}_s] = \frac{\alpha_{2s} - \alpha_s^2}{N}; \\ \mathbf{D}[\hat{\mu}_s] &= \mu_{2s} - 2s\mu_{s-1}\mu_{s+1} - \mu_s^2 + s^2\mu_2\mu_{s-1}^2 + O(N^{-2}), \end{aligned} \quad (2.56)$$

де  $O(N^{-2})$  – величина того ж порядку що і  $N^{-2}$ .

З формули (2.56) випливає, що оцінки початкових  $\alpha_s$  і центральних  $\mu_s$  моментів є асимптотично незміщеними і слухними. Середні квадратичні помилки оцінок моментів дорівнюють

$$\varepsilon(\hat{\alpha}_s) = \sqrt{\frac{\alpha_{2s} - \alpha_s^2}{N}}; \quad \varepsilon(\hat{\mu}_s) = \sqrt{\frac{\mu_{2s} - 2s\mu_{s-1}\mu_{s+1} - \mu_s^2 + s^2\mu_2\mu_{s-1}^2}{N}}. \quad (2.57)$$

Відносні помилки оцінювання початкових і центральних моментів, що не дорівнюють нулю, з урахуванням (2.57) приймуть вигляд



$$\delta(\hat{\alpha}_s) = \frac{1}{\alpha_s} \sqrt{\frac{\alpha_{2s} - \alpha_s^2}{N}}; \delta(\hat{\mu}_s) = \frac{1}{\mu_s} \sqrt{\frac{\mu_{2s} - 2s\mu_{s-1}\mu_{s+1} - \mu_s^2 + s^2\mu_2\mu_{s-1}^2}{N}}. \quad (2.58)$$

З формул (2.58) визначимо мінімальні об'єми вибірок  $N_{\min}$ , при яких забезпечується задана відносна помилка оцінювання відповідного моменту  $s$ -го порядку

$$N_{\min}(\hat{\alpha}_s) = \frac{\alpha_{2s} - \alpha_s^2}{[\delta(\hat{\alpha}_s)\alpha_s]^2}; \quad N_{\min}(\hat{\mu}_s) = \frac{\mu_{2s} - 2s\mu_{s-1}\mu_{s+1} - \mu_s^2 + s^2\mu_2\mu_{s-1}^2}{[\delta(\hat{\mu}_s)\mu_s]^2}.$$

**Оцінки кумулянтів.** Згідно з роботою [33] кумулянти визначаються за наступною формулою:

$$\kappa_s = \left. \frac{d^s \ln f(u)}{i^s du^s} \right|_{u=0},$$

де  $f(u)$  – характеристична функція,  $i = \sqrt{-1}$ .

Вирази для оцінок кумулянтів одержують на основі їх зв'язку з моментами [34], зокрема оцінки перших чотирьох кумулянтів мають вигляд

$$\hat{\kappa}_1 = \hat{m}; \quad \hat{\kappa}_2 = \hat{\mu}_2; \quad \hat{\kappa}_3 = \hat{\mu}_3; \quad \hat{\kappa}_4 = \hat{\mu}_4 - 3\hat{\mu}_2^2. \quad (2.59)$$

Математичні сподівання оцінок кумулянтів дорівнюють [33]

$$\begin{aligned} \mathbf{M}[\hat{\kappa}_1] &= \kappa_1; \quad \mathbf{M}[\hat{\kappa}_2] = \frac{N-1}{N} \kappa_2; \quad \mathbf{M}[\hat{\kappa}_3] = \frac{(N-1)(N-2)}{N^2} \kappa_3; \\ \mathbf{M}[\hat{\kappa}_4] &= \frac{(N-1)(N^2-6N+6)}{N^2} \kappa_4 - 6 \frac{(N-1)}{N^2} \kappa_2^2. \end{aligned} \quad (2.60)$$

Дисперсії оцінок кумулянтів  $\kappa_s$ ,  $s = \overline{1, 3}$ , на підставі виразів (2.59) дорівнюють дисперсіям оцінок відповідних моментів  $\hat{\alpha}_1$ ,  $\hat{\mu}_2$ ,  $\hat{\mu}_3$ , визначених формулою (2.56), а дисперсія оцінки четвертого кумулянту дорівнює

$$\mathbf{D}[\hat{\kappa}_4] = \frac{\mu_8 + 48\mu_2^2\mu_4 - 36\mu_2^4 - \mu_4^2 + 64\mu_2\mu_3^2 - 8\mu_3\mu_5 - 12\mu_2\mu_6}{N}. \quad (2.61)$$

З формул (2.60) випливає, що оцінки кумулянтів є асимптотично незміщеними, а з формул (2.56), (2.61) – слухними.

**Оцінки коефіцієнтів асиметрії та ексцесу.** В практичних задачах часто зручно оперувати безрозмірними кумулянтними коефіцієнтами  $\gamma_s$ ,  $\gamma_s = \kappa_s \kappa_2^{-s/2}$ .

На сьогоднішній день з усіх кумулянтних коефіцієнтів найчастіше використовуються коефіцієнти асиметрії  $\gamma_3$  та ексцесу  $\gamma_4$ . Зокрема, ці

коефіцієнти є простими і зручними числовими характеристиками, що показують ступінь відмінності досліджуваного розподілу від гауссівського, для якого  $\gamma_s = 0$  при  $s \geq 3$ . На основі коефіцієнтів  $\gamma_3$  і  $\gamma_4$  проводиться вибір апроксимуючих щільностей ймовірностей із систем розподілів Пірсона [35] і Джонсона [36].

Оцінки коефіцієнтів асиметрії  $\gamma_3$  і ексцесу  $\gamma_4$  знаходять за формулами

$$\hat{\gamma}_s = \frac{\hat{\mu}_s - 3\hat{\mu}_2 \hat{\mu}_2^{s/2}}{\hat{\mu}_2^{s/2}}, \quad s = 3, 4, \quad (2.62)$$

де  $\hat{\mu}_s$  – оцінки центральних моментів (2.55).

Математичні сподівання і дисперсії оцінок (2.62) дорівнюють [33]:

$$\mathbf{M} \left[ \begin{matrix} \hat{\gamma}_3 \\ \hat{\gamma}_4 \end{matrix} \right] = \begin{matrix} c_3 \\ c_4 \end{matrix}, \quad \mathbf{D} \left[ \begin{matrix} \hat{\gamma}_3 \\ \hat{\gamma}_4 \end{matrix} \right] = \begin{matrix} c_3 \\ c_4 \end{matrix} / N, \quad s = 3, 4,$$

де коефіцієнти  $c_3, c_4$  визначені виразами [37]

$$c_3 = M_6 - 3M_3M_5 - 6M_4 + \frac{9}{4}M_3^2M_4 + \frac{35}{4}M_3^2 + 9;$$

$$c_4 = M_8 - 4M_4M_6 - 8M_3M_5 + 4M_4^3 - M_4^2 + 16M_3^2M_4 + 16M_3^2,$$

$$M_s = \mu_s \mu_2^{-s/2}.$$

Оцінки коефіцієнтів  $\gamma_3$  та  $\gamma_4$  є незміщеними і слухними, а середні квадратичні (2.1) помилки оцінювання дорівнюють

$$\varepsilon \left( \begin{matrix} \hat{\gamma}_3 \\ \hat{\gamma}_4 \end{matrix} \right) = \sqrt{\frac{c_s}{N}}, \quad s = 3, 4, \quad (2.63)$$

і при фіксованому  $N$  залежать тільки від коефіцієнтів  $c_s$ .

Відносні помилки (2.2) оцінювання коефіцієнтів  $\gamma_3$  та  $\gamma_4$ , що не дорівнюють нулю, при фіксованому об'ємі вибірки  $N$  визначаються формулою

$$\delta \left( \begin{matrix} \hat{\gamma}_3 \\ \hat{\gamma}_4 \end{matrix} \right) = \frac{\varepsilon \left( \begin{matrix} \hat{\gamma}_3 \\ \hat{\gamma}_4 \end{matrix} \right)}{\gamma_s} = \frac{\sqrt{c_s}}{\gamma_s \sqrt{N}}, \quad s = 3, 4. \quad (2.64)$$

З формули (2.64) можна визначити мінімальний об'єм вибірки  $N_{\min}$ , при якому забезпечуються задані відносні помилки  $\delta \left( \begin{matrix} \hat{\gamma}_3 \\ \hat{\gamma}_4 \end{matrix} \right)$ ,

$$N_{\min} = c_s (\delta \gamma_s)^{-2}. \quad (2.65)$$

Аналіз середніх квадратичних помилок оцінювання кумулянтних коефіцієнтів п'ятого і шостого порядків проведено в роботі [38].

*Аналіз типових розподілів.* В табл. 2.2 наведені значення кумулянтних коефіцієнтів  $\gamma_3$  та  $\gamma_4$  деяких типових розподілів та середні квадратичні помилки їх оцінювання, що розраховані за формулою (2.63) для об'єму вибірки  $N = 10^6$ .

Таблиця 2.2. Кумулянтні коефіцієнти та помилки їх оцінок

Розподіл	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$c_3$	$c_4$	$\varepsilon\left(\hat{\gamma}_3, \right)$	$\varepsilon\left(\hat{\gamma}_4, \right)$
Рівномірний, $a = 0, b = 10$	0	-1,2	2,06	1,32	0,001	0,001
Гауссівський, $m = 0, \sigma = 1$	0	0	6	24	0,002	0,005
Стюдента, $\nu = 13$	0	0,67	15,81	204,9	0,004	0,014
Стюдента, $\nu = 200$	0	0,03	6,28	26,3	0,003	0,005
Показниковий, $\lambda = 1$	2	6	72	8064	0,009	0,09
Гамма, $\alpha = 2, \lambda = 1$	1,41	3	31,5	1908	0,006	0,044

В табл. 2.3 наведені значення об'ємів вибірки  $N_{\min}$ , які забезпечують відносну помилку оцінювання  $\delta = 0,01$  (1 %) коефіцієнту ексцесу розподілів, для яких  $\gamma_4 \neq 0$ .

Таблиця 2.3. Об'єм вибірки  $N_{\min}$  при  $\delta = 0,01$ 

Розподіл	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$N_{\min}$
Рівномірний, $a = 0, b = 10$	0	-1,2	$9,14 \cdot 10^3$
Стюдента, $\nu = 13$	0	0,67	$4,61 \cdot 10^6$
Стюдента, $\nu = 200$	0	0,03	$2,81 \cdot 10^8$
Показниковий, $\lambda = 1$	2	6	$2,24 \cdot 10^6$
Гамма, $\alpha = 2, \lambda = 1$	1,41	3	$2,12 \cdot 10^6$

З даних табл. 2.3 випливає, що для коефіцієнту ексцесу, значення якого близькі до нуля (розподіл Стюдента з числом степенів свободи  $\nu = 200$ ), мінімальний об'єм вибірки значно збільшується в порівнянні з іншими (на два порядки).

Для перевірки наведених вище теоретичних формул одержані статистичні оцінки коефіцієнтів асиметрії і ексцесу типових розподілів та числові характеристики оцінок.

Комп'ютерним моделюванням з використанням пакета програм MatLab 6.5 [39] отримано набір з  $L$  реалізацій вибірок та масиви оцінок  $\hat{\gamma}_3(j)$  і  $\hat{\gamma}_4(j)$ ,  $j = \overline{1, L}$  (рис. 2.1).

$\xi_1(1)$	$\xi_2(1)$	...	$\xi_N(1)$	→	$\hat{\gamma}_3(1)$	$\hat{\gamma}_4(1)$
$\xi_1(2)$	$\xi_2(2)$	...	$\xi_N(2)$	→	$\hat{\gamma}_3(2)$	$\hat{\gamma}_4(2)$
...	...	...	...		...	...
$\xi_1(L)$	$\xi_2(L)$	...	$\xi_N(L)$	→	$\hat{\gamma}_3(L)$	$\hat{\gamma}_4(L)$

 Рис. 2.1. Послідовність отримання масиву оцінок  $\hat{\gamma}_3$  та  $\hat{\gamma}_4$ 

Для випадкових величин з типовими розподілами (див. табл. 2.1) змодельовані вибірки об'ємом  $N = 10^6$  та отримані оцінки коефіцієнтів асиметрії та ексцесу за формулами (2.62). Це відповідає однократному вимірюванню кумулянтних коефіцієнтів.

Всього змодельовано  $L = 10^3$  реалізацій вибірок, таким чином отримано масиви оцінок коефіцієнтів асиметрії і ексцесу об'ємом  $10^3$  значень кожний. За формулами

$$\hat{M}[\hat{\gamma}_s] = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \hat{\gamma}_s(j), \quad \hat{\sigma}(\hat{\gamma}_s) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L (\hat{\gamma}_s(j) - \hat{M}[\hat{\gamma}_s])^2} \quad (2.66)$$

отримані оцінки математичного сподівання і середнього квадратичного відхилення оцінок  $\hat{\gamma}_3$  та  $\hat{\gamma}_4$ , що відповідають багаторазовим вимірюванням коефіцієнтів  $\gamma_3$  та  $\gamma_4$ .

В табл. 2.4 наведені теоретичні значення коефіцієнтів  $\gamma_3$  і  $\gamma_4$  та оцінки математичного сподівання і середнього квадратичного відхилення їх оцінок, отриманих за формулами (2.66).

Аналіз результатів табл. 2.3 і 2.4 показує, що оцінки математичних сподівань  $\hat{M}[\hat{\gamma}_s]$  оцінок  $\hat{\gamma}_3$  та  $\hat{\gamma}_4$  близькі до теоретичних значень кумулянтних коефіцієнтів  $\gamma_3$  та  $\gamma_4$ , а оцінки середніх квадратичних відхилень  $\hat{\sigma}(\hat{\gamma}_s)$  оцінок  $\hat{\gamma}_3$  та  $\hat{\gamma}_4$  близькі до теоретичних значень середніх квадратичних помилок  $\varepsilon(\hat{\gamma}_s)$ .

**Розрізнення шумових сигналів кумулянтним методом.** Розглянемо дві моделі шумових сигналів, які відповідають можливим станам об'єкту діагностування, наприклад, справному та працездатному.

Нехай справному стану відповідає сигнал з гауссівським розподілом  $p_n(x)$  ( $m=0$ ,  $\sigma=1$ ), а працездатному – розподіл Стьюдента  $p_t(x)$  з числом степенів свободи  $\nu = 200$ .

Таблиця 2.4. Числові характеристики оцінок кумулянтних коефіцієнтів

Розподіл	Теоретичні значення $\gamma_s$	$\hat{M}[\hat{\gamma}_s]$	$\hat{\sigma}(\hat{\gamma}_s)$
Рівномірний, $a=0$ , $b=10$	$\gamma_3 = 0$ $\gamma_4 = -1,2$	-0,0000 -1,2001	0,0014 0,0012
Гауссівський, $m=0$ , $\sigma=1$	$\gamma_3 = 0$ $\gamma_4 = 0$	0,0000 -0,0002	0,0024 0,0047
Стюдента, $\nu=13$	$\gamma_3 = 0$ $\gamma_4 = 0,67$	-0,0001 0,6667	0,0041 0,0142
Показниковий, $\lambda=1$	$\gamma_3 = 2$ $\gamma_4 = 6$	2,0002 6,0016	0,0084 0,0879
Гамма, $\alpha=2$ , $\lambda=1$	$\gamma_3 = 1,41$ $\gamma_4 = 3$	1,4140 2,9984	0,0056 0,0431

Щільності ймовірностей цих розподілів практично не розрізняються, оскільки

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |p_n(x) - p_t(x)| dx = 0,0016.$$

Тому виникає необхідність визначення числових характеристик, що дозволять розрізнити ці сигнали. Розглянемо доцільність використання як таких характеристик кумулянтних коефіцієнтів  $\gamma_3$  та  $\gamma_4$  сигналів.

Теоретичні кумулянтні коефіцієнти  $\gamma_3$  і  $\gamma_4$  дозволяють вирішити задачу, що розглядається, оскільки для гауссівського розподілу  $\gamma_{3n} = \gamma_{4n} = 0$ , а для розподілу Стюдента  $\gamma_{3t} = 0$ ,  $\gamma_{4t} = 0,03$  (табл. 2.1).

Проаналізуємо можливість розрізнення цих розподілів на основі експериментальних даних, коли замість теоретичних значень кумулянтних коефіцієнтів  $\gamma_3$  та  $\gamma_4$  використовуються їх оцінки.

Для цього для гауссівського розподілу та розподілу Стюдента побудуємо еліпси розсіювання оцінок коефіцієнтів асиметрії  $\gamma_3$  та ексцесу  $\gamma_4$ , центри яких лежать на лінії  $\gamma_3 = 0$ .

Розрахуємо значення мінімального об'єму вибірки  $N_{\min}$ , коли еліпси розсіювання не будуть перетинатися. Очевидно, що ця умова буде вико-

нуватись, якщо на інтервалі  $[0; \gamma_{4t}]$  укладається по три середніх квадратичних відхилення оцінок коефіцієнтів ексцесу кожного розподілу, тобто

$$\gamma_{4t} = 3(\varepsilon_{4n} + \varepsilon_{4t}),$$

де  $\varepsilon_{4n}$ ,  $\varepsilon_{4t}$  – середні квадратичні відхилення оцінок коефіцієнтів ексцесу гауссівського розподілу та розподілу Стьюдента, відповідно.

Використовуючи вираз (2.63), отримаємо наступну формулу:

$$N_{\min} = \frac{9}{\gamma_{4t}^2} (c_{4n} + c_{4t} + 2\sqrt{c_{4n}c_{4t}}).$$

Підставляючи в дану формулу числові значення з табл. 2.1, отримаємо мінімальний об'єм вибірки  $N_{\min} = 9,667 \cdot 10^5$ .

На рис. 2.2 наведені розраховані еліпси розсіювання кожного розподілу для об'єму вибірки  $N_{\min} = 10^6$  та масиви отриманих моделюванням оцінок  $\hat{\gamma}_3(j)$  і  $\hat{\gamma}_4(j)$ ,  $j = \overline{1, L}$ ,  $L = 10^3$ , гауссівського розподілу та розподілу Стьюдента.

З рис. 2.2 видно, що еліпси розсіювання  $[\gamma_s \pm 3\varepsilon_s]$  не перетинаються, а практично всі отримані значення оцінок  $\hat{\gamma}_3(j)$  і  $\hat{\gamma}_4(j)$  лежать в областях, що обмежені відповідними еліпсами.

Таким чином, отримані результати показали можливість розрізняти два стани об'єкту, яким відповідають нормальний розподіл та розподіл Стьюдента сигналів, за сукупністю оцінок кумулянтних коефіцієнтів  $\gamma_3$  і  $\gamma_4$ .

Зазначимо, що коефіцієнти  $\gamma_3$  та  $\gamma_4$  використані в роботі [40] для класифікації дефектів підшипників кочення.

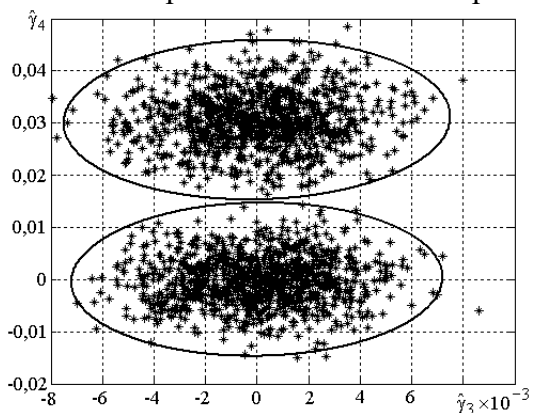


Рис. 2.2. Еліпси розсіювання для оцінок коефіцієнтів асиметрії та ексцесу гауссівського розподілу і розподілу Стьюдента

## 2.4. Оцінювання щільності ймовірностей

Простішою оцінкою щільності ймовірностей випадкових величин і процесів є гістограми [33], в загальному випадку – оцінки, що базуються на наближених методах знаходження щільності ймовірностей [33, 41, 42].

**Гістограма** є випадковою функцією, що визначається наступним чином:

$$\hat{p}_n(x) = \sum_{k=1}^n \hat{p}_k \varphi(x - x_k), \quad (2.67)$$

де  $n$  – кількість інтервалів гістограми;  $x_k = x_{\min} + 0,5(2k-1)\Delta x$ ,  $k = \overline{1, n}$ ;  $\Delta x = (\xi_{\max} - \xi_{\min})/n$ ;  $\hat{p}_k$  – частоти потрапляння досліджуваної випадкової величини у відповідний інтервал  $\Delta x$ ; функції  $\varphi(x)$  визначені наступним чином:

$$\varphi(x) = \begin{cases} (\Delta x)^{-1}, & x \in (-\Delta x/2; \Delta x/2]; \\ 0, & x \notin (-\Delta x/2; \Delta x/2]. \end{cases} \quad (2.68)$$

Оцінка (2.67) є зміщеною, тому що

$$\mathbf{M}[\hat{p}_n(x)] = \frac{\Delta F(x)}{\Delta x} \neq p(x),$$

де  $\Delta F(x) = F(x + \Delta x) - F(x)$ .

Зміщення можна наближено оцінити за формулою [43]

$$b(x) = \mathbf{M}[\hat{p}_n(x)] - p(x) = \frac{\Delta x}{2} p^{(1)}(x). \quad (2.69)$$

Дисперсія оцінки (2.67) щільності ймовірностей дорівнює

$$\mathbf{D}[\hat{p}_n(x)] = \frac{1}{N(\Delta x)^2} \Delta F(x) [1 - \Delta F(x)].$$

З останньої формули випливає, що дана оцінка є слушною. Для наближеного знаходження дисперсії оцінки (2.67) використовується формула

$$\mathbf{D}[\hat{p}_n(x)] \approx \frac{p(x)}{N\Delta x}. \quad (2.70)$$

Нормована помилка оцінки (2.67) приблизно дорівнює [43]

$$\delta(x) = \sqrt{\frac{\mathbf{D}[\hat{p}_n(x)] + b^2(x)}{p^2(x)}} \approx \sqrt{\frac{1}{N\Delta x p(x)} + \frac{\Delta x^2}{4} \left(\frac{p^{(1)}(x)}{p(x)}\right)^2}. \quad (2.71)$$

Зазначимо, що з формул (2.69)–(2.71) випливає, що нормована помилка оцінки щільності ймовірностей суттєво залежить від інтервалу  $\Delta x$ . При зменшенні  $\Delta x$  зменшується зміщення (2.69) оцінки, але зростає її дисперсія (2.70). При збільшенні  $\Delta x$  навпаки зменшується дисперсія оцінки, а зміщення зростає. Тому зменшення  $\Delta x$  і відповідно збільшення кількості інтервалів гістограми  $n$  призводить тільки до збільшення помилок оцінки щільності ймовірностей. Зазвичай кількість інтервалів гістограми рекомендують [42] обирати в залежності від об'єму вибірки  $N$ , зокрема за формулою  $n \approx 1 + 3,32 \lg N$ , в якій  $n$  приймається найближчим цілим в бік збільшення.

Для побудови гістограми необхідно виконати наступні дії.

1. Задати об'єм вибірки  $N$  та отримати вибірку  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ .
2. Визначити мінімальний  $\xi_{\min}$  і максимальний  $\xi_{\max}$  елементи вибірки.
3. Розрахувати кількість інтервалів  $n$  гістограми за формулою  $n \approx 1 + 3,32 \lg N$ .
4. Розрахувати крок гістограми за формулою  $\Delta x = (\xi_{\max} - \xi_{\min}) / n$ .
5. Розрахувати відносні частоти  $\hat{p}_k$  потрапляння відліків в інтервали гістограми

$$\left[ \xi_{\min} + (k-1)\Delta x; \xi_{\min} + k\Delta x \right), \quad k = \overline{1, n}.$$

6. Розрахувати ординати щільності ймовірностей за формулою

$$\hat{p}(x_k) = \frac{\hat{p}_k}{\Delta x}.$$

На рис. 2.3 наведена гістограма, що побудована для вибірки об'ємом  $N = 10^4$  гауссівської випадкової величини з параметрами  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$ , та графік теоретичної щільності ймовірностей.

З рис. 2.3 видно, що гістограма добре узгоджується з теоретичною щільністю ймовірностей.

**Двокомпонентні гауссівські суміші розподілів.** Нехай невідома щільність ймовірностей  $p(x)$  досліджуваної випадкової величини  $\xi$  є одновершинною та симетричною. Тоді її можна апроксимувати двокомпонентною гауссівською сумішшю



$$p_2(x) = \frac{c_1}{\sigma_1} \varphi\left(\frac{x - m_N}{\sigma_1}\right) + \frac{c_2}{\sigma_2} \varphi\left(\frac{x - m_N}{\sigma_2}\right), \quad (2.72)$$

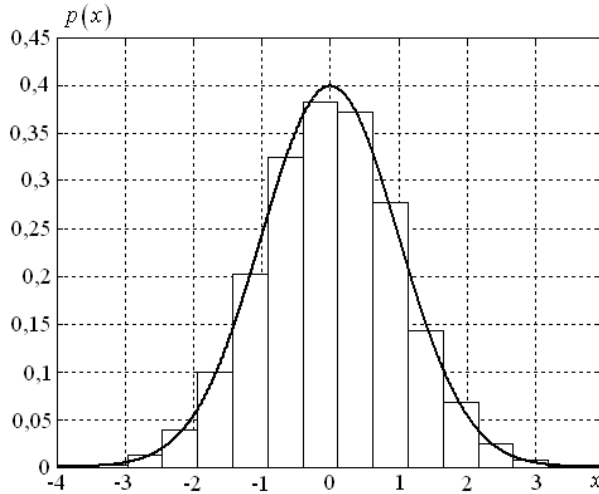


Рис. 2.3. Гістограма та щільність ймовірностей гауссівської випадкової величини з параметрами  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$

де  $c_k$  – вагові коефіцієнти суміші,  $\varphi(x)$  – щільність ймовірностей стандартної гауссівської випадкової величини:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}, \quad x \in (-\infty; \infty).$$

У роботі [44] отримані формули для знаходження параметрів  $\{c_1, c_2, m_N, \sigma_1, \sigma_2\}$  суміші (2.72), якщо відомі початкові або центральні моменти досліджуваної випадкової величини  $\xi$ . Зокрема встановлено, що суміші (2.72) можна застосовувати для апроксимації розподілів, у яких кумулянтні коефіцієнти  $\gamma_4$  та  $\gamma_6$  задовольняють умові

$$\gamma_6 > 5\gamma_4 \left( \frac{\gamma_4}{3} - 1 \right),$$

а параметри суміші обчислюються за формулами

$$\begin{aligned} c_1 &= D(1+D)^{-1}; & c_2 &= 1 - c_1; \\ m_N &= m; & \sigma_1^2 &= d\sigma_2^2; & \sigma_2^2 &= \mu_2(c_1d + c_2)^{-1}, \end{aligned} \quad (2.73)$$

де

$$D = B + \sqrt{B^2 - 1}; \quad B = 1 + 3\gamma_6^2 (50\gamma_4^3)^{-1};$$

$$d = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \begin{cases} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma_4}{3D}}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{D\gamma_4}{3}}\right)^{-1}, & \gamma_6 > 0; \\ \left(1 + \sqrt{\frac{\gamma_4}{3D}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{D\gamma_4}{3}}\right)^{-1}, & \gamma_6 < 0. \end{cases}$$

Двокомпонентну гауссівську суміш (2.72) можна використати для оцінювання щільності ймовірностей  $p(x)$ , якщо замість параметрів суміші  $\{c_1, c_2, m_N, \sigma_1, \sigma_2\}$  використовувати їх оцінки:

$$\hat{p}_2(x) = \frac{\hat{c}_1}{\hat{\sigma}_1} \varphi\left(\frac{x - \hat{m}_N}{\hat{\sigma}_1}\right) + \frac{\hat{c}_2}{\hat{\sigma}_2} \varphi\left(\frac{x - \hat{m}_N}{\hat{\sigma}_2}\right). \quad (2.74)$$

Сформулюємо методику оцінювання щільності ймовірностей  $p(x)$  за формулою (2.74).

1. Задати об'єм вибірки  $N$  та отримати вибірку  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ .
2. Знайти оцінку  $\hat{m}_N$  математичного сподівання суміші

$$\hat{m}_N = \hat{m} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_k.$$

3. Знайти оцінки  $\hat{\mu}_s$ ,  $s = 2, 4, 6$ , центральних моментів за формулою (2.55).

4. Обчислити оцінки  $\hat{\gamma}_4$  та  $\hat{\gamma}_6$  кумулянтних коефіцієнтів за формулами

$$\hat{\gamma}_4 = \frac{\hat{\mu}_4}{\hat{\mu}_2^2} - 3; \quad \hat{\gamma}_6 = \frac{\hat{\mu}_6}{\hat{\mu}_2^3} - 15 \frac{\hat{\mu}_4}{\hat{\mu}_2^2} + 30.$$

5. Перевірити виконання умови

$$\hat{\gamma}_6 > 5\hat{\gamma}_4 \left(\frac{\hat{\gamma}_4}{3} - 1\right).$$

6. Обчислити оцінку  $\hat{D}$  параметра суміші  $\hat{D} = \hat{B} + \sqrt{\hat{B}^2 - 1}$ ,  $\hat{B} = 1 + 3\hat{\gamma}_6^2 (50\hat{\gamma}_4^3)^{-1}$ .

7. Знайти оцінку  $\hat{d}$  параметра суміші

$$\hat{d} = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2} = \begin{cases} \left(1 - \sqrt{\frac{\hat{\gamma}_4}{3\hat{D}}}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{\hat{D}\hat{\gamma}_4}{3}}\right)^{-1}, & \hat{\gamma}_6 > 0; \\ \left(1 + \sqrt{\frac{\hat{\gamma}_4}{3\hat{D}}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\hat{D}\hat{\gamma}_4}{3}}\right)^{-1}, & \hat{\gamma}_6 < 0. \end{cases}$$

8. Знайти оцінки  $\hat{c}_1$  і  $\hat{c}_2$  вагових коефіцієнтів суміші

$$\hat{c}_1 = \hat{D}(1 + \hat{D})^{-1}; \quad \hat{c}_2 = 1 - \hat{c}_1.$$

9. Знайти оцінки  $\hat{\sigma}_2^2$  і  $\hat{\sigma}_1^2$  дисперсій суміші

$$\hat{\sigma}_2^2 = \hat{\mu}_2 (\hat{c}_1 \hat{d} + \hat{c}_2)^{-1}; \quad \hat{\sigma}_1^2 = \hat{d} \hat{\sigma}_2^2.$$

11. За формулою (2.74) отримати оцінку щільності ймовірностей.

Знаходження математичного сподівання і дисперсії оцінки щільності ймовірностей з використанням двокomпонентної гауссівської суміші напштовхується на непереборні труднощі.

Тому перевірка якості оцінювання щільності ймовірностей проведена методами статистичного моделювання [45] для двох моделей сумішей (табл. 2.5). Ймовірнісні характеристики оцінок знайдені по 1000 вибірках, кожна об'ємом  $N = 10^5$ .

Таблиця 2.5. Теоретичні значення та оцінки параметрів сумішей

Моделі Параметри	Суміш 1		Суміш 2	
	Теорія	Оцінка	Теорія	Оцінка
$c_1$	0,2	0,2006	0,5	0,4871
$c_2$	0,8	0,7994	0,5	0,5129
$\sigma_1$	4	3,9979	4	4,0238
$\sigma_2$	1	0,9975	1	1,0886
$m$	0	-0,0003	0	0,0001
$\sigma^2$	4	3,9992	8,5	8,4969
$\gamma_3$	0	-0,0014	0	-0,0001
$\gamma_4$	6,75	6,7458	2,3356	2,3358
$\gamma_5$	0	-0,0398	0	0,0007
$\gamma_6$	75,937	75,848	0	0,0004

З даних табл. 2.5 випливає, що значення оцінки параметрів сумішної мало відрізняються від їх теоретичних значень, що підтверджує можливість їх застосування для оцінки негауссівської одновершинної симетричної щільності ймовірностей.

**Відрізки рядів по ортогональних поліномах.** Припустимо, що щільність ймовірностей  $p(x)$ ,  $x \in [a, b]$ , досліджуваної випадкової величини  $\xi$  задовольняє умові

$$\int_a^b p^2(x) \rho(x) dx < \infty,$$

де функція  $\rho(x)$ , яка називається *ваговою*, задовольняє умовам:

$$1) \rho(x) \geq 0; \quad 2) \int_a^b \rho(x) dx < \infty.$$

Тоді щільність ймовірностей  $p(x)$  можна розкласти в ряд [3, 24, 33]

$$p(x) = \rho(x) \sum_{k=0}^{\infty} \tilde{\gamma}_k, \quad (2.75)$$

в якому базисні функції  $\varphi_k(x)$  ортогональні з вагою  $\rho(x)$ , тобто

$$\int_a^b \varphi_k(x) \varphi_l(x) \rho(x) dx = \begin{cases} 0, & k \neq l; \\ \int_a^b \varphi_k^2(x) \rho(x) dx = \|\varphi_k\|^2, & k = l, \end{cases}$$

де межі інтегрування можуть бути скінченними або нескінченними.

Нехай базисні функції  $\varphi_k(x)$  є поліномами, тобто

$$\varphi_k(x) = \sum_{j=0}^k h_{kj} x^j,$$

де  $h_{kj}$  – дійсні числа, які однозначно визначаються ваговою функцією  $\rho(x)$ .

В цьому випадку коефіцієнти  $\tilde{\gamma}_k$  подання (2.75) виражаються через початкові моменти  $\alpha_s$  досліджуваної випадкової величини  $\xi$

$$\tilde{\gamma}_k = \dots \dots \int_a^b \varphi_k(x) p(x) dx = \|\varphi_k\|^{-2} \sum_{j=0}^k h_{kj} \alpha_j$$

і ряд (2.75) можна представити в такому вигляді [46]

$$p(x) = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_j Q_j(x), \quad (2.76)$$

де

$$Q_j(x) = \rho(x) \sum_{k=j}^{\infty} \|\varphi_k\|^{-2} \varphi_k(x) h_{kj}, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

На практиці в формулі (2.75) використовується часткова сума зі скінченною кількістю складових до  $n$ -го порядку, тобто

$$p_n(x) = \rho(x) \sum_{k=0}^n \tilde{\tau} \quad (2.77)$$

У формулі (2.77) як базисні функції  $\varphi_k(x)$  найчастіше використовуються поліноми Ерміта, рідко – поліноми Лагерра, практично не використовуються поліноми Якобі.

Для оцінки щільності ймовірностей використаємо формулу (2.76) з обмеженою кількістю складових  $n$ , а замість початкових моментів використаємо їх оцінки  $\hat{\alpha}_j$  [47], тобто

$$\hat{p}_n(x) = \sum_{j=0}^n \hat{\alpha}_j Q_{nj}(x), \quad (2.78)$$

де

$$Q_{nj}(x) = \rho(x) \sum_{k=j}^n \|\varphi_k\|^2 \varphi_k(x) h_{kj}, \quad j = \overline{0, n}. \quad (2.79)$$

В роботі [47] досліджено властивості оцінки (2.78). Математичне сподівання  $M[\hat{p}_n(x)]$  оцінки (2.78) дорівнює

$$M[\hat{p}_n(x)] = \sum_{j=0}^n \alpha_j Q_{nj}(x) = p_n(x). \quad (2.80)$$

З виразу (2.80) видно, що оцінка (2.78) має зміщення  $b_n(x) = p_n(x) - p(x)$ , яке обумовлене помилкою усікання ряду (2.76), і не пов'язане з об'ємом вибірки.

Дисперсія оцінки (2.78) дорівнює

$$D[\hat{p}_n(x)] = \sum_{j=0}^n \sum_{r=0}^n R_{jr} Q_{nj}(x) Q_{nr}(x),$$

де  $R_{jr} = (\alpha_{j+r} - \alpha_j \alpha_r) / n$ , та задовольняє нерівності

$$D[\hat{p}_n(x)] \leq \frac{\alpha_{2n}}{N} \left[ \sum_{j=1}^n |Q_{nj}(x)| \right]^2. \quad (2.81)$$

З формули (2.81) випливає, що за умови існування моменту  $\alpha_{2n}$ , оцінка (2.78) є слушною. Сформулюємо методику оцінювання щільності ймовірностей  $p(x)$  за формулою (2.78).

1. На основі апріорної інформації про невідому щільність ймовірностей обрати вагову функцію  $\rho(x)$ .

2. Задати кількість  $n$  складових у формулі (2.78).

2. За ваговою функцією конкретизувати поліноми  $\varphi_k(x)$ , обчисли-

ти їх норму  $\|\varphi_k\|$  та коефіцієнти  $h_{kj}$ .

4. За формулою (2.79) знайти функції  $Q_{nj}(x)$ .

5. Задати об'єм вибірки  $N$  та отримати вибірку  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ .

6. Знайти оцінки початкових моментів  $\hat{\alpha}_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ , за формулою (2.55).

7. За формулою (2.78) отримати оцінку щільності ймовірностей.

Як приклад оцінимо щільність ймовірностей ергодичного гауссівського випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням і одиничною дисперсією [47]. В цьому випадку щільність ймовірностей одновершинна і визначена на інтервалі  $x \in (-\infty; \infty)$ , тому як вагову функцію приймаємо функцію

$$\rho(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}, \quad x \in (-\infty; \infty),$$

якій відповідають поліноми Ерміта, визначені за формулою [33, 48]

$$\Phi_k(x) = H_k(x) = (-1)^k e^{x^2/2} \frac{d^k}{dx^k} (e^{-x^2/2}).$$

Обмежимося в формулі (2.78) чотирма доданками і запишемо в явному вигляді функції  $Q_{4j}(x)$ ,  $j = \overline{0, 4}$ :

$$Q_{40}(x) = \rho(x) \left[ H_0(x) - \frac{H_2(x)}{2!} + \frac{3H_4(x)}{4!} \right];$$

$$Q_{41}(x) = \rho(x) \left[ \frac{H_1(x)}{1!} - \frac{3H_3(x)}{3!} \right];$$

$$Q_{42}(x) = \rho(x) \left[ \frac{H_2(x)}{2!} - \frac{6H_4(x)}{4!} \right];$$

$$Q_{43}(x) = \rho(x) \frac{H_3(x)}{3!};$$

$$Q_{44}(x) = \rho(x) \frac{H_4(x)}{4!},$$

де  $H_0(x) = 1$ ,  $H_1(x) = x$ ,  $H_2(x) = x^2 - 1$ ,  $H_3(x) = x^3 - 3x$ ,  $H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3$ .

Помилки оцінювання щільності ймовірностей визначимо наступним чином [43].

1. Середньоквадратична помилка оцінювання

$$\varepsilon(x) = \left( \mathbf{M} \left[ \left( \hat{p}_n(x) - p(x) \right)^2 \right] \right)^{1/2} = \left( b^2(x) + \mathbf{D} \left[ \hat{p}_n(x) \right] \right)^{1/2},$$

де  $b(x) = p(x) - \mathbf{M} \left[ \hat{p}_n(x) \right]$  – зміщення оцінки.

2. Інтегральна середньоквадратична помилка оцінювання

$$\varepsilon_{\text{int}} = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(x) dx.$$

Для різних об'ємів вибірки  $N$  в табл. 2.6 наведені теоретичні значення початкових моментів та їх оцінки, в табл. 2.7 наведені теоретичні та експериментальні значення інтегральної помилки.

Таблиця 2.6. Теоретичні значення та оцінки початкових моментів

Об'єм вибірки $N$	Моменти	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
	Теорія	0	1	0	3
500	Оцінки	-0,0314	0,9768	0,0405	3,1840
1000		0,0455	1,0645	0,1287	3,3917
5000		0,0145	0,9806	0,0640	2,8954
10000		-0,0001	1,0189	-0,0422	3,1860
50000		0,0052	1,0070	-0,0057	3,0416

Таблиця 2.7. Значення інтегральної помилки

Об'єм вибірки $N$	Теоретичні значення	Експериментальні значення
500	0,0662	0,1001
1000	0,0468	0,0685
5000	0,0209	0,0252
10000	0,0148	0,0199
50000	0,0066	0,0115

На рис. 2.4 зображені області  $m_N(x) \pm 3\sigma_N(x)$ , в яких з довірчою ймовірністю  $p_\beta = 0,997$  можуть знаходитись оцінки щільності ймовірностей.

З наведених результатів видно, що оцінювання щільності ймовірностей (2.78) дає прийнятні результати вже при об'ємі вибірки  $N = 10^4$ . Відзначимо, що в багатьох практичних задачах довірна ймовірність може бути зменшена, що приведе до звуження області можливих значень оцінюваної щільності ймовірностей. Зокрема, при  $p_\beta = 0,95$  відповідна область дорівнює  $m_N(x) \pm 1,96\sigma_N(x)$ .

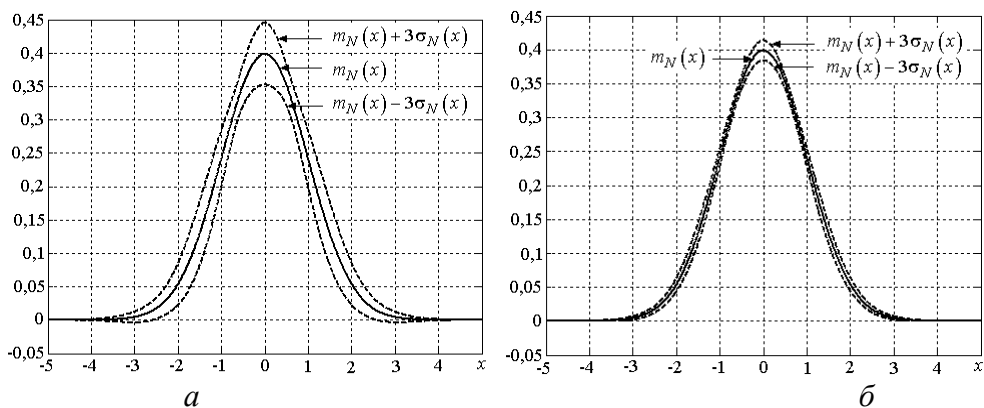


Рис. 2.4. Графіки теоретичних (суцільна лінія) та експериментальних (штрихові лінії) залежностей  $m_N(x)$ ,  $m_N(x) \pm 3\sigma_N(x)$  при різних об'ємах вибірки:  $a - N = 10^3$ ,  $b - N = 10^4$

## 2.5. Оцінювання кореляційно-спектральних характеристик

**Оцінювання кореляційних функцій.** Для оцінки кореляційних функцій застосовуються наступні основні методи [41, 43, 49]:

- 1) прямий метод;
- 2) метод на основі розкладення кореляційної функції в ряд;
- 3) метод на основі перетворення Фур'є оцінки спектральної щільності.

Розглянемо прямий метод оцінки кореляційних функцій. Нехай  $\xi(t)$  – стаціонарний випадковий процес, який має кореляційну функцію  $R(\tau)$  і спостерігається на інтервалі  $[0; T]$ . Оскільки кореляційні функції дійсних стаціонарних випадкових процесів є парними функціями аргументу  $\tau$ , то їх можна розглядати тільки для значень  $\tau \geq 0$ . Враховуючи це, запишемо формулу для оцінки кореляційної функції по одній реалізації [49]:

$$\hat{R}(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} \overset{\circ}{\xi}(t) \overset{\circ}{\xi}(t + \tau) dt, \quad 0 \leq \tau < T, \quad (2.82)$$

де  $\overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - \mathbf{M}[\xi(t)]$ .

Припустимо, що математичне сподівання процесу  $\xi(t)$  відоме, тоді математичне сподівання оцінки кореляційної функції (2.82) дорівнює



$$\begin{aligned} \mathbf{M}[\hat{R}(\tau)] &= \mathbf{M}\left[\frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \xi(t) \xi(t+\tau) dt\right] = \\ &= \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \mathbf{M}\left[\xi(t) \xi(t+\tau)\right] dt = R(\tau), \end{aligned}$$

тому оцінка (2.82) є незміщеною.

Дисперсія оцінки (2.82) дорівнює

$$\mathbf{D}[\hat{R}(\tau)] = \frac{2}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \left(1 - \frac{z}{T-\tau}\right) R_{\eta}(z) dz, \quad (2.83)$$

де

$$\begin{aligned} R_{\eta}(z) &= \mathbf{M}[\eta(t)\eta(t+z)] - \{\mathbf{M}[\eta(t)]\}^2 = \\ &= \mathbf{M}[\xi(t)\xi(t-\tau)\xi(t+z)\xi(t+z+\tau)] - \{\mathbf{M}[\xi(t)\xi(t+\tau)]\}^2. \end{aligned}$$

З формули (2.83) випливає загальна умова слухності оцінки (2.82), і, отже, ергодичності процесу  $\xi(t)$  відносно кореляційної функції

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \left(1 - \frac{z}{T-\tau}\right) R_{\eta}(z) dz = 0. \quad (2.84)$$

Конкретизуємо задачу, яку розглядаємо. Нехай  $\xi(t)$  – гауссівський стаціонарний випадковий процес. Тоді формула (2.83) приймає вигляд [43]

$$\mathbf{D}[\hat{R}(\tau)] = \frac{2\sigma^4}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \left(1 - \frac{z}{T-\tau}\right) [r^2(z) + r(z+\tau)r(z-\tau)] dz, \quad (2.85)$$

де  $r(\tau) = \frac{R(\tau)}{\sigma^2}$  – нормована кореляційна функція процесу  $\xi(t)$ .

Припустимо, що нормована кореляційна функція процесу  $\xi(t)$  задовольняє умові:  $r(\tau) \rightarrow 0$  при  $\tau \rightarrow \pm\infty$ . В цьому випадку умова ергодичності (2.84) процесу  $\xi(t)$  відносно кореляційної функції матиме вигляд

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T r^2(\tau) d\tau = 0.$$

Розглянемо відносну помилку оцінки (2.82), використовуючи формулу (2.85)

$$\delta_R(\tau) = \frac{\mathbf{D}[\hat{R}(\tau)]}{R^2(\tau)}. \quad (2.86)$$

Нехай  $T \gg \tau$ . Тоді з (2.85) одержуємо наближену формулу

$$\mathbf{D}[\hat{R}(\tau)] = \begin{cases} \frac{4\sigma^4}{T} \int_0^\infty r^2(z) dz = \frac{4\sigma^4 \tau_2}{T}, & \tau = 0; \\ \frac{2\sigma^4}{T} \int_0^\infty r^2(z) dz = \frac{2\sigma^4 \tau_2}{T}, & \tau > 0, \end{cases}$$

де  $\tau_2 = \int_0^\infty r^2(z) dz$ .

Таким чином, помилка (2.86) оцінки (2.82) дорівнює:

$$\delta_R(\tau) = \frac{\mathbf{D}[\hat{R}(\tau)]}{R^2(\tau)} = \begin{cases} \frac{4\sigma^4 \tau_2}{T\sigma^4 r^2(0)} = \frac{4\tau_2}{T}, & \tau = 0; \\ \frac{2\sigma^4 \tau_2}{T\sigma^4 r^2(\tau)} = \frac{2\tau_2}{Tr^2(\tau)}, & \tau > 0. \end{cases} \quad (2.87)$$

З формули (2.87) видно, що при  $\tau = 0$  значення відносної помилки прямує до нуля при  $T \rightarrow \infty$ . Однак при  $\tau > 0$  нормована кореляційна функція  $r(\tau) \rightarrow 0$ , якщо  $\tau \rightarrow \pm\infty$ , тому при великих значеннях  $\tau$  відносна помилка може необмежено зростати навіть при  $T \rightarrow \infty$ . У зв'язку з цим виникає задача покращення оцінки (2.82) кореляційної функції. Ефективним методом розв'язання цієї задачі є застосування кореляційних вікон [49, 50] і використання оцінок наступного вигляду:

$$\hat{R}_w(\tau) = \hat{R}(\tau)w(\tau), \quad (2.88)$$

де  $\hat{R}(\tau)$  – оцінка (2.82) кореляційної функції;  $w(\tau)$  – кореляційне вікно, яке є деякою функцією, що має властивості нормованої кореляційної функції.

В табл. 2.8 наведені приклади кореляційних вікон [50]. Оцінки (2.88) з вікнами завжди зміщені, тому що  $\mathbf{M}[\hat{R}_w(\tau)] = w(\tau)R(\tau)$ , але дисперсія цих оцінок менша за дисперсію оцінок без вікон.

Розглянемо оцінки кореляційної функції в дискретній формі. Нехай є послідовність  $\xi(n)$ ,  $n = 0, N-1$ , ергодичного випадкового процесу. Оцінка кореляційної функції є дискретним аналогом формули (2.82) і записується в наступному вигляді [41, 43]:

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=0}^{N-k-1} \xi(n)\xi(n+k). \quad (2.89)$$

Значення  $k$  в формулі (2.89) відповідають аргументам кореляційної функції  $\tau = kT_d$  в формулі (2.82) і приймають додатні значення  $k$ ,

Таблиця 2.8. Кореляційні вікна

Назва вікна	Аналітичний вираз $w(\tau)$
Бартлетта	$\begin{cases} 1 -  \tau  / \tau_M, &  \tau  < \tau_M; \\ 0, &  \tau  \geq \tau_M \end{cases}$
Хеннінга	$\begin{cases} 0,5 \left( 1 + \cos \frac{\pi\tau}{\tau_M} \right), &  \tau  < \tau_M; \\ 0, &  \tau  \geq \tau_M \end{cases}$
Хеммінга	$\begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos \frac{\pi\tau}{\tau_M}, &  \tau  < \tau_M; \\ 0, &  \tau  \geq \tau_M \end{cases}$
Блекмана	$\begin{cases} 0,42 + 0,5 \cos \frac{\pi\tau}{\tau_M} + 0,08 \cos \frac{2\pi\tau}{\tau_M}, &  \tau  < \tau_M; \\ 0, &  \tau  \geq \tau_M \end{cases}$

тому що  $\hat{R}(-k) = \hat{R}(k)$ .

Математичне сподівання оцінки (2.89) дорівнює  $\mathbf{M}[\hat{R}(k)] = R(k)$ , тобто оцінка є незміщеною.

Дисперсія оцінки (2.89) у випадку гауссівських процесів за умови  $N > k$  дорівнює

$$\mathbf{D}[\hat{R}(k)] \approx \frac{N}{(N-k)^2} \sum_{l=-\infty}^{\infty} [R^2(l) + R(l+k)R(l-k)],$$

тому оцінка є слушною.

Розглянемо оцінки кореляційної функції двох тестових сигналів – гармоніки з випадковою початковою фазою і телеграфного сигналу.

*Гармоніка з випадковою початковою фазою.* Нехай у гармоніки

$$\xi(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$$

початкова фаза  $\varphi$  розподілена за рівномірним законом на інтервалі  $[0; 2\pi]$ . Кореляційна функція такого сигналу дорівнює

$$R(\tau) = 0,5 A^2 \cos(2\pi f_0 \tau).$$

Для перевірки якості оцінки цієї кореляційної функції змодельємо реалізацію гармоніки з випадковою початковою фазою. Прийmemo наступні параметри сигналу: амплітуда  $A=5$  В; частота  $f_0=100$  Гц; час-

тота дискретизації  $f_d = 10$  кГц; період дискретизації  $T_d = 10^{-4}$  с; тривалість реалізації  $T = 20$  с. Отриманий в результаті моделювання графік оцінки кореляційної функції (рис. 2.5) не суперечить теоретичним значенням.

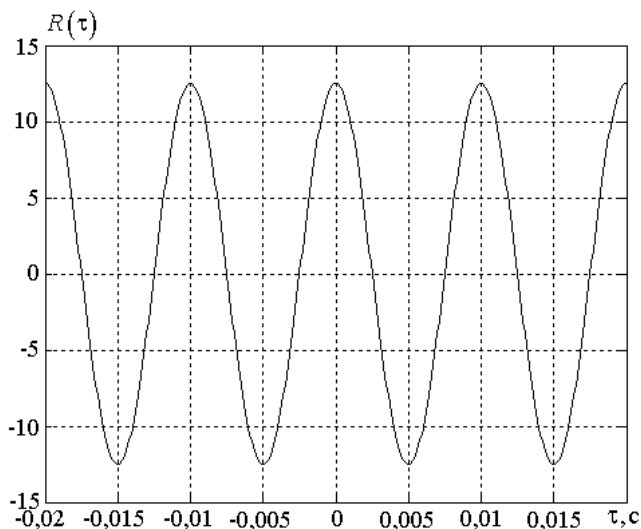


Рис. 2.5. Графік оцінки кореляційної функції гармоніки

*Телеграфний сигнал* є стаціонарним випадковим процесом, що змінює свої значення з  $+1$  на  $-1$  у випадкові моменти часу  $t_k$ , які є однорідним пуассонівським потоком подій з інтенсивністю  $\lambda$  [24].

Кореляційна функція та інтервал кореляції телеграфного сигналу дорівнюють

$$R(\tau) = \exp(-2\lambda|\tau|), \quad \tau_{corr} = (2\lambda)^{-1}$$

Виберемо параметри модельного сигналу. Крок дискретизації повинен бути набагато меншим за інтервал кореляції  $T_d \ll \tau_{corr}$ , тому частота дискретизації  $f_d \gg 2\lambda$ . Задамо тривалість реалізацій  $T = 2,56 \cdot 10^5 T_d$  ( $T \gg \tau_{corr}$ ).

На рис. 2.6 наведені графіки теоретичних кореляційних функцій телеграфного сигналу та їх оцінок для різних значень інтенсивності  $\lambda$ .

В табл. 2.9 наведені помилки оцінювання кореляційних функцій  $\max |R(\tau) - \hat{R}(\tau)| / R(0)$  телеграфного сигналу, отриманих за результатами моделювання для різних значень інтенсивності  $\lambda$  та інтервалів кореляції для діапазону  $[-5\tau_{corr}; 5\tau_{corr}]$ .

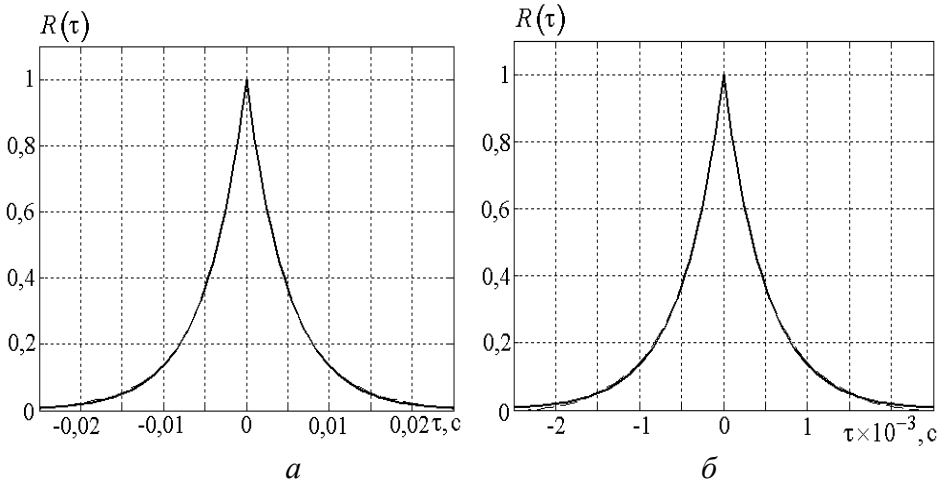


Рис. 2.6. Графіки теоретичних кореляційних функцій телеграфного сигналу (суцільна лінія) та їх оцінок (штрихова лінія):  $a - \lambda=100$ ,  $b - \lambda=1000$

Таблиця 2.9. Значення помилки оцінювання кореляційних функцій

$\lambda$	$\tau_{corr} \cdot c$	$\max  R(\tau) - \hat{R}(\tau)  / R(0)$
100	0,005	0,016
1000	0,0005	0,021

З даних табл. 2.9 випливає, що помилки оцінювання кореляційних функцій не перевищують 3%.

**Оцінювання спектральних характеристик.** Для оцінювання спектральних характеристик застосовують наступні основні методи [41, 43, 49]:

- 1) метод фільтрації;
- 2) метод на основі перетворення Фур'є оцінки кореляційної функції;
- 3) метод на основі перетворення Фур'є реалізації.

На сьогоднішній день для оцінювання спектральної щільності ергодичних випадкових процесів найбільше застосовується метод, що базується на перетворенні Фур'є реалізації. Це пояснюється тим, що, по-перше, цей метод еквівалентний методам 1) та 2), а по-друге, його досить просто реалізувати практично засобами цифрової обчислювальної техніки.

Суть методу, який базується на перетворенні Фур'є реалізації, полягає в наступному. Нехай  $\xi(t)$  – стаціонарний випадковий процес, який має спектральну щільність  $S(f)$  і спостерігається на інтервалі  $[0; T]$ . Оцінка,

яка отримана перетворенням Фур'є усіченої реалізації, називається *періодограмною оцінкою* і визначається наступною формулою [41, 43, 49–52]:

$$\hat{S}(f) = \frac{1}{T} |S_T(f)|^2, \quad (2.90)$$

де  $S_T(f) = \int_0^T \xi(t) e^{-i2\pi ft} dt$  – поточний спектр процесу  $\xi(t)$ .

Періодограмна оцінка (2.90) є нестационарною випадковою функцією. Математичне сподівання оцінки (2.90) при  $T \rightarrow \infty$  прямує до  $S(f)$ , тобто, є асимптотично незміщеною. Дисперсія оцінки (2.90) пропорційна квадрату спектральної щільності та при збільшенні тривалості реалізації  $T$  не зменшується, зокрема, при  $T \rightarrow \infty$  відносна помилка оцінювання дорівнює

$$\sqrt{\mathbf{D}[\hat{S}(f)]} / S(f) \rightarrow 1.$$

Таким чином, оцінка (2.90) не є слушною, і її безпосереднє застосування призводить до помилкових результатів. Тому для отримання слушних оцінок спектральної щільності випадкового процесу  $\xi(t)$  застосовується згладжування періодограми (2.90) або спектральними вікнами, або усередненням [43]. Отримані таким чином оцінки називаються згладженими (модифікованими) періодограмами.

Згладжування періодограми усередненням може бути застосоване як для шумових, так і для ритмічних процесів, тому є найбільш поширеним методом отримання слушних оцінок спектральної щільності. На сьогоднішній день для отримання згладжених оцінок спектральної щільності використовуються цифрові методи, засновані на дискретному перетворенні Фур'є. Розглянемо ці методи докладніше.

Нехай досліджуваний ергодичний процес  $\xi(t)$ , який спостерігається на інтервалі  $[0; T]$ , дискретизується з кроком  $T_d$ , в результаті чого отримуємо випадкову вибірку  $\underline{\xi} = (\xi_1, \dots$  об'ємом  $N$ ,  $\xi_k = \xi(t_k)$ , де  $t_k = kT_d$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ .

Незгладжена оцінка спектральної щільності (періодограма) є дискретним аналогом формули (2.90) та описується виразом [51]:

$$\begin{aligned} \hat{S}(f) &= \frac{1}{NT_d} \left| \hat{S}_T(f) \right|^2 = \\ &= \frac{1}{NT_d} \left| T_d \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-i2\pi k T_d f} \right|^2 = \frac{1}{Nf_d} \left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-i2\pi k T_d f} \right|^2, \end{aligned} \quad (2.91)$$

де  $x(k)$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ , – реалізація випадкової вибірки;  $f_d = 1/T_d$  – частота дискретизації.

Розглянемо два методи згладжування періодограми (2.91) усередненням – метод Бартлетта та метод Уелча, в результаті застосування яких отримуємо слушні оцінки спектральної щільності.

Згладжування періодограми за методом Бартлетта базується на створенні псевдоансамблю реалізацій періодограм та їх подальшого усереднення. Для цього реалізація випадкової вибірки  $x(k)$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ , розбивається на  $P$  сегментів, що не перекриваються, по  $D$  відліків в кожному ( $DP \leq N$ ). Тоді кожний  $p$ -й сегмент складається з відліків  $x^{(p)}(n) = x(pD + n)$ ,  $0 \leq n \leq D-1$ .

Суть методу Бартлетта полягає в обчисленні періодограм по кожному сегменту  $p$ ,  $0 \leq p \leq P-1$ ,

$$\hat{S}^{(p)}(f) = \frac{1}{Df_d} \left| \sum_{k=0}^{D-1} x^{(p)}(k) e^{-i2\pi f k T_d} \right|^2,$$

та їх подальшому усередненню

$$\hat{S}_B(f) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \hat{S}^{(p)}(f).$$

Уелч модифікував основну схему методу сегментування та усереднення Бартлетта за рахунок застосування вікна даних (табл. 2.10) та використання сегментів, що перекриваються [50, 51].

Наведені в табл. 2.10 вікна  $w(n)$  визначені в діапазоні аргументів

$$0 \leq n \leq N-1, \quad t[n] = \frac{n - [N-1]/2}{N-1}.$$

Таблиця 2.10. Вікна даних

Назва вікна	Аналітичний вираз $w(n)$
Рівномірне	1
Бартлетта	$1 - 2 t[n] $
Ханна	$\cos^2(\pi t[n]) = 0,50 + 0,50 \cos(2\pi t[n])$
Хеммінга	$0,54 + 0,46 \cos(2\pi t[n])$
Усічене гауссівське	$\exp\{-0,5(5t[n])^2\}$

Реалізація випадкової вибірки  $x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ , розбивається на  $P$  сегментів по  $D$  відліків в кожному, сусідні сегменти зсунені на  $S$  відліків ( $S \leq D$ ), тому максимальна кількість сегментів  $P$  дорівнює цілій частині числа  $1 + (N - D) / S$ .

Далі кожний  $p$ -й сегмент помножується на вікно даних, в результаті чого отримуємо зважений сегмент відліків  $x^{(p)}(n) = w(n)x(pS + n)$ ,  $0 \leq n \leq D - 1$ , де  $w(n)$  – відліки вікна даних. По кожному зваженому сегменту  $0 \leq p \leq P - 1$  обчислюються періодограми  $\hat{S}^{(p)}(f)$  [51]

$$\hat{S}^{(p)}(f) = \left| \sum_{k=0}^{D-1} x^{(p)}(k) e^{-i2\pi f k T_d} \right|^2 \left[ f_d \sum_{n=0}^{D-1} w^2(n) \right]^{-1},$$

які потім усереднюються:

$$\hat{S}_w(f) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \hat{S}^{(p)}(f).$$

Розглянемо оцінки спектральних щільностей двох тестових сигналів – гармоніки з випадковою початковою фазою і телеграфного сигналу.

*Гармоніка з випадковою початковою фазою.* Нехай у гармоніки

$$\xi(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (2.92)$$

початкова фаза  $\varphi$  розподілена рівномірно на інтервалі  $[0; 2\pi]$ . Спектральні характеристики такого сигналу мають дискретний характер.

При оцінюванні спектральних характеристик по одній реалізації амплітудний спектр є лініями на частотах  $-f_0$  і  $f_0$  висотою  $A/2$ , а спектральна щільність при усередненні періодограм при рівномірному вікні даних дорівнює  $(0,5A)^2 D T_d$ , де  $D$  – кількість відліків одного сегменту (розмір вікна даних);  $T_d$  – період дискретизації.

Для перевірки цих даних змодельємо реалізацію гармоніки з випадковою початковою фазою. Задамо параметри сигналу: амплітуда  $A = 5$  В; частота  $f_0 = 100$  Гц; частота дискретизації  $f_d = 10$  кГц; період дискретизації  $T_d = 10^{-4}$  с; тривалість реалізації  $T = 20$  с;  $D = 4096$  (роздільна здатність по частоті 2,44 Гц). При таких значеннях параметрів спектральна щільність дорівнює 2,56 В.

На рис. 2.7 представлені графіки оцінок спектральних характеристик моделі (2.92), які не суперечать теоретичним значенням.



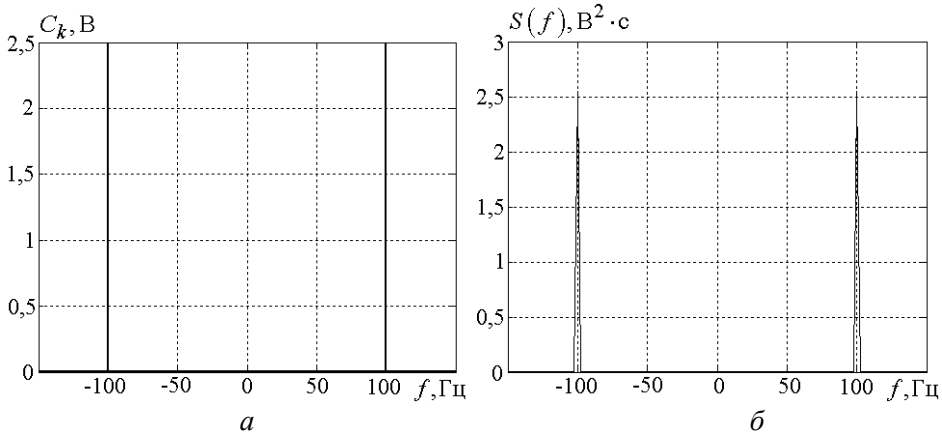


Рис. 2.7 – Оцінки спектральних характеристик гармоніки:  
 а – по одній реалізації; б – при усередненні періодограм

Точні значення максимумів отриманої спектральної щільності до-  
 рівнюють 2,5465 В на частотах – 100,098 Гц.

*Телеграфний сигнал.* Стаціонарний телеграфний сигнал має спек-  
 тральну щільність

$$S(f) = \frac{1}{\lambda} \left[ 1 + \left( \frac{\pi f}{\lambda} \right)^2 \right]^{-1}.$$

Виберемо параметри модельного сигналу.

Крок дискретизації повинен бути набагато менший за інтервал ко-  
 реляції  $T_d \ll \tau_{corr}$ , звідки частота дискретизації  $f_d \gg 2\lambda$ .

З іншого боку будемо вимагати, щоб для крайніх частот оцінки  
 спектральної щільності виконувалась умова  $S(f_d/2) < 0,001S(0)$ , зві-  
 дки  $(f_d/2) > (30\lambda/\pi)$ , тобто  $f_d > 60\lambda/\pi$ . Приймаємо значення  
 $f_d = 20\lambda$ .

Задамо роздільну здатність  $\Delta f$  оцінки спектральної щільності в ме-  
 жах ширини спектру п'яти ліній, тобто  $S(f_{0,5}) = S(5\Delta f) = 0,5S(0)$ , де  
 $f_{0,5} = \lambda/\pi$ . Тоді отримуємо кількість ліній (розмір вікна даних)

$$D = \frac{f_d}{\Delta f} = \frac{20\lambda}{\lambda/5\pi} = 100\pi. \text{ Приймаємо } D=512.$$

Тривалість реалізацій  $T$  задамо виходячи з кількості усереднень  
 періодограм за методом Уелча (використовуємо вікно Хеммінга, пере-

криття складає 50 %)  $K = \frac{N-D}{D/2} + 1$ , рівного  $10^2$ . Отримуємо  $N = 2,56 \cdot 10^5$  відліків, звідки  $T = NT_d = 2,56 \cdot 10^5 \cdot T_d$ .

На рис. 2.8 наведені графіки теоретичних спектральних щільностей телеграфного сигналу та їх оцінок для різних значень інтенсивності  $\lambda$ .

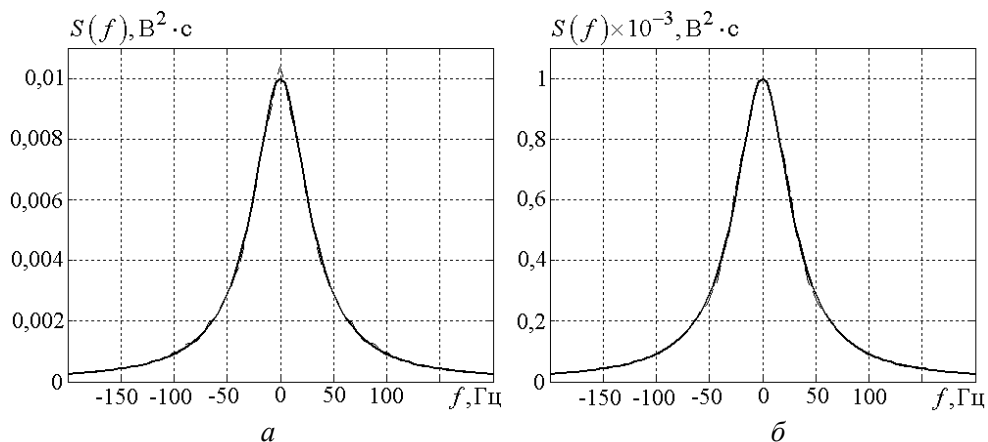


Рис. 2.8. Графіки теоретичних спектральних щільностей телеграфного сигналу (суцільна лінія) та їх оцінок (штрихова лінія):

$a - \lambda=100, b - \lambda=1000$

З наведених графіків видно, що значення оцінок спектральної щільності близькі до теоретичних значень спектральної щільності, що підтверджує справедливість методів їх оцінювання.

В табл. 2.11 наведені отримані за результатами моделювання числові значення помилки  $\max |S(f) - \hat{S}(f)| / S(0)$ .

Таблиця 2.11. Значення помилки оцінювання спектральних щільностей

$\lambda$	$\Delta f$ , Гц	$f_{0,5}$ , Гц	$\max  S(f) - \hat{S}(f)  / S(0)$
100	3,9	31,8	0,12
1000	39	318	0,09

З даних табл. 2.11 випливає, що максимальна помилка оцінювання спектральної щільності складає 12 %, що є прийнятним при вирішенні багатьох практичних задач.

## Література

1. *Красильников А.И.* Модели шумовых сигналов в системах диагностики теплоэнергетического оборудования. – К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2014. – 112 с.
2. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Белые шумы в колебательных системах. – К., Ин-т электродинамики АН УССР, 1989. – 42 с.
3. *Пугачев В.С., Сеницын И.Н.* Стохастические дифференциальные системы. – М.: Наука, 1985. – 560 с.
4. *Гихман И.И., Скороход А.В.* Введение в теорию случайных процессов. – М.: Наука, 1977. – 567 с.
5. *Бунимович В.И.* Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. – М.: Сов. радио, 1951. – 360 с.
6. *Rice S.O.* Mathematical analysis of random noise // *Bell Syst. Techn. Journ.* – 1944. – 23 (3). – P. 282–332; 1945 – 24 (1). – P. 282–332.
7. *Красильников А.И., Горовецкая Т.А.* Каноническое представление характеристической функции импульсного случайного процесса // *Вестн. Киев. политехн. ин-та. Электроакустика и звукотехника.* – 1984. – Вып. 8. – С. 34–37.
8. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
9. *Красильников А.И.* Каноническое представление характеристической функции пуассоновских импульсных процессов // *Электроника и связь.* – 2005. – № 25. – С. 33–37.
10. *Зачепицкая Л.П.* Пуассоновские случайные процессы. Особенности простых и сложных процессов: Учеб. пособие. – Горький: Горьк. гос. ун-т, 1982. – 109 с.
11. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
12. *Bar-David I.* Statistics of Nonstationary Shot Processes and the Fluctuations of Detected Signals // *Proc. IEEE.* – 1968. – Vol. 56, № 12. – P. 2167–2168.
13. *Gilbert E., Pollak H.* Amplitude Distribution of Shot Noise // *Bell Syst. Techn. Journ.* – 1960. – Vol. 39, № 2. – P. 333–350.
14. *Souček B.* Distribution Function for Output of Certain Linear Filters for Random Input Events // *Journal of Electronics and Controls.* – 1964. – Vol. 16, № 1. – P. 81–90.
15. *Wolff S., Gastwirth J.* On Probability Distributions for Filtered White Noise // *IEEE Trans. on Inform. Theory.* – 1967. – Vol. IT-13, № 3. – P. 481–484.

16. *Марченко Б.Г.* Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике. – К.: Наук. думка, 1973. – 192 с.
17. *Марченко Б.Г., Щербак Л.Н.* Линейные случайные процессы и их приложения. – К.: Наук. думка, 1975. – 144 с.
18. *Бойко И.Ф., Марченко Б.Г.* Анализ нелинейных преобразований сигналов в системах диагностики с использованием стохастических ортогональных разложений. – К.: 1987. – 57 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т электродинамики; № 542).
19. *Lugannani R.* On a Class of Stochastic Processes which Are Closed under Linear Transformations // Inform. and Contr. – 1967. – № 10. – P. 1–21.
20. *Красильников А.И.* Некоторые свойства пуассоновской спектральной функции Колмогорова линейных случайных процессов // Электроника и связь. – 2005. – № 26. – С. 23–28.
21. *Красильников А.И.* Особенности вычисления спектральной функции скачков линейных случайных процессов // Вестник КПИ. Электроакустика и звукотехника. – 1987. – Вып. 11. – С. 29–32.
22. *Красильников А.И.* Представление одномерной характеристической функции линейных случайных процессов в форме А.Н. Колмогорова / Киев. политехн. ин-т. – К., 1985. – 15 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 15.10.85, № 2540 Ук-85 Деп.
23. *Красильников А.И.* Представление одномерной характеристической функции линейных случайных процессов в форме Леви // Электроника и связь. – 2001. – № 13. – С. 128–130.
24. *Левин Б.Р., Шварц В.* Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
25. *Гутер Р.С., Кудрявцев Л.Д., Левитан Б.М.* Функции действительного переменного. Приближение функций. Почти-периодические функции. – М.: Физматгиз, 1963. – 244 с.
26. *Лозе М.* Теория вероятностей: Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1962. – 719 с.
27. *Драган Я.П.* Енергетична теорія лінійних моделей стохастичних сигналів. – Львів: ЦСДЕС, 1997. – 333 с.
28. *Болотин В.В.* Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – 336 с.
29. *Светлицкий В.А.* Случайные колебания механических систем. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
30. *Михайлов Ф.А., Теряев Е.Д., Булеков В.П., Саликов Л.М., Диканова Л.С.* Динамика непрерывных линейных систем с детерминированными и случайными параметрами. – М.: Наука, 1971. – 562 с.

31. *Директор С., Рорер Р.* Введение в теорию систем: Пер. с англ. / Под ред. Н.П. Бусленко. – М.: Мир, 1974. – 464 с.
32. *Розанов Ю. А.* Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика. – М.: Наука, 1985. – 320 с.
33. *Крамер Г.* Математические методы статистики / Пер. с англ. под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
34. *Кендалл М., Стьюарт А.* Теория распределений / Пер. с англ. под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Наука, 1966. – 588 с.
35. *Митропольский А.К.* Техника статистических вычислений. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. – 480 с.
36. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах / Пер. с англ. под ред. В.В. Налимова. – М.: Мир, 1969. – 396 с.
37. *Берегун В.С., Гармаш О.В., Красильников А.И.* Анализ среднеквадратической ошибки оценивания коэффициентов асимметрии и эксцесса типовых распределений // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2013): 2 міжнар. наук. конф., 29–30 жовтня 2013 р.: зб. тез допов. – Вінниця, 2013. – С. 61–63.
38. *Берегун В.С., Гармаш О.В., Красильников А.И.* Среднеквадратические ошибки оценок кумулянтных коэффициентов пятого и шестого порядков // Электронное моделирование. – 2014. – Т. 36, № 1. – С. 17–28.
39. *Иглин С.П.* Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 612 с.
40. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – К.: Наук. думка, 1992. – 196 с.
41. *Куликов Е.И.* Методы измерения случайных процессов. – М.: Радио и связь, 1986. – 272 с.
42. *Шалыгин А.С., Палагин Ю.И.* Прикладные методы статистического моделирования. – Л.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
43. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных / Пер с англ. В.Е. Привальского, А.И. Кочубинского; Под ред. И.Н. Коваленко. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
44. *Красильников А.И., Пилипенко К.П.* Применение двухкомпонентной гауссовской смеси для идентификации одновершинных симметричных плотностей вероятностей // Электроника и связь. – 2008. – № 5 (46). – С. 20–29.
45. *Красильников А.И., Пилипенко К.П.* Моделирование дискретных смесей распределений // Электроника и связь. – 2010. – № 2 (55). – С. 57–61.

46. *Берегун В.С., Красильніков О.І.* Апроксимативні методи знаходження щільності імовірностей // *Електроника и связь.* – 2010. – № 4. – С. 51–55.
47. *Берегун В.С., Красильніков О.І.* Помилки експериментального визначення щільності імовірностей ергодичних випадкових процесів при її ортогональному поданні // *Електроника и связь.* – 2009. – № 1 (48). – С. 5–14.
48. *Суетин П.К.* Классические ортогональные многочлены. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2005. – 480 с.
49. *Яглом А.М.* Корреляционная теория стационарных случайных функций. С примерами из метеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 279 с.
50. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2 т.; Пер. с франц. – М.: Мир, 1983. – Т. 2. – 256 с.
51. *Марпл-мл. С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
52. *Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е.* Обробка сигналів: Вид. 2. - К.: Либідь, 1999. - 496с.

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ

#### 3.1. Моделювання температурного і теплового полів в сенсорах теплового потоку

Термоелектричні первинні перетворювачі теплового потоку (далі – сенсори) використовують для досліджень та контролю різноманітних теплових процесів, у тому числі у системах моніторингу енергетичного обладнання.

Виміряне за допомогою сенсорів значення густини теплового потоку в загальному випадку не збігається з дійсним через неідентичність температурних полів об'єкту моніторингу або об'єкту контролю (ОК) за наявності й за відсутності сенсору. Ця неідентичність обумовлена відмінністю теплофізичних властивостей об'єкта і сенсора, а також розмірами сенсора. Відомо, що одним із способів зменшення відмінності між вимірним і дійсним значеннями густини теплового потоку ( $q_{ВИМ}$  і  $q_0$ ), є виготовлення сенсорів з охоронною зоною по периметру чутливого елемента [1-3]. При цьому її ширина повинна бути такою, щоб забезпечити одномірність теплового потоку в області чутливого елемента як при калібруванні та повірці сенсору, так і при його застосуванні на різних ОК.

Для забезпечення коректності вимірювань теплового потоку необхідно провести аналіз методичних похибок, обумовлених порушенням одномірності температурного поля і початкового теплового потоку при розташуванні сенсора на ОК. Аналіз можна виконати шляхом дослідження залежностей степеню спотворень (збурень) теплових і температурних полів для найбільш типових ОК і найбільш поширених випадків взаємного розташування сенсору і ОК при різних граничних умовах теплообміну з оточуючим середовищем (ОС) [1-9].

Проведемо математичне моделювання температурного і теплового полів в тілі сенсора, що представляє собою обмежений короткий циліндр висотою  $h_{sens}$  і діаметром  $D_{sens} = 2r_{sens}$ , при розв'язанні задачі теплопровідності в циліндричній системі координат  $(r, \varphi, z)$ , яка описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = 0, \text{ при } \varphi = const, \quad (3.1)$$

за граничних умов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{sens} \cdot \frac{\partial T(r,z)}{\partial z} = \alpha_{BEPX} \cdot (T_{OC} - T_1), \quad T_1 = T(r, z = h_{sens}), \quad \text{при } 0 < r \leq r_{sens} \\ \lambda_{sens} \cdot \frac{\partial T(r,z)}{\partial z} = \frac{1}{R_K} \cdot (T_2 - T_{OK}), \quad T_2 = T(r, z = 0), \quad \text{при } 0 < r \leq r_{sens} \\ \lambda_{sens} \cdot \frac{\partial T(r,z)}{\partial r} = \alpha_{БОК} \cdot (T_{OC} - T_{БОК}), \quad T_{БОК} = T(r = r_{sens}, z), \quad \text{при } 0 \leq z \leq h_{sens} \\ \frac{\partial T(r,z)}{\partial r} = 0, \quad \text{при } r = 0, \end{array} \right. \quad (3.2)$$

де  $\lambda_{sens}$  – теплопровідність сенсора;  $\alpha_{BEPX}$  і  $\alpha_{БОК}$  – коефіцієнти теплообміну торцевої й бокової поверхонь сенсора, відповідно;  $R_K$  – контактний тепловий опір.

На рис. 3.1 показано розташування сенсора на ізотермічній поверхні та характер розподілу приведеної густини середньоінтегрального теплового потоку  $q_{cp}/q_0$  на вході в сенсор і виході з нього в залежності від відносного поточного радіусу сенсора  $r/h_{sens}$  при значенні критерію Біо  $Bi_{BEPX} = 0,1$  і варіації відношення коефіцієнтів теплообміну  $\alpha_{БОК}/\alpha_{BEPX}$  для випадків коли приведений радіус сенсора ( $r_{sens}/h_{sens}$ ) дорівнює 5, 10, 15, 20.

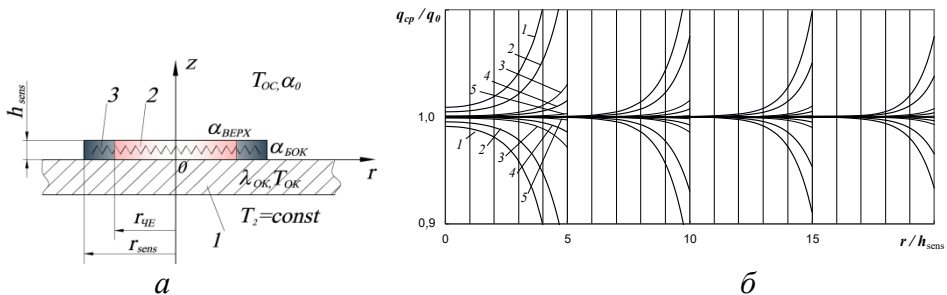


Рис. 3.1. Розташування сенсора на ізотермічній поверхні (а) та характер розподілу густини середньоінтегрального теплового потоку на вході в сенсор і виході із нього в залежності від відносного поточного радіусу (б)  
 а: 1 – об'єкт моніторингу, 2 – чутливий елемент, 3 – охоронна зона  
 б: 1 –  $R_{sens}/R_{БОК}=0,1$ ; 2 – 0,05; 3 – 0,01; 4 – 0,005; 5 – 0,001

Крайовий ефект поширюється на ділянку рівну приблизно п'яти товщин сенсора. Тому для даних умов сенсор повинен мати охоронну зону, ширина якої не менше п'яти його товщин. Граничним випадком для даної задачі є монтаж сенсора в досліджувану поверхню із високо-



теплопровідного матеріалу (рис. 3.2, *a*), або в металеве кільце на ізотермічній поверхні чи на профільованій металевій підкладці.

У цьому випадку  $T_{БОК} = T_2$ , а  $R_{БОК} = 0$ . Результати математичного моделювання теплового поля за граничних умов 3-го роду наведені на рис. 3.2, *б*.

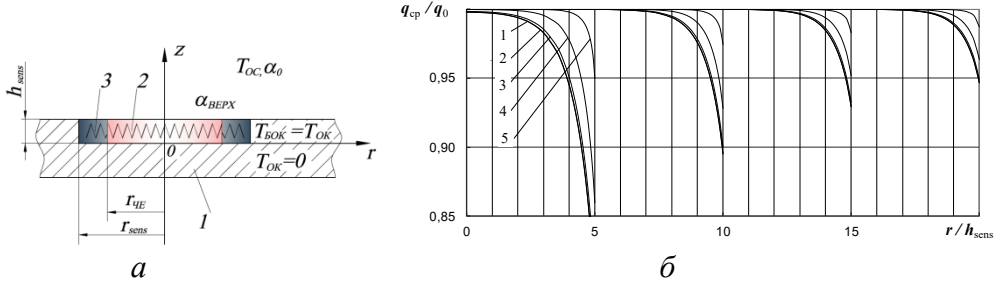


Рис. 3.2. Сенсор, вмонтований в металеву пластину (*a*) та характер розподілу густини середньоінтегрального теплового потоку при варіації числових значень критерію Біо (*б*)

*a*: 1 – об'єкт контролю, 2 – чутливий елемент, 3 – охоронна зона;  
*б*: 1 –  $Bi_{BEPEX} = \alpha_{BEPEX} \cdot h_{sens} / \lambda_{sens} = 10^{-3}$ ; 2 –  $10^{-2}$ ; 3 – 0,1; 4 – 1; 5 – 10

При застосуванні сенсорів для вимірювання потоку теплового випромінювання (рис. 3.3, *a*), рівняння (3.1) розв'язується за таких граничних умов:

$$\begin{aligned}
 q_0(r, z) &= const && \text{при } 0 \leq r < \infty \text{ і } z = 0, \\
 T(r, z) &= T_2 = const && \text{при } 0 \leq r < r_{sens} \text{ і } z = h_{sens}, \\
 T(r, z) &= T_{БОК} = const && \text{при } r = r_{sens} \text{ і } 0 \leq z \leq h_{sens}, \\
 T_2 &= T_{БОК} = 0 && \text{при } r = r_{sens} \text{ і } 0 \leq z \leq h_{sens}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Результати математичного моделювання розподілу густини середньоінтегрального теплового потоку по висоті сенсора в залежності від відносного поточного радіуса наведені на рис. 3.3, *б*. Як видно з графіків, спотворення теплового потоку в сенсорі поширюються на глибину не більше п'яти його товщин. Причому, зі збільшенням радіусу сенсора спотворення для всіх випадків зменшується. Тому доцільно створення сенсора з охоронною зоною з урахуванням його радіусу: чим більший радіус, тим меншою може бути охоронна зона. Для сенсорів, що мають приведений радіус більше 30, охоронна зона може складати одну-дві його товщини.

Актуальним завданням є вимірювання густини теплового потоку при розташуванні сенсора всередині масиву (рис. 3.4, *a*).

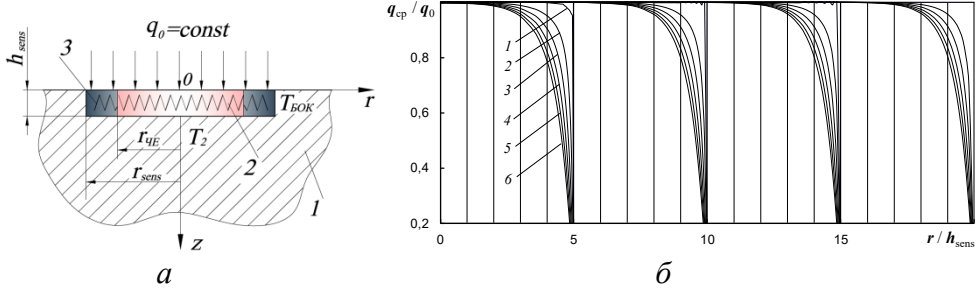


Рис. 3.3. Схема розташування сенсора в порожнині напівобмеженого масиву (а) і характер розподілу значень густини середньоінтегрального теплового потоку по висоті сенсора (б)  
 а: 1 – об'єкт контролю, 2 – чутливий елемент, 3 – охоронна зона сенсора;  
 б: 1 –  $z / h_{sens} = 0$ ; 2 – 0,2; ... ; 6 – 1,0

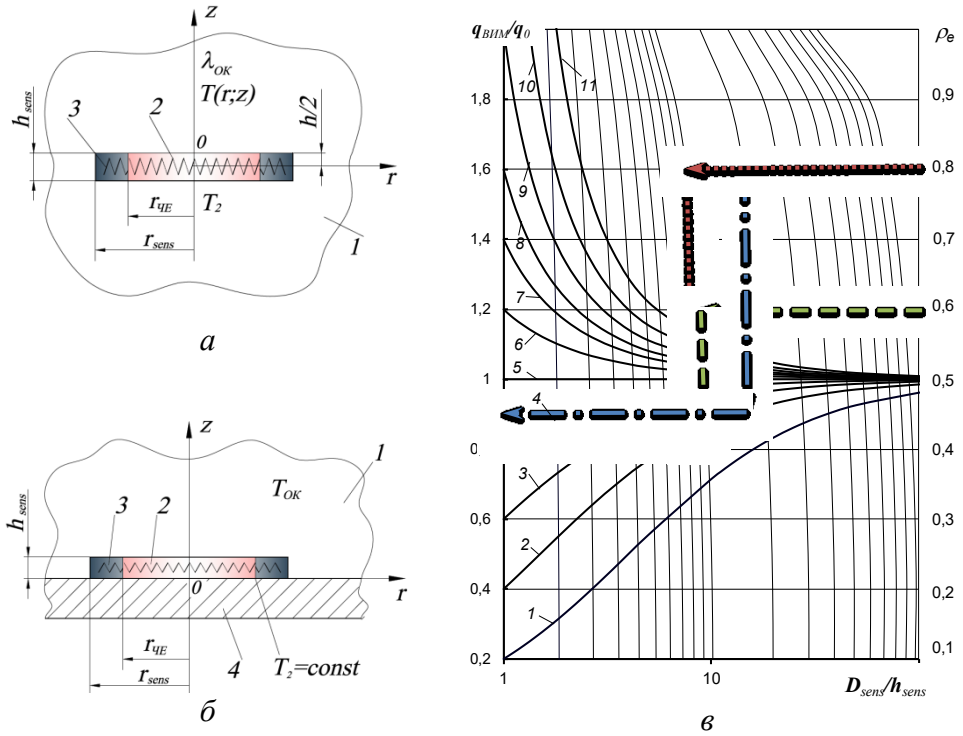


Рис. 3.4. Розташування сенсора всередині масиву (а, б) і номограма (в) залежностей відношення значень густини теплового потоку і методичної похибки від геометричного параметра: а, б: 1 – об'єкт контролю, 2 – чутливий елемент, 3 – охоронна зона, 4 – пластина металева;  
 в: 1 –  $\lambda_{sens} / \lambda_{OK} = 0,2$ ; 2 – 0,4; ... ; 8 – 1,6; 9 – 2,0; 10 – 3,0; 11 – 10

Визначальними факторами для даної задачі є співвідношення геометричних розмірів сенсора і співвідношення його теплопровідності до теплопровідності ОК. Причому, глибина спотворень в ОК сягає від 2 до 4 приведених радіусів  $r / r_{sens}$  в зоні, що прилягає до сенсора, а в самому сенсорі зберігається та ж тенденція – до п'яти його товщин. За результатами математичного моделювання такої задачі побудовано номограму (рис. 3.4, в).

Описані конструктивно-технологічні рішення і номограма використовуються для випадку розташування сенсора на ізотермічній поверхні, яка примикає до напівобмеженого масиву (рис. 3.4, б), за умови, що приведений радіус розраховується по формулі:

$$\rho = r_{sens} / 2h_{sens} \quad (3.4)$$

Зменшення методичної похибки досягається за рахунок вирівнювання теплофізичних характеристик сенсора і ОК, збільшення співвідношення  $D / h_{sens}$ , введення охоронної зони в конструкцію сенсора, а також збільшення її ширини.

При розташуванні сенсора на поверхні напівобмеженого масиву за граничних умов 3-го роду (рис. 3.5, а), визначальними факторами впливу на величину методичної похибки є:

- коефіцієнт теплообміну  $\alpha$ , радіус  $r_{sens}$ ,
- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{OK}$
- тепловий опір сенсора  $R_{sens}$ , що враховується приведеним тепловим опором  $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,sens} + R_{sens})$  та критерієм  $Bi_{0,r} = \alpha_{OK} \cdot r_{sens} / \lambda_{OK}$ .

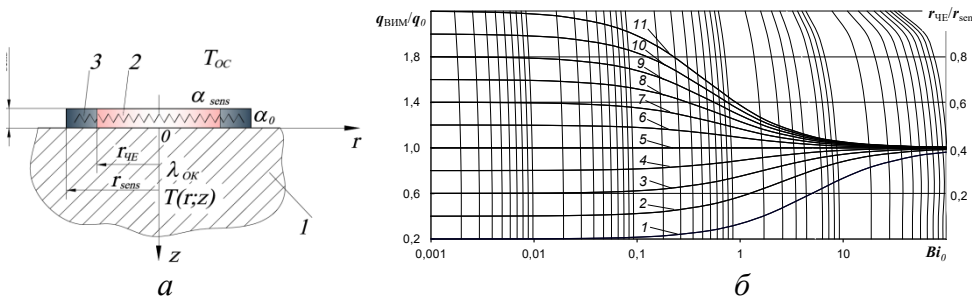


Рис. 3.5. Розташування сенсора на поверхні напівобмеженого масиву (а) і номограма для визначення відношення значень густини теплового потоку і методичної похибки (б)  
 а: 1 – об'єкт контролю, 2 – чутливий елемент, 3 – охоронна зона  
 б: 1 –  $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,sens} + R_{sens}) = 0,2$ ; 2 – 0,4; ...; 11 – 2,2

Методичну похибку можна зменшити за рахунок застосування сенсора з мінімальним тепловим опором і при збільшенні його геометричних розмірів (рис. 3.5, б).

Зі зниженням теплопровідності об'єкта контролю методична похибка зменшується, а зі збільшенням – прямує до значень, характерних для розташування сенсора на ізотермічній поверхні.

Типовим випадком вимірювання теплового потоку є розташування сенсора на поверхні пластини зі сторони конвективного теплообміну (граничні умови 3-го роду) за умови, що з іншої сторони пластини теплообмін здійснюється за граничних умов 2-го роду (рис. 3.6, а).

Результати моделювання показують, що зі збільшенням приведеної товщини пластини  $h_{OK} / r_{sens}$  методична похибка збільшується (рис. 3.6, б). У випадку, коли  $h_{OK} / r_{sens} \geq 1$  при визначенні методичної похибки можна використати номограми для напівобмеженого масиву (рис. 3.5, б). Висновки, зроблені для напівобмеженого масиву, справедливі й для даної задачі.

На рис. 3.6, в наведено результати математичного моделювання спотворень температурного поля на поверхні пластини при варіації числових значень критерію Біо.

З аналізу графіків випливає, що зі збільшенням значень критерію Біо збурення температурного поля зростають, але спотворення на поверхні ОК локалізуються в зоні розташування сенсора.

Ця інформація необхідна для вибору місць встановлення поверхневих сенсорів теплового потоку та температури в незбуреній зоні.

Практично значущим є випадок розташування сенсора на поверхні необмеженої пластини при конвективному теплообміні з обох сторін (рис. 3.7, а), який описує теплотричні вимірювання при сертифікації, стандартизації та паспортизації будівель.

Аналіз графіків на рис. 3.7, б показує, що за приведеної товщини  $h_{OK} / r_{sens} \geq 1$  спотворення теплового потоку не залежать від співвідношення коефіцієнтів теплообміну  $\alpha_2 / \alpha_1$  і аналогічні випадку розташування сенсора на напівобмеженому масиві. Причому, з ростом  $\alpha_2$  методична похибка зростає.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що наявність охоронної зони навколо чутливого елемента сенсора забезпечує мінімізацію спотворень теплового поля в зоні розташування чутливого елемента. Доцільно добиватися рівності теплопровідності сенсора та ОК лише в разі розташування сенсора всередині необмеженого масиву або на ізотермічній поверхні, що прилягає до напівобмеженого масиву.

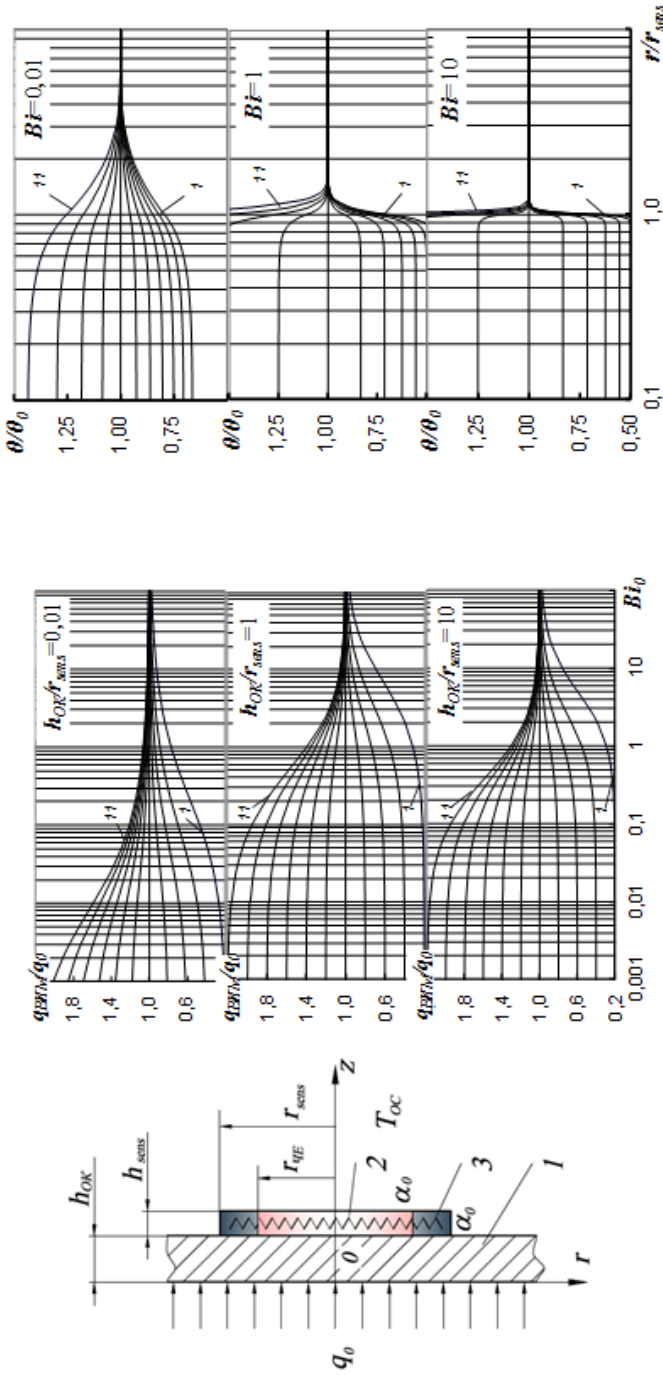


Рис. 3.6. Розташування сенсора на поверхні необмеженої пластини (а) та залежність співвідношення густини виміряного середньоінтегрального й дійсного теплового потоку при варіації приведенної товщини (б) і числових значень критерію Біо (в)

а: 1 – об'єкт контролю, 2 – чутливий елемент сенсора, 3 – охоронна зона сенсора  
 б: 1 –  $R_{\text{ок}}/R_{\text{ок,снс}}=0,2; 2 - 0,4; \dots$ ; 11 – 2,2 в: 1 –  $R_{\text{ок}}/R_{\text{ок,снс}}=0,2; 2 - 0,4; \dots$ ; 11 – 2,2

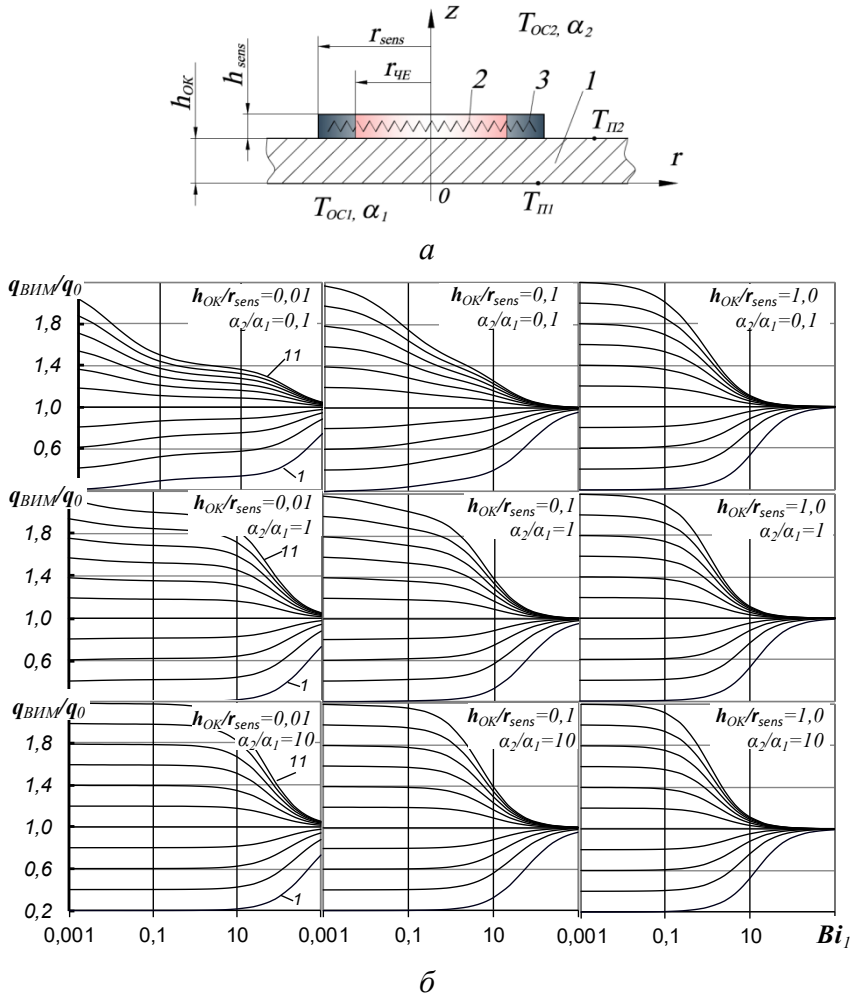


Рис. 3.7. Розташування сенсора на поверхні необмеженої пластини (а) і залежність відношення густини виміряного середньо інтегрального і дійсного теплового потоку від критерію Біо (б)

а: 1 – об'єкт контролю, 2 – чутливий елемент, 3 – охоронна зона

б: 1 –  $R_{OK}/R_{OK,sens}=0,2$ ; 2 –  $0,4$ ;...; 11 –  $2,2$

При конвективному теплообміні загальний опір теплопередаванню на теплове поле не впливає, вплив має лише опір тепловіддаванню з боку встановлення сенсора та його власний тепловий опір. Причому, в усіх випадках конвективного і радіаційного теплообміну тепловий опір сенсора доцільно мінімізувати. При відносній товщині пластини  $h_{OK} / r_{sens} \geq 1$  (див. рис. 3.6, б та 3.7, б) для визначення методичної похи-

бки допустиме використання номограми для напівобмеженого масиву (див. рис. 3.5, б).

### 3.2. Методи розрахунку параметрів сенсорів теплового потоку

Розглянемо методи розрахунку основних параметрів багатоелементних термоелектричних сенсорів теплового потоку виду допоміжної стінки, які є різновидом градієнтних перетворювачів [1, 5, 6, 11, 12]. Такий сенсор є пластиною, в якій розміщена батарея термоелементів, залитих електроізоляційним компаундом. Батарея термоелементів виконується у вигляді стрічкоподібної спіралі з дроту основного термоелектрода, навитої на каркасну електроізоляційну стрічку, причому на основну дріт з однієї зі сторін спіралі нанесено покриття з іншого (парного) термоелектричного матеріалу. Границі переходу від ділянки з чистим дротом до біметалевої ділянки є спаями термоелементів, причому один із спаїв кожного термоелемента розташований поблизу однієї з поверхонь сенсора, а другий спай – поблизу протилежної.

Таким чином, за наявності теплового потоку, що проходить крізь пластину сенсора і, відповідно, паралельно через всі елементи термобатареї, виникає перепад температури між спаями  $\Delta T$ , внаслідок чого, в кожному з включених послідовно термоелементів з термоелектричним коефіцієнтом  $\alpha_{TE}$ , генерується електричний сигнал  $\Delta U$ . У разі рівного розподілу значень довжини ділянки з чистим дротом і біметалічної ділянки, справедливо співвідношення [1, 6]:

$$\Delta U = \alpha_{TE} \cdot \Delta T = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T / \left( 1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{f_1}{f_2} \right), \quad (3.5)$$

де  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2$ ) – коефіцієнти Зеєбека основного термоелектроду – дроту ( $i = 1$ ) і гальванічно нанесеного матеріалу ( $i = 2$ );  $f_i$  – площа перерізу матеріалу;  $\rho_i$  – питомий опір матеріалу.

Основною характеристикою сенсорів теплового потоку є чутливість  $S$  до вимірюваної величини: густини теплового потоку  $q$  –  $S_q = E/q$  і теплового потоку ( $Q$ ) –  $S_Q = E/Q = E/(q \cdot A)$ . Також при розрахунках характеристик сенсорів користуються поняттям питомої чутливості  $S_v = E/(q \cdot A \cdot h)$ , яка не залежить від розмірів сенсора і характеризує чутливість одиниці об'єму теплочутливої зони. У представлених формулах  $E$  – вихідний сигнал сенсора,  $A$  та  $h$  – площа і висота теплочутливої зони.

Традиційно розрахунок чутливості сенсорів залежно від параметрів конструкції і властивостей використаних матеріалів виконують за формулою [1, 3, 4]:

$$S_V = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\lambda_1 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21}/f_{21}) \cdot [2 + \lambda_{21} \cdot f_{21} + \lambda_{31} \cdot (\Phi - 2 - f_{21})]}, \quad (3.6)$$

де  $\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;  $f_{i1} = f_i/f_1$ ,  $\lambda_{i1} = \lambda_i/\lambda_1$ ,  $\rho_{i1} = \rho_i/\rho_1$  – приведені (відносні) значення площі перетину, коефіцієнту теплопровідності і питомого опору матеріалів, причому індекс 3 відноситься до заливального компаунду;

$\Phi = (2f_1 + f_2 + f_3)/f_1 = 2 + f_{21} + f_{31}$  – формпараметр або відносна площа одиничного термоелемента, для якого справедливо співвідношення:

$$\Phi = A/(Z \cdot f_1) = 1/(n \cdot f_1), \quad (3.7)$$

де  $Z$  – загальна кількість термоелементів в сенсорі,  $n$  – щільність заповнення термоелементами.

Формула (3.6) отримана в припущенні, що всі ізотермічні поверхні в чутливій зоні є площинами, паралельними поверхням сенсора і перпендикулярними тепловому потоку, що надходить, тобто перетоки теплоти між гілками термоелементів і зоною, зайнятою заливальним компаундом, відсутні. Насправді, внаслідок значної різниці коефіцієнтів теплопровідності матеріалів, такі перетоки існують, а ізотермічні поверхні відрізняються від паралельних площин. На практиці це призводить до того, що розрахунки за формулою (3.6) дають лише загальний характер залежності приведені чутливості від параметрів конструкції і властивостей матеріалів, а характеристики виготовлених перетворювачів можуть помітно відрізнятися від розрахункових.

Для більш точного розрахунку чутливості сенсорів рекомендовано [13] застосовувати метод дроблення елементарних комірок тіла ізотермічними і адіабатними площинами. У запропонованому методі розрахунку чутливості, фізична модель сенсора розглядається у вигляді гетерогенного тіла з замкнутими включеннями з контрастною теплопровідністю.

Елементарною коміркою сенсора є одиничний термоелемент разом з зонами заливного компаунда, що припадають на нього і, в загальному випадку, з теплопровідними шунтами і температуровирівнювальними покриттями, які призначаються для зменшення теплового опору сенсора [1, 11]. На рисунку 3.8 показаний одиничний елемент сенсора із зазначенням дроблення його ізотермічними і адіабатними площинами на ділянки, а також еквівалентні схеми з'єднання теплових опорів ділянок



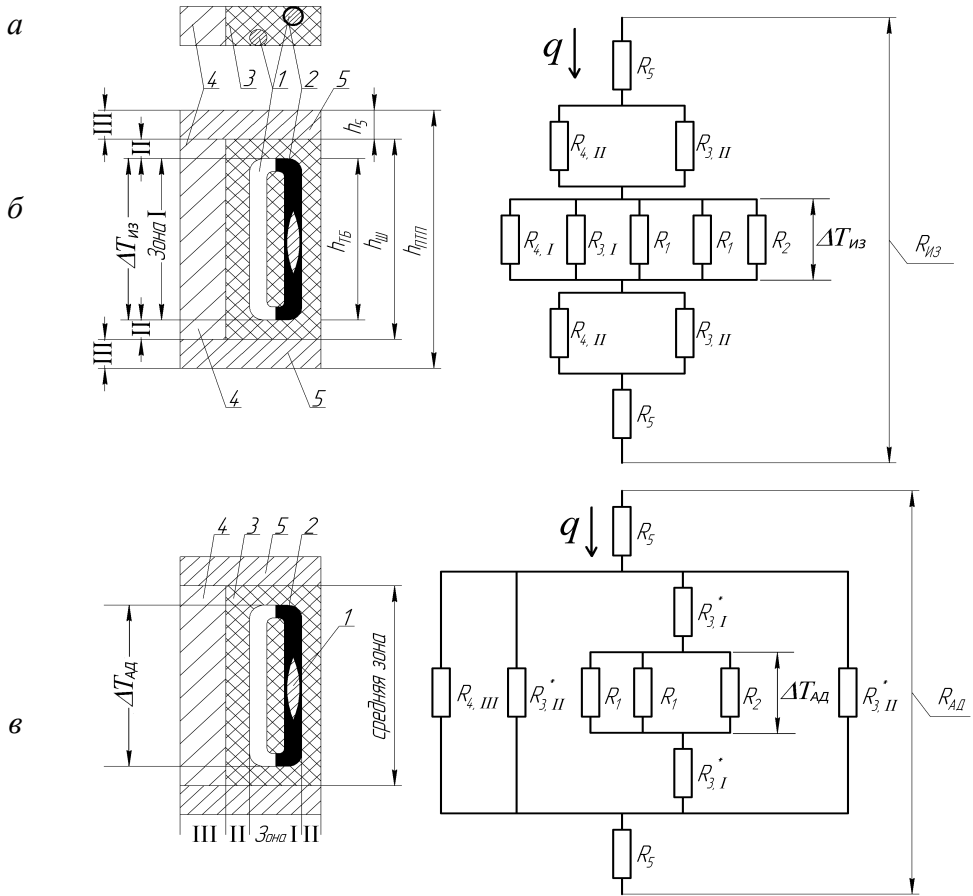


Рис. 3.8. Одиничний термоелемент сенсора: *а* – поперечний переріз; *б* – схема ізотермічного дроблення і еквівалентна схема з'єднань теплових опорів ділянок; *в* – схема адіабатно-ізотермічного дроблення і еквівалентна схема з'єднань теплових опорів ділянок: 1 – основний термоелектрод; 2 – гальванічне покриття; 3 – залівний компаунд; 4 – тепловий шунт; 5 – температуровирівнювальне покриття

для двох способів дроблення.

Перший варіант дроблення є ізотермічним, а другий варіант є адіабатно-ізотермічним, так як поперечні тепловому потоку елементи з високотеплопровідних металів вирівнюють розподіл температури і створюють ізотермічні поверхні.

Для розрахунку приведеного теплового опору кожної виділеної ділянки  $R_{дiл,j}$  в еквівалентній схемі застосована формула:

$$R_{\text{дiл},j} = \frac{h_{\text{дiл},j}}{\lambda_i} \cdot \frac{f_{\text{од.ел}}}{f_{\text{дiл},j}} = \frac{h_{\text{дiл},j}}{\lambda_{i3} f_{i1}} \cdot \frac{\Phi}{\lambda_3}, \quad (3.8)$$

де  $h_{\text{дiл},j}$ ,  $f_{\text{дiл},j}$  – висота і площа перетину  $j$ -ої ділянки;  $f_{\text{од.ел}}$  – площа перерізу одиничного елемента,  $\Phi = (2f_1 + f_2 + f_3 + f_4) / f_1 = 2 + f_{21} + f_{31} + f_{41}$  – формпараметр,  $\lambda_{i3} = \lambda_i / \lambda_3$  – приведений коефіцієнт теплопровідності при  $i = 1 \dots 5$ , причому індекс 3 відноситься до заливального матеріалу, індекс 4 до матеріалу шунта, індекс 5 – до матеріалу температуровирівнювального покриття.

Висота ділянки  $h_{\text{дiл},j}$  визначається наступними параметрами або їх різницею:  $h_{\text{ТБ}}$  – висота термобатарей,  $h_{\text{Ш}}$  – висота шунта,  $h_5$  – висота (товщина) температуровирівнювального покриття,  $h_{\text{sens}}$  – висота сенсора, причому  $h_{\text{sens}} = h_{\text{Ш}} + h_5$ .

Введемо наступні позначення:

$b = 2 + f_{21}$  – відносна площа перетину термоелектродів одиничного елемента;

$\Lambda_{1,2} = 2\lambda_{13} + \lambda_{23} \cdot f_{21}$  – відносна теплопровідність одиниці довжини термоелектродів;

$\Lambda_{3,4} = f_{31} + \lambda_{43} \cdot f_{41}$  – відносна теплопровідність одиниці довжини пасивних ділянок одиничного елемента (компаунда і шунта).

Застосовуючи для еквівалентних схем рис. 3.8 закони Кірхгофа і використовуючи введені позначення, отримуємо значення різниці температури між спаями термоелемента при впливі на сенсор густини теплового потоку  $q$ :

– для ізотермічного дроблення:

$$\Delta T_{\text{ІЗ}} = q \cdot \frac{h_{\text{ТБ}} \cdot \Phi}{\lambda_3} \cdot \frac{1}{\Lambda_{1,2} + \Lambda_{3,4}}, \quad (3.9)$$

– для адіабатно-ізотермічного дроблення:

$$\Delta T_{\text{АД}} = q \cdot \frac{h_{\text{ТБ}} \cdot \Phi}{\lambda_3} \cdot \frac{b}{\Lambda_{1,2} \cdot (\Lambda_{3,4} + b) - \frac{h_{\text{ТБ}}}{h_{\text{Ш}}} \cdot \Lambda_{3,4} \cdot (\Lambda_{1,2} - b)}. \quad (3.10)$$

Виходячи з формул (3.7), (3.9) і (3.10) знаходимо приведену чутливість для розглянутих варіантів дроблення:

– для ізотермічного дроблення:

$$S_{V,IB} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\lambda_3 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21}/f_{21}) \cdot (\Lambda_{1,2} + \Lambda_{3,4})}, \quad (3.11)$$

– для адіабатно-ізоермічного дроблення:

$$S_{V,AD} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot b}{\lambda_3 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21}/f_{21}) \cdot \left[ \Lambda_{1,2} \cdot (\Lambda_{3,4} + b) - \frac{h_{TB}}{h_{III}} \cdot \Lambda_{3,4} \cdot (\Lambda_{1,2} - b) \right]}. \quad (3.12)$$

Відзначимо, що формула (3.11), при відсутності шунта і температуровирівнювального покриття ( $h_5 = 0$ ,  $f_{41} = 0$ ), еквівалентна (3.6).

Результуюче значення приведеної чутливості сенсора знаходиться як середнє значення чутливості для ізоермічного і адіабатно-ізоермічного дроблення:

$$S_{V,PE3} = 0,5 \cdot (S_{V,IB} + S_{V,AD}). \quad (3.13)$$

Тепловий опір термоелектричних сенсорів розраховується за формулами:

$$R_{sens} = 0,5 \cdot (R_{IB} + R_{AD}), \quad (3.14)$$

$$R_{IB} = \frac{2h_5}{\lambda_5} + \frac{h_{III} \cdot \Phi}{\lambda_3 \cdot (\Lambda_{3,4} + b)} \cdot \left( 1 - \frac{h_{TB}}{h_{III}} \cdot \frac{\Lambda_{1,2} - b}{\Lambda_{1,2} + \Lambda_{3,4}} \right), \quad (3.15)$$

$$R_{AD} = \frac{2h_5}{\lambda_5} + \frac{h_{III} \cdot \Phi}{\lambda_3} \cdot \frac{\Lambda_{1,2} - \frac{h_{TB}}{h_{III}} \cdot (\Lambda_{1,2} - b)}{\Lambda_{1,2} \cdot (\Lambda_{3,4} + b) - \frac{h_{TB}}{h_{III}} \cdot \Lambda_{3,4} \cdot (\Lambda_{1,2} - b)}. \quad (3.16)$$

Перевірка коректності отриманих співвідношень проводилась на сенсорах, термоелемент яких виконано на базі константану (дріт-основа) з нікелевим покриттям. Параметри конструкції сенсорів: діаметр – 60 мм; діаметр дроту-основи  $d = 0,1$  мм; щільність укладання термоелементів  $n = 3,6$  мм<sup>-2</sup>; формпараметр  $\Phi \approx 35$ ; висота термобатарей  $h_{TB} = 1,25$  мм; товщина  $h_{sens} = 1,4$  мм. Відносний переріз нікелевого покриття варіювався від  $f_{21} = 0,12$  до  $f_{21} = 1,1$ . У виготовлених сенсорах були відсутні шунти і температуровирівнювальне покриття, тому  $h_5 = 0$ ;  $f_{41} = 0$ ;  $h_{sens} = h_{III}$ ;  $\Lambda_{3,4} = f_{31} = \Phi - b$ . При виготовленні сенсорів використано компаунд на базі епоксидного полімеру УП-610 з вмістом наповнювача (порошку корунду) – 250% від маси полімеру. Чутливість перетворювачів і коефіцієнт теплопровідності компаунда визначені на еталонній установці УВТ-1 [14] в діапазоні температури від 323 К до

463 К. Результати розрахунків приведеної чутливості при ізотермічному і адіабатно-ізотермічному дробленні, а також уточненого середнього значення відповідно до формул (3.11) – (3.13) і експериментальних досліджень представлені на рис. 3.9 у вигляді графіків залежностей приведеної чутливості від відносного перерізу нікелевого покриття.

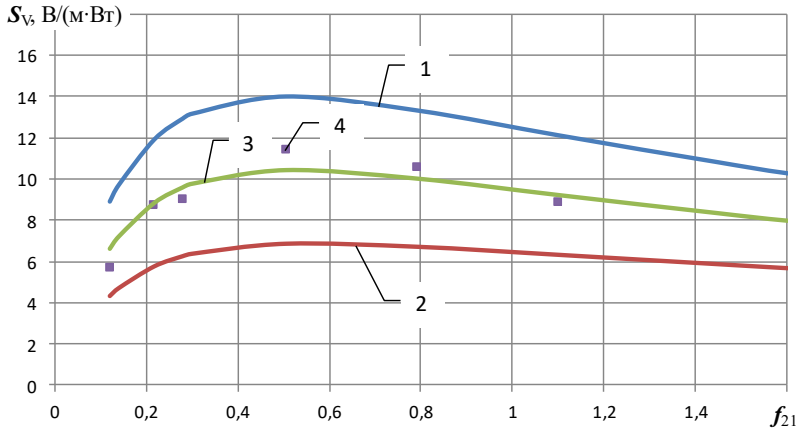


Рис. 3.9. Залежність приведеної чутливості від відносного перерізу нікелевого покриття  $f_{21}$ : 1 – для ізотермічного дроблення; 2 – для адіабатно-ізотермічного дроблення; 3 – результуюче значення; 4 – експериментальні дані

Всі результати відносяться до середньої температури сенсора 323 К. Як впливає з наведених графіків, результати експериментально виміряної приведеної чутливості відповідають значенням, отриманим відповідно до запропонованого розрахункового методу.

Значення коефіцієнтів теплопровідності, термоелектричних коефіцієнтів і питомого опору матеріалів істотно залежать від температури, внаслідок чого приведена чутливість також має температурну залежність. На рис. 3.10 наведені графіки температурних залежностей приведеної чутливості сенсора для трьох значень відносного перерізу нікелевого гальванічного покриття, отримані за уточненим методом з урахуванням температурних залежностей властивостей матеріалів.

На цьому ж рисунку показані отримані експериментально значення чутливості відповідних сенсорів. Дані експериментів добре співпадають з результатами розрахунків, а чутливість сенсора з  $f_{21} = 1,1$  практично не залежить від температури, що свідчить про можливість створення сенсорів, чутливих до теплового потоку, але інваріантних до зміни температури. На практиці помічено, що мала товщина захисного

шару компаунда, що відокремлює спай термобатареї від поверхні сенсора, впливає на його чутливість.

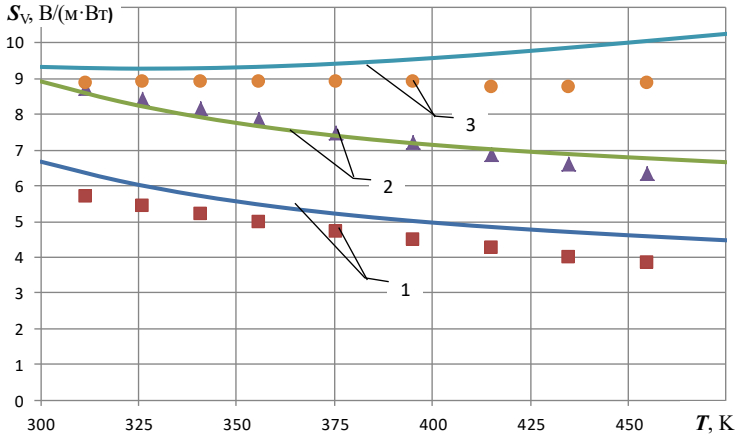


Рис. 3.10. Розрахункові (суцільні лінії) та експериментальні (точки) температурні залежності наведеної чутливості сенсорів для трьох значень відносного перетину нікелевого гальванічного покриття:  
 1 -  $f_{21} = 0,12$ ; 2 -  $f_{21} = 0,217$ ; 3 -  $f_{21} = 1,1$

Це явище може негативно позначатися на точності вимірювань в разі, коли калібрування і експлуатація перетворювача відбуваються при різних умовах теплообміну, наприклад, калібрування – при кондуктивному способі підведення теплоти, а експлуатація – при радіаційно-конвективному. В [14] для стабілізації чутливості сенсорів рекомендується виконувати захисний шар товщиною 0,1 ... 0,5 мм. У той же час традиційна формула (3.6) не демонструє залежність чутливості від товщини захисного шару компаунда. У описаному вище методі розрахунку така залежність врахована присутністю в знаменнику формули (3.12) множника, що дорівнює відношенню висоти термобатареї і висоти шунта (або висоти сенсора). На рис. 3.11 представлено графіки залежності приведеної чутливості сенсора без шунтів і температуровирівнювальних пластин від відношення  $h_{sens}/h_{TB}$  при варіації форм параметра  $\Phi$  для константан-нікелевих і константан-мідних термобатарей.

Графіки свідчать, що в діапазоні значень відношення  $h_{sens}/h_{TB}$  від 1,0 до 1,2 чутливість істотно залежить від товщини захисного шару, а при  $h_{sens}/h_{TB} \geq 1,2$ , значення приведеної чутливості стабілізується, і подальше збільшення товщини захисного шару мало впливає на неї. Таким чином, рекомендується для найбільш поширених сенсорів висо-

тою  $h_{sens} \approx (1...4)$  мм, виконувати захисні шари з обох сторін товщиною 0,1 ... 0,4 мм.

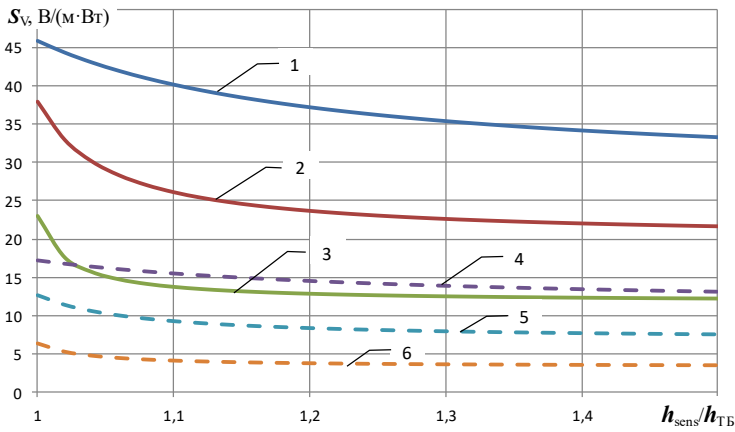


Рис. 3.11. Залежності приведеної чутливості від відношення  $h_{sens} / h_{TB}$  при варіації формпараметра  $\Phi$  для константан-мідних (суцільна лінія) і константан-нікелевих (пунктир) термобатарей: 1 - Con-Cu,  $\Phi = 10$ ; 2 - Con-Cu,  $\Phi = 50$ ; 3 - Con-Cu,  $\Phi = 200$ ; 4 - Con-Ni,  $\Phi = 10$ ; 5 - Con-Ni,  $\Phi = 50$ ; 6 - Con-Ni,  $\Phi = 200$ .

Шляхом дроблення одиничного елемента сенсора теплового потоку ізотермічними і адіабатними площинами отримані нові уточнені формули для розрахунку приведеної чутливості біметалевих гальванічних сенсорів виду допоміжної стінки. Експериментальні дослідження партії константан-нікелевих перетворювачів з різними перерізами гальванічного покриття підтверджують достовірність запропонованих розрахункових формул. Отримані результати теоретично підтверджують відомий з практики факт залежності чутливості від товщини захисного шару компаунда і дозволяють оцінити необхідне значення цієї товщини для стабілізації характеристик сенсора.

### 3.3. Реалізація сенсорів теплового потоку

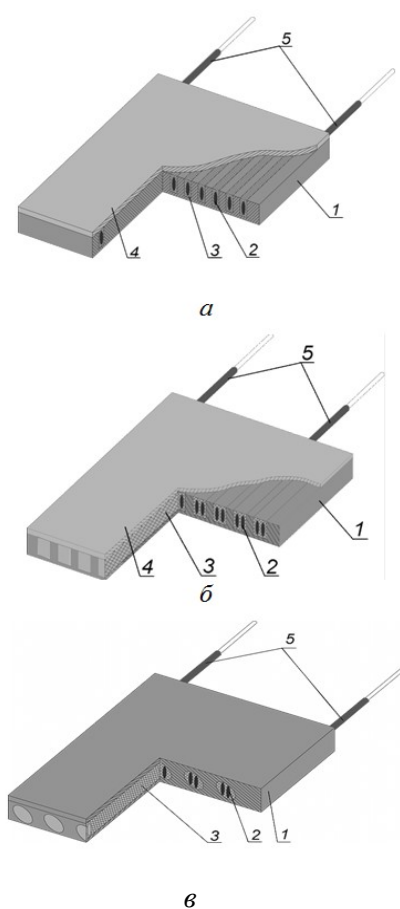
Для вдосконалення метрологічних та експлуатаційних характеристик сенсорів теплового потоку в залежності від умов їх застосування в системах моніторингу та діагностики енергетичного обладнання проведено низку досліджень та розробок.

**Сенсори теплового потоку з тепловими шунтами.** При вимірюванні теплового потоку в умовах конвективного і конвективно-

радіаційного теплообміну на величину методичної похибки впливає тепловий опір сенсора, який при використанні традиційних електроізоляційних компаундів з теплопровідністю  $(0,2 \div 1,2) \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  змінюється в межах від  $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  до  $10^{-2} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Зменшити тепловий опір сенсора і розширити області його застосування дозволяє введення в конструкцію теплових шунтів.

Три можливих конструктивних рішення сенсора з тепловими шунтами і температуровирівнювальними покриттями показані на рис. 3.12 при виконанні в металевому корпусі і на рис. 3.13 – схема побудови сенсора з дровим тепловим шунтом [12, 15].



Однією з перших моделей сенсора з тепловим шунтом, використаних в приладах для дослідження теплофізичних властивостей матеріалів, характеристик теплових труб і інших об'єктів нової техніки, з'явилася конструкція з фрезерованим металевим корпусом, показана на рис. 3.12, а. В цьому випадку сенсор складається з корпусу, в паралельних пазах якого розміщена стрічкова термобатарея, залита електроізоляційним компаундом. Після полімеризації компаунда до корпусу припаяна кришка. Через два отвори в бічній поверхні корпусу виведені потенціалоз'ємні дроти термобатареї. Недоліком такої конструкції є те, що термоелементи і заливний компаунд під час пайки кришки до корпусу зазнають вплив високої температури, що висуває жорсткі технологічні вимоги до властивостей заливного компаунда і гальванічного покриття.

Від цього недоліку позбавлена друга модель сенсора (див. рис. 3.12, б), технологія виготовлення якої передбачає припаявання кришки до корпусу відразу після фрезерування пазів. При цьому пази виконують більшої ширини (не менше ніж в 2 рази) і в них вкладають складену вдвічі стрічкову спіраль,

Рис. 3.12. Варіанти моделей сенсорів з тепловими шунтами та металевому корпусі: 1 – корпус; 2 – батарея термоелементів; 3 – електроізоляційний компаунд; 4 – кришка; 5 – потенціалоз'ємні дроти

попередньо оповиту ниткою, просочену заливальним компаундом. Надлишки компаунда видаляються через відкриті торці пазів корпусу.

При необхідності розміщення сенсора на досліджуваній поверхні з високою температурою надійний тепловий контакт забезпечують зазвичай із застосуванням легкоплавкого припою або галій-індієвої евтектики. Але при цьому є небезпека потрапляння цих речовин на паяні шви корпусу і взаємодії їх з припоєм. У цьому випадку доцільно сенсор виготовляти в суцільнометалевому корпусі у вигляді пластини, в якій висвердлені отвори для розміщення стрічкової батареї (див. рис. 3.12, в).

У моделі сенсора, схема будови якого показана на рис. 3.13, стрічкова термобатарея з нанесеним гальванічним покриттям додатково обвивається електроізолювальним дротом, мідним або константановим, діаметр і щільність навивки вибирають виходячи з розрахунку необхідного значення ефективного теплового опору сенсора. Цей дріт виконує функцію теплових шунтів, розміщених паралельно (за тепловим потоком) до термоелементів. Подальша технологія виготовлення такого сенсора не відрізняється від традиційної, неодноразово описаної в літературі [1-3, 15].

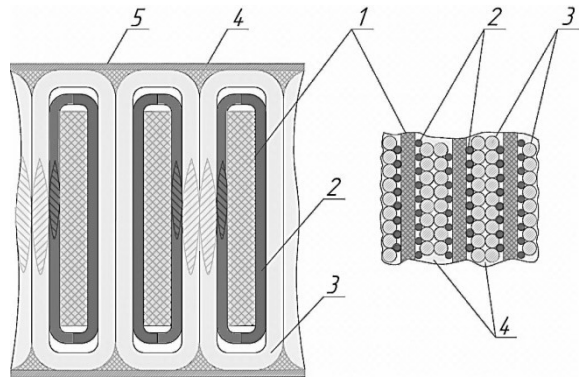


Рис. 3.13. Схема побудови ПТП з дротовим тепловим шунтом: 1 – основа; 2 – батарея термоелементів; 3 – дротовий тепловий шунт; 4 – заливний компаунд; 5 – температуровирівнювальне покриття

Після отримання заготовки сенсора типу допоміжної стінки, що складається з гальванічних термоелементів, заформованих разом з дротяними шунтами в заливальному компаунді, робочі поверхні шліфують до появи в зрізі перетинів шунтувального дроту і, при необхідності, металізують, утворюючи тим самим температуровирівнювальні покриття поверхонь, що сприймають і віддають теплоту. Це дає можливість змінювати ефективний тепловий опір сенсора в широкому діапазоні значень, а наявність температуровирівнювального покриття обох поверхонь сенсора з шунтами забезпечує рівномірність поля теплового потоку на вході і виході з нього. Використання теплових шунтів



дозволило знизити тепловий опір сенсорів більш ніж на порядок і наблизити їх ефективну теплопровідність до теплопровідності металів.

Відповідно до моделі, наведеної в розділі 3.2, тепловий опір сенсора з шунтами прийнято рівним напівсумі опорів, знайденими за ізотермічною та адіабатною моделями:

$$R_{sens} = 0,5 \cdot (R_B^{III} + R_{Ad}^{III}). \quad (3.17)$$

На рис. 3.14 наведено результати теоретичного дослідження залежності ефективного теплового опору сенсора від теплопровідності шунта при варіації геометричного параметра шунта  $\phi = f_4 / (2f_1 + f_2 + f_3 + f_4)$ , де  $f_i$  – площа перерізу компонентів одиничного термоелемента згідно з індексом ( $i=1$  – основний термоелектрод; 2 – гальванічне покриття; 3 – заливний компаунд; 4 – тепловий шунт).

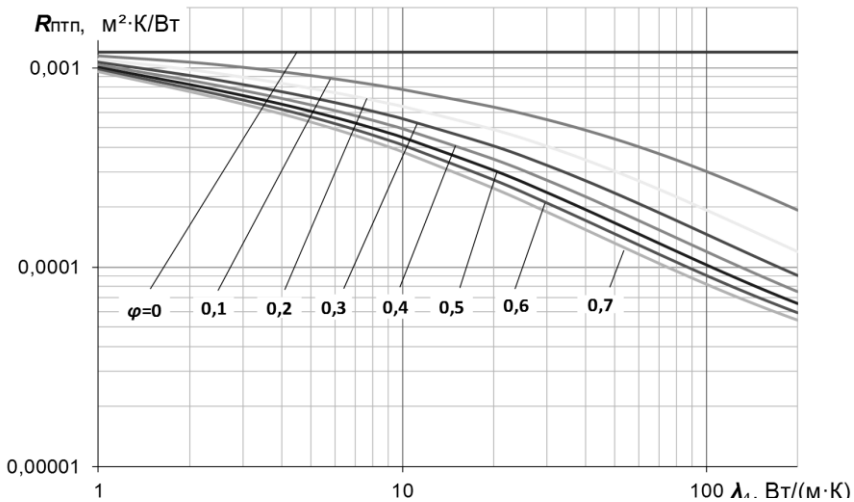


Рис. 3.14. Залежність ефективного теплового опору сенсора теплового потоку від теплопровідності шунта при варіації геометричного параметра шунта  $\phi$

Таким чином, завдання забезпечення вимірювання густини теплового потоку з більшою точністю на конкретному об'єкті із застосуванням сенсорів, який має необхідне для узгодженості з теплофізичними характеристиками об'єкта значення ефективного теплового опору, вирішується введенням в конструкцію сенсора теплового шунта з відповідними геометричним параметром і коефіцієнтом теплопровідності.

**Біспіральні сенсорні теплових потоку.** Практика багаторічної експлуатації термоелектричних біметалевих багатоелементних сенсорів розкрила їх недоліки, основними з яких є обмежений діапазон тем-

ператури експлуатації та залежність функції перетворення від температури.

Стабільність у часі характеристик сенсорів, зокрема метрологічних, залежить від безлічі факторів, деякі з них подібні тим, що впливають на термоелектричні перетворювачі температури (термопари), але існує і ряд факторів специфічних для сенсорів теплового потоку.

В процесі експлуатації сенсори піддаються фізичному старінню, в результаті чого змінюються властивості термоелементів. Основні причини цих змін – окислення і дифузія металів термоелектродів, зміна структури металів і заливного компаунда, дифузія домішок і забруднення металів.

Проблема, пов'язана з часовою стабільністю метрологічних характеристик, вирішена шляхом переходу від широко використовуваних мідних покриттів і покриттів з дорогоцінних металів до нікелевих покриттів. Завдяки високій корозійній стійкості нікелю та його більшому питомому опору отримані пари копель-нікель і константан-нікель, що відрізняються високою стабільністю в часі навіть в умовах експлуатації сенсорів за температури до 500 К. Причому, в діапазоні температури від 300 К до 500 К зміна функції перетворення таких сенсорів не перевищує 3%.

Подальше підвищення температури призводить до істотної зміни функції перетворення і появи піків при температурі точки Кюрі для нікелю.

Цей недолік усунуто створенням біспіральних сенсорів, що побудовані на базі з двох термобатарей [16, 17]. Причому, обидві термобатареї виконуються з нікелевим покриттям, а основою додаткової термобатареї є парний термоелектрод (рис. 3.15, *а, б*).

За першим варіантом конструкції (рис. 3.16, *а*) обидві спіралі з основних термоелектродних дротів 1 і 2 з електролітичними покриттями 3.1 і 3.2 напіввитків навито на окремі каркасні стрічки 4 і 5. Ці стрічки виконані зі смужок електроізоляційного матеріалу однакової висоти і розташовані паралельно, так, що верхні спаї обох спіралей знаходяться в одній площині, а нижні спаї – в іншій. Площини спаїв паралельні і рознесені на висоту термобатареї. Обидві спіралі з'єднані послідовно у спаї 6 і зафіксовані у вигляді пластини електроізоляційним компаундним матеріалом (на рис. 3.16 не показаний). Сигнал біспірального сенсора виводиться через потенціалоз'ємні дроти 7.

Сумарна чутливість двох термобатарей, включених послідовно за електричним сигналом та паралельно відносно теплового потоку, розраховується за формулою:

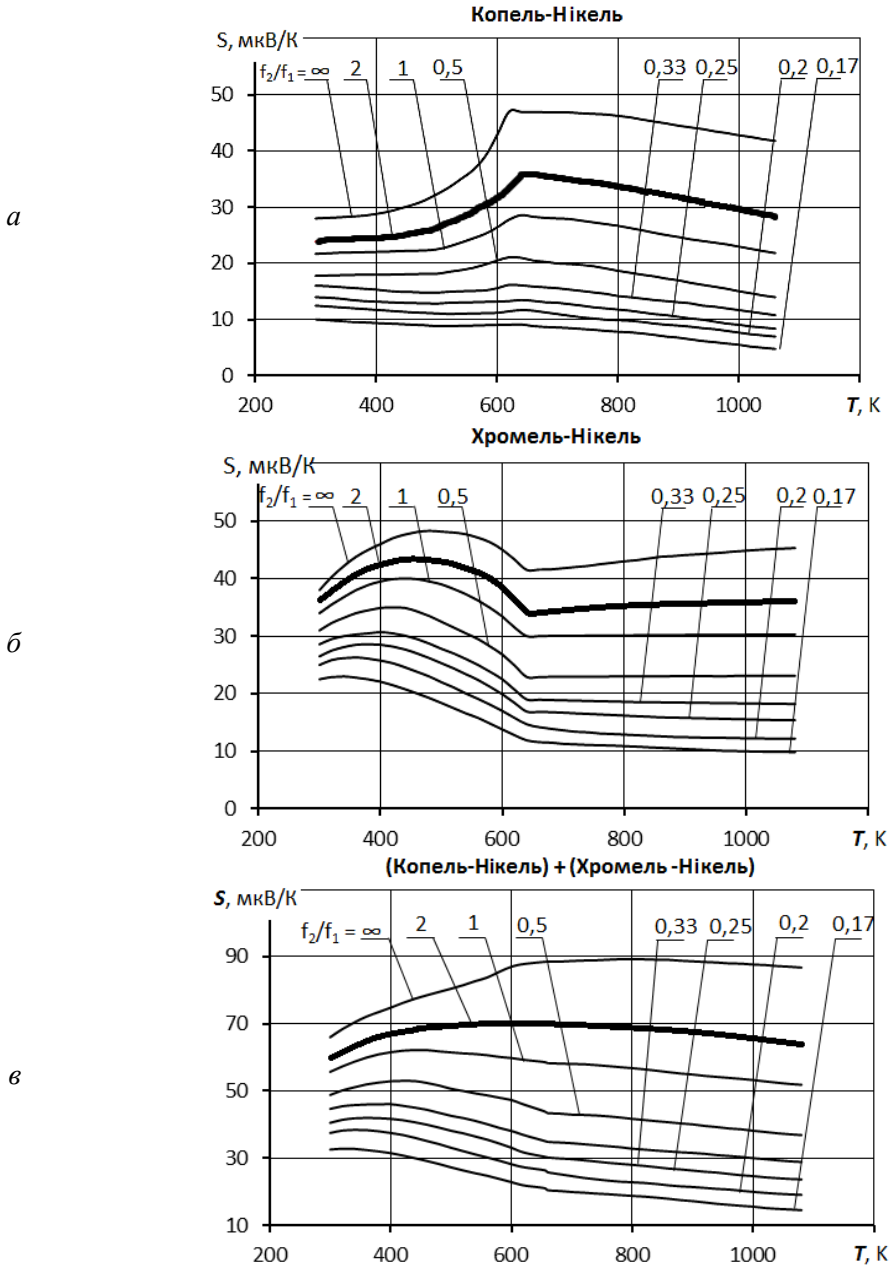


Рис. 3.15. Температурні залежності чутливості термоелементів, включених послідовно за електричним сигналом

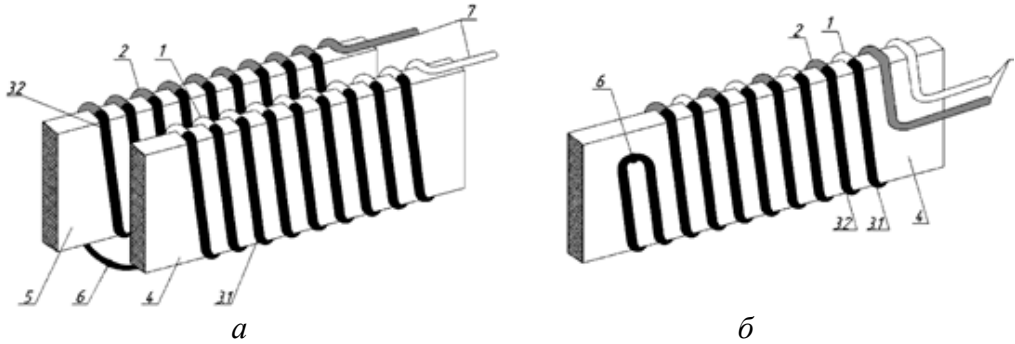


Рис. 3.16. Варіанти виконання батареї термоелементів біспірального сенсора (спіраль поставлена на «ребро»): 1 – основний термоелектродний дріт першої спіралі; 2 – термоелектродний дріт другої спіралі; 3.1, 3.2 – електролітичне покриття відповідних напіввитків кожної спіралі; 4, 5 – каркасні ізоляційні стрічки; 6 – з'єднання спіралей; 7 – потенціалоз'ємні дроти батарей термоелементів

$$S_{\Sigma} = \alpha_1^3 \cdot z_1 / [1 + (\rho_3 \cdot f_1) / (\rho_1 \cdot f_{31})] - \alpha_2^3 \cdot z_2 / [1 + (\rho_3 \cdot f_2) / (\rho_2 \cdot f_{32})] - \alpha_3^3 \cdot (z_1 / [1 + (\rho_3 \cdot f_1) / (\rho_1 \cdot f_{31})] - z_2 / [1 + (\rho_3 \cdot f_2) / (\rho_2 \cdot f_{32})]), \quad (3.18)$$

де  $\alpha_1^3, \alpha_2^3, \alpha_3^3$  – коефіцієнт Зеєбека матеріалів основних дротів 1 і 2 та матеріалу покриття 3;  $z_1, z_2$  – кількість термоелементів в першій та другій термобатареях відповідно;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – питомий електричний опір основних дротів 1, 2 та покриття 3.

При  $z_1 / (1 + \rho_3 \cdot f_1 / \rho_1 \cdot f_{31}) = z_2 / (1 + \rho_3 \cdot f_2 / \rho_2 \cdot f_{32})$ , чутливість сенсора не залежить від властивостей матеріалу покриття і розраховується за формулою:

$$S_{\Sigma, opt} = \alpha_1^3 \cdot z_1 / (1 + \rho_3 \cdot f_1 / \rho_1 \cdot f_{31}) - \alpha_2^3 \cdot z_2 / (1 + \rho_3 \cdot f_2 / \rho_2 \cdot f_{32}). \quad (3.19)$$

При виготовленні біспірального сенсора можливі кілька конструктивних рішень, які схематично показані на рисунку 3.16, *a* і *б*, коли спіраль поставлена на «ребро» і на рисунку 3.17, коли спіраль розташована «плазом».

Конструкція сенсора за другим варіантом (див. рис. 3.16, *б*) відрізняється тим, що обидві спіралі розташовані на загальній каркасній стрічці 4, при цьому термоелектродні дроти 1 і 2 навито один відносно іншого зі зміщенням на ізолюючий проміжок, який не допускає електричного контакту між термоелементами.

Конструкція сенсора, показана на рис. 3.17, також може бути виконана в двох варіантах, аналогічних вже описаним, тобто з двох спіралей на індивідуальній стрічці-носієві кожна (варіант *a*) і на загальній

стрічці (варіант б), але зі зміщенням на проміжок для виключення торкання витків однієї спіралі з витками іншої спіралі.

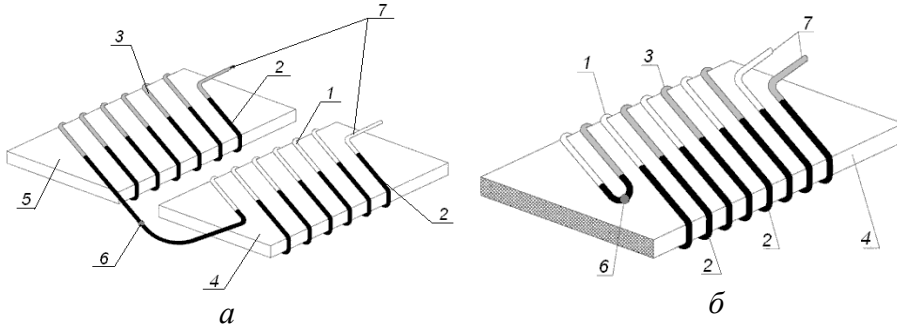


Рис. 3.17. Варіанти виконання батареї термоелементів біспіралного сенсора (спіраль розташована «плазом»): 1 – основний термоелектродний дріт першої спіралі; 2 – термоелектродний дріт другої спіралі; 3 – електролітичне покриття напіввитків спіралі; 4, 5 – каркасні ізоляційні стрічки; 6 – спай з'єднання спіралей; 7 – потенціалоз'ємні дроти батареї термоелементів

**Сенсори теплового потоку з поліметалічним покриттям.** Підвищити чутливість біметалевих сенсорів можна шляхом нанесення на обидва напіввитки дроту-основи батареї гальванічного покриття з парних термоелектродних матеріалів, що мають високі значення коефіцієнта Зеебека, але не випускаються у вигляді проволочки (наприклад, сурма, вісмут).

Для розрахунку оптимальних значень чутливості й необхідної для

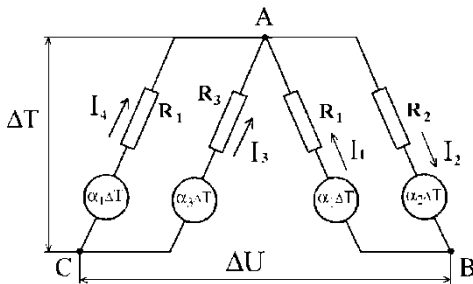


Рис. 3.18. Еквівалентна електрична схема термоелемента з шарами термоелектричних покриттів на напіввитках

цього товщини покриттів використовується еквівалентна електрична схема термоелемента сенсора, наведена на рисунку 3.18, де індекс «1» відповідає основному термоелектроду, «2» і «3» – двом гальванічним покриттям. За наявності різниці температури  $\Delta T$  між вузлами контуру виникають струми  $I_1, I_2, I_3, I_4$ , а між вузлами В і С виникає різниця потенціалів  $\Delta U$ , яка, згідно з

правилом Кірхгофа для ланцюгів постійного струму:

$$\Delta U_{CB} = \left( \frac{\alpha_3^3 - \alpha_1^3}{R_1 + R_3} + \frac{\alpha_1^3 - \alpha_2^3}{R_1 + R_2} \right) \cdot R_1 \cdot \Delta T. \quad (3.20)$$

З урахуванням (3.20) розрахункове співвідношення для приведеної чутливості  $S_V = S \cdot (A \cdot h)^{-1}$  біметалевих сенсорів набуває вигляду:

$$S_V = \frac{1}{\lambda_1 \cdot f_1} \cdot \left( \frac{\alpha_3^3 / (1 + \rho_{31} / f_{31}) - \alpha_2^3 / (1 + \rho_{21} / f_{21})}{2 + \lambda_{21} \cdot f_{21} + \lambda_{31} \cdot f_{31} + \lambda_{41} \cdot f_{41}} + \frac{\alpha_1^3 / \left( (1 + \rho_{21} / f_{21})^{-1} - (1 + \rho_{31} / f_{31})^{-1} \right)}{2 + \lambda_{21} \cdot f_{21} + \lambda_{31} \cdot f_{31} + \lambda_{41} \cdot f_{41}} \right), \quad (3.21)$$

де  $\rho_{i1} = \rho_i / \rho_1$  – приведений питомий електричний опір;  $f_{i1} = f_i / f_1$  – приведена площа перерізу;  $\lambda_{i1} = \lambda_i / \lambda_1$  – відношення коефіцієнтів теплопровідності (індексами позначені:  $i = 1$  проволочка основи,  $i = 2; 3$  гальванічне покриття,  $i = 4$  заливний компаунд).

При  $\rho_{21} / f_{21} = \rho_{31} / f_{31}$  чутливість сенсора не залежить від матеріалу основного термоелектроду термобатареї та визначається тільки коефіцієнтами Зеебека матеріалів покриття.

Таким чином, використання поліметалічних термоелектродів дозволяє захищати термоелементи сенсора від корозії і використовувати термоелектродні матеріали, що мають більш високе значення коефіцієнта Зеебека в порівнянні з традиційними парами, але не випускаються у вигляді дроту. Це забезпечує стабільність характеристик сенсора та підвищує його чутливість при одночасному зменшенні електричного опору [18, 19].

**Сенсори теплового потоку для дослідження нестационарних теплових процесів.** Для енергетичного обладнання характерні, як правило, високі значення температури й густини теплового потоку і динамічні теплові режими. Це потребує створення вимірювальних первинних перетворювачів і вимірювальної системи, яка здатна давати адекватну інформацію про параметри швидкоплинних теплових процесів в умовах постійно мінливої температури поверхні ОК.

Сенсори теплового потоку кінцевої товщини, що мають індивідуальну статичну функцію перетворення, призначені тільки для вимірювання стаціонарного або повільно змінного теплового потоку. Швидкодію або інерційність сенсорів характеризують часом реакції та постійною часу [5]. Час реакції визначають як час з початку впливу ступінчасто змінюваного теплового потоку до моменту досягнення вихідним сигналом деякого заданого значення, наприклад, 0,99 від сталого значення. Постійна часу характеризує швидкодію сенсорів вельми умовно, так як нестационарні процеси в ньому описуються, як правило,

значно складніше, ніж проста експоненціальна зміна у часі. Час реакції за рівнем 0,99 (час встановлення показань) для сенсору з експоненційною перехідною характеристикою пов'язано з постійною часу в такий спосіб:  $t_{0,99} = 5 \cdot \tau_{0,63}$ . Таким чином, для дослідження нестационарних теплових процесів постійна часу повинна бути не менше, ніж в (5...10) разів менше, ніж характерний час зміни теплового потоку.

Якщо для вимірювання стаціонарних теплових потоків достатньо визначити різницю температури на торцевих поверхнях термобатарей, тобто виконати диференціювання між двома перерізами сенсора, то в разі вимірювання нестационарних теплових потоків кількість перерізів, між якими виконується диференціювання, має бути збільшена. Це дозволяє на порядок зменшити інтервал часу реакції на зовнішню теплову дію.

На практиці для збільшення кількості перерізів у сенсор вводять додаткову корегувальну термобатарей, в якій площини розміщення спаїв не співпадають з площинами спаїв основної термобатарей [20, 21].

Встановлено, що для збільшення швидкодії необхідно підсумовувати в певній пропорції сигнали, що відповідають різниці температури в шарах пластини сенсора. У загальному випадку співвідношення сигналів може бути різним.

Сигнал, що формується за допомогою термобатарей, спаї яких розташовані в перерізах з координат  $\eta$  і  $(1-\eta)$ , та відповідає зміні в часі вимірюваного значення густини теплового потоку  $q(\tau)$  відносно густини теплового потоку  $q_0$ , який надходить на теплосприймаючу поверхню, визначається як:

$$\frac{q(\tau)}{q_0} = \frac{\lambda}{h_{sens} \cdot \eta} \cdot ([\theta(0, \tau) - \theta(\eta, \tau)] + m \cdot [\theta(0, \tau) - \theta(\eta, \tau) - (\theta(1-\eta, \tau) - \theta(1, \tau))]), \quad (3.22)$$

де  $m$  – параметр, який враховує чутливості коригувальних термобатарей та їх внесок у сумарний сигнал;  $\eta = x / h_{sens}$  – безрозмірна координата.

На рис. 3.19 представлені результати математичного моделювання залежності відносної густини вимірюваного теплового потоку при ступеневій зміні вхідного потоку від критерію Фур'є ( $Fo = a\tau / h^2$ , де  $a$  – температуропровідність сенсора) з використанням рівняння (3.22), для

випадку  $\eta=0,5$  при варіації значень параметра  $m$  ( $m=0,5; 0,56; 0,62; 0,705$ ).

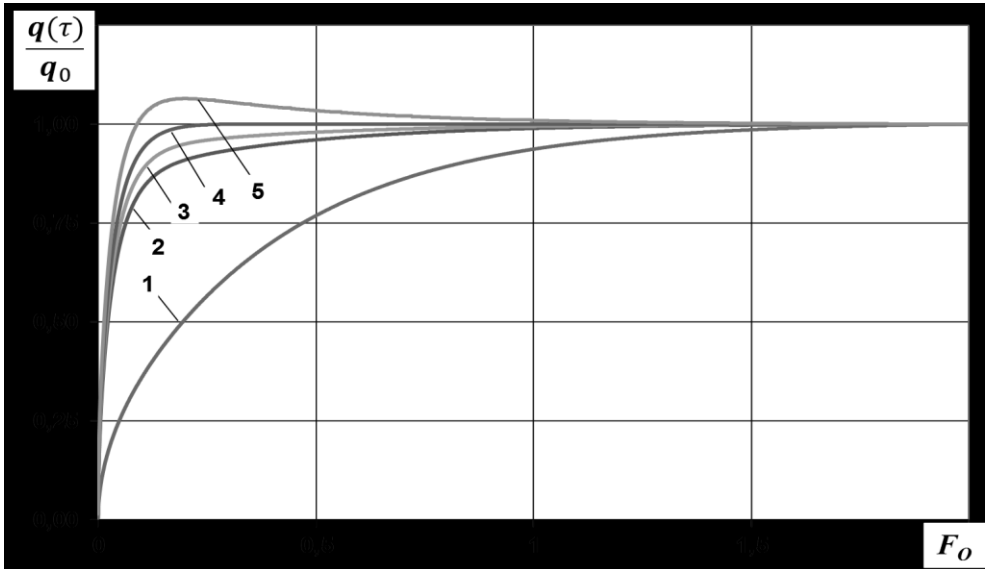


Рис. 3.19. Залежності вимірної відносної густини теплового потоку при  $\eta=0,5$  від критерію Фур'є при варіації параметра  $m$ :

- 1 – сенсор без корегувальної термобатарей:  $n=2$ , при  $m=0$ ;  
 2 – двошаровий сенсор:  $n=3$ ,  $m=0,5$ ; 3 –  $m=0,56$ ; 4 –  $m=0,62$ ; 5 –  $m=0,705$

З аналізу графіків випливає, що за наявності тільки трьох перетинів (для випадку  $\eta=0,5$ ), між якими вимірюється різниця температури, при підборі числа  $m$ , досягається зниження інерційності сенсора, що не поступається результатам, отриманим для випадків  $n=4; 5$  і більше. Як правило, сенсори з корегувальною термобатарей виконують з двох термобатарей, одна з яких – основна, на теплосприймальну поверхню якої надходить тепловий потік, друга – корегувальна, гарячі спаї якої розміщено поблизу перерізу холодних спаїв основної термобатарей, та яка включена з основною диференційно (рис. 3.20).

Такі сенсори мають постійну часу на порядок меншу ніж у традиційних сенсорів такої ж товщини.

Основні характеристики розроблених сенсорів теплового потоку, які можуть бути застосовані в системах моніторингу та діагностики енергетичного обладнання приведено в таблиці 3.1.



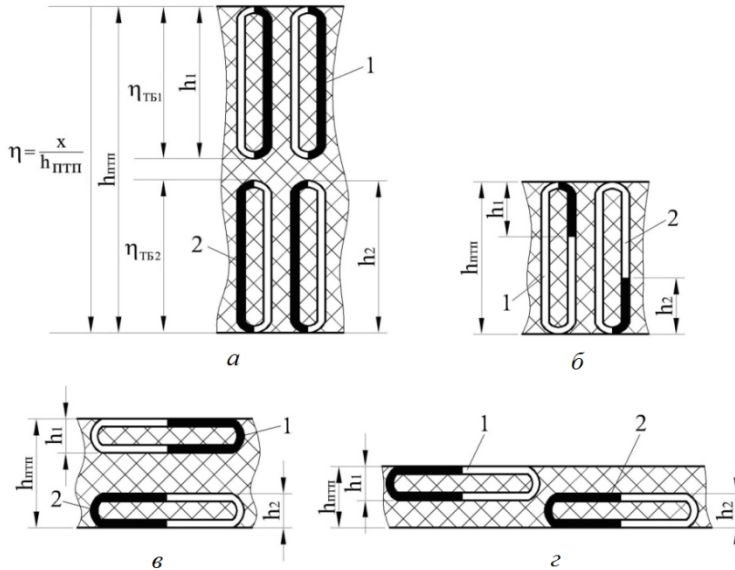


Рис. 3.20. Можливі схеми побудови малоінерційного сенсору  
1 – основна термобатарея, 2 – коригувальна термобатарея.

Таблиця 3.1. Основні характеристики сенсорів теплового потоку

Назва характеристики	Сенсор теплового потоку			
	загального призначення	з тепловим шунтом	з коригувальною термобатареєю	біспіральний
Діапазон вимірювання густини теплового потоку, Вт/м <sup>2</sup>	10...2·10 <sup>4</sup>	100...20·10 <sup>4</sup>	100...1·10 <sup>4</sup>	100...15·10 <sup>4</sup>
Температурний діапазон експлуатації, °С	-196...200	-196...400	-50...200	-50...400
Час реакції за рівнем 0,63 не більше, с	3...30	1...2	0,1...1	3...30
Коефіцієнт ефективної теплопровідності, Вт/(м·К)	0,5...3	3...100	0,5...3	0,5...3
Межі основної відносної похибки, %	4	4	4	4

Таким чином проведені розрахунки та результати досліджень дозволяють зробити висновок, що застосування сенсорів з корегувальною термобатареєю дає переваги за точністю вимірювання та швидкодією у порівнянні зі стандартними перетворювачами.

## Література

1. *Геращенко О. А.* Основы теплотметрии. – К.: Наукова думка, 1972. – 172 с.
2. *Пилипенко Н.В.* Методы и приборы нестационарной теплотметрии на основе решения обратных задач теплопроводности, – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 180 с.
3. *Gifford, A.R., et al.*, A durable heat flux sensor for extreme temperature and heat flux environments. submitted // *Thermophysics and Heat Transfer*, 2010. – P.69-76.
4. *Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Менделеева Т.В.* Теоретические основы метрологии теплоточных измерений // *Промышленная теплотехника*. – Киев, 2001. – Т. 23, № 4-5. – С. 175-180.
5. *ДСТУ 3756-98.* Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови. – К.: Держспоживстандарт України, 2000. – 21 с.
6. *Грищенко Т., Декуша Л., Воробьев Л.* Тепловой поток и методы его измерения // *Метрология та прилади*. – 2009. – № 2. – С. 3-11.
7. *Декуша Л.В., Менделеева Т.В.* Измерение стационарного теплового потока, проходящего через бесконечную пластину по обе стороны, которой происходит конвективный теплообмен // *Промышленная теплотехника*. – Киев, 2007. – Т. 29, № 2. – С. 88-96.
8. *Diller T.E.* Advances in Heat Flux Measurements // *Advances in Heat Transfer*. – Academic Press, Boston. – 1993. – Vol.23, p. 279–368,
9. *Воробьев Л., Грищенко Т., Декуша Л., Ковтун С.* Методичні похибки при вимірюванні густини теплового потоку // *Науково-виробничий журнал: Метрологія та прилади*. – 2015. – № 6 – С. 8-14.
10. *Воробьев Л.И., Декуша Л. В., Грищенко Т. Г., Ковтун С. И., Шмаров Е.В.* Уточненный расчет чувствительности термоэлектрических преобразователей теплового потока // *Науково-виробничий журнал: Метрологія та прилади*. – 2015. – № 5 – С. 220-223
11. *Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Шмаров Є.В., Воробьев Л.Й.* Ефективний тепловий опір перетворювача теплового потоку виду допоміжної стінки // *Науково-виробничий журнал: Метрологія та прилади*. – 2012. – № 6. – С. 20-26.
12. *Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.* Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справочная книга. – Л.: Энергия, 1974. – 264с.

13. *Ковтун С.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И.* Аппаратурное обеспечение поверочной схемы для теплоточных измерений // Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 68. – Львів: «Львівська політехніка», 2008. – С. 126-133.
14. *Van der Graaf F.* Heat Flux Sensor // Thermal Sensors. VCH Verlagsgesellschaft mbh. – Weinheim, FRG. – 1990. – Chapter 8, Vol. 4. – 28p.
15. *Грищенко Т., Декуша Л., Шмаров Е., Воробьев Л.* Преобразователи теплового потока с тепловыми шунтами и температуровыравнивающими покрытиями // Промышленная теплотехника. – Киев, 2013. – Т. 35, № 3. – С. 94–102.
16. *Шмаров Е.В., Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г.* Биспиральный преобразователь теплового потока // Пром. теплотехника. – Киев, 2012. – Т. 34, № 6 – С. 86–93.
17. *Патент 102475 UA, МПК G01K 17/08* Перетворювач теплового потоку / Декуша Л. В., Шмаров Є. В., Грищенко Т. Г., Воробйов Л. Й.; заявник Інститут технічної теплофізики НАН України. – Опубл 10.07.2013. – Бюл. № 13. – 2013.
18. *Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Воробьев Л.И.* Многослойные гальванические преобразователи теплового потока // Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 64. – Львів : «Львівська політехніка», 2003. – С. 48–52.
19. *Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г.* Особенности проектирования преобразователей теплового потока для исследования нестационарного теплообмена // Промышленная теплотехника. – Киев, 2008. – Т. 30, № 2. – С. 99–104.
20. *Декуша Л., Воробьев Л., Грищенко Т., Декуша О., Пархоменко Г.* Особенности проектирования малоинерционных ПТП для исследования нестационарного теплообмена // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів, 2008. – Вип. 68 – С. 116–125.
21. *Воробьев Л., Грищенко Т., Декуша Л., Декуша О., Ковтун С., Шмаров Е.* Теплометрические средства контроля тепловой нагрузки на головной обтекатель ракеты-носителя // Метрологія та прилади. – Харків, 2013. – № 2. – С. 22–29.

## 4. АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС МОНІТОРИНГУ

### 4.1. Система збирання, реєстрування та опрацювання акустичних сигналів

Апаратно-програмний комплекс моніторингу є системою збирання, реєстрування та опрацювання діагностичних акустичних сигналів, яка призначена для отримання масивів вихідних даних для моніторингу та формування діагностичних характеристик і параметрів.

Система складається з таких основних блоків (рис. 4.1) – перетворювача, підсилювача, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) та персонального комп'ютера (ПК) зі спеціалізованим програмним забезпеченням, яке реалізовано в блоці опрацювання.

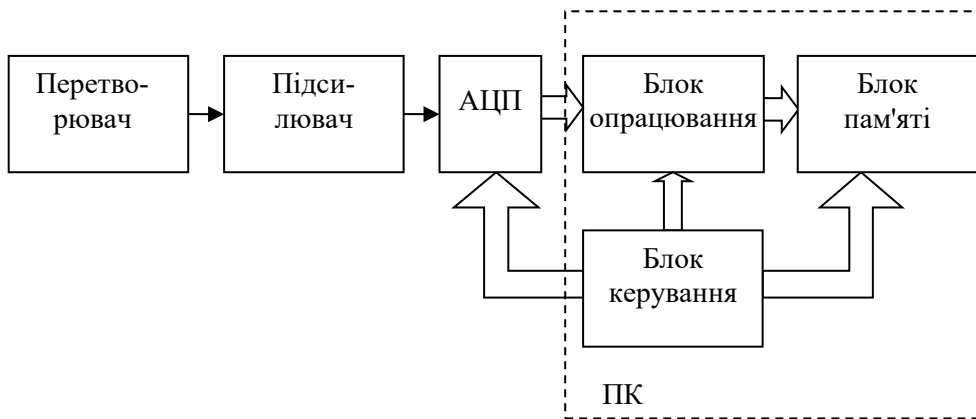


Рис. 4.1. Структурна схема системи збирання, реєстрування та опрацювання акустичних сигналів

Перетворювач та касадно увімкнений з ним попередній підсилювач здійснює перетворення досліджуваного фізичного процесу в електричний сигнал. За необхідності після попереднього підсилювача в схему додатково можуть бути включені нормуючий підсилювач і фільтр. АЦП здійснює формування цифрових масивів вихідних даних для моніторингу та забезпечує їх реєстрацію на жорсткому диску комп'ютера.

Блок пам'яті в ПК призначений для збереження за певний період реалізацій зареєстрованих діагностичних сигналів, результатів вимірювань діагностичних характеристик і параметрів та ін. Блок опрацювання на основі статистичних методів та алгоритмів цифрової обробки сигналів здійснює перетворення масиву вихідних даних в масив діагностичних параметрів, пов'язаних із станом об'єктів моніторингу.

Система працює наступним чином. Збирання сигналів здійснюється встановленим на об'єкт дослідження перетворювачем, за допомогою якого первинний акустичний сигнал перетворюється в електричний сигнал, який підсилюється попереднім підсилювачем, призначеним для первинного підсилення та узгодження перетворювача з подальшою частиною схеми. Далі сигнал надходить на нормуючий підсилювач, який забезпечує необхідний динамічний діапазон системи. Підсилений сигнал подається на фільтр, де формується необхідний частотний діапазон сигналу. З виходу фільтра сигнал надходить на АЦП, який перетворює його в цифрову форму, і далі передається на персональний комп'ютер.

Цифрований сигнал зберігається в блоці пам'яті комп'ютера. Реєстрація та опрацювання сигналів здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Система збирання, реєстрування та опрацювання акустичних сигналів реалізована у вигляді мобільної системи (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Мобільна система збирання, реєстрування та опрацювання акустичних сигналів

**Апаратна частина системи.** Дамо загальну характеристику основних приладів системи.

Як *перетворювачі* використовуються п'єзоелектричні вібровимірювальні перетворювачі (акселерометри) ДН-3-М1 (рис. 4.3, а), ДН-4-

M1 (рис. 4.3, б) виробництва ТОВ «Виброприбор» та KD 35 і KD 39 (рис. 4.3, в) виробництва RFT.

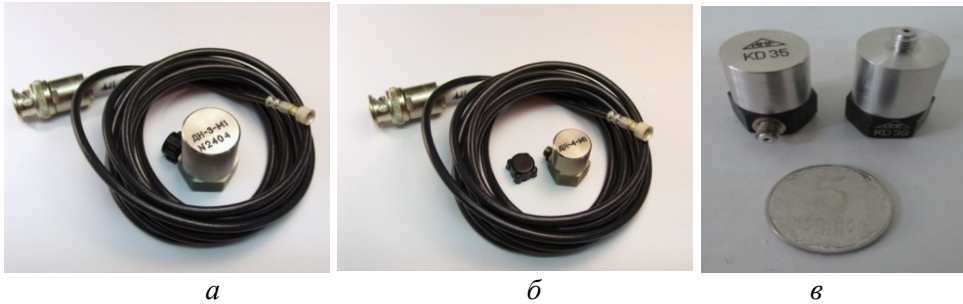


Рис. 4.3. П'єзоелектричні вібровимірювальні перетворювачі

*Попередній підсилювач* призначений для підсилення електричного сигналу з виходу акселерометрів і є триканальним підсилювачем заряду, схема якого наведена на рис. 4.4, а зовнішній вигляд - на рис. 4.5.

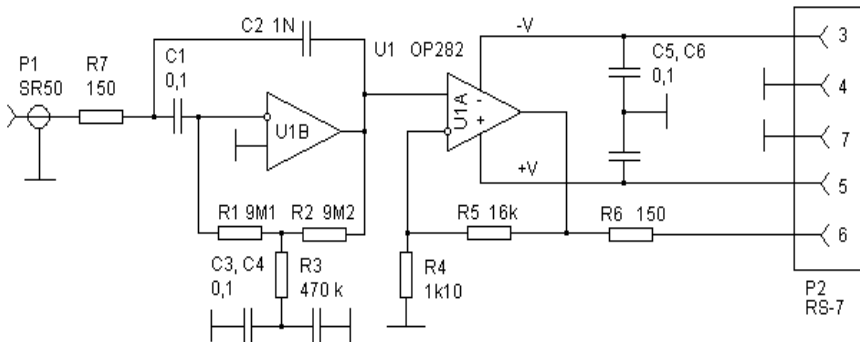


Рис. 4.4. Принципова схема підсилювача заряду

Як *підсилювач і фільтр* використано селективний підсилювач РУ2-11 (рис. 4.6) призначений для дослідження, налаштування та випробування систем і приладів, що використовуються у вимірювальній техніці, зв'язку, автоматичі, приладобудуванні та ін.

Як *АЦП* використано зовнішній модуль вводу-виходу сигналів ADA-1406 (рис. 4.7) виробництва фірми «ООО «ХОЛИТ Дэйта Системс», який забезпечує ввід, вивід та обробку ана-



Рис. 4.5. Зовнішній вигляд триканального підсилювача заряду

логової і цифрової інформації та є закінченою системою з власним



Рис. 4.6. Зовнішній вигляд підсилювача селективного РУ2-11

процесором. Модуль ADA-1406 підключається до комп'ютера через USB кабель та керується відповідним програмним забезпеченням, встановленим на комп'ютері.

**Програмне забезпечення системи.** До складу програмного забезпечення входять наступні основні блоки:

- вхідних даних;
- статистичної обробки;
- побудови вирішальних правил;
- результатів обчислень;
- керування.

*Блок вхідних даних* складається з двох незалежних блоків – блоку моделювання та блоку зчитування зовнішніх даних. Блок моделювання призначено для формування сигналу під час

виконання програми, блок зчитування зовнішніх даних призначено для сервісної роботи з файлами даних.

Базовим вузлом для збору й обробки є блок зчитування зовнішніх даних, як таке обране програмне забезпечення «Power Graph», що встановлюється на GR. Дане програмне забезпечення є сучасним інструментом реєстрації, візуалізації, обробки й аналізу даних.

Призначення програмного забезпечення «Power Graph»:

- збирання даних з різних вимірювальних пристроїв і приладів;
- реєстрація, візуалізація й обробка сигналів у режимі реального часу;
- редагування, математична обробка й аналіз даних;
- зберігання, імпорт і експорт даних.

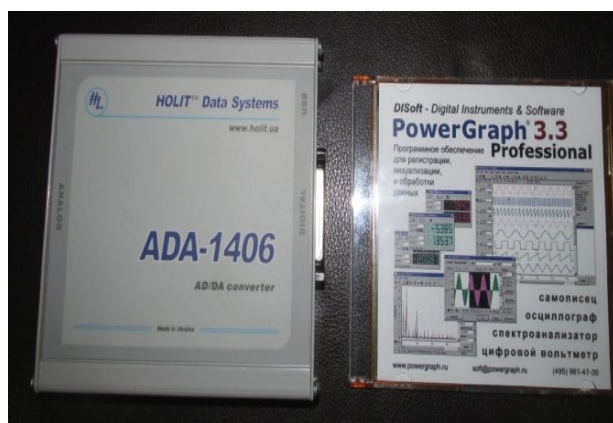


Рис. 4.7. Зовнішній вигляд модуля ADA-1406

Блок статистичного опрацювання є основним і виконує розрахунок оцінок імовірнісних характеристик досліджуваних сигналів. У блоці побудови вирішальних правил проводиться аналіз отриманих діагностичних характеристик, на основі яких обираються найбільш чутливі й приймається рішення про стан об'єкта моніторингу. Блок результатів обчислень зберігає всі отримані ймовірнісні характеристики сигналів.

Блок візуалізації призначено для виводу на екран комп'ютера числових характеристик і побудови графіків розрахованих функцій. Блок керування призначено для вводу параметрів, необхідних для роботи кожного з розглянутих вище блоків.

Загальна методика реєстрації сигналів:

1. Зібрати схему (див. рис. 4.1) та ввімкнути прилади системи.
2. Запустити на комп'ютері програму Power Graph для роботи з АЦП і вибрати АЦП, що використовується (ADA-1406). Головне вікно програми зображене на рис. 4.8, а вікно панелі параметрів вводу кожного каналу на рис. 4.9.

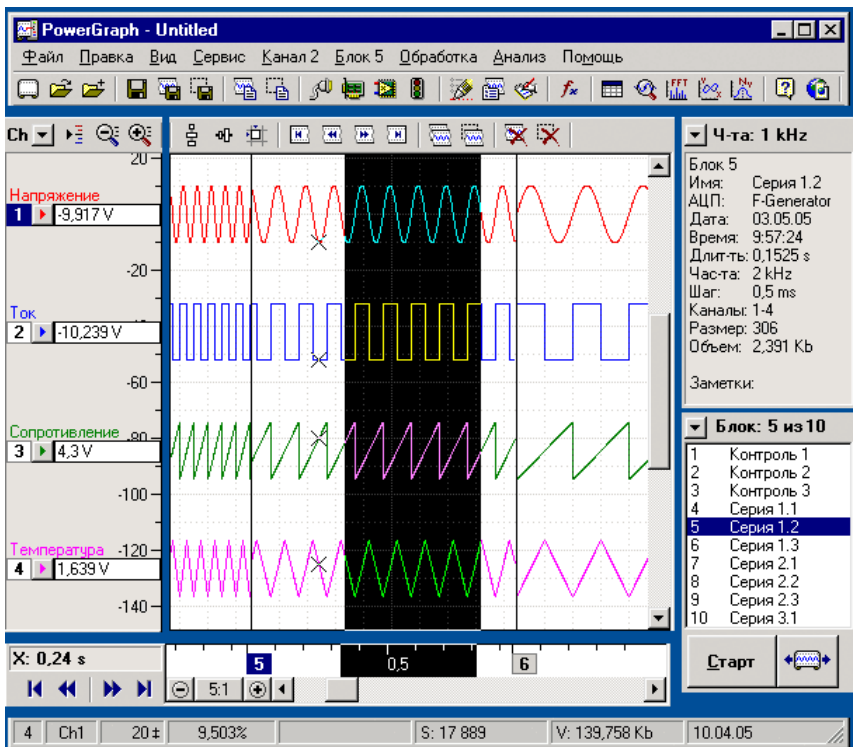


Рис. 4.8. Головне вікно програми PowerGraph



## 3. Виконати апаратне налаштування каналів:

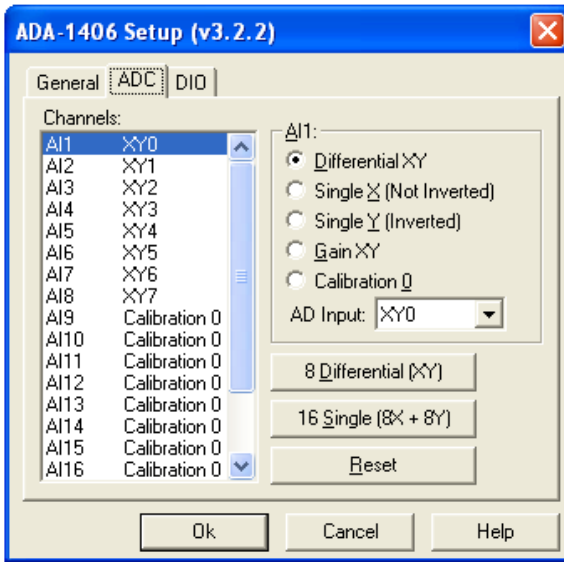


Рис. 4.9. Вікно настроювання каналів

рив, наприклад:

- меню Сервіс/Синхро-нізація встановити в параметрах Стоп Тригер, час реєстрації 10 с;
- меню Сервіс/Частота реєстрації: 200 кГц;

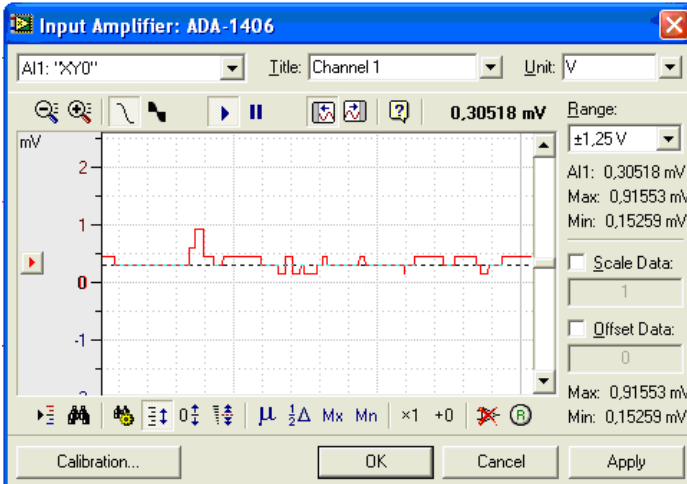


Рис. 4.10. Вікно Вхідний підсилювач

меню Файл/Зберегти блок, вказати тип RawData (\*.dat), поставити маркер .par (L-Card) і ввести ім'я файлу.

136

–у меню Сервіс/налаштування АЦП на вкладці ADC обрати режим підключення – 8 диференціальних каналів;

–індивідуально для кожного використовуваного каналу налаштувати параметри за допомогою вікна Вхідний Підсилювач (рис. 4.10); обов'язковим є вибір відповідного діапазону вимірювання значень вхідного сигналу, наприклад  $\pm 10$  В.

4. Встановити параметри запису, використовуючи панель вводу парамет-

–меню Сервіс/Канали й Графіки в підменю Кількість графіків: 2 канали.

5. Запис (введення) сигналів здійснюється після натискання кнопки Старт у правій нижній частині головного вікна програми.

6. Зберегти дані, вибравши в

Розглянемо алгоритм роботи блоку статистичного опрацювання акустичних сигналів (рис. 4.11).

Вхідні дані, зчитані з файлу, піддаються первинній обробці, яка полягає в обчисленні математичного сподівання, дисперсії і тестуванні досліджуваного сигналу на стаціонарність.

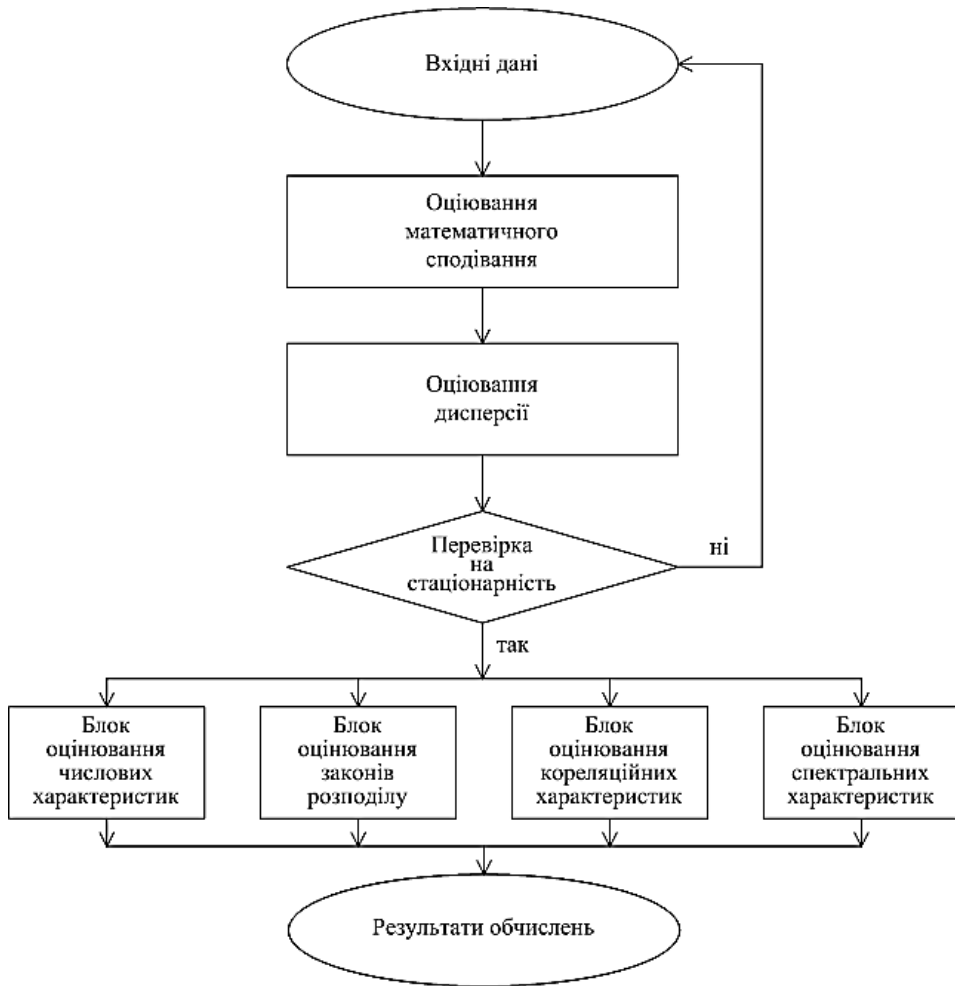


Рис. 4.11. Схема алгоритму блоку статистичного опрацювання

Якщо сигнал нестационарний, тоді набір вхідних даних необхідно розширити додатковими реалізаціями та проводити обробку усередненням вимірюваних характеристик за ансамблем реалізацій. Блок первинної обробки в залежності від вирішуваної задачі може бути відсутнім.

Далі здійснюється статистичне оціювання діагностичних параметрів.

трів та характеристик акустичних сигналів:

- оцінювання числових характеристик;
- оцінювання законів розподілу;
- оцінювання кореляційних характеристик;
- оцінювання спектральних характеристик.

Блок оцінювання числових характеристик здійснює оцінювання початкових та центральних моментів, кумулянтів та кумулянтних коефіцієнтів до шостого порядку включно.

Блок оцінювання законів розподілу здійснює побудову гістограми, оцінки щільності імовірностей з використанням суміші розподілів і відрізків ортогональних рядів. Блок оцінювання кореляційних характеристик здійснює оцінки кореляційної та взаємної кореляційної функції. Блок оцінювання спектральних характеристик здійснює оцінки амплітудних спектрів та спектральних щільностей. В блоці результатів обчислень визначаються діагностичні параметри і характеристики, які є найбільш чутливими до різних станів об'єкту діагностування.

Розглянуті блоки програмного забезпечення об'єднані в єдину програму. Для зручності роботи з програмою розроблено графічний інтерфейс користувача, який являє собою вікно з елементами керування, осями та текстовими полями для виводу результатів, створене в середовищі розробки додатків GUIDE пакету MatLab [1].

Порядок роботи з розробленим інтерфейсом користувача наступний:

- заповнюються всі вільні поля числовими параметрами, що визначають роботу програми – значення параметрів сигналів та діапазони графіків, що будуються;
- обираються види запропонованих альтернатив з меню, що випадає;
- після натискання кнопки керування здійснюється запуск програми, в результаті чого відбувається візуалізація розрахованих характеристик.

На рис. 4.12 наведено графічний інтерфейс користувача, який призначено для розв'язку задач моделювання та обробки телеграфного сигналу на основі алгоритму.

Наведемо методику роботи з даним програмним забезпеченням:

1. Запустити пакет MatLab, в якому запустити додаток GUIDE вводом в командному рядку команди `guide`.
2. Відкрити файли з розширеннями `*.fig` та `*.m`, відповідно до задачі, що вирішується. Запустити файл з розширенням `*.fig`.
3. Ввести значення інтенсивності процесу в полі «Інтенсивність»,

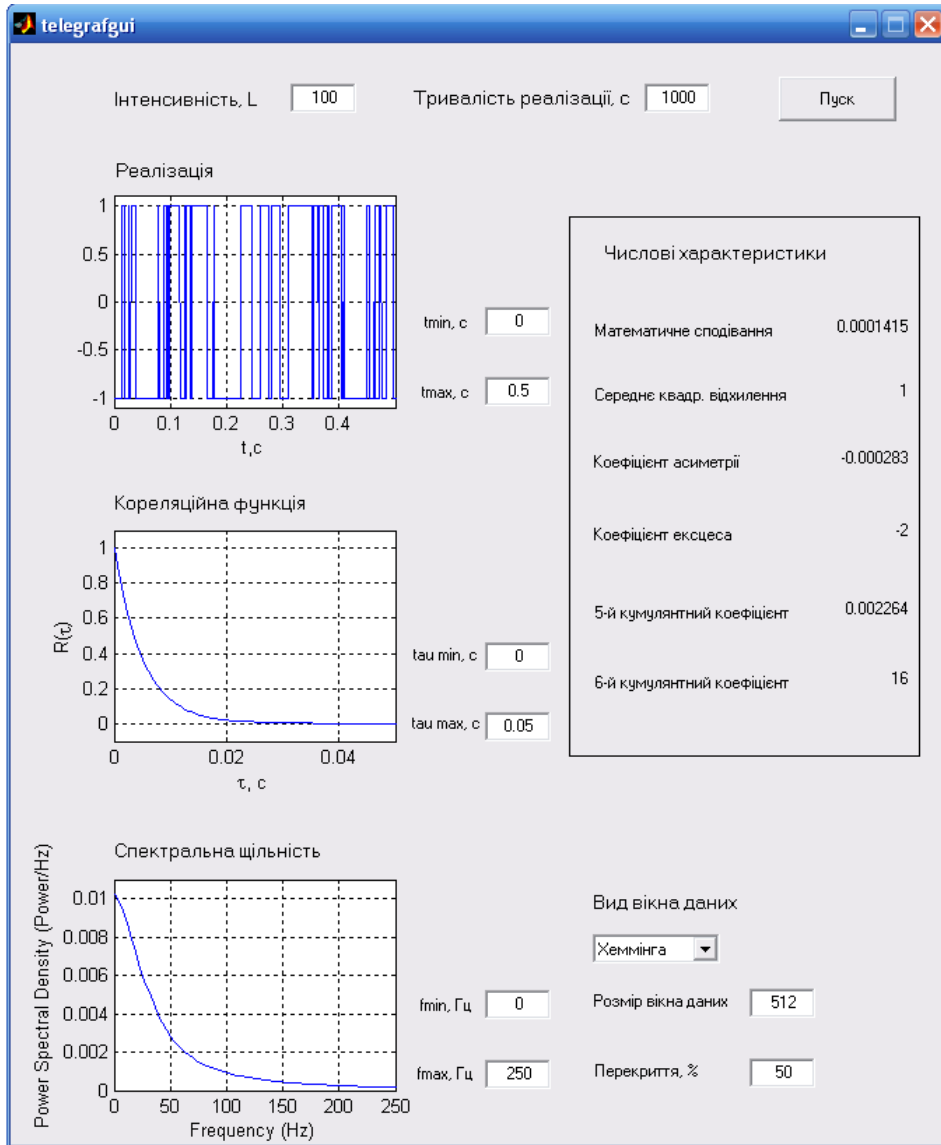


Рис. 4.12. Графічний інтерфейс користувача після виконання програми

L» та тривалість реалізації в полі «Тривалість реалізації, с».

4. Ввести початкове та кінцеве значення моментів часу для відображення відрізка реалізації в поля « $t_{min}, c$ » та « $t_{max}, c$ » відповідно.
5. Ввести початкове та кінцеве значення аргументів зсуву за часом для відображення фрагменту оцінки кореляційної функції в по-

- ля «tau min, с» та «tau max, с» відповідно.
6. Ввести початкове та кінцеве значення частот для відображення фрагменту оцінки спектральної щільності в поля «fmin, Гц» і «fmax, Гц» відповідно.
  7. Обрати в меню «Вид вікна даних» одне із значень «рівномірне», «Бартлетта» або «Хеммінга».
  8. Ввести значення розміру вікна даних і перекриття сусідніх сегментів при оцінюванні спектральної щільності в поля «Розмір вікна даних» і «Перекриття, %» відповідно.
  9. Натиснути кнопку «Пуск».

В результаті виконання програми з'явиться вікно (див. рис. 4.12), у відповідних вікнах якого з'являться графіки реалізації, фрагменти оцінок кореляційної функції та спектральної щільності, а також значення числових характеристик.

В основу блоку Побудова вирішальних правил покладений алгоритм перевірки статистичних гіпотез. На підставі отриманих діагностичних характеристик (значення числових характеристик, вид закону розподілу, значення й розташування спектральних характеристик, характер кореляційної функції й ін.), вибираються найбільш чутливі до різних станів об'єкта діагностування. На основі аналізу обраних характеристик приймається рішення відносно стану досліджуваного об'єкту.

**Динамічний діапазон мобільної системи.** Для розрахунку динамічного діапазону здійснено дослідження власних шумів мобільної системи, для чого замість акселерометра використано його еквівалент ємністю  $C=1$  нФ, схема якого наведена на рис. 4.13. Якщо на вхід такої схеми подати напругу  $U$ , то на виході утвориться електричний заряд величиною  $q = CU$ , тобто отримаємо джерело заряду.

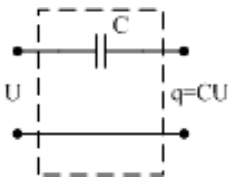


Рис. 4.13. Еквівалентна схема акселерометра

Дослідження власних шумів проводилися за наступною методикою:

1. Підключити еквівалент акселерометра до мобільної системи (див. рис. 4.1). Закоротити вхід еквівалента акселерометра.
2. Ввімкнути в мережу підсилювач заряду, фільтр, АЦП і комп'ютер.
3. Запустити на комп'ютері програму «PowerGraph» для роботи з АЦП.
4. Встановити параметри запису, використовуючи панель вводу параметрів (див. п. 4 загальної методики реєстрації сигналів).
5. Здійснити запис власних шумів, натиснувши кнопку «Старт».

6. Повторити пп. 4, 5 для діапазонів вхідних сигналів  $\pm 2,5$  В і  $\pm 5$ В.

7. Отримати за допомогою програмного пакета «PowerGraph», або будь-якого іншого (наприклад, MatLab), оцінки числових характеристик: математичного сподівання  $m$ , середнього квадратичного відхилення  $\sigma$ , коефіцієнта асиметрії  $\gamma_3$ , коефіцієнта ексцесу  $\gamma_4$ .

В табл. 4.1 наведені результати досліджень власних шумів системи для різних діапазонів вхідних напруг АЦП. Об'єм вибірки при цьому склав  $2 \cdot 10^6$  відліків.

МЗР – молодший значимий розряд (крок квантування) – знаходиться за формулою

Таблиця 4.1. Числові характеристики власних шумів мобільної системи

Параметр	Діапазон вхідних напруг, В			
	$\pm 1,25$	$\pm 2,5$	$\pm 5$	$\pm 10$
$m$ , МЗР	1,4220	1,5263	1,5848	1,6144
$\sigma$ , МЗР	0,6377	0,5912	0,5673	0,5584

$$\delta u = 2U_{\max} / 2^n,$$

де  $U_{\max}$  – діапазон вхідних напруг АЦП (максимальна амплітуда вхідної напруги),  $n$  – кількість розрядів АЦП.

Розрахуємо динамічний діапазон системи за формулою:

$$D = 20 \lg(U_{\max}^* / U_{\min}^*),$$

де величина  $U_{\min}^*$  визначається власними шумами мобільної системи, а  $U_{\max}^*$  – його нелінійними спотвореннями.

Розглянемо два вхідних сигнали – гармонічний з постійною амплітудою і шумовий (гауссовий). Задамо  $U_{\min}^* = 2\sigma$ ,  $U_{\max}^* = (U_{\max} - |m|) / \sqrt{2}$  – для гармонічного сигналу та  $U_{\max}^* = (U_{\max} - |m|) / 4$  – для шумового сигналу.

В табл. 4.2 наведено розраховані з використанням табл. 4.1 значення динамічного діапазону мобільної системи для різних діапазонів вхідних напруг АЦП.

З табл. 4.2 видно, що динамічний діапазон мобільної системи для шумових сигналів на 9 дБ менший за динамічний діапазон для гармонічних сигналів.

Таблиця 4.2. Динамічний діапазон мобільної системи

Вигляд сигналу	Діапазон вхідних напруг, В			
	$\pm 1,25$	$\pm 2,5$	$\pm 5$	$\pm 10$
гармонічний	62,51 дБ	67,66 дБ	71,77 дБ	74,03 дБ
гауссівський	53,51 дБ	58,66 дБ	62,77 дБ	65,03 дБ

Коефіцієнт підсилення напруги підсилювача заряду тракту вводу склав 24 дБ, який визначено виходячи з формули

$$K_{дБ} = 20 \lg(U_{вих}/U_{вх}),$$

де  $U_{вих}$ ,  $U_{вх}$  – ефективні значення вихідної та вхідної напруги відповідно.

Похибка квантування визначається [2] молодшим значимим розрядом  $\delta u$ . За рівномірного квантування середнє квадратичне відхилення похибки квантування становить  $\sigma = \delta u / (2\sqrt{3}) \approx 22,1$  мкВ. Погіршення сигналу через квантування обмежене половиною величини кроку квантування  $\pm \delta u / 2$  В, і в даному випадку для 14-тирозрядного АЦП при діапазоні вхідних напруг  $\pm 10$  В наближено дорівнює  $\pm 75,6$  мкВ.

## 4.2. Акустичні сенсори для шумової та вібродіагностики

Системи функціональної діагностики, що базуються на застосуванні шумових та ритмічних сигналів, широко використовуються для визначення технічного стану теплотехнічного обладнання [3]. На сьогоднішній день найбільш розповсюдженими системами діагностування, що використовують шумові сигнали, є акустико-емісійні системи, а системами, що використовують ритмічні сигнали – вібродіагностичні системи. Ці системи відносяться до пасивних акустичних систем діагностування; як чутливий елемент в них найчастіше використовуються п'єзоелектричні перетворювачі. Основним елементом вимірювальних кіл п'єзоперетворювачів є попередні підсилювачі. Їх головним завданням є перетворення великого вхідного опору цих перетворювачів у більш низький опір, який допускає безпосередній зв'язок з відносно низькоомною вимірювальною, аналізуючою та реєструючою апаратурою.

Попередні підсилювачі утворюють дві групи [4, 5]:

1) підсилювачі заряду, вихідна напруга яких пропорційна заряду, що надходить на їх вхід (не підсилюють електричний заряд). Їх основ-

ною перевагою є те, що вони виключають вплив довжини з'єднувальних кабелів на загальну чутливість і, відповідно, допускають застосування з'єднувальних кабелів практично будь-якої довжини;

2) підсилювачі напруги, вихідна напруга яких прямо пропорційна напрузі, що надходить на їх вхід. Підсилювачі напруги відрізняються простотою схеми. Зміна довжини з'єднувального кабеля в системі з підсилювачем напруги викликає необхідність підстроювання коефіцієнта підсилення використовуваної апаратури та повторного калібрування системи.

Розглянемо детальніше основні параметри та характеристики акустичних сенсорів в пасивних акустичних системах діагностування: перетворювачів акустичної емісії у акустико-емісійних системах та віброперетворювачів у вібродіагностичних системах.

**Перетворювачі акустичної емісії.** Перетворювач акустичної емісії (ПАЕ) перетворює акустичний сигнал акустико-емісійного процесу в електричний сигнал, параметри якого використовуються для оцінки джерел АЕ. Конструкція типового ПАЕ [4, 6] зображена на рис. 4.14.

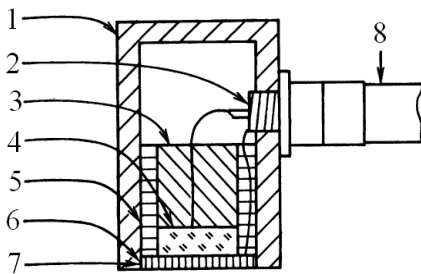


Рис. 4.14. Конструкція ПАЕ:

- 1 – корпус, 2 – електричний роз'єм,
- 3 – демпфер, 4 – п'єзоелемент,
- 5 – конструктивний елемент (циліндр), 6 – шар клею, 7 – захисна пластина, 8 – кабель

ПАЕ за конструкцією нагадує прямий перетворювач для ультразвукового контролю. Основним елементом є перетворювач акустичного сигналу в електричний, для чого використовується п'єзо-електричний перетворювач у вигляді пластини, циліндра, конуса та ін. Застосовуються також [4] магнітострикційні, ємнісні, оптичні перетворювачі.

Основними параметрами ПАЕ є:

- імпульсна характеристика – електричний відгук ПАЕ на дію одиничного акустичного імпульсу (дельта-імпульс);
- коефіцієнт перетворення ПАЕ – відношення максимального значення імпульсної характеристики на робочій частоті перетворювача до амплітуди акустичного сигналу (зміщення частинок поверхні стандартного блоку або контрольованого об'єкта), що надходить на перетворювач; вимірюється у В/м;
- число викидів імпульсної характеристики додатної полярності, що перевищують рівень 0,1 від максимуму імпульсної характеристики;
- період власних коливань імпульсної характеристики;



- тривалість імпульсної характеристики;
- енергія імпульсної характеристики.

Існує наступна класифікація ПАЕ:

а) за коефіцієнтом перетворення:

–ПАЕ першого класу – перетворювачі, що мають чутливість менше  $50 \cdot 10^6$  В/м;

–ПАЕ другого класу – перетворювачі, що мають чутливість у діапазоні  $(50 \dots 100) \cdot 10^6$  В/м;

–ПАЕ третього класу – перетворювачі, що мають чутливість у діапазоні  $(100 \dots 200) \cdot 10^6$  В/м;

–ПАЕ четвертого класу – перетворювачі, що мають чутливість, яка перевищує  $200 \cdot 10^6$  В/м;

б) за частотним діапазоном:

–низькочастотні – робоча частота до 50 кГц;

–стандартні промислові – 50...200 кГц;

–спеціальні промислові – 200...500 кГц;

–високочастотні – робоча частота понад 500 кГц;

в) за смугою пропускання частот:

–резонансні перетворювачі – смуга пропускання  $0,2F_p$ , де  $F_p$  – робоча частота ПАЕ;

–смугові перетворювачі – смуга пропускання  $(0,2 \dots 0,8)F_p$ ;

–широкосмугові перетворювачі – смуга пропускання більш  $0,8F_p$ .

Для смугових і широкосмугових перетворювачів робоча частота співвідноситься з верхньою  $F_g$  та нижньою  $F_n$  частотами смуги пропускання за допомогою виразу:

$$F_p = \sqrt{F_g F_n}$$

і є середньгеометричною частотою ПАЕ.

Розглянемо параметри перетворювачів акустичної емісії найпоширеніших на ринках країн СНД виробників: Vallen Systeme GmbH (Німеччина) [7], ТОВ «ГлобалТест» (м. Саров, Росія) [8], ЗАТ «НПФ «Діатон» (Москва, Росія) [9].

У табл. 4.3 наведено параметри типових ПАЕ виробництва Vallen Systeme GmbH [7], що мають наступні особливості: VS150-М (резонанс при 150 кГц), VS900-М (численні піки), VS25-Р (плоска характеристика від 50 до 270 кГц), VS650-Р (резонанс при 650 кГц), VS30-V (плоска характеристика), VS1000-Н (плоска характеристика від 30 до 270 кГц), АЕ2045S (дуже плоска характеристика).

Таблиця 4.3. Параметри типових ПАЕ виробництва Vallen Systeme GmbH

Модель ПАЕ	Діапазон частот, кГц	Діапазон температур, °С	Ємність, пФ
VS150-M	100...450	-50...+100	350
VS900-M	100...900	-50...+100	540
VS25-P	20...500	-50...+100	100
VS650-P	300...850	-50...+100	85
VS30-V	23...80	-50...+85	140
VS1000-H	10...400	-20...+100	50
AE2045S	200...2500	-20...+80	140

На рис. 4.15 наведено зовнішній вигляд ПАЕ виробництва Vallen Systeme GmbH.



Рис. 4.15. ПАЕ виробництва Vallen Systeme GmbH:  
а – VS150-M, б – VS900-M, в – VS30-V

У табл. 4.4 наведено параметри ПАЕ виробництва ТОВ «Глобалтест» [8] без вбудованих підсилювачів. У випадку застосування вбудованих підсилювачів відповідні перетворювачі мають коефіцієнт електроакустичного перетворення більше на 25 дБ.

Таблиця 4.4. Параметри ПАЕ виробництва ТОВ «ГлобалТест» без вбудованих підсилювачів

Модель ПАЕ	Коефіцієнт електроакустичного перетворення відносно 1 В/(м/с)	Робоча частота, кГц	Смуга пропускання, кГц	Електрична ємність, пФ	Температурний діапазон, °С	Маса, г
GT200	>60	165	130...200	400...500	-40...+150	15
GT205	>70	50	40...100	400...500	-40...+150	45
GT300	>50	280	100..800	400...500	-40...+150	15
GT301	>55	220	50...500	50...500	-40...+120	14

На рис. 4.16 наведено зовнішній вигляд ПАЕ виробництва ТОВ «ГлобалТест».



Рис. 4.16. ПАЕ виробництва ТОВ «ГлобалТест»: а – GT205, б – GT300, в – GT301

У табл. 4.5 наведено параметри ПАЕ виробництва ЗАТ «НПФ «Диатон» [9] з вбудованими підсилювачами, які використовуються для діагностування технологічних та магістральних трубопроводів, днищ резервуарів, кранів, мостів, котлів, реакторів та ін. Температурний діапазон всіх ПАЕ складає від  $-25$  до  $+70$  °С.

Таблиця 4.5. Параметри ПАЕ виробництва ЗАТ «НПФ «Диатон» з вбудованими підсилювачами

Модель ПАЕ	Номинальна резонансна частота, кГц	Діапазон робочих частот, кГц	Маса, г
ДР3И	30	15...60	120
ДР6И	60	30...120	100
ДР15И	150	75...300	90

На рис. 4.17 наведено зовнішній вигляд ПАЕ виробництва ЗАТ «НПФ «Диатон».



Рис. 4.17. ПАЕ виробництва ЗАТ «НПФ «Диатон»: а – ДР6И, б – ДР15И

Як впливає з даних табл. 4.3–4.5 ПАЕ мають частотні діапазони від десятків до сотень кілогерц, робочі температури лежать від -120 до +150 °С, електричні ємності становлять величини порядку десятків–сотень пікофарад.

**Віброперетворювачі.** Вібровимірювальний перетворювач (віброперетворювач) – вимірювальний перетворювач, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації про значення вимірюваних параметрів вібрації. Основними параметрами вібрації є переміщення, швидкість, прискорення.

Основними параметрами віброперетворювачів є:

–діапазон вимірювання – область значень вимірюваного параметра вібрації, для якої нормовані допустимі похибки віброперетворювача;

–коефіцієнт перетворення – відношення зміни сигналу на виході віброперетворювача до викликаної їй зміни параметра вібрації на вході; для п'єзоперетворювачів цей параметр називають чутливістю (по заряду чи по напрузі);

–нерівномірність амплітудно-частотної характеристики в смузі частот віброперетворювача; визначає робочий діапазон частот віброперетворювача. Для п'єзоперетворювачів додатковими характеристиками, що визначають нерівномірність амплітудно-частотної характеристики, є частота установочного резонансу, ємність і опір ізоляції;

–відносний коефіцієнт поперечного перетворення – відношення коефіцієнта поперечного перетворення до коефіцієнта перетворення віброперетворювача;

–нелінійність амплітудної характеристики в робочому діапазоні параметра вібрації;

–коефіцієнт впливу деформації основи віброперетворювача та ін.

Віброперетворювачі поділяють на [10, 11]:

–перетворювачі відносної вібрації, які використовують кінематичний метод вимірювання вібрації. Він полягає в тому, що вимірюються параметри вібрації відносно обраної нерухомої системи координат. Основні типи віброперетворювачів відносної вібрації – магнітні, електромагнітні, оптичні;

–перетворювачі абсолютної вібрації (датчики інерційного типу), які використовують динамічний метод вимірювання вібрації. Він полягає в тому, що вимірюються параметри вібрації відносно штучної нерухомої системи координат.

Віброперетворювачі абсолютної вібрації діляться на два класи:

а) генераторні, що перетворюють енергію механічних коливань в електричну. До них відносяться п'єзоелектричні, електродинамічні

(індукційні) перетворювачі;

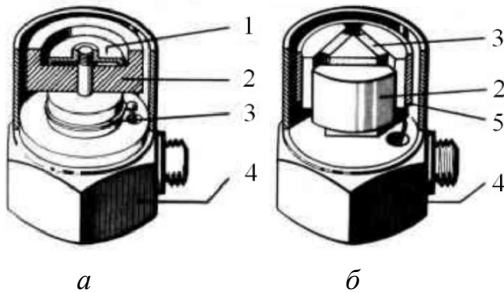
б) параметричні, що перетворюють механічні коливання у зміну параметрів електричних кіл. До них відносяться вихрострумові, ємнісні, резистивні, індуктивні та ін. перетворювачі.

Для вимірювання вібропереміщення частіше використовуються вихрострумові віброперетворювачі – проксиметри, для вимірювання віброшвидкості частіше використовуються ємнісні перетворювачі – велосиметри, однак найбільше поширення [4, 5, 10, 11] мають акселерометри – п'єзоелектричні перетворювачі, електричний сигнал на виході яких пропорційний прискоренню діючих на нього механічних коливань. Перевагами акселерометрів є широкий частотний діапазон (зазвичай до 20 кГц), лінійна амплітудна характеристика в широкому динамічному діапазоні, можливість отримання віброшвидкості та вібропереміщення виконанням операції інтегрування, висока надійність, довговічність, вібро- та удароміцність, відсутність джерела живлення, малі габарити та ін.

Виходячи з існуючого асортименту п'єзоелектричних акселерометрів [11–15] можна провести їх класифікацію за наступними ознаками:

1) за конструкцією:

– однокомпонентні (рис. 4.18 а), що складаються з одного п'єзоелемента, що працює під дією сили стискання;



– багатокомпонентні (частіше трикомпонентні – рис. 4.18 б), що складаються з п'єзоелементів, що працюють під дією зрізаючої (зсувної) сили. В окремих випадках такі акселерометри;

Рис. 4.18. Конструкції віброперетворювачів:

а – однокомпонентного,

б – трикомпонентного, де: 1 – пружина,

2 – сейсмічна маса, 3 – п'єзоелемент,

4 – основа, 5 – стяжне кільце

– перетворюють вібрацію вздовж трьох взаємно перпендикулярних напрямків і називаються триосьовими;

2) за призначенням:

– загального призначення

(універсальні) – для роботи в складі портативних систем і для лабораторних досліджень;

– промислові – для роботи в складних умовах з підвищеною вологістю, забрудненням, вибухонебезпечністю;

– еталонні – для перевірки віброперетворювачів методом порівняння;

- ударні – для вимірювання ударних прискорень;
- 3) за особливостями експлуатації:
  - мініатюрні – для вимірювання вібрації мініатюрних об’єктів;
  - високочутливі – мають підвищену чутливість;
  - підводні – для роботи в умовах підвищеної вологості або під водою.

Існує широкий асортимент акселерометрів, що відрізняються чутливістю, розмірами, способом кріплення, умовами роботи. Розглянемо параметри акселерометрів найпоширеніших на ринках країн СНД виробників: Brüel & Kjær (Данія) [13], PCB Piezoelectronics Inc. (США) [14], ТОВ «ГлобалТест» (м. Саров, Росія) [15], ЗАТ «Вибро-прибор» (м. Санкт-Петербург, Росія) [16], ТОВ «Виброприбор» (м. Таганрог, Росія) [17] та ін.

Акселерометри фірми Брюль і К’єр [13] розділяються на дві великі групи:

– п’єзоелектричні зарядові акселерометри, що мають високоомний вихід;

– акселерометри типу CCLD (п’єзоелектричні зарядові акселерометри із вбудованими підсилювачами, які мають низькоомний вихід).

Акселерометри кожної із цих груп підрозділяються [13] на три наступні види:

– одноосьові акселерометри;

– триосьові акселерометри;

– промислові акселерометри.

Приведемо діапазони параметрів трьох видів віброперетворювачів із зарядовим виходом (табл. 4.6).

Таблиця 4.6. Діапазони параметрів акселерометрів Brüel & Kjær із зарядовим виходом

Вид акселерометра	Чутливість по заряду, пКл/(м/с <sup>2</sup> )	Частотний діапазон (нерівномірність АЧХ ±10%), Гц	Частота резонансу, кГц	Амплітудний діапазон (пікове значення), g	Робочий діапазон температур, °С	Маса, г
Одноосьові	0,004...38	0,1...54000	10...180	1000...5000	-74...+250	1...176
Триосьові	0,3...1	0,1...16000	24...48	500...3000	-74...+250	6...55
Промислові	1...10	0,1...12800	28...40	1000...2000	-196...+482	16...60

У табл. 4.7 наведено параметри типових акселерометрів Brüel & Kjær із зарядовим виходом: одноосьових – 4371, 4374, 4393, триосьових –

вого 4321, промислового 4391.

Таблиця 4.7. Параметри типових акселерометрів Brüel & Kjær

Модель акселерометра	Чутливість по заряду, пКл/(м/с <sup>2</sup> )	Частотний діапазон (нерівномірність АЧХ ±10%), Гц	Частота резонансу, кГц	Амплітудний діапазон (пікове значення), г	Робочий діапазон температур, °С	Маса, г
4371	1	0,1...12600	42	3000	-55...+250	11
4374	0,15	1...26000	85	5000	-74...+250	0,75
4393	0,316	0,1...16500	55	5000	-74...+250	2,4
4321	1	0,1...12000	40	500	-74...+250	55
4391	1	0,1...10000	40	2000	-60...+180	16

На рис. 4.19 наведено зовнішній вигляд акселерометрів виробництва Brüel & Kjær.

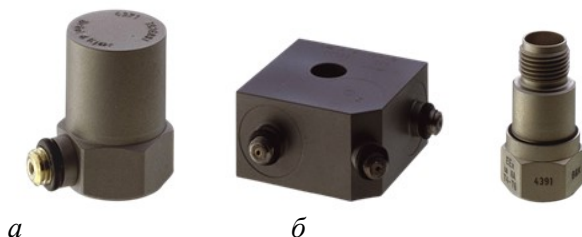


Рис. 4.19. Акселерометри виробництва Брюль і К'єр:  
а – 4371, б – 4321, в – 4391

Серед продукції фірми PCB Piezoelectronics Inc. [14] основне місце займають акселерометри з використанням п'єзоелектричних мікросхем (ICP), які мають низькоомний вихід. Такі датчики мають більш високу ефективність, ніж датчики із зарядовим виходом, однак їх діапазон робочих температур обмежений рамками надійності вбудованих мікросхем (табл. 4.8, рис. 4.20).

Таблиця 4.8. Параметри акселерометрів PCB Piezoelectronics Inc. на основі ICP

Вид акселерометра	Чутливість по g, мВ/g	Чутливість по напрузі, мВ/(м/с <sup>2</sup> )	Частотний діапазон, Гц	Маса, г
Універсальні	5...100	0,51...10,2	0,3...25000	0,2...27
Трикомпонентні	5...100	0,51...10,2	0,7...10000	1...10,5
Низькотемпературні	5...100	0,51...10,2	0,7...10000	1,8...40
Низькочастотні	100...1000	0,1...1	0,07...4000	50...635
Ударні	0,1...1	0,01...0,1	0,4...10000	–



Рис. 4.20. Акселерометри виробництва PCB Piezoelectronics Inc.  
 а – 352С33 (універсальний), б – 356В21 (трикомпонентний), в – 393А03 (низькочастотний)

Для порівняння значень чутливості по напрузі з табл. 4.8 і значень чутливості по заряду з попередніх таблиць необхідно враховувати, що при типовому значенні ємності віброперетворювача 1 нФ чутливість по напрузі 1 мВ/(м/с<sup>2</sup>) відповідає чутливості по заряду 1 пКл/(м/с<sup>2</sup>).

Віброперетворювачі виробництва ТОВ «ГлобалТест» [15] розділяються на дві групи:

а) віброперетворювачі із зарядовим виходом – мають високоомний вихід;

б) віброперетворювачі із вбудованою електронікою, що мають низькоомний вихід.

Приведемо діапазони параметрів найпоширеніших віброперетворювачів із зарядовим виходом (табл. 4.9).

Таблиця 4.9. Діапазони параметрів акселерометрів ТОВ «ГлобалТест» із зарядовим виходом

Вид акселерометра	Чутливість по заряду, пКл/(м/с <sup>2</sup> )	Частотний діапазон (нерівномірність АЧХ ±1 дБ), Гц	Частота установочного резонансу, кГц	Амплітудний діапазон (пікове значення), м/с <sup>2</sup>	Робочий діапазон температур, °С	Маса, г
Мініатюрні	0,025...0,11	5...30000	50...90	60000...300000	-60...+150	0,18...2,6
Мініатюрні трикомпонентні	0,025...0,2	5...25000	50...75	25000...150000	-60...+150	3,1...17
Загального призначення	0,3...8	0,5...20000	20...60	18000...60000	-60...+150	2,9...6,5
Трикомпонентні	0,2...1	0,5...20000	30...55	10000...25000	-60...+150	9...38
Промислові	1...50	2...7000	9...21	5000...10000	-60...+400	95...140
Високочутливі	20...100	0,01...5000	4...15	100...10000	-80...+150	31...165



На рис. 4.21 наведено зовнішній вигляд акселерометрів виробництва ТОВ «ГлобалТест».



Рис. 4.21. Акселерометри виробництва ТОВ «ГлобалТест»: а – AP1037 (загального призначення), б – AP1081 (трикомпонентний), в – AP62B (промисловий)

Для всього асортименту віброперетворювачів ЗАТ «Вибро-прибор» [16] коефіцієнт перетворення лежить у межах 1...25 пКл/(м/с<sup>2</sup>), частотний діапазон лежить у межах 1..15000 Гц при нерівномірності АЧХ  $\pm 5\%$ , частота установочного резонансу лежить у межах 13..45 кГц, максимальне прискорення лежить у межах 200...500 g, діапазон робочих температур лежить у межах -60...+650 °С.

Параметри типових акселерометрів ЗАТ «Виброприбор» наведено в табл. 4.10. На рис. 4.22 наведено зовнішній вигляд акселерометрів виробництва ЗАТ «Вибро-прибор».

Таблиця 4.10. Параметри типових акселерометрів ЗАТ «Вибро-прибор»

Модель акселерометра	Чутливість по заряду, пКл/(м/с <sup>2</sup> )	Частотний діапазон (нерівномірність АЧХ $\pm 5\%$ ), Гц	Частота установочного резонансу, кГц	Робочий діапазон температур, °С	Максимальне прискорення, g
МВ-43-1	1	10...5000	25	-60...+250	300
МВ-43-25	25	10...3000	17	-60...+250	200
МВ-45	5	10...5000	30	-60...+250	300
МВ-46	1	10...5000	40	-60...+250	300
МВ-47	1	10...3000 ( $\pm 7\%$ )	13	-60...+650	500

У табл. 4.11 наведено параметри акселерометрів ДН-3-М1 і ДН-4-М1 виробництва ТОВ «Виброприбор» [17], які відомі своїм застосуванням у шумомірах ВШВ-003-М2, а також подібних їм акселерометрів KD 35 і KD 39 виробництва RFT (Німеччина). Зовнішній вигляд

акселерометрів з табл. 4.11 наведено на рис. 4.22.

Таблиця 4.11. Параметри типових акселерометрів  
ТОВ «Виброприбор» і RFT

Модель акселерометра	Робочий діапазон частот, Гц	Чутливість по напрузі, мВ/(м/с <sup>2</sup> )	Відносний коефіцієнт поперечного перетворення, %	Робочий діапазон температур, °С	Маса, не більше, г
ДН-3-М1	до 4800	10	4	-30...+70	50
ДН-4-М1	до 12600	1	4	-30...+70	13
KD 35	до 10 кГц	5	3,6	–	–
KD 39	до 10 кГц	5	3,6	–	–

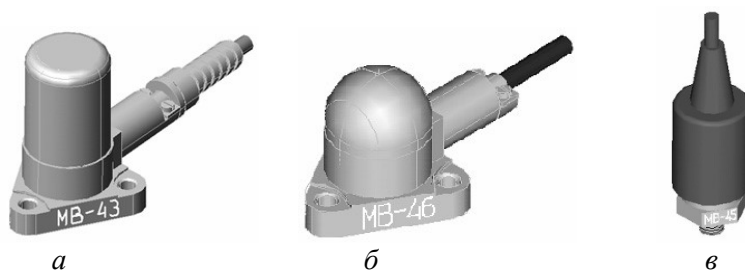


Рис. 4.22. Акселерометри виробництва ЗАТ «Вибро-прибор»:  
а – МВ-43, б – МВ-46, в – МВ-45

За даними табл. 4.6–4.11 можна зробити висновок про те, що частотний діапазон розглянутих сучасних акселерометрів лежить від сотих-десятих часток герц до десятків кілогерц (максимальне значення 54 кГц), чутливість по заряду від тисячних часток до десятків (максимальне значення – 100) пКл/(м/с<sup>2</sup>) для перетворювачів із зарядовим виходом, амплітудний діапазон вимірювання прискорень лежить від сотень до сотень тисяч м/с<sup>2</sup>, робочий діапазон температур лежить від -196 °С (для промислових акселерометрів Брюль і К'єр) до +650 °С (для акселерометра МВ-47, чутливий елемент якого виготовлений з лангату).

### 4.3. Магніострикційні ультразвукові сенсори

На світовому ринку широке розповсюдження здобули магніострикційні сенсори лінійних переміщень на основі магніострикційних ліній затримки. Магніострикційні сенсори положення цілком виправ-

дано посіли чинне місце серед пропонованих на ринку сенсорів положення. Це зумовлено, в першу чергу, їх високою надійністю, стійкістю до вібраційних впливів, а також значним діапазоном перетворень, відносно невисокою вартістю [18-21].

Світовими лідерами розробки і виробництва магнітострикційних сенсорів положення є такі фірми як MTS (США), Balluff (Німеччина), Shlumberger Industries (Франція) та ін. Аналітики цих фірм вказують на понад 1500 областей використання магнітострикційних сенсорів положення. Такі сенсори мають допустиму похибку вимірювання переміщення не більше 1 мм; діапазон робочих температур - від -200 до +200 °С; вимірюване переміщення - від 0 до 6000 мм; високу завадостійкість і мінімальну споживану потужність.

У табл. 4.12 представлені характеристики магнітострикційних сенсорів положення фірм Gefran, Balluff, KSR-Kucbler, MTS Sensors.

Таблиця 4.12. Основні характеристики магнітострикційних сенсорів положення

Характеристики	Balluff	Gefran	KSR-Kucbler	MTS Sensors
Вимірюване переміщення, мм	0...5500	50...4000	200...6000	50...5500
Робоча температура, °С	-40...+85	-30...+90	-45...+125 -200...+200	-200...+125
Похибка вимірювання, мм	< 1	< 1	< 1	0,13...0,8
Напруга живлення, В	до 24	24	10...30	10,5...28

Залежно від використовуваного типу хвильового руху відомі магнітострикційні сенсори положення на об'ємних і поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Магнітострикційні сенсори положення, що використовують ПАХ поки не знайшли широкого застосування, оскільки ПАХ практично не допускають безконтактного збудження та зчитування ультразвукових коливань (затухання близько 80 дБ), тобто не дозволяють побудувати механічно плавно регульовану лінію затримки у великому діапазоні перетворень.

Магнітострикційні сенсори, які генерують та приймають поздовжні, поперечні, торсіонні та інші види ультразвукових хвиль, широко використовуються у системах неруйнівного контролю [18-21]. В основній більшості вони мають значні розміри випромінюючої поверхні.

Для забезпечення малої апертури розроблені ультразвукові сенсори (рис. 4.23), що використовують магнітострикційний ефект і мають

малу площу випромінюючої поверхні  $0,07 \dots 0,8 \text{ мм}^2$  (діаметр хвилеводу  $0,3 \dots 1,0 \text{ мм}$ ). Це дозволяє створити в контрольованому зразку

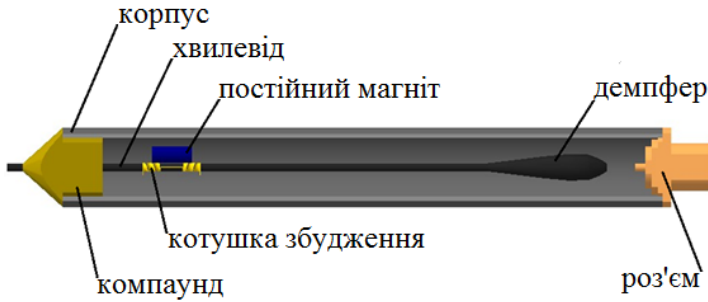


Рис. 4.23. Ультразвуковий малоапертурний магнітострикційний сенсор

напівсферичну (ненаправлену) поздовжню хвилю при зондуючому радіоімпульсному сигналі з частотою заповнення  $0,5 \dots 2,5 \text{ МГц}$  [22].

Основні параметри і характеристики магнітострикційних сенсорів суттєво залежать від конструкції самого сенсора, від точності виготовлення його елементів і частин та від технологічних процесів підготовки матеріалів, з яких виготовляється сенсор [21].

Для малоапертурних сенсорів однією з найбільш важливих задач є необхідність забезпечення максимальної чутливості.

На рис. 4.24 зображена схема стенду, за допомогою якого визначалися основні характеристики і параметри складових елементів магнітострикційних сенсорів (МСС).

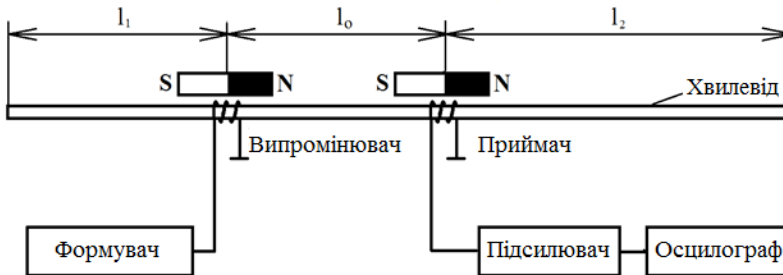


Рис. 4.24. Схема стенду для визначення основних характеристик і параметрів МСС

На одному хвилеводі розташовані два МСС: один випромінюючий, а другий – приймаючий. При подачі імпульсу струму збудження в котушку випромінювача на ділянці хвилеводу під цією котушкою внаслідок ефекту Джоуля збуджується поздовжня ультразвукова хвиля, що

розповсюджується в обидві сторони по хвилеводу. Хвиля, що розповсюджується вліво, відбивається від лівого торця хвилеводу і знову по хвилеводу поширюється вправо. Хвиля, що розповсюджується вправо, внаслідок ефекту Віллари, наводить е.р.с. в котушці приймача через час  $t_0$ , пропорційний  $l_0$ . Поширюючись далі, хвиля відбивається від правого торця хвилеводу і починає рухатися у зворотному напрямку. Відстані між випромінювачем, приймачем і торцями хвилеводу обрані наступним чином:  $l_1 \leq l_2$ . Тоді перший прийнятий МСС радіоімпульс пройшов відстань  $l_0$ , другий -  $l_1 + l_0$ , третій -  $l_2 + l_0$  і т.д. Торці хвилеводу зашліфовані для отримання хороших відбиваючих властивостей.

На рис. 4.25 зображена осцилограма сигналу на котушці приймача.

Перший експеримент був проведений з різними видами котушок у приймаючому МСС: котушка №1 – двосекційна, аналогічна котушці випромінювача; котушка №2 – 4-х секційна; котушка №3 – односекційна, котушка №4 – односекційна двошарова, котушка №5 – односекційна. Перші чотири котушки намотані безпосередньо на хвилевід, а п'ята котушка намотана на ізолюючий шар із фторопластової плівки завтовшки 0,15 мм. Кожна секція котушок містить 20 витків обмотувального мідного дроту діаметром 0,10 мм. Котушка № 4 містить два шари по 20 витків. Суміжні секції в котушках намотані в протилежних напрямках. Випромінюючий перетворювач у всіх експериментах містить двосекційну одношарову котушку.



Рис. 4.25. Осцилограма сигналу на виході приймаючого МСС

В табл. 4.13 наведено значення амплітуд відповідних прийнятих радіоімпульсів для циліндричного хвилеводу діаметром 1 мм.

Таблиця 4.13. Результати вимірювань амплітуд сигналів на котушках магнітострикційних сенсорів

Котушка приймача	$U_1$ , В	$U_{21}$ , мВ	$U_{22}$ , мВ	$U_{21}/U_1$	$Z_k$ , Ом
№1	6	40	35	0,0067	12
№2	6	80	70	0,0133	24
№3	6	20	17	0,0033	6
№4	6	32	27	0,0053	24
№5	6	10	09	0,0017	6

де:  $U_1$  – амплітудне значення напруги на котушці випромінювача,  $U_{21}$  - амплітудне значення напруги першого прийнятого імпульсу на котушці приймача,  $U_{22}$  - амплітудне значення напруги другого прийнятого імпульсу на котушці приймача,  $U_{21}/U_1$  – коефіцієнт подвійного перетворення,  $Z_k$  – модуль електричного імпедансу котушки.

Проведені експерименти показали, що амплітуда прийнятого сигналу практично пропорційна кількості секцій в котушці. При цьому за рахунок намотування суміжних секцій в протилежних напрямках електричний імпеданс змінюється не пропорційно квадрату загального числа витків, а пропорційно першого ступеня їх кількості за рахунок впливу взаємного індуктивного зв'язку між секціями.

З отриманих результатів видно, що збільшення відстані між хвилеводом і котушкою на 0,15 мм призводить до зменшення амплітуди прийнятого сигналу в два рази. Отже, витки необхідно розташовувати якомога ближче до хвилеводу.

Для двошарової котушки № 4 видно, що напруга прийнятого імпульсу збільшилася в 1,6 рази, а електричний імпеданс – в чотири. Так як енергія прийнятого імпульсу пропорційна квадрату напруги і обернено-пропорційна електричному імпедансу, то можна зробити висновок, що ефективність такої котушки значно зменшилася за рахунок віддалення другого шару обмотки від хвилеводу на величину першого шару.

Значення величин  $U_{22}$  необхідні для визначення величини загасання ультразвукового сигналу в хвилеводі. Зменшення сигналу відбувається за рахунок додаткового дворазового проходження ділянки хвилеводу  $l_1$ .

Вимірявши час затримки між першим і другим прийнятими імпульсами, можна визначити швидкість поширення поздовжньої ультразвукової хвилі в хвилеводі.

При цьому швидкість і загасання поздовжньої ультразвукової хвилі в хвилеводі можна визначити з наступних виразів:

$$c_l = \frac{l_0}{\tau_{12}}; \quad \beta = \frac{20 \lg U_{21} / U_1}{l_0},$$

де  $\tau_{12}$  - час затримки між випроміненим і першим прийнятим імпульсами,  $c_l$  - швидкість поширення поздовжньої ультразвукової хвилі в хвилеводі.

Залежність акустичного тиску від часу в будь-якій точці хвилеводу описується наступним виразом:

$$p(t, x) = u_1 (t + x/c_l) \cdot K \cdot e^{-\beta x},$$

де  $u_1$  – напруга на котушці випромінювача;  $K$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  $\beta$  - коефіцієнт загасання ультразвукового сигналу в хвилеводі;  $x$  – відстань від котушки випромінювача до довільної точки на хвилеводі.

Наступний експеримент був проведений з метою визначення матеріалів і складу акустичного дзеркала, яке повинне надійно кріпити хвилевід до корпусу і при цьому мати акустичний імпеданс відмінний від імпедансу хвилеводу. Для цього були залиті тестові кільцеподібні зразки різними сумішами (рис. 4.26):

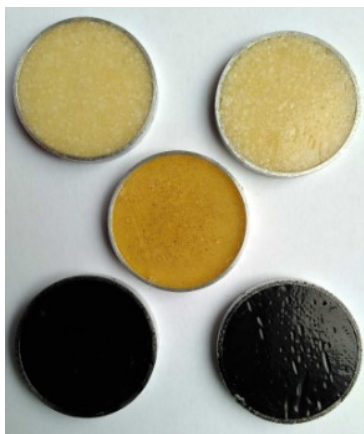


Рис. 4.26. Тестові кільця для перевірки властивостей матеріалу акустичного дзеркала

- зразок № 1 (два шт.) – епоксидна смола ЕД-20, наповнена спученим перлітом (два верхніх кільця);
- зразок № 2 (одна шт.) – чиста епоксидна смола ЕД-20 (середнє кільце);
- зразок № 3 (два шт.) – епоксидна смола ЕД-20, наповнена сажею (два нижніх кільця);

Наповнювачі додавалися в максимальній кількості, при якій компаунд ще зберігав текучість. Ультразвуковий сигнал пропускався крізь отримані зразки. Для випромінювання і приймання сигналів використовувалися МСС, виготовлені, як показано на рис. 4.23, залиті чистою епоксидною смолою ЕД-20, з односекційними одношаровими котушками.

Дослідження показали, що найбільше ослаблення сигналу було отримано у зразків № 1. Зразки № 2 і № 3 мали практично однаковий

коефіцієнт загасання ультразвукового сигналу. Згідно з отриманими експериментальними даними були виготовлені високочутливі МСС, фотографії внутрішнього модуля і зовнішнього вигляду наведено на рис. 4.27.



Рис. 4.27. Малоапертурні магнітострикційні сенсори:  
а – хвилевід з котушкою і демпфером, б – зовнішній вигляд

Висока чутливість сенсорів досягається також за рахунок використання спеціальних матеріалів з високими значеннями коефіцієнта магнітострикції та магнітострикції насичення, які піддаються певній технологічній обробці.

Приймаючий кінець хвилеводу сенсора може бути зашліфованим в рівень з корпусом, а може виступати на 1...3 мм. В першому випадку для забезпечення акустичного контакту необхідно використовувати контактну рідину. В другому випадку можна обійтися без неї, що дуже зручно при контролі об'єктів з необробленою поверхнею.

Електричний імпеданс малоапертурних магнітострикційних сенсорів становить 0,1 ... 50,0 Ом. Виготовлення пасивних узгоджувальних пристроїв в одному корпусі з сенсором дозволяє зменшити втрати сигналу при передачі його до електронних блоків. Особливо це ефективно для сенсорів з маловитковими котушками.

Як було вказано вище, магнітострикційний випромінювач має малу площу випромінюючої поверхні, що дозволяє створити в контрольованому зразку сферичну (ненаправлену) поздовжню хвилю. Тому для нормальної роботи ультразвукової системи контролю необхідно забезпечити достатню потужність випромінювання.

На рис. 4.28 наведено конструкцію потужного магнітострикційного перетворювача (МСП) з акустичним підсумовуванням сигналів у хвилеводі. Запропоноване технічне рішення забезпечує збільшення інтенсивності випромінюваного сигналу у  $N^2$  разів, де  $N$  - кількість котушок збудження. Діаметр випромінюючої поверхні перетворювача (діаметр хвилеводу) становить 0,3 ... 1,0 мм. Перетворювач працює на частоті 1 МГц. При такому співвідношенні діаметра перетворювача і частоти несучого коливання радіоімпульсу в досліджуваній зразок



випромінюється ультразвукова поздовжня хвиля з діаграмою напрямленості у вигляді півсфери.

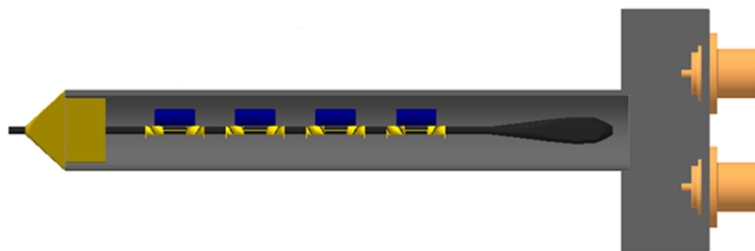


Рис. 4.28. МСП з акустичним підсумовуванням сигналів у хвилеводі

Відстані між котушками збудження дорівнюють одній довжині поздовжньої хвилі у хвилеводі. Сигнали в котушки збудження надходять із затримкою в часі по відношенню до попередніх котушок на один період несучого коливання. Таким чином, до кінця хвилеводу сигнали від кожної котушки приходять одночасно і синфазно, що забезпечує акустичне підсумовування сигналів у хвилеводі і дозволяє підвищити амплітуду випромінюваного сигналу в  $N$  разів, а потужність випромінювання – в  $N^2$  разів.

Розміщення в одному корпусі декількох малоапертурних магнітострикційних сенсорів дозволяє створювати лінійки (рис. 4.29) і матриці сенсорів для суттєвого скорочення часу контролю об'єктів [23]. Збільшення кількості вимірювальних каналів не є складною технічною проблемою при сучасному рівні інтеграції електронних пристроїв.

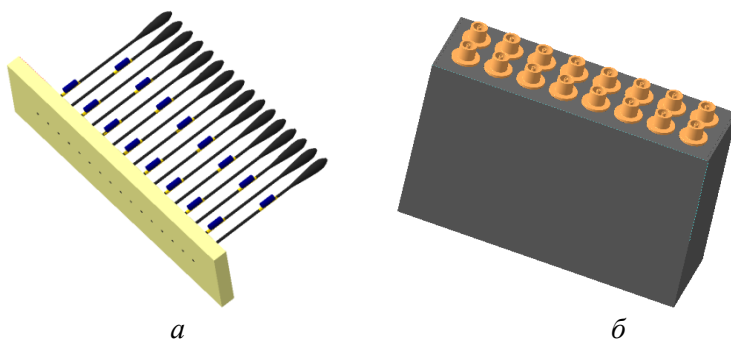


Рис. 4.29. Лінійка МСС:

а – внутрішній модуль, б – зовнішній вигляд

Експериментальні і теоретичні дослідження показали, що найкращі параметри і характеристики перетворювачів досягаються при використанні одношарових маловиткових котушок збудження. Для забез-

печення високої потужності випромінювання збуджуючих перетворювачів і підвищення чутливості приймаючих сенсорів використовуються багатосекційні котушки, які дозволяють отримати ефект акустичного підсумовування сигналів у хвилеводі.

Застосування ультразвукових концентраторів при проектуванні малоапертурних сенсорів дозволяє в кілька разів підвищити ефективність останніх.

Хвилевід перетворювачів має акустичний імпеданс близький до імпедансу контрольованого об'єкта, що зручно для акустичного узгодження сенсора і об'єкта контролю.

Ще одна істотна перевага МСС - точка Кюрі (температура, при якій зникає магнітострикційні ефект) для більшості розповсюджених магнітострикційних матеріалів знаходиться в межах 600 – 1200 °С, що значно перевищує температуру Кюрі для п'єзоелектричних перетворювачів. Ця особливість дозволяє використовувати малоапертурні МСС при високих температурах, що необхідно для контролю нагрітих тіл (котлів, труб, теплообмінників) безпосередньо в процесі їх функціонування.

#### 4.4. Комп'ютерне моделювання шумових та ритмічних сигналів

Отримання реальних інформаційних сигналів у результаті натурального експерименту зазвичай є дорогим або взагалі неможливим. У зв'язку з цим, доцільним є використання комп'ютерного моделювання для вирішення задач аналізу таких сигналів. Розглянемо методи та алгоритми моделювання шумових і ритмічних сигналів.

**Моделювання шумових сигналів.** Для моделювання шумових сигналів використаємо їх конструктивні моделі, що розглядалися в підрозділі 2.1.

*Діагностичні моделі.* В підрозділі 2.1 показано, що базовою моделлю шумових сигналів є процеси Бунімовича – Райса

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} \eta_k h(t - t_k). \quad (4.1)$$

Зміна стану об'єкта діагностування приводить до зміни параметрів процесу (4.1), зокрема, закону розподілу амплітуд  $\eta_k$ , форми імпульсів  $h(t)$ , інтенсивності появи імпульсів  $\lambda$ . Тому діагностичними ознаками є зміна імовірнісних характеристик шумових сигналів.

Конкретизуємо параметри моделі (4.1). Розглянемо деякі типові

форми елементарних імпульсів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14. Форма елементарних імпульсів

Номер	Форма імпульсів	Аналітичний вираз $h(t)$ , $A > 0$ , $\tau_0 > 0$
1	Прямокутна	$h(t) = AE(t)E(\tau_0 - t)$
2	Пилкоподібна	$h(t) = A(t/\tau_0)E(t)E(\tau_0 - t)$
3	Експоненціально-степенева	$h(t) = A(t/\tau_0)^b \exp(-t/\tau_0)E(t)$
4	Експоненціально-синусна	$h(t) = A \exp(-t/\tau_0) \sin(\omega_0 t)E(t)$

Оскільки амплітуди імпульсів додатні, задамо показникову щільність імовірностей величин  $\eta_k$ :

$$p_\eta(y) = \beta \exp(-\beta y)E(y), \beta > 0.$$

В табл. 4.15 наведені розраховані в роботі [24] кумулянтні коефіцієнти  $\gamma_s = \kappa_s \kappa_2^{-s/2}$ ,  $s = \overline{3,6}$ , типових моделей процесу (4.1) для значень  $\lambda\tau_0 = 1$  та  $\lambda\tau_0 = 5$ .

Таблиця 4.15. Кумулянтні коефіцієнти типових моделей

Форма імпульсів	Параметр	Кумулянтні коефіцієнти			
	$\lambda\tau_0$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$
1	1	2,121	6	21,213	90
	5	0,949	1,2	1,897	3,6
2	1	2,756	10,8	55,114	347,14
	5	1,232	2,16	4,93	13,886
3, $b = 0$	1	2	6	24	120
	5	0,894	1,2	2,147	4,8
3, $b = 1$	1	1,257	2,25	5,213	14,815
	5	0,562	0,45	0,466	0,593
4	1	0,357	8,978	11,234	297,132
	5	0,16	1,796	1,005	11,885

За даними табл. 4.15 можна зробити висновок, що розподіл процесу (4.1) навіть при достатньо великому значенні  $\lambda\tau_0 = 5$  суттєво відрізняється від гауссівського, для якого  $\gamma_s = 0$ ,  $s \geq 3$ .

Алгоритм моделювання складається з наступних етапів [24]:

1. Визначити крок дискретизації  $T_d$  модельованого сигналу на основі інтервалу кореляції сигналу ( $T_d \ll \tau_{corr}$ ) або на основі верхньої частоти сигналу ( $T_d = 1/f_d, f_d \gg f_a$ ).

2. Задати необхідну тривалість модельованих реалізацій та сформувати масив дискретних моментів часу  $t$ , для яких будуть змодельовані відліки сигналу. Проміжок часу між сусідніми елементами масиву дорівнює  $T_d$ .

3. Отримати масив випадкових моментів часу  $t_k$  появи елементарних імпульсів виходячи із заданої інтенсивності  $\lambda$  пуассонівського потоку подій, у якого інтервали між сусідніми моментами  $t_k$  розподілені за показниковим законом.

4. Сформувати масив випадкових амплітуд  $\eta_k$  імпульсів з потрібним законом розподілу.

5. Сформувати  $k$ -й елементарний імпульс. Для цього моделюється функція  $h(t)$ , зміщена на величину  $t_k$  та помножена на значення амплітуди  $\eta_k$ .

6. Змодельовати реалізації процесу (4.1) підсумовуючи отримані елементарні імпульси для всіх значень з масиву часу.

*Результати моделювання.* Змодельуємо реалізації шумових сигналів на комп'ютері для конкретних значень параметрів діагностичних моделей.

Задамо значення параметрів:  $A = 1$ ,  $\beta = 1$ ,  $\tau_0 = 1$  мкс. Оберемо частоту заповнення експоненціально-синусних імпульсів  $f_0 = \omega_0/2\pi = 5$  МГц. Дослідження виконаємо для інтенсивності  $\lambda = 5 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ , що відповідає  $\lambda\tau_0 = 5$ . Оберемо крок дискретизації  $T_d = 10$  нс (частота дискретизації складає 100 МГц), що менше за тривалість  $\tau_0$  елементарного імпульсу в 100 разів. Покладемо тривалість реалізацій рівну  $T = 0,5$  мс. Тоді об'єм вибірки для кожної реалізації складає  $N = 5 \cdot 10^4$  відліків. Для забезпечення стаціонарності процесу, що моделюється, початок відліку часу перенесемо в точку  $t_0 = 20\tau_0$ .

На рис. 4.30 наведені змодельовані реалізації процесу (4.1) з формою імпульсів 3 ( $b = 0$ ) та формою 4. Для перевірки ефективності алгоритму моделювання порівняємо значення теоретичних та експериментальних початкових моментів. Теоретичні моменти  $\alpha_s$  процесу (4.1) знайдемо, використовуючи формули зв'язку початкових моментів з ку-

мулянтами  $\kappa_s$  :

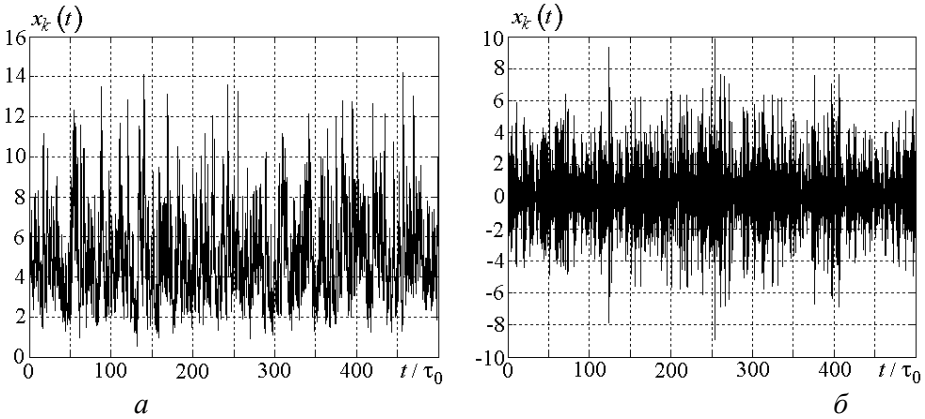


Рис. 4.30. Реалізації процесу Бунімовича – Райса:  $a$  – з експоненціальною формою імпульсів 3,  $b$  – з експоненціально-синусною формою імпульсів 4

$$\alpha_1 = \kappa_1; \quad \alpha_2 = \kappa_2 + \kappa_1^2; \quad \alpha_3 = \kappa_3 + 3\kappa_1\kappa_2 + \kappa_1^3;$$

$$\alpha_4 = \kappa_4 + 4\kappa_1\kappa_3 + 3\kappa_2^2 + 6\kappa_2\kappa_1^2 + \kappa_1^4.$$

В табл. 4.16 наведені отримані в роботі [25] теоретичні значення початкових моментів моделей, що розглядаються, та їх оцінки  $\hat{\alpha}_{s\text{cp}}$ , отримані усередненням за 30 реалізаціями.

Таблиця 4.16. Значення теоретичних та експериментальних моментів

Моменти	Форма імпульсів				
	1	2	3, $b=0$	3, $b=1$	4
$\alpha_1$	5	2,5	5	5	0,159
$\hat{\alpha}_{1\text{cp}}$	5,038	2,548	5,027	4,987	0,157
$\alpha_2$	35	9,58	30	27,5	2,525
$\hat{\alpha}_{2\text{cp}}$	35,28	9,87	30,19	27,34	2,505
$\alpha_3$	305	48,13	210	164,7	1,827
$\hat{\alpha}_{3\text{cp}}$	305,7	49,89	210,7	162,9	1,729
$\alpha_4$	3145	296,4	1680	1066	30,73
$\hat{\alpha}_{4\text{cp}}$	3118,3	308,2	1672,2	1044	30,45

За даними табл. 4.16 можна зробити висновок про добре узгодження теоретичних і експериментальних значень моментів процесу, оскільки

відносна помилка для даного ансамблю реалізацій не перевищила 5,4% (у випадку моменту  $\alpha_3$  для форми імпульсів 4).

На рис. 4.31 наведені гістограми та графіки теоретичних щільностей імовірностей процесу (4.1) з формами імпульсів 3 ( $b=0$ ) та 4, що побудовані за формулою (2.91) з використанням теоретичних початкових моментів, а не їх оцінок.

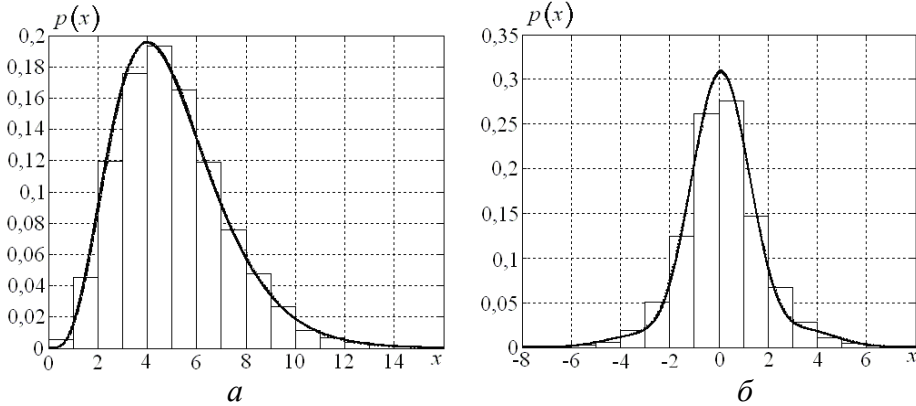


Рис. 4.31. Теоретичні щільності імовірностей і гістограми процесу (4.1):  
 $a$  – з експоненціальною формою імпульсів 3,  
 $b$  – з експоненціально-синусною формою імпульсів 4

Графіки на рис. 4.31 показують узгодженість між теоретичними щільностями імовірностей та гістограмами.

**Модельовання ритмічних сигналів.** В підрозділі 2.2 показано, що найбільш узагальненими моделями ритмічних сигналів є:

- стаціонарні випадкові процеси з дискретним спектром;
- періодично корельовані випадкові процеси.

*Дійсні стаціонарні випадкові процеси з дискретним спектром* можуть бути подані в наступному вигляді:

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k e^{i2\pi f_k t}, \quad (4.2)$$

де  $\gamma_k$  – незалежні однаково розподілені комплексні випадкові величини, у яких  $\mathbf{M}[\gamma_k] = 0$ ,  $\mathbf{D}[\gamma_k] = \sigma_k^2$ , причому  $\gamma_k$  і  $\gamma_{-k}$  утворюють комплексно спряжені пари, а частоти  $f_k = f_{-k}$ ,  $f_0 = 0$ .

Кореляційна функція процесу (4.2) є майже періодичною функцією і дорівнює

$$R(\tau) = \sigma_0^2 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \sigma_k^2 \cos 2\pi f_k \tau.$$

Відмітимо окремі випадки моделі (4.2).

1. Якщо частоти  $f_k$  є кратними, тобто  $f_k = kf_1$ , то кореляційна функція є періодичною функцією з періодом  $T_0 > 0$ ,  $R(\tau) = R(\tau + T_0)$  та

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} R(\tau) e^{-i2\pi k f_1 \tau} d\tau.$$

2. Нехай  $\gamma_k$  – вироджені випадкові величини, які дорівнюють  $C_k$ . Тоді моделлю ритмічних сигналів є детерміновані майже періодичні функції

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{i2\pi f_k t}. \quad (4.3)$$

3. Якщо в формулі (4.3) частоти  $f_k$  кратні, тобто  $f_k = kf_1$ , а  $C_k$  є коефіцієнтами Фур'є, то процес  $\xi(t)$  є детермінованою періодичною функцією з періодом  $T_0 = 1/f_1$ .

Таким чином, для моделювання будемо використовувати формулу (4.2), яку перепишемо в дійсній формі

$$\xi(t) = \gamma_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_k \cos(2\pi f_k t - \varphi_k). \quad (4.4)$$

При моделюванні кількість доданків в формулі (4.4) скінченна.

*Алгоритм моделювання* містить наступні етапи.

1. Задати кількість гармонік  $n$ .
2. Задати амплітуди гармонік  $\gamma_k$ .
3. Задати початкові фази  $\varphi_k$ .
4. Задати тривалість реалізації  $T$ .
5. Визначити крок дискретизації виходячи з частоти вищої гармоніки  $f_n$ :  $T_d = 1/f_d$ ,  $f_d \gg f_n$ .

6. Змоделювати реалізацію процесу, підсумовуючи всі гармоніки.

*Результати моделювання.* Змоделюємо два процеси з дискретним спектром ( $n=10$ ): з кратними частотами;  $f_1=50$  Гц,  $f_k = kf_1$ ,  $k = \overline{1,10}$ ; та з некротними частотами:  $f_1=50$  Гц,  $f_2=75$  Гц,  $f_3=130$  Гц,  $f_4=175$  Гц,  $f_5=225$  Гц,  $f_6=275$  Гц,  $f_7=310$  Гц,  $f_8=360$  Гц,  $f_9=410$  Гц,

$f_{10}=470$  Гц. Задамо для обох процесів наступні параметри моделювання:  $\gamma_0=0$ ,  $\gamma_1=1$ ,  $\gamma_2=0,9$ ,  $\gamma_3=0,8$ ,  $\gamma_4=0,7$ ,  $\gamma_5=0,6$ ,  $\gamma_6=0,5$ ,  $\gamma_7=0,4$ ,  $\gamma_8=0,3$ ,  $\gamma_9=0,2$ ,  $\gamma_{10}=0,1$ ; випадкова величина  $\varphi_k$  рівномірно розподілена на інтервалі  $[0;2\pi]$ . Задамо тривалість реалізації 10 с, а частоту дискретизації 20 кГц.

На рис. 4.32 наведені реалізації змодельованих процесів з дискретним спектром для випадку кратних і некратних частот; на рис. 4.33 – оцінки їх кореляційних функцій, на рис. 4.34 – оцінки спектральних щільностей. Розмір вікна даних при спектральному аналізі складає 16384 відліків, що визначає роздільну здатність по частоті  $20000/16384=1,22$  Гц. З рисунків видно, що у випадку кратних частот процес і його кореляційна функція є періодичними функціями, чого немає у випадку некратних частот, в обох випадках спектральні щільності мають дискретні складові на частотах  $f_k$ .

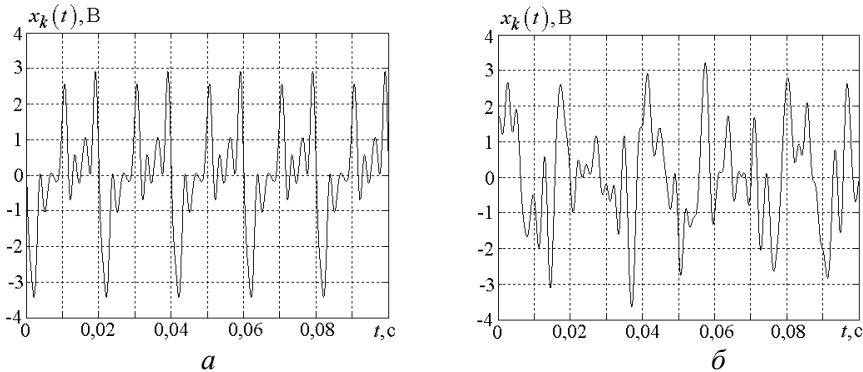


Рис. 4.32. Реалізації процесів з дискретним спектром:  
*a* – кратні частоти, *б* – некратні частоти

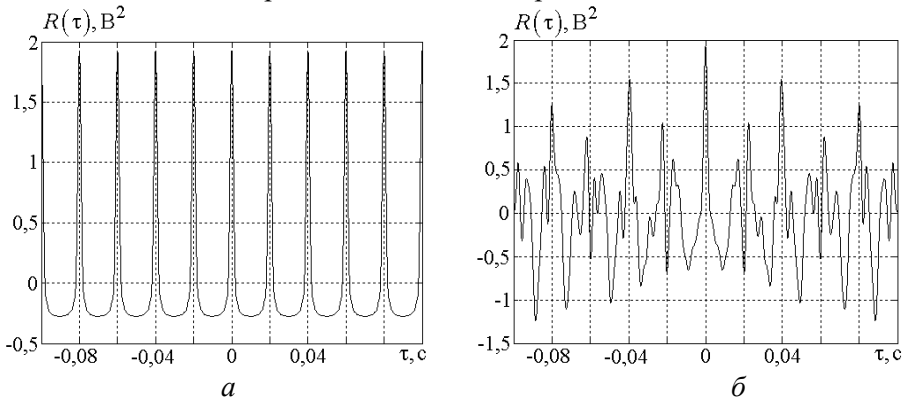


Рис. 4.33. Оцінки кореляційних функцій процесів з дискретним спектром: *a* – кратні частоти, *б* – некратні частоти



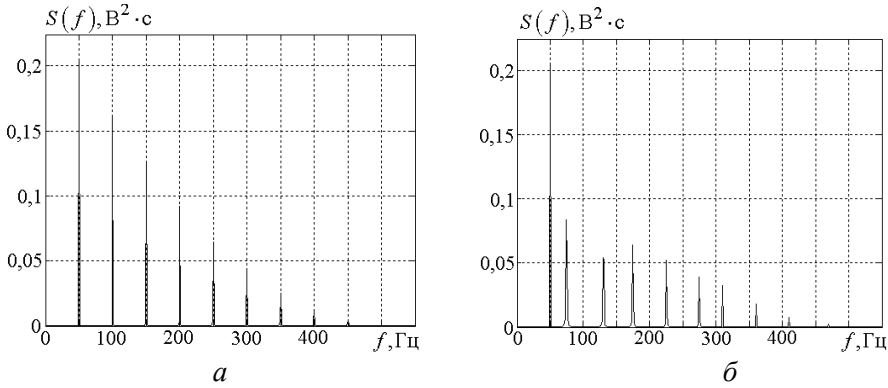


Рис. 4.34. Оцінки спектральних щільностей процесів з дискретним спектром: *a* – кратні частоти, *б* – не кратні частоти

*Періодично корельовані випадкові процеси* з періодом  $T_0 > 0$  є не-стаціонарними процесами та задовольняють наступним умовам:

$$1) m(t+T_0) = m(t); \quad 2) R(t_1+T_0, t_2+T_0) = R(t_1, t_2).$$

Згідно з [26] періодично корельовані випадкові процеси можуть бути отримані періодичним повторенням відрізка  $T_0$  стаціонарного процесу.

Використовуємо для моделювання гауссівський стаціонарний процес з незалежними значеннями з параметрами  $m=0$  і  $\sigma=1$ .

Задасмо наступними параметрами моделювання: тривалість реалізації – 100 с, частота дискретизації – 20 кГц (об'єм вибірки  $N = 2 \cdot 10^6$  відліків). Розмір вікна даних для спектрального аналізу – 8192, що означає роздільну здатність по частоті  $20000/8192=2,44$  Гц.

Виділимо з реалізації вихідного процесу відрізок тривалістю  $T_0 = 0,02$  (400 відліків) і повторимо його 4999 разів. Отримана таким чином реалізація має тривалість 100 с (об'єм вибірки  $N = 2 \cdot 10^6$  відліків). Зауважимо, що вибраному періоду повторень відповідає частота 50 Гц, яка є характерною для роботи роторного обладнання.

На рис. 4.35 наведені реалізації змодельованих процесів – стаціонарного і періодично корельованого, на рис. 4.36 – оцінки їх кореляційних функцій, на рис. 4.37 – оцінки спектральних щільностей.

Із рис. 4.35–4.37 випливає, що реалізації обох сигналів схожі між собою, однак кореляційна функція періодично корельованого процесу є періодичною з інтервалом 0,02 с, а його спектральна щільність замість флуктуацій навколо середнього значення  $5 \cdot 10^{-5} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$  має дискретні складові на частотах, кратних 50 Гц.

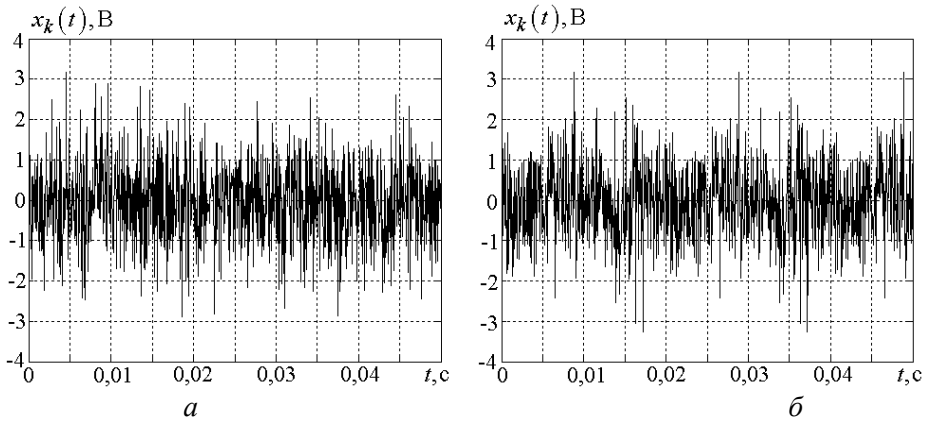


Рис. 4.35. Реалізації змодельованих процесів:  
*a* – стаціонарного, *б* – періодично корельованого

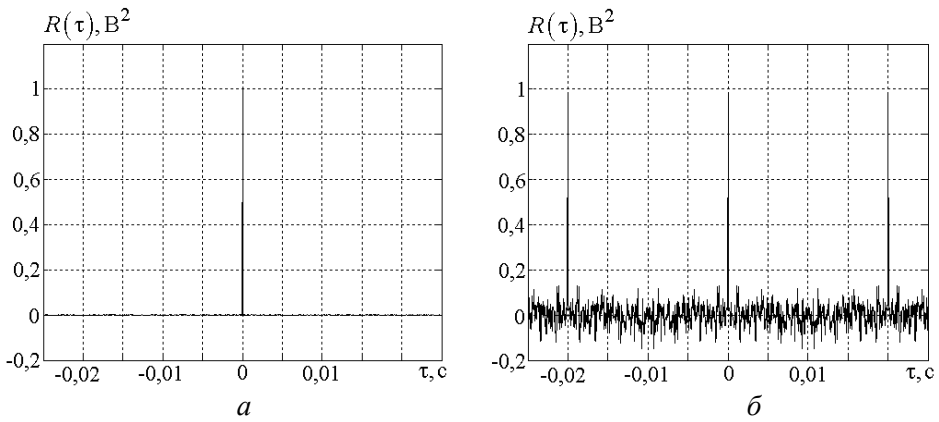


Рис. 4.36. Оцінки кореляційних функцій процесів:  
*a* – стаціонарного, *б* – періодично корельованого

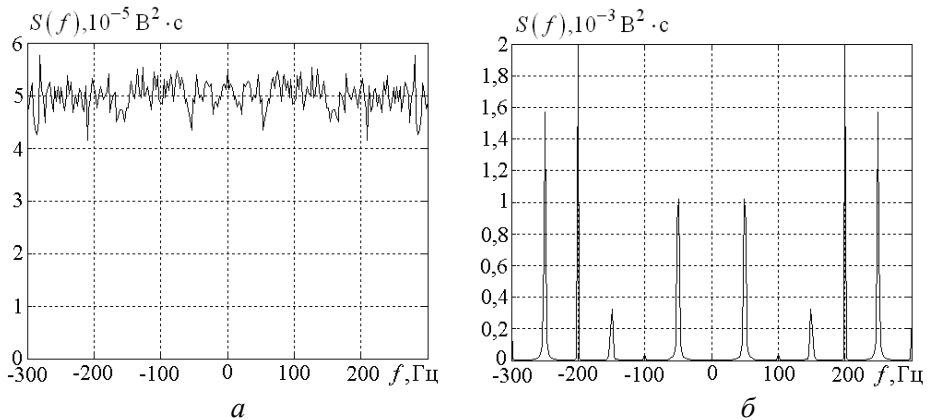


Рис. 4.37. Оцінки спектральних щільностей процесів:  
*a* – стаціонарного, *б* – періодично корельованого

## 4.5 Програмне забезпечення систем моніторингу

Прикладне програмне забезпечення є одним з основних компонентів систем моніторингу, на нього покладено реалізацію функції взаємодії з модулями апаратного комплексу системи, керування інформаційними потоками всередині системи, реалізацію алгоритмів цифрової та статистичної обробки інформаційних сигналів, побудови зображень інформаційних полів, формування інтерфейсу користувача, збереження отриманої інформації та вихідних результатів, тощо.

Розроблена загальна структура програмного забезпечення систем моніторингу представлена на рис. 4.38.

Як платформу розробки використано середовище LabView від National Instrument. Даний продукт є потужним засобом для створення власного програмного забезпечення, орієнтованого на вирішення як науково-дослідних, так і прикладних задач, має широку бібліотеку вбудованих інструментів функцій цифрового опрацювання сигналів та математичного опрацювання даних.

Програмний модуль взаємодії з модулями апаратного комплексу системи (модулями контрольно-вимірювальної апаратури) забезпечує програмне узгодження цих модулів з програмним забезпеченням системи в цілому. Для спряження програмного забезпечення вимірювального модуля з програмним забезпеченням системи використовується спеціальна бібліотека функцій програміста або API функцій – прикладний програмний інтерфейс, який є набором інструментів для взаємодії різнотипного програмного забезпечення.

Блок взаємодії з модулями системи забезпечує обмін даними з компонентами драйвера, які відповідають за наступні операції: пошук підключеного пристрою; отримання ідентифікатора пристрою; конфігурацію та запуск процесу перетворення; перевірку поточного стану процесу збирання та передавання сигналу про його завершення; зчитування отриманих даних та передавання їх для подальшого опрацювання; зупинення збирання даних та завершення роботи з пристроєм.

В момент запуску системи відбувається завантаження бібліотеки обклашки. За її допомогою стають доступні функції для роботи з пристроєм.

Першим етапом є процедура пошуку та первинної ініціалізації відповідних контрольно-вимірювальних модулів, після чого вони стають готовими до роботи у складі системи моніторингу. Сигнал до початку збирання даних формується шляхом виклику функції, що відповідає за

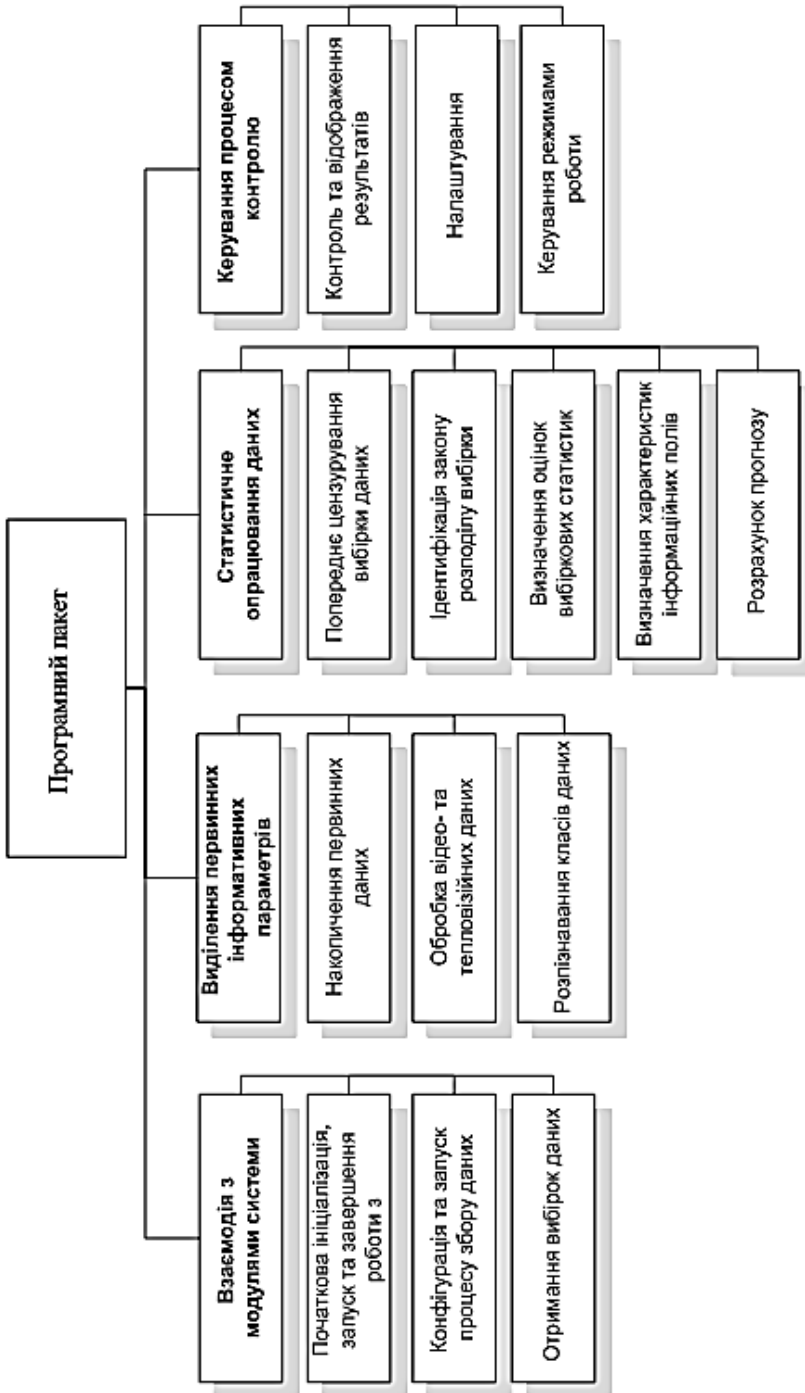


Рис. 4.38. Структура програмного забезпечення

встановлення параметрів роботи: частоти опитування кожного окремого модуля, режиму синхронізації, формату даних тощо.

Після завершення циклу збирання в буферах контрольно-вимірювальних модулів формуються масиви даних вимірювань, які подаються на вхід каналу передачі даних. Це може бути інтерфейс зв'язку. Отримані масиви передається до програмних модулів, що реалізують функції оброблення інформаційних сигналів – це модулі виділення первинних інформативних параметрів, їх статистичного опрацювання та керування процесом контролю.

Модуль виділення первинних інформативних параметрів може також бути частиною системи в залежності від структури модулів контрольно-вимірювальної апаратури системи. Цей модуль забезпечує накопичення первинних даних і керує їх передаванням через спеціалізований інтерфейс в інші модулі програмного забезпечення системи для подальшої статистичного опрацювання, побудови розподілів інформаційних полів, автоматичного розпізнавання класів даних, що відповідають різним станам об'єкта досліджень.

Модуль накопичення первинних даних виконує зберігання вхідних інформаційних масивів, зменшення їхньої розмірності за рахунок відбору певних діагностичних ознак, які використовуються для подальшого оброблення, що дає можливість підвищити ефективність опрацювання даних та роботи системи в цілому, а також нормування вхідного вектора для приведення його до заданого діапазону значень.

Модуль оброблення відео та тепловізійних даних (при наявності відповідних блоків в апаратній частині системи) реалізує наступні алгоритми роботи із зображеннями – підвищення просторової розрізнувальної здатності, підвищення контрастності, фільтрації зображень, виділення геометричних примітивів, прив'язки до еталонів. Крім того, даний модуль дозволяє проводити геометричні вимірювання з використанням зображень в 1D і 2D просторах для локалізації координат і розмірів об'єктів, а також вимірювання яскравості в задачах оброблення інформації, що надходить з тепловізора. В розробленні цього модуля використана бібліотека IMAQ Vision середовища Lab VIEW.

Модуль розпізнавання класів даних здійснює класифікацію вхідних даних за певними заданими ознаками, розбиття множини векторів-ознак на кластери та розпізнавання різних класів (образів). Цей модуль реалізовано на основі модифікованої нейронної мережі, що дозволило будувати правила прийняття рішення на основі мінімально можливої початкової інформації, а також динамічно змінювати ці правила в процесі діагностування. Зазначені характеристики було отримано за допо-

могою внесення змін у класичні структури нейронних мереж та створення нових алгоритмів їх роботи.

Функціональне навантаження блока статистичного опрацювання даних є найвагомим в системі моніторингу, тому розглянемо його програмні модулі більш детально. Структура програмного забезпечення цього блока представлена на рис. 4.39.

Модуль попереднього цензурування вибіркового даних призначений в першу чергу для зменшення впливу вибіркового значень з надлишковими похибками та виявлення прогресуючих чи періодичних трендів.

Перша задача вирішується фільтрацією даних – віконною або медіанною, в залежності від розмірності вхідного вектора, або застосуванням статистичних критеріїв, які для заданої довірчої ймовірності дозволяють розрахувати граничні вибіркові значення (за критеріями Романовського та Діксона).

Для виявлення трендів використані критерії серій та метод Фостера – Стюарта, який дозволяє встановити не тільки тренд математичного сподівання, але і тренд дисперсії ряду спостережень.

Ідентифікація законів розподілу експериментальних даних необхідна не тільки для підтвердження факту їх однорідності, але і для вибору тієї чи іншої моделі інформаційного поля, а також може бути використана як діагностична ознака.

Модуль ідентифікації законів розподілу використовує наступні статистичні інструменти: направлені критерії перевірки на гауссовість (складений критерій) та на рівномірність (критерій Фроцині), апроксимація законів розподілу лінійних даних кривими Пірсона та апроксимація законів розподілів кутових даних розподілами Мізеса та намотаним Гаусса.

Модуль ідентифікації законів розподілу працює наступним чином: вибіркові дані, що пройшли попереднє цензурування поділяються на лінійні та кутові; лінійні дані перевіряються про приналежність вибіркового закону розподілу до гауссового чи рівномірного направленими критеріями. Якщо ці гіпотези не підтверджуються, проводиться апроксимація розподілами Пірсона, що враховується в подальших розрахунках.

Закони розподілу кутових даних апроксимуються або розподілом Мізеса або намотаним Гаусса. Використання розподілу Мізеса є більш прийнятним, тому що порівняно з намотаним гауссівським він має математичний запис, що призводить до простіших оцінок параметрів розподілу.

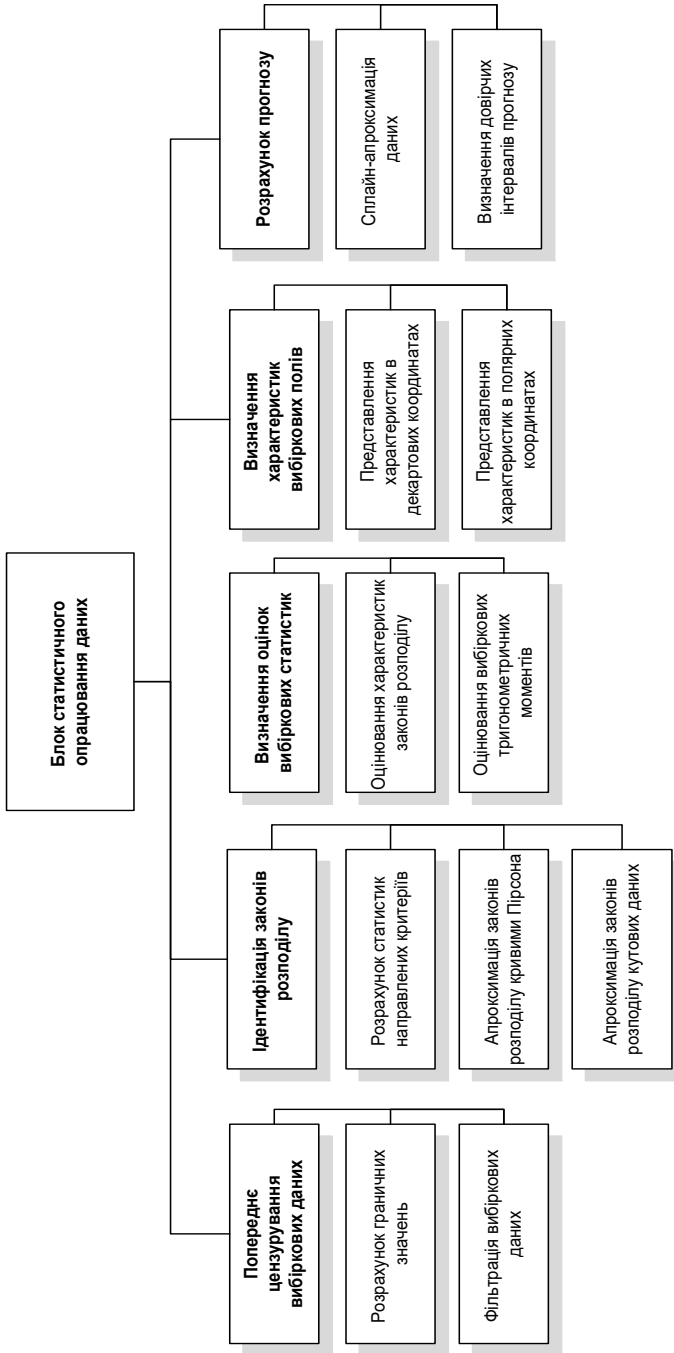


Рис. 4.39. Структура програмного забезпечення блока статистичного опрацювання даних

Модуль визначення вибіркових статистик здійснює оцінювання статистичних параметрів експериментальних даних з урахуванням визначеного закону розподілу для подальшого використання в розрахунках характеристик полів або розрахунку прогнозу стану об'єкта контролю.

Визначення характеристик інформаційних полів здійснюється на основі розрахованих статистичних характеристик та з урахуванням обраної моделі поля.

Інформаційні поля можуть будуватись як в декартових, так і в полярних координатах. Модуль визначення характеристик полів дозволяє будувати зображення полів у 3D просторі, а також досліджувати зміну їх характеристик у часі.

Модуль розрахунку прогнозу здійснює побудову регресійної моделі поведінки вимірюваних параметрів в часі на основі сплайн - апроксимації експериментальних даних.

Розроблена методика прогнозування дозволяє отримувати довірчі інтервали прогнозу, де із заданою ймовірністю можуть перебувати значення інформативних параметрів у майбутньому. Це фактично дає змогу прогнозувати в часі поведінку інформаційних полів.

Формування інтерфейсу користувача, встановлення необхідних налаштувань, вибір режимів роботи та індикація результатів покладені на блок керування процесом контролю, архітектура якого наведена на рис.4.40.

Основний програмний код розробленого програмного забезпечення системи виконано за модульною структурою, що дає можливість підключення та інтеграції в основний код програми раніше створених підпрограм та додаткових модулів на мовах високого рівня, працювати з динамічними бібліотеками dll, розширювати функціональні можливості додатковими програмними модулями та функціями без внесення значних змін в основну структуру програмного забезпечення.

Даний підхід дозволяє без ускладнень додавати необхідні або виключати непотрібні елементи в програмне забезпечення системи, модернізувати та адаптувати систему до зміни завдань та умов роботи, тощо. Отримання великої кількості діагностичної інформації, яку потрібно обробити, ускладнює алгоритми обробки даних та збільшує необхідний для їх аналізу час. Тому актуальним на теперішній час є застосування інтелектуальних комп'ютерних технологій для вирішення завдань розпізнавання стану об'єктів моніторингу. Задача розпізнавання (кластеризації) вирішується за допомогою розроблення та застосування штучної нейронної мережі.





Рис. 4.40. Структура модуля керування процесом контролю

Вибір цього рішення обумовлений здатністю нейронних мереж виконувати такі операції оброблення, порівняння і класифікації образів, які недоступні традиційній математиці, а можливість самонавчання та самоорганізації дозволяє створювати потужні інтелектуальні системи для вирішення завдань моніторингу і діагностики.

Нейромеревий класифікатор в системі моніторингу забезпечує нелінійне розділення простору ознак, можливість поповнення бібліотеки класів в автоматичному режимі, високу достовірність кластеризації у випадках мінімуму вихідної інформації про образи, що розпізнаються, та обмеженої кількості образів для навчання [3].

В процесі вирішення завдання кластеризації з використанням нейронних мереж виникає дилема – необхідно в процесі роботи забезпечити з одного боку пластичність пам'яті нейронної мережі (здатність сприйняття нових даних і створення нових кластерів), з іншого боку зберегти стабільність, яка гарантує, що інформація про вже відомі кластери не знищується і

не руйнується [27]. Дане було усунуте використанням нейронної мережі адаптивної резонансної теорії - ART-2.

Нейронна мережа ART-2 не чутлива до порядку пред'явлення вхідних векторів, може працювати як з бінарними, так і з безперервними сигналами, має велику швидкодію і забезпечує високу достовірність ідентифікації вхідних сигналів. До того ж мережа ART-2 має властивість самостійного виправлення помилок класифікації після певної кількості циклів повторного пред'явлення навчальної вибірки.

Мережа ART [28] є векторним класифікатором. Вхідний вектор класифікується залежно від того, якому раніше зафіксованих мережею еталонних образів він схожий (подібний). Рішення про ідентифікацію вхідного вектора мережа ART виражає у формі збудження одного з нейронів шару розпізнавання. Якщо вхідний вектор не відповідає жодному з «еталонних» образів, створюється нова категорія (виділяється новий нейрон і запам'ятовується новий вектор), яка відповідає вхідному вектору. Якщо визначено, що вхідний вектор має схожість з одним з векторів (еталонів), які зустрічалися раніше, за певним критерієм подібності, еталонний вектор в пам'яті нейронної мережі буде змінюватися (навчатися) під впливом нового вхідного вектора таким чином, щоби стати більш схожим на даний вхідний вектор.

Образ, що запам'ятовується, не буде змінюватися у випадку, якщо поточний вхідний вектор не виявиться досить схожим на нього. Новий образ може створювати додаткові класифікаційні категорії, однак він не зможе змусити змінюватися існуючу пам'ять.

Мережа ART складається з двох шарів нейронів  $F_1$  (шар порівняння) та  $F_2$  (шар розпізнавання) [28]. Шар  $F_1$  містить  $n$  нейронних елементів, які відповідають розмірності вхідного образу. Кожний нейрон має синоптичні зв'язки з елементами шару  $F_2$ . Кожний нейрон шару  $F_2$  характеризує деякий кластер образів. Кожному шару мережі відповідає власна матриця вагових коефіцієнтів  $W$  і  $V$ . Прямий ваговий вектор  $W_i$  відповідає  $i$ -му кластеру, зворотний ваговий вектор  $V_j$  характеризує інтегрований образ, що відповідає цьому кластеру. Активність нейронів у шарах  $F_1$  та  $F_2$  відповідають за короткочасну пам'ять, а вагові вектори  $W$  і  $V$  - за довгострокову пам'ять.

Основні рівняння, які описують роботу шару порівняння  $F_1$  мережі ART-2 є наступні два рівняння:

$$p_i = u_i + \sum_j g(y_j) v_{j,i}, \quad q_i = p_i / (e + |p|), \quad u_i = z_i / (e + |z|),$$

$$z_i = f(t_i) + b \cdot f(q_i), \quad s_i = x_i + a \cdot u_i, \quad t_i = s_i / (e + |s|),$$

де  $y_j$  – вихід  $j$ -го нейрона шару розпізнавання  $F_2$ ;  $v_{j,i}$  – елементи матриці вагових коефіцієнтів  $V$ ;  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом;  $e$  – параметр, який характеризує співвідношення між часом роботи нейронів шарів  $F_1$  і  $F_2$ ,  $0 < e \ll 1$ ;  $f(x)$  – нелінійна сигнальна функція активації нейронів.

Функція активації нейронів може бути або безперервно диференційованою

$$f(x) = \begin{cases} 2 \cdot \theta \cdot x^2 / (x^2 + \theta^2), & \text{при } 0 \leq x < \theta \\ x, & \text{при } x \geq \theta \end{cases}$$

або кусково-лінійною:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq x < \theta \\ x, & \text{при } x \geq \theta \end{cases}$$

Робота шару розпізнавання  $F_2$  мережі ART-2 описується наступними рівняннями:

$$T_j = \sum_i p_i w_{i,j}, \quad T_k = \max \{T_j : j = \overline{1, m}\},$$

$$g(y_k) = \begin{cases} d, & \text{при } T_k = \max_j (T_j) \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де  $w_{i,j}$  – елементи матриці вагових коефіцієнтів  $W$ ;  $d$  – константа, яка визначається експериментальним шляхом.

Таким чином, на пристрій порівняння надходить вектор  $p_i$ :

$$p_i = \begin{cases} u_i, & \text{при неактивних нейронах слоя } F_2 \\ u_i + d \cdot v_{k,i}, & \text{при активному нейроні } k \end{cases}$$

Пристрій порівняння активує сигнал того, заглушення, якщо не буде виконана наступна умова:

$$\rho / (e + |r|) \geq 1,$$

де  $\rho \in [0, 1]$  – коефіцієнт чутливості класифікатора;  $r = (r_1, r_2, \dots)$  – вектор, що характеризує ступінь відмінності вхідного вектора  $X$  від «еталонного» вектора  $W_k$  в пам'яті мережі:

$$r_i = (u_i + c \cdot p_i) / (e + |u| + |c \cdot p|),$$

де  $c$  – ваговий коефіцієнт, що вибирається з нерівності:

$$c \leq (1-d)/d.$$

У разі правильної класифікації вхідного вектора сигнал заглушення не активується, а вагові коефіцієнти матриць  $W$  та  $V$  модифікуються наступним чином:

$$\begin{aligned} v_{j,i}^{new} &= v_{j,i}^{old} + \Delta v_{j,i}, \quad \Delta v_{j,i} = g(y_j) [p_i - v_{j,i}] = d \cdot (p_i - v_{k,i}), \\ w_{i,j}^{new} &= w_{i,j}^{old} + \Delta w_{i,j}, \quad \Delta w_{i,j} = g(y_j) [p_i - w_{i,j}] = d \cdot (p_i - w_{i,k}). \end{aligned}$$

де  $v_{j,i}^{old}$ ,  $v_{j,i}^{new}$ ,  $w_{i,j}^{old}$ ,  $w_{i,j}^{new}$  – вагові коефіцієнти матриць  $V$  і  $W$  відповідно до та після модифікації.

На початку роботи мережі і при формуванні нового нейрона (у разі формування нового класу) значення відповідних вагових коефіцієнтів ініціалізуються початковими значеннями:

$$v_{j,i} = 0, w_{i,j} \leq \frac{1}{(1-d)\sqrt{N}}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, m},$$

де  $N$  – розмірність вхідного вектора  $X$ ;  $m$  – кількість нейронів в шарі розпізнавання  $F_2$  (кількість класів в пам'яті).

З метою підвищення ефективності роботи мережі ART-2 і достовірності кластеризації була розроблена нова архітектура мережі, алгоритм її роботи і навчання [29].

На рис. 4.41 зображена структурна схема розробленої мережі ART-2, де виділені блоки, які були змінені і доповнені по відношенню до класичної мережі ART-2.

Проаналізуємо відмінності нової структури.

По-перше, класичній реалізації мережі ART-2 вагові коефіцієнти матриць  $W$  і  $V$  мають майже однакові за значеннями елементи, тобто має місце дублювання значень.

У розробленій мережі ART-2 разом з двома матрицями вагових коефіцієнтів реалізований алгоритм роботи, який передбачає використання однієї матриці вагових коефіцієнтів, що тим самим зменшує витрати пам'яті системи і зменшує кількість обчислювальних операцій (в процесі виконання модифікації вагових коефіцієнтів під час навчання і адресації до елементів відповідних матриць при розрахунках).

У розробленій мережі має місце наступне співвідношення:

$$V = W^T.$$

Таким чином, удвічі зменшується необхідний об'єм пам'яті і кількість операцій при модифікації вагових коефіцієнтів під час навчання.



Рис. 4.41. Структурна схема класифікатора на основі нейронної мережі ART-2

По-друге, в класичній реалізації мережі ART-2 фактично виділяється один критерій оцінки приналежності вхідного вектора до певного класу. У розробленій новій архітектурі нейронної мережі ART-2 для обчислення двох критеріїв оцінки приналежності вхідного вектора до певного класу були використані дві матриці вагових коефіцієнтів, але значення їх елементів модифікуються при навчанні способом, що відрізняється від класичної теорії.

Алгоритм роботи шару розпізнавання  $F_2$ . У запропонованій мережі робота шару розпізнавання описується рівняннями:

$$T_j = \sum_i x_i w_{i,j}, \quad T_k = \max \{T_j : j = \overline{1, m}\},$$

де  $w_{i,j}$  – елементи матриці вагових коефіцієнтів  $W$ ;  $x_i$  – елементи вхідного вектора  $X$ .

Функціонування шару порівняння  $F_1$  залишається без змін. Модифікація вагових коефіцієнтів під час навчання відбувається за наступним алгоритмом:

$$v_{j,i}^{new} = v_{j,i}^{old} + \Delta v_{j,i}, \quad \Delta v_{j,i} = g(y_j) [u_i - v_{j,i}] = d \cdot (u_i - v_{j,i}),$$

$$w_{i,j}^{new} = w_{i,j}^{old} + \Delta w_{i,j}, \quad \Delta w_{j,i} = g(y_j) [x_i - w_{i,j}] = d \cdot (x_i - w_{i,k}),$$

де  $v_{j,i}^{old}$ ,  $v_{j,i}^{new}$ ,  $w_{i,j}^{old}$ ,  $w_{i,j}^{new}$  – відповідно вагові коефіцієнти матриць  $V$  и  $W$  до та після модифікації.

Всі інші обчислення виконуються відповідно до класичного алгоритму мережі ART-2. Такий класифікатор на основі мережі ART-2 має наступні переваги при рішенні задачі ідентифікації: стабільність інформації, що зберігається, можливість динамічно розширювати власну базу знань, високу заводозахищеність, інваріантність щодо порядку пред'явлення вхідних векторів, здатність автоматично виправляти помилки, які були отримані на попередніх етапах навчання.

На рис. 4.42 наведений приклад програмного коду блока нейрорежевого класифікатора, реалізованого у середовищі LabVIEW.

Розроблений класифікатор на основі мережі ART-2 має наступні переваги при вирішенні задачі ідентифікації: стабільність інформації, що зберігається, можливість динамічно розширювати власну базу знань, високу заводозахищеність, інваріантність щодо порядку пред'явлення вхідних векторів, здатність автоматично виправляти помилки, які були отримані на попередніх етапах навчання.

Також був розроблений новий алгоритм роботи шару розпізнавання  $F_2$ . У запропонованій мережі робота шару розпізнавання описується рівняннями:

$$T_j = \sum_i x_i w_{i,j}, \quad T_k = \max \{T_j : j = \overline{1, m}\},$$

де  $w_{i,j}$  – елементи матриці вагових коефіцієнтів  $W$ ;  $x_i$  – елементи вхідного вектора  $X$ .

Функціонування шару порівняння  $F_1$  залишається без змін. Модифікація вагових коефіцієнтів під час навчання відбувається за наступним алгоритмом:

$$v_{j,i}^{new} = v_{j,i}^{old} + \Delta v_{j,i}, \quad \Delta v_{j,i} = g(y_j) [u_i - v_{j,i}] = d \cdot (u_i - v_{k,i}),$$

$$w_{i,j}^{new} = w_{i,j}^{old} + \Delta w_{i,j}, \quad \Delta w_{j,i} = g(y_j) [x_i - w_{i,j}] = d \cdot (x_i - w_{i,k}),$$

де  $v_{j,i}^{old}$ ,  $v_{j,i}^{new}$ ,  $w_{i,j}^{old}$ ,  $w_{i,j}^{new}$  – відповідно вагові коефіцієнти матриць  $V$  и  $W$  до та після модифікації.

Всі інші обчислення виконуються відповідно до класичного алгоритму мережі ART-2.

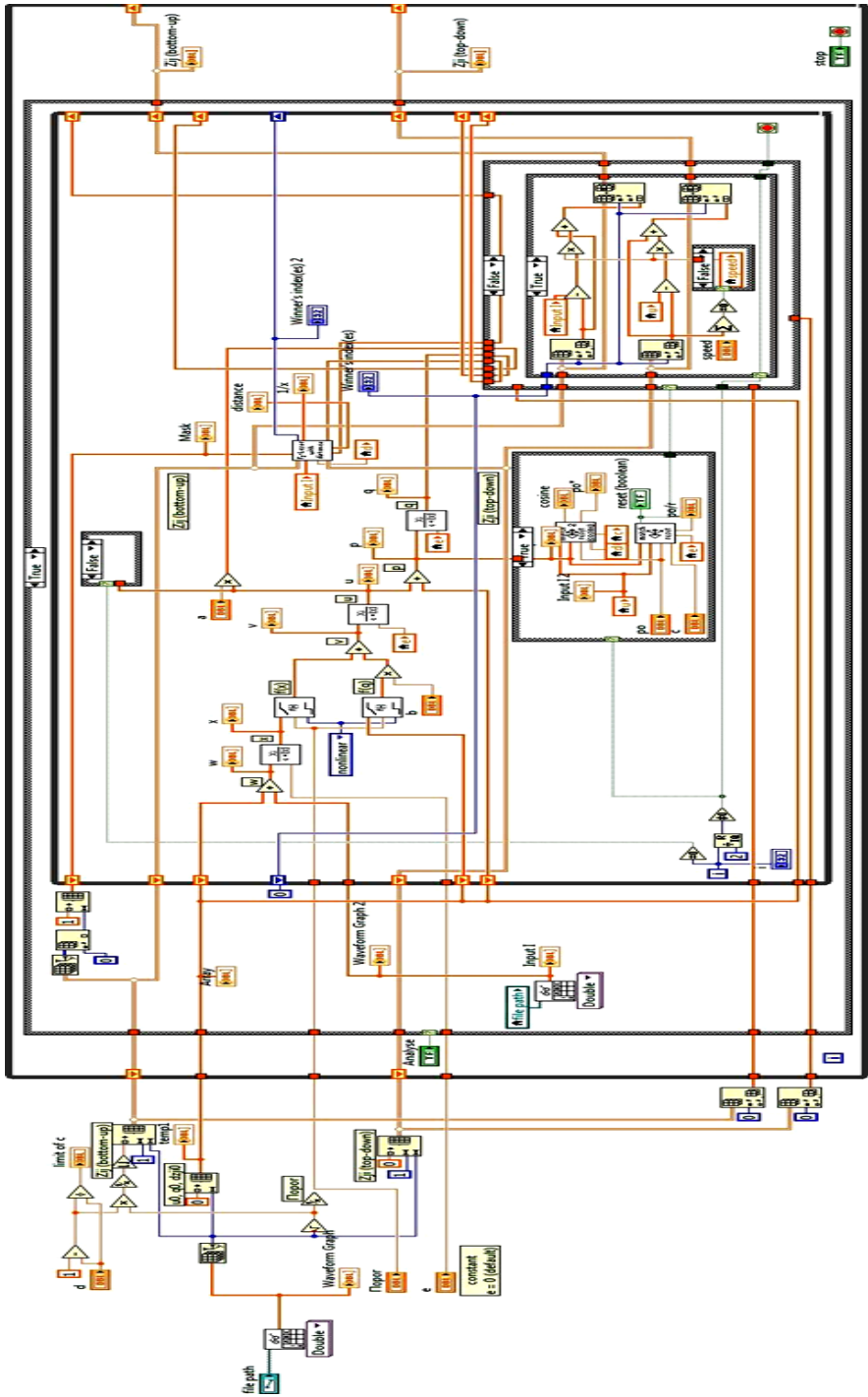


Рис. 4.42. Приклад програмного коду блока нейромережевого класифікатора

Розроблений класифікатор на основі мережі ART-2 має наступні переваги при вирішенні завдання ідентифікації: стабільність інформації, що зберігається, можливість динамічно розширювати власну базу знань, високу захищеність від завад, інваріантність щодо порядку пред'явлення вхідних векторів, здатність автоматично виправляти помилки, які були на попередніх етапах навчання.

## Література

1. *Ануфриев И.Е.* Самоучитель MatLab 5.3/6.x. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 736 с.
2. *Рубичев Н.А.* Измерительные информационные системы: учебное пособие. – М.: Дрофа, 2010. – 334 с.
3. *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія / В.П. Бабак та ін.; за ред. В.П. Бабака.* – К.: Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015. – 512 с.
4. *Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика.* – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.
5. *Петрухин В.В., Петрухин С.В.* Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.
6. *Трипалин А.С., Буйло С.И.* Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1986. – 160 с.
7. *Vallen systeme.* Датчики акустической эмиссии Режим доступа: <http://vallenae.ru/static/sensors>
8. *ООО «ГлобалТест».* Преобразователи акустической эмиссии. Режим доступа: <http://globaltest.ru/page/converters-acoustic-emission-menu/>
9. *ЗАО «НПФ «Диатон».* Датчики. Режим доступа: <http://www.diatontest.ru/sensors.htm>
10. *Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. В.В. Клюева.* – М.: Машиностроение, 1978. – 448 с.



11. *Вибродиагностика*: Монографія / Г.Ш. Розенберг, Е.З. Мадорский, Е.С. Голуб и др.; под ред. Г.Ш. Розенберга. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 284 с.
12. *Сеppидж М., Лухт Т.Р.* Брюль и Кьер. Пьезоэлектрические акселерометры и преусилители. Справочник по теории и эксплуатации. – Дания, Глоструп: Ларсен и сын, 1987. – 187 с.
13. *Brüel & Kjør.* Датчики вибрации. Режим доступа: <http://www.bksv.ru/Products/transducers/vibration/>
14. *ООО «ВиброСпектр».* Вибрация, ударные нагрузки. Режим доступа: <http://www.pcb-group.ru/index.php?zi=44&chr=showpage>
15. *ООО «ГлобалТест».* Датчики вибрации. Режим доступа: <http://globaltest.ru/page/vibrodatchiki/>
16. *ЗАО «Вибро-прибор».* Датчики вибрации. Режим доступа: <http://www.vpribor.spb.ru/produkcija/datchiki-vibracii.html>
17. *«Виброприбор».* Вибропреобразователи и микрофоны. Режим доступа: <http://vibropribor.ru/kategoriya-produkcii/vibropreobrazovateli-i-mikrofony.html>
18. *Seung H.M., Kim Y.Y.* Generation of omni-directional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer // NDT and E International. – 2016. – Vol. 80. – P.6-14.
19. *Ribichini R., Cegla F., Nagy P.B., Cawley P.* Experimental and numerical evaluation of electromagnetic acoustic transducer performance on steel materials // NDT and E International. – 2012. – Vol. 45. – P. 32-38.
20. *Kwun H., Teller C.M.* Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod // Journal of the Acoustical Society of America. – 1994. – Vol. 96. – P. 1202-1204.
21. *Vinogradov S.A.* Magnetostrictive transducer for torsional guided waves in pipes and plates // Materials evaluation. – 2009. – Vol. 67. – P. 333-341.
22. *Патент 104567* України. Ультразвуковий малоапертурний магніострикційний перетворювач / В.П. Бабак, І.В. Богачев; заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ. – а201306020; заявл. 15.05.13; опубл. 10.02.14, Бюл. №3.
23. *Патент 107629* України. Матриця малоапертурних магніострикційних перетворювачів/ В.П. Бабак, І.В. Богачев; заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ. – а201312825; заявл. 04.11.13; опубл. 26.01.15, Бюл. №2.
24. *Бабак В.П., Берегун В.С., Красильников А.И., Полобюк Т.А.* Имитационное моделирование шумовых информационных сигналов,

- возникающих при работе теплоэнергетического оборудования // Научни известия на НТСМ. – год. XXI, бр. 2 (139) – 2013. – С. 124–128.
25. *Красильников А.И., Березун В.С.* Применение метода ортогональных представлений для нахождения плотностей вероятности типовых моделей флуктуационных сигналов // Радиозлектроника. – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 13–21. – (Известия вузов).
  26. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. Часть I. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976. – 496 с.
  27. *Комашинский, В. И.* Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2003. – 94 с.
  28. *Фишер-Крипс А.С.* Интерфейсы измерительных систем. Справочное руководство / А.С. Фишер-Крипс; пер. с англ. – М.: Технологии, 2006. - 336 с.
  29. *Бабак С.В.* Идентификация импульсных сигналов на основе нейросетевых технологий / С.В. Бабак, В.С. Еременко // Proceedings 25-th National scientific symposium with international participation “Metrology and metrology assurance 2015”, September 7 – 11, 2015, Sozopol, Bulgaria. – P. 420 – 424.

## 5. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ МОДУЛІВ ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВОК

### 5.1. Методи та засоби контролю якості палива

Однією з найважливіших характеристик палива є *теплота згоряння*. Для визначення теплоти згоряння палив та хімічних речовин традиційно використовують ентальпійні водяні бомбові калориметри, але останніми роками для таких вимірювань набувають розповсюдження калориметри теплового потоку, або *кондуктивні калориметри* [1], які мають вагомі переваги порівняно з традиційними водяними, зокрема, не вимагають кондиціонування і точного зважування води, легко автоматизуються та не потребують спеціальних приміщень для експлуатації.

В кондуктивному калориметрі комірку з реакційною посудиною – калориметричною бомбою – оточено чутливою калориметричною оболонкою, вмонтованою в масивний термостатований блок. Оболонку з'єднано з вимірювально-обчислювальною системою, яка вимірює та обробляє сигнали первинних перетворювачів теплового потоку та температури. На поверхні масивного блоку розміщено електричний нагрівник, що слугує виконавчим елементом системи терморегулювання, яка за сигналом перетворювача температури регулює електричну потужність нагрівника так, щоб підтримувати сталі значення температури блоку. Охолодження зовнішньої поверхні калориметричного блоку здійснюється конвективно шляхом обдування за допомогою вентилятора.

При вимірюваннях зразок досліджуваного матеріалу розміщують в калориметричній бомбі, заповнюють її киснем та встановлюють в комірку, а після стабілізації температури в калориметрі підпалюють зразок. Теплота, що виникає внаслідок згоряння зразка, проходить крізь калориметричну чутливу оболонку, внаслідок чого генерується електричний сигнал, що надходить на вимірювально-обчислювальну систему, де здійснюється його вимірювання та інтегрування. Інтегральне значення сигналу від моменту підпалу зразка до моменту повторної стабілізації температури в калориметрі пропорційне кількості теплоти, що виділилася в реакційній посудині.

Сучасні калориметри теплового потоку відповідають вимогам щодо точності вимірювань, зменшення тривалості підготовки та проведення досліду, але вони мають і недоліки – неконтрольовані зміни температури та швидкості руху повітря, що обдуває калориметричний блок, та інші зовнішні збурення спричиняють коливання сигналу кало-

риметричної оболонки, що може призвести до погіршення метрологічних характеристик приладу.

Добре відомий спосіб боротьби з впливом зовнішніх збурень у кондуктивних калориметрах – це використання диференційної схеми підключення чутливих елементів. Проте, диференціальні калориметри теплового потоку мають достатньо великі розміри, в їх термостатованих блоках під час вимірювань може виникати неоднорідність температури, що може збільшити похибку вимірювань. Торцеві поверхні масивного блоку та калориметричних комірок з кожного боку вкриті шарами теплоізоляційного матеріалу, але це не є ідеальним тепловим захистом, внаслідок чого зовнішні збурення, такі як неконтрольовані зміни температури зовнішнього повітря або пряме падіння сонячних променів, впливають на теплове поле в масивному блоці, а теплота, що виділяється в калориметричній комірці внаслідок досліджуваної реакції, може частково проходити назовні.

Зменшення неоднорідності температури та тепловтрат з торців калориметричного термостатованого блоку можна досягти, розмістивши на кожному торці масивного блоку перетворювач теплового потоку та нагрівник торця, які разом з регулятором утворять активну адіабатну теплоізоляцію для зменшення неконтрольованого теплообміну [2]. На рис. 5.1 зображено схему загального вигляду диференціального калориметра в розрізі.

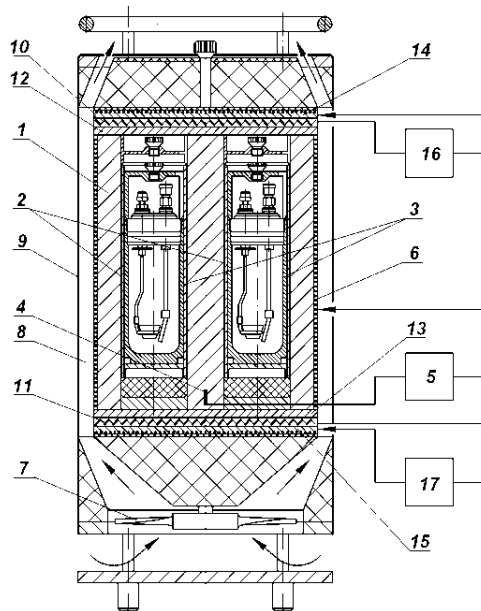


Рис. 5.1. Схема диференціального калориметра

В масивному термостатованому блоці 1 розміщені дві калориметричні комірки з чутливими оболонками 2 та реакційними посудинами 3, а також перетворювач температури 4, який підключений до входу терморегулятора 5, вихід якого підключений до електричного нагрівника 6, розташованого на боковій поверхні масивного блоку. Бокова поверхня блока 1 має систему керованого повітряного охолодження, яка містить вентилятор 7 та кільцевий коаксіальний канал 8 для охолоджувального повітря, утворений боковою поверхнею блока 1 та корпусом 9.

На верхньому торці масивного блоку розташовано ПТП 10, а на іншому торці – ПТП 11. Одна з сторін кожного з цих сенсорів знаходиться у тепловому контакті з масивним блоком через температуровирівнювальні пластини 12 та 13, а на іншому боці розміщені компенсаційні електричні нагрівники торців 14 та 15. Вихід верхнього ПТП 10 підключений до входу регулятора 16, вихід якого підключений до електричного нагрівника верхнього торця 14, а вихід нижнього ПТП 11 підключений до входу регулятора 17, вихід якого підключений до електричного нагрівника нижнього торця 15.

Оскільки температура термостатування масивного блоку встановлюється вищою за температуру оточуючого повітря, крізь торці масивного блоку почне протікати тепловий потік направлений від масивного блоку і при цьому ПТП 10 та 11 генерують сигнали, які подаються на входи регуляторів 16 та 17, які підводять електричну потужність на нагрівники торців 14 та 15, в результаті чого теплові потоки крізь торці масивного блоку компенсуються. Якщо тепловий потік крізь торці термостатованого блоку збільшується, наприклад, внаслідок тепловиділення від досліджуваної реакції в реакційних посудинах 3, сенсори 10 та 11 генерують сигнал, пропорційний тепловому потоку крізь відповідний торець. Сигнали ПТП 10 та 11 подаються на входи регуляторів 16 та 17, які підвищують значення електричної потужності, що подається на нагрівники торців 14 та 15, за рахунок чого компенсується наявний тепловий потік. В разі зменшення тепловиділення в комірках зміна теплового потоку крізь торці автоматично призводить до зменшення значення електричної потужності, що подається на нагрівники торців. Таким чином, на кожному торці масивного блоку утворено систему автоматичного підтримання нульового теплового потоку – активна адіабатна теплоізоляція, яка забезпечує підвищення точності вимірювання теплоти, що виділяється або поглинається при фізико-хімічних та біологічних процесах, за рахунок зменшення неконтрольованого теплообміну крізь торці термостатованого блоку.

Розглянута повномасштабна диференціальна схема підходить здебільшого для мікрокалориметрів, оскільки для неї характерна обмеженість верхньої границі вимірюваної теплової потужності внаслідок того, що система термостатування теплоізованого масивного блоку не здатна відводити значну кількість теплоти, що виділяється в реакційній посудині. Крім того, наявність двох однакових комірок призводить до збільшення габаритів та маси пристрою. Ці недоліки особливо наглядно проявляються при спробі створення диференціального бомбового калориметра за класичною схемою при використанні бомб, що за розмірами відповідають вимогам діючих стандартів до маси проб палив.

Для розв'язання зазначених протиріч запропоновано модель квазі-диференціального калориметра [3, 4], що має дві комірки – основну робочу з необхідними розмірами та комірку порівняння значно меншої висоти. Загальна структура такого калориметра показана на рис. 5.2.

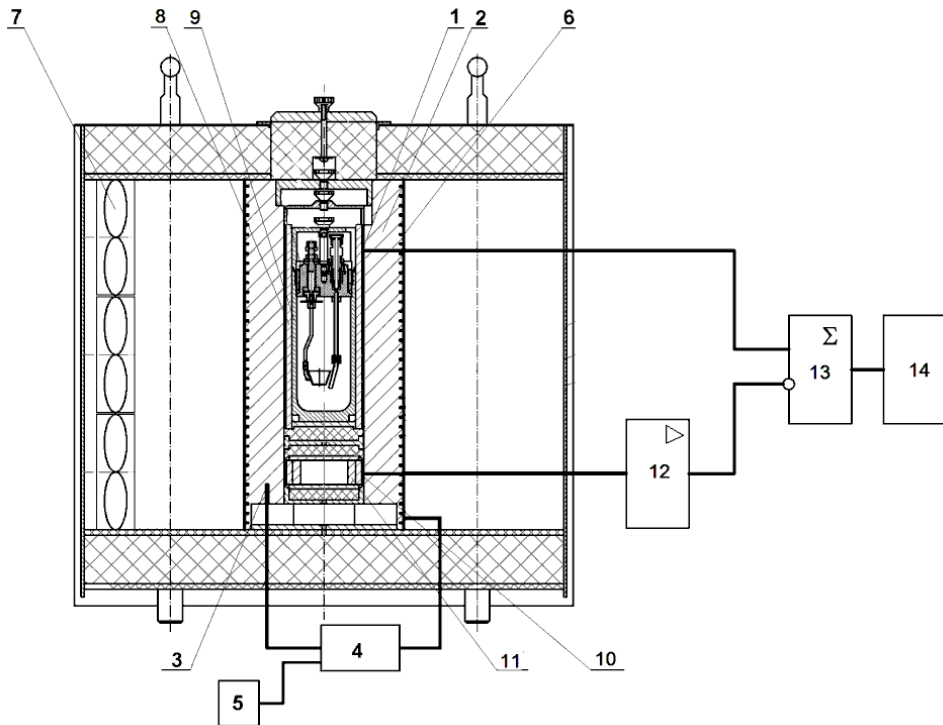


Рис. 5.2. Схема квазідиференціального бомбового калориметра

Тепловий блок приладу має калориметричну чутливу оболонку 1, вмонтовану в термостатований блок 2. Система термостатування блоку 2 складається з вмонтованого у блок перетворювача температури 3,

електронного терморегулятора 4 із задавачем значення температури 5. Виконавчими елементами системи термостатування є електричний нагрівник 6, який розташований на зовнішній поверхні блоку 2 і підключений до виходу регулятора 5, та блок вентиляторів 7, який утворює потік охолоджувального повітря в каналі, що оточує блок 2.

В калориметричній оболонці 1 розташовані комірка 8 та калориметрична бомба 9, що складається зі стакану та кришки з вентилями. Під основною калориметричною оболонкою 1 співвісно з нею розташовано додаткову компенсаційну оболонку 10, яка має той же самий діаметр, конструкцію та щільність термоелементів, що й в основній оболонці, а висотою приблизно у 10 разів менша. У компенсаційній оболонці 10 розміщено імітатор комірки 11 та реакційної посудини, що має питому теплоємність на одиницю площі поверхні оболонки таку ж саму, як і вміст основної оболонки. Імітатор комірки і реакційної посудини виконаний складеним з двох або більшої кількості частин, причому між частинами, що складають імітатор, розташовані регульовані теплові опори. Така конструкція дозволяє шляхом підбору теплових опорів між частинами імітатора при настроюванні калориметра отримувати таку ж саму динаміку зміни сигналу компенсаційної оболонки при впливі зовнішнього збурення, як і динаміка зміни сигналу основної оболонки при впливі того ж збурення.

Вихід компенсаційної оболонки 10 з'єднаний зі входом підсилювача 12, вихід якого з'єднаний з інвертувальним входом суматора 13, до неінвертувального входу якого приєднаний вихід основної калориметричної оболонки 1. Вихід суматора 13 з'єднаний зі входом вимірювально-обчислювальної системи 14.

Між основною калориметричною оболонкою 1 та компенсаційною оболонкою 16 розташовано тепловий екран з високотеплопровідного матеріалу, який має тепловий контакт з термостатованим блоком 2. Така конструкція забезпечує теплову розв'язку між основною та компенсаційною калориметричними оболонками. Теплові ефекти, що виникають в реакційній посудині в основній калориметричній оболонці, безпосередньо не впливають на сигнал компенсаційної оболонки.

На етапі настроювання пристрою блок нагрівають до заданої температури і починають реєструвати сигнали калориметричних оболонок, а також сигнали на виходах підсилювача та суматора.

Після встановлення стаціонарного режиму задавачем температури задають режим зміни температури термостатованого блоку від першого усталеного значення до іншого, що відрізняється на 2...10 К, та реєструють вказані сигнали у перехідному процесі.

На рис. 5.3, *а,б*, представлені графіки зміни в часі вказаних сигналів. Зміні температури корпусу відповідає крива 1, сигнал основної калориметричної оболонки представлений кривою 2, компенсаційної – кривою 3, а сигнали на виходах підсилювача та суматора, відповідно,

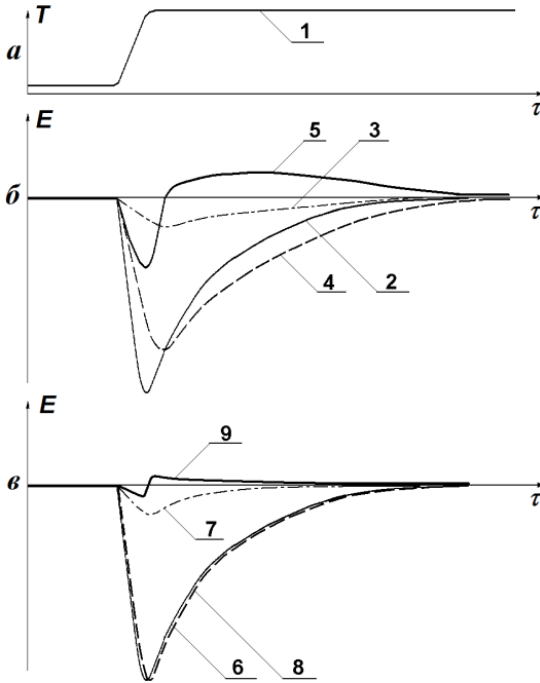


Рис.5.3. Графіки зміння сигналів під час настроювання: *а* – зміння температури корпусу; *б* – зміння сигналів до регулювання; *в* – зміння сигналів після регулювання

кривими 4 та 5. По закінченні перехідного процесу регулюванням теплових опорів у складеному імітаторі комірки і реакційної посудини змінюють сталі часу вихідного сигналу компенсаційної оболонки так, щоб вони наблизились до сталих часу вихідного сигналу основної калориметричної оболонки.

На підставі зареєстрованих значень сигналів калориметричних оболонок встановлюють значення  $K$  коефіцієнту підсилення підсилювача, яке визначають за розрахунковою формулою:

$$K = \int_0^{\tau_n} E_{OO} d\tau / \int_0^{\tau_n} E_{KO} d\tau, \quad (5.1)$$

де  $E_{OO}$  і  $E_{KO}$  – сигнали основної та компенсаційної оболонки, виміряні протягом

перехідного процесу.

Перевіряють результати настроювання, знову задаючи режим зміння температури термостатованого блоку та проводячи реєстрацію сигналів у перехідному процесі, як це показано на рис. 5.3, *в*, де крива 6 – сигнал основної калориметричної оболонки; 7 – сигнал компенсаційної оболонки; 8 – сигнал на виході підсилювача; 9 – сигнал на виході суматора. Внаслідок проведеного регулювання – вирівнювання сталих часу та встановлення коефіцієнту підсилення – зміна сигналу 8 на виході підсилювача близька до зміни сигналу 6 основної калориметричної оболонки, а зміна сигналу 9 на виході суматора значно менша, ніж



відповідна зміна цього сигналу до настроювання (поз. 5 на рис. 5.3, б). Тобто вихідний сигнал стає малочутливим до зовнішніх збурень.

Розглянутий принцип побудови квазидиференціального калориметра теплового потоку реалізовано в моделі КТС-4 (рис. 5.4). До складу приладу, окрім теплового та електронного блоків, входять дві калориметричні бомби та сервісне обладнання.



Рис. 5.4. Фото калориметра КТС-4

Основні технічні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання кількості теплоти від 10 до 35 кДж;
- похибка вимірювань не більше  $\pm 0,1\%$ ;
- загальна маса калориметра 70 кг.

Калориметр для визначення теплоти згоряння палива КТС-4 пройшов метрологічну атестацію в ДП «Укрметрестестандарт» і за своїми метрологічними характеристиками не поступається закордонним робочим засобам вимірювання, а його вартість у 3...4 рази нижча від імпортованих аналогів.

За допомогою такого калориметра можна дослідити теплоту згоряння як традиційних енергетичних палив (вугілля, нафтопродуктів), так і нових видів біопалива [5].

## 5.2 Моніторинг процесу спалювання палива

Моніторинг процесу спалювання палива зводиться до контролю за вмістом вихідних газів, при цьому об'єктами дослідження виступають котел та повітряно-паливний тракт [6]. Структурна схема моніторингу процесу спалювання палива наведена на рис. 5.5.

Ефективність роботи котельного агрегату визначається на основі ефективності функціонування його вузлів: пальників, поверхонь нагріву, теплообмінників (економайзерів, підігрівачів повітря), тягодуттєвих машин та інших пристроїв. Однією з найбільш важливих складових процесу горіння є ефективність спалювання палива, тобто економічність роботи безпосередньо пальників і пов'язаного з ним устаткування (вентилятора і димососів) [6].

Рівняння теплового балансу котла в загальному вигляді при стаціонарному режимі функціонування має наступний вигляд:

$$Q_N = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (5.2)$$

де  $Q_N$  – наявна теплота,  $Q_1$  – корисна теплота,  $Q_2$  – втрати теплоти з відхідними газами,  $Q_3$  – втрати теплоти з хімічною неповнотою спалювання,  $Q_4$  – втрати теплоти з механічною неповнотою спалювання,  $Q_5$  – втрати теплоти від поверхонь нагріву,  $Q_6$  – втрати з фізичною теплотою шлаку.

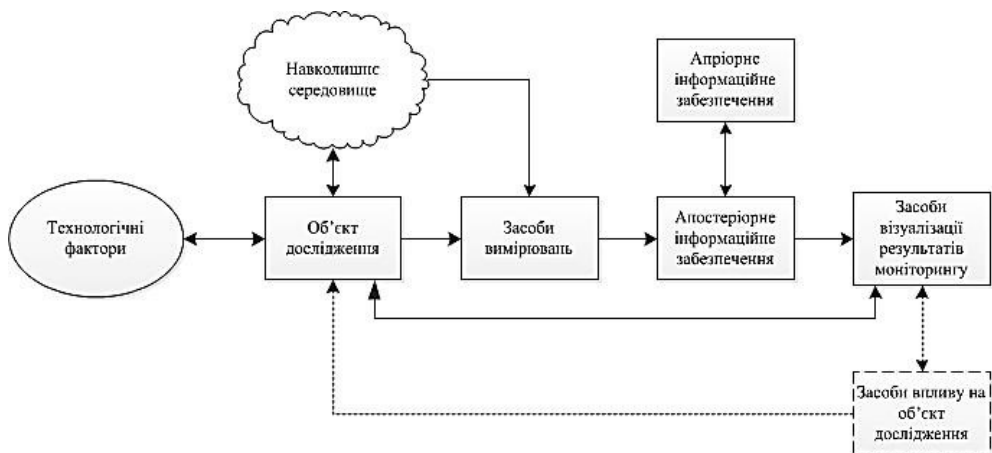


Рис. 5.5. Структурна схема моніторингу процесу спалювання палива

Економічність спалювання палива характеризується значенням ККД, що в свою чергу представляє різницю між тепловою енергією, що виділилась під час спалювання палива, та втратами енергії в коте-

льному агрегаті. ККД може бути визначений за прямим та зворотним балансом:

$$Q_1 / Q_N = q_1 = \eta_d - \text{ККД за прямим балансом};$$

$$\eta_r = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - \text{ККД за зворотним балансом}.$$

Основними втратами теплоти при спалюванні природного газу є втрати тепла з відхідними газами; теплові втрати, пов'язані з хімічною неповнотою спалювання; втрати теплоти від поверхонь нагріву.

Втрати тепла з відхідними газами залежать від: різниці температур вихідних газів та повітря, що подається в топку котла, та від вмісту залишкового кисню у відхідних газах, що характеризує коефіцієнт надлишку повітря ( $\alpha$ ) чи співвідношення «повітря-паливо». Ці втрати є значними (для котлів малої та середньої потужності вони можуть скласти від 10 до 26%, для газових котлів та котлів електростанцій – 6-12%) та переважно впливають на ККД котлоагрегату.

На рис. 5.6 приведені втрати теплоти з відхідними газами, що розраховуються за методикою М.Б. Равича [7], при різних значеннях температури вихідних газів.

Згідно методики, що базується на узагальнених характеристиках палив,  $q_2$  при спалюванні природних та попутних газів визначають за

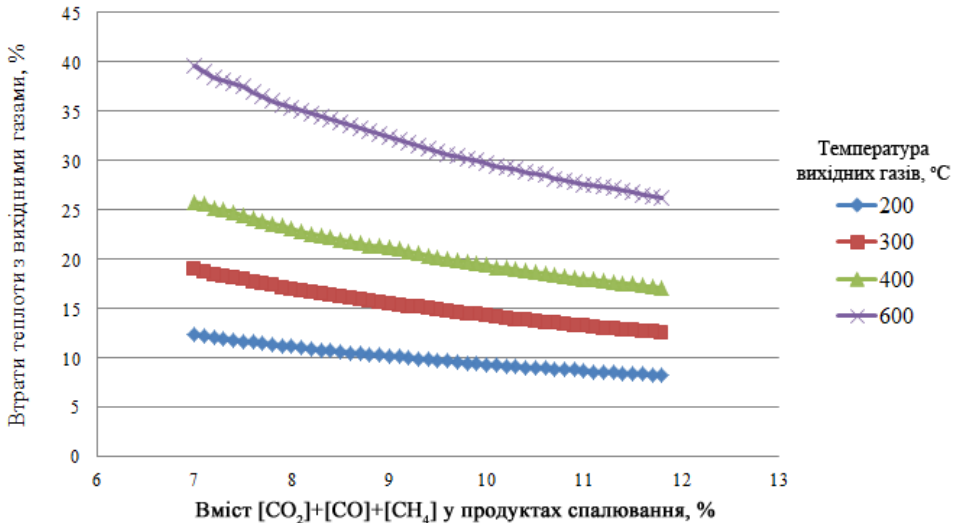


Рис. 5.6. Втрати теплоти з відхідними газами в котлоагрегаті при різному складі продуктів спалювання

формулою:

$$q_2 = 0,01 \cdot z \cdot (t_g - t_a), \% \quad (5.3)$$

де  $z$  приймає табличне значення [7],  $t_g$  – температура вихідних газів,  $t_a$  – температура навколишнього середовища.

При цьому, підвищення  $t_g$  на  $10^\circ\text{C}$  вище нормального значення для даного навантаження котла збільшує  $q_2$  не менше ніж на 0,5%, а підвищення  $\alpha$  на 0,1 збільшує  $q_2$  приблизно на 1%.

Втрати теплоти з хімічним недопалом палива залежать від: коефіцієнта надлишку повітря, якості змішування палива та повітря; повноти спалення палива та вмісту горючих залишків у вихідних газах ( $[\text{CO}] + [\text{H}_2] + [\text{CH}]$ ). Ці втрати повинні бути мінімізовані за правильної організації процесу спалювання палива.

Згідно методики, наведеної вище, втрати теплоти з хімічної неповнотою спалювання  $q_3$  визначають згідно даних про вміст продуктів спалювання палива за формулами:

$$q_3 = \frac{35 \cdot [\text{CO}] + 30 \cdot [\text{H}_2] + 100 \cdot [\text{CH}_4]}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4} \text{ – для природного газу;}$$

$$q_3 = \frac{40 \cdot [\text{CO}] + 30 \cdot [\text{H}_2] + 110 \cdot [\text{CH}_4]}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4} \text{ – для нафтопромислового газу.}$$

Втрати теплоти від неповного спалення палива можуть бути значними, та досягати значень в діапазоні від 3,5% до 7% (в залежності від коефіцієнта надлишку повітря). При цьому за певних конструкційних особливостей горючі гази можна спалювати без втрат  $q_3$ .

Втрати теплоти в навколишнє середовище  $q_5$  включають теплоту, що віддається обмуровкою та іншими частинами котла навколишньому середовищу. Значення  $q_5$  залежить від якості обмурівки та ізоляції зовнішніх стін агрегату і від різниці температур між зовнішньою його поверхнею і навколишнім середовищем. Для водогрійних котлів типу КВ-ГМ, КВГ, ТВГ, КСВТ, КСВ, Turbotom залежність втрат теплоти в навколишнє середовище  $q_5$  від теплопродуктивності котла наведено на рис. 5.7.

Потрібно відмітити, що для різного роду котлів значення параметру  $q_5$  згідно рис. 5.7 не відповідає дійсності у зв'язку з їхніми конструкційними особливостями. Тому для порівняння функціонування котлів та інших теплових агрегатів, що працюють на природному газі за основу приймають коефіцієнт використання палива (КВП,  $\eta_u$ ):

$$\eta_u = 100 - (q_2 + q_3). \quad (5.4)$$

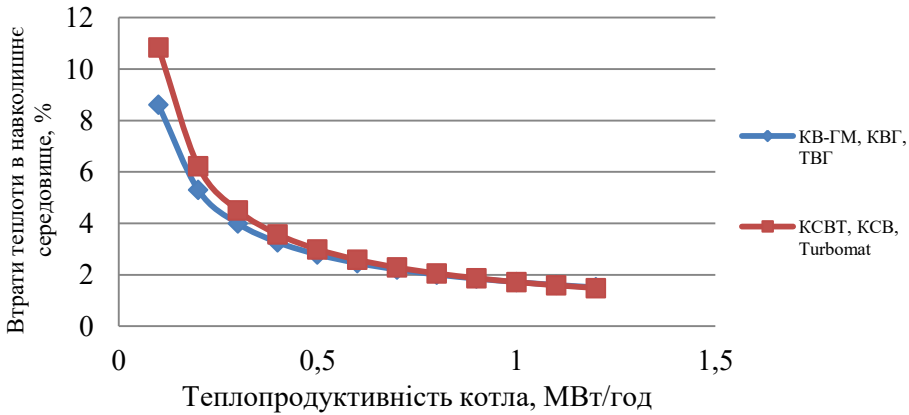


Рис. 5.7. Залежність втрати теплоти у навколишнє середовище від теплопродуктивності котла

На рис. 5.8 представлено теоретичний графік залежності складу продуктів спалювання природного газу від коефіцієнту надлишку повітря при повному спаленні палива.

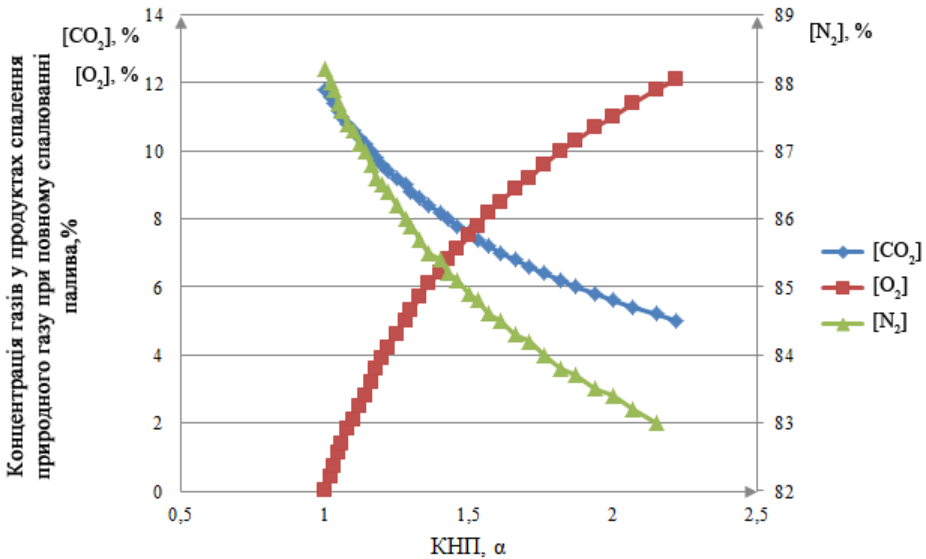


Рис. 5.8. Залежність складу продуктів спалювання від коефіцієнта надлишку повітря

В таблиці 5.1 подано дані щодо складу та кількості продуктів спалювання метану (як головного компоненту природного газу).

Таблиця 5.1. Склад та кількість продуктів спалювання метану

Показник		Коефіцієнт надлишку повітря, $\alpha$							
		1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2	
Витрати повітря, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>		9,52	10,47	11,42	12,38	13,33	14,28	19,04	
Кількість продуктів спалювання, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	<i>вологих</i>	10,52	11,47	12,42	13,38	14,33	15,28	20,04	
	<i>сухих</i>	8,52	9,47	10,42	11,38	12,33	13,28	18,04	
Склад продуктів спалювання, об. %	<i>вологих</i>	[H <sub>2</sub> O]	19,11	17,43	16,1	14,95	13,96	13,09	9,98
		[CO <sub>2</sub> ]	9,51	8,72	8,05	7,48	6,98	6,54	4,99
		[O <sub>2</sub> ]	–	1,74	3,22	4,49	5,58	6,54	9,98
		[N <sub>2</sub> ]	71,38	72,11	72,63	73,08	73,48	73,83	75,05
	<i>сухих</i>	[CO <sub>2</sub> ]	11,74	10,56	9,59	8,79	8,11	7,53	5,54
		[O <sub>2</sub> ]	–	2,11	3,84	5,27	6,49	7,53	11,09
		[N <sub>2</sub> ]	88,26	87,33	86,57	85,94	85,4	84,94	83,37

З наведених даних видно, що зменшення коефіцієнта надлишку повітря сприяє зниженню концентрації кисню у вихідних газах, підвищенню ККД, і як наслідок, зниженню температури димових газів та споживання електроенергії вентилятором і димососом.

Одночасно з цим знижується рівень викидів шкідливих оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), що призводить до зменшення екологічного забруднення.

Поява хімічного недопалу (CO) в продуктах спалення палива означає межу допустимого впливу на зменшення подачі повітря. Ця межа є нестабільною і залежить як від характеристик пальників, так і від навантаження котла. На її положення впливає також: склад палива; кліматичні умови; температура палива і повітря; технічний стан обладнання і багато інших чинників. Область економічно вигідного режиму спалювання палива відповідає малим значенням вмісту кисню (0,5-1,5%) і появі «слідів» хімічного недопалу, тобто вмісту CO на рівні більше 200 ppm [8].

Оптимальний склад вихідних газів котельної установки наведено в табл. 5.2 [9].

Таблиця 5.2. Оптимальний склад сухих продуктів спалювання природного газу

Компоненти	Оптимальна концентрація, %	Примітка
[O <sub>2</sub> ]	0,5-5	Кисень
[CO <sub>2</sub> ]	12-16	Діоксид вуглецю
[CO]	<0,01	Монооксид вуглецю
[NO <sub>x</sub> ]	<0,02	Оксиди нітрогену
[CH <sub>4</sub> ]	<0,01	Метан
[H <sub>2</sub> O]	~0	Вода у вигляді пари
Інші складові	~0	Тверді залишки

Моніторинг процесу спалювання палива здійснюється на основі фізико-хімічних методів контролю, порівняння яких за допомогою універсального якісного критерію ефективності (УЯКЕ) наведено в табл. 5.3.

Більшість котелень працюють за режимними картами, які оновлюються кожні три роки. У цих картах витрата повітря, що подається для спалювання, не залежить від зміни характеристик палива та стану обладнання.

При складанні режимної карти наладчики свідомо збільшують витрату повітря, що подається для спалювання, для виключення хімічного недопалу, викликаного відсутністю стаціонарних приладів контролю складу газів, що відходять, та тим, що котли нерідко працюють з ручним регулюванням подачі палива і повітря.

Крім цього, відсутність контролю герметичності топки та димододів призводить до збільшення продуктивності димососа через присоси повітря з котельні.

В процесі експлуатації оператор візуально визначає якість спалювання, в результаті чого витрата повітря може збільшитися ще більше і робоча точка зміститься в область великих  $\alpha$ . Все це призводить до перевитрати палива і підвищеного викиду забруднюючих речовин в атмосферу.

Наблизити роботу котлоагрегату до найбільш раціональних режимів функціонування можна за допомогою газоаналізуючих пристроїв (табл. 5.4) чи систем автоматичного керування процесом спалювання (табл. 5.5).

Більшість з останніх ґрунтується на застосуванні комбінованого методу інформування про вміст залишкового кисню та продуктів неповного спалювання з перехресним обмеженням, що дозволяє більш точно (в порівнянні з паралельним управлінням) підтримувати співвідношення «повітря-паливо».






Такі системи знижують вміст кисню у вихідних газах до того часу, поки в них не з'являється монооксид вуглецю (оптимальним є рівень в межах від 50 до 200 ppm) [10]. Поява CO у вихідних газах свідчить про утворення локальних зон в топці котла з хімічним недопалом палива. До недоліків таких систем можна віднести: наявність систем відбору та підготовки проби, що значно збільшує час вимірювання; відсутність частотного регулювання вентиляторів та димососів, що ускладнює підтримку оптимального режиму спалення палива; тривалий час інсталяції системи; порівняно значний термін окупності; призначення виключно для котлоагрегатів великої потужності.

Таблиця 5.3. Порівняння методів контролю за складом вихідних газів на основі УЯКЕ

Метод	Параметр					УЯКЕ
	Швидкодія	Надій-ність	Багатоко-мпонент-ність	Вибір-ковість	Вартість	
Магнітний	0	1	1	0	0	0,4
Термокондуктометричний	0	1	1	0	1	0,6
Термохімічний	0	1	1	0	0	0,4
Пневмоакустичний	0	0	0	0	1	0,2
Пневматичний	0	1	1	0	1	0,6
Інфрачервоний	1	1	1	1	0	0,8
Хемілюмінесцентний	1	0	1	1	1	0,8
Напівпровідниковий	0	1	1	0	0	0,4
Полярографічний	1	1	1	1	1	1
Флуоресцентний	1	0	1	1	1	0,8
Фотокалориметричний	1	0	1	0	0	0,4
Іонізаційний	1	0	1	0	0	0,4
Термомагнітний	1	1	1	1	0	0,8



Таблиця 5.4. Портативні газоаналізуючі пристрої

Назва	Речовини	Час встановлення показань, с	Країна-виробник	Орієнтована вартість, \$	Фото
ПЕМ-4М2	O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	120	Російська Федерація	за запитом	
ПГА-600	O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , Cl <sub>2</sub>	60	Російська Федерація	~900	
TESTO-350	O <sub>2</sub> , CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	60	Німеччина	~4700	
ОКСИ-5М	O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	30	Україна	~1500	
GreenLine 8000	O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	180	Італія	за запитом	

Таблиця 5.5. Системи керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах

Назва	Склад системи	Обмеження	Фото
ЕКО-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- перетворювач частоти привода вентилятора та димососа;</li> <li>- датчик тиску газу на пальнику;</li> <li>- датчики вмісту CO та O<sub>2</sub>;</li> <li>- датчик розрідження в димоході;</li> <li>- пульт управління «Логиконт»; GPRS-модем.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- для функціонування системи необхідне підключення до мережі Інтернет;</li> <li>- технологічна складність розробки;</li> <li>- значні експлуатаційні витрати при підключенні системи;</li> <li>- призначена виключно для котлоагрегатів великої потужності.</li> </ul>	
Факел-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- датчики CO та O<sub>2</sub>;</li> <li>- мікропроцесорний регулятор «Міні-терм-400»;</li> <li>- самописець «Технограф-160» витратомір пару.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- наявність систем відбору і підготовки проби;</li> <li>- відсутність частотного регулювання вентилятора та димососу;</li> <li>- відносно значний термін окупності (до 2 років).</li> </ul>	
IT16RN-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- система контролю за процесом спалювання СКПГ-1м;</li> <li>- блок пробо підготовки GMS-1;</li> <li>- табло індикації d116;</li> <li>- блок зв'язку та живлення CSB-1.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- наявність систем відбору і підготовки проби;</li> <li>- порівняно великий час інсталяції системи;</li> <li>- відносно значний термін окупності.</li> <li>- наявність систем відбору і підготовки проби;</li> </ul>	
АНГОР	<ul style="list-style-type: none"> <li>- газоаналізатор «АНГОР-С» (O<sub>2</sub>, CO);</li> <li>- контроллер «СПЕКОН СК-2»;</li> <li>- датчик тиску газу на пальнику.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- відсутність частотного регулювання вентилятора та димососу;</li> <li>- призначена для котлоагрегатів великої потужності.</li> </ul>	

Принципово новий підхід до моніторингу процесу спалювання палива ґрунтується на застосуванні ширококутового кисневого зонду (рис. 5.9) [11].

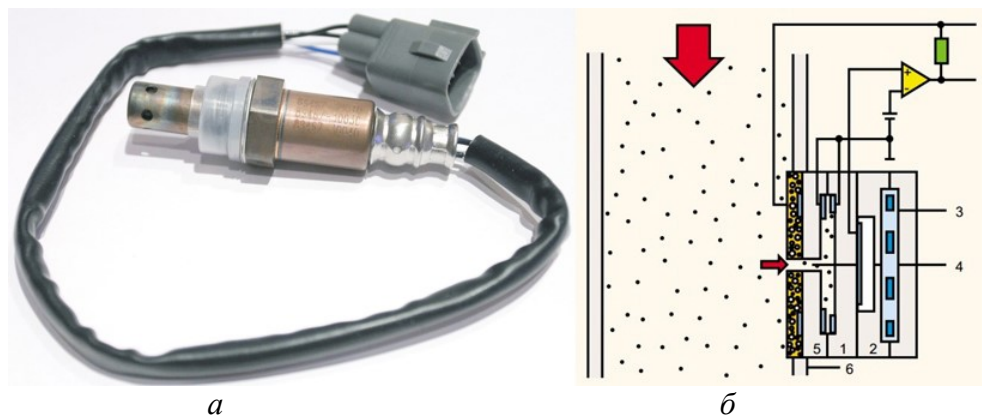


Рис. 5.9. Ширококутовий кисневий зонд:  
*а* – зовнішній вигляд; *б* – структурна схема (1 – комірка Нернста,  
 2 – референтна комірка, 3 – підігрівач, 4 – дифузійна щілина,  
 5 – насосна комірка, 6 – повітряно-паливний тракт)

Сьогодні кисневі зонди є широко розповсюдженими в автомобілебудуванні у зв'язку з постійно зростаючими жорсткими нормами до токсичності вихідних газів.

Суттєвою перевагою таких зондів є доокислення CO на поверхні сенсору, що містить у своєму складі  $ZrO_2$ . Це дає можливість отримати інформацію про фактичну концентрацію кисню в продуктах спалення. Недоліком їх застосування є неможливість виявлення хімічного недопалу в зоні  $\alpha > 1$ , проте як показують експериментальні дані підтримка функціонування котлоагрегату з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha \geq 1,1-1,15$  виключає можливість утворення CO на рівні більше 200 ppm.

Конструкція зонду передбачає наявність двох камер (комірок): вимірювальної і насосної (рис. 5.9 б). Через отвір у стінці насосної комірки вихідні гази потрапляють у вимірювальну камеру (дифузійну щілину) в комірці Нернста. Ця конфігурація відрізняється постійним підтриманням стехіометричного співвідношення «повітря-паливо» в дифузійній камері. Електронна схема модуляції напруги живлення підтримує у вимірювальній камері склад суміші, що відповідає  $\alpha = 1$ . Для цього насосна комірка при збідненій суміші і надлишку кисню у димових газах видаляє кисень з дифузійної щілини в зовнішнє середовище, а

при збагаченій суміші і недостатній кількості кисню – перекачує іони кисню з навколишнього середовища в дифузійну щілину. Напрямок струму при перекачуванні кисню в різні сторони також відрізняється (табл. 5.6).

Таблиця 5.6. Залежність сили струму від коефіцієнта надлишку повітря в кисневому зонді

I, мА	-3	-2	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$\alpha$	0,75	0,82	0,90	0,95	1	1,12	1,27	1,46	1,71	2,06	2,59

Застосування широкосмугового кисневого зонду в системі моніторингу має ряд переваг перед традиційними газоаналізуючими пристроями: відсутність системи відбору та підготовки проби, швидке вимірювання концентрації кисню (0,1-0,2 с), безперебійна робота, довгий термін експлуатації, легка інсталяція на різні види теплових агрегатів.

Загальний вигляд системи моніторингу процесу спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності на основі кисневого зонду представлено на рис. 5.10 [12, 13].

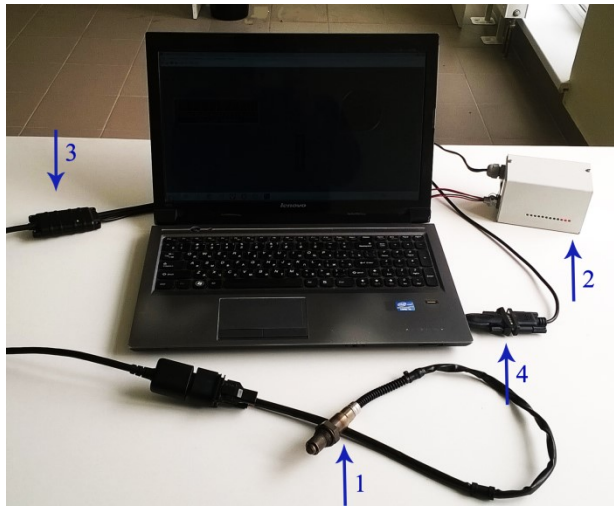


Рис. 5.10. Фото блоку контролю вмісту кисню в димових газах системи моніторингу процесу спалювання палива в котлоагрегатах: 1 – широкосмуговий кисневий зонд, 2 – альфа-індикатор, 3 – контролер, 4 – USB-інтерфейс

Технічні характеристики системи моніторингу процесу спалювання палива в котлоагрегатах наведені в табл. 5.7.

- В загальному, система моніторингу дозволяє:
- оптимізувати режим спалювання палива із врахуванням фактичних умов, режимів роботи котлоагрегату та характеристика палива;
  - знизити питомі витрати палива мінімум на 10%;
  - зменшити рівень викидів оксидів азоту до 40%;
  - зменшити рівень викидів монооксиду вуглецю до 50%;
  - підвищити коефіцієнт корисної дії котлоагрегату мінімум на 5%;
  - якісно спростити роботу обслуговуючого персоналу.

Таблиця 5.7. Технічні характеристики системи моніторингу процесу спалювання палива

Параметр	Значення
Вихідний сигнал вимірювального зонда, В	+0,1...+5,0
Відгук (затримка часу індикації) для 50% ступінчатого збурювання, с	0,1...0,3
Початковий час підготовки до вимірів, с	≤30,0
Діапазон вимірювань параметра $\alpha$	0,5...1,5
Відносна похибка, %	3
Індикація результатів вимірювань	світлодіодна
Довжина кабелю сполучення, м	≤ 5
Температура навколишнього середовища при відносній вологості до 80%:	
блоку індикації, °С	5...50
коробки вимірювального зонда, °С	5...70
Умови в точці вимірювань:	
температура середовища, °С	50...250
швидкість потоку, м/с	≤15
тиск, Па	≤+500

Особливості розробленої системи моніторингу дозволяють використовувати її в системі автоматичного керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності. На рис. 5.11 наведена структурна схема функціонування такої системи.

Основним призначенням системи керування є регулювання швидкості приводу електродвигуна вентилятора, так щоб в топці котла підтримувати оптимальний режим спалювання, тобто забезпечити найбільш сприятливі умови для повного спалення палива. Для цього система на основі інформації отриманої від своїх первинних сенсорів (кис-

невого зонду, сенсорів температури та розрідження) подає в топку необхідну кількість повітря.

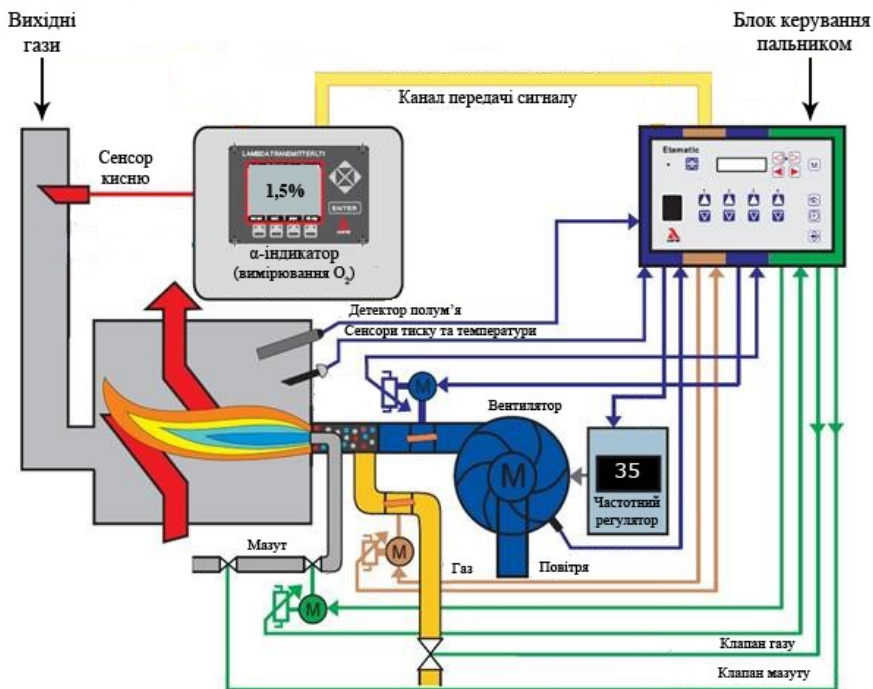


Рис. 5.11. Структурна схема системи автоматичного керування процесом спалення палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності на базі кисневого зонду

Задача забезпечення оптимального режиму процесу спалювання палива вирішується вибором необхідної швидкості обертання електродвигунів тягодуттєвих механізмів при повністю відкритих направляючих апаратах практично у всьому діапазоні робочої продуктивності паливоспалюючої установки з корекцією по O<sub>2</sub>.

Система керування забезпечує раціональну витрату використаного природного газу (економія складає 5-10% в рік); зниження споживання електричної енергії асинхронними провідними двигунами тягодуттєвих механізмів (економія 30-75% в рік); зниження шкідливих речовин в атмосферу за рахунок повного спалювання палива.

### **5.3 Методи і засоби моніторингу теплотехнічних (теплофізичних) параметрів і характеристик теплогенеруючих установок**

Визначення експлуатаційного ресурсу котлів, котельного обладнання та трубопроводів неможливе без наявності інформації про рівень температури поверхонь та теплового потоку крізь теплоізоляційні конструкції агрегатів та обладнання. При обстеженні теплового стану енергетичного обладнання для визначення тепловтрат необхідно одночасно вимірювати температуру та тепловий потік у багатьох точках об'єкту протягом досить тривалого часу. Це обумовлено тим, що енергетичне обладнання, як правило, змінює режими роботи в залежності від навантаження, яке в свою чергу змінюється не лише протягом сезону, але й протягом доби. Крім того, ефективність та ресурс роботи теплогенеруючих установок значною мірою залежать від стану теплової ізоляції.

Моніторинг теплотехнічних (теплофізичних) параметрів і характеристик теплогенеруючих об'єктів повинен мати відповідне приладове забезпечення. Для визначення температури існує досить багато різноманітних приладів, що реалізують як контактний, так і безконтактний методи вимірювань. Для вимірювання густини теплового потоку, теплового опору та теплофізичних властивостей в Україні серійно розробляються спеціалізовані вимірювальні прилади [14, 15] на основі первинних перетворювачів (сенсорів) теплового потоку [16] і температури [17]. Застосування сенсорів теплового потоку та засобів вимірювання на їх основі дозволяє шляхом прямих вимірювань визначати теплові втрати крізь огорожувальні конструкції теплогенеруючих установок, зокрема, котлів, котельного обладнання, теплопроводів тощо.

**Методика розрахунку тепловтрат теплогенеруючих установок.** Методи експериментального визначення густини теплового потоку та його конвективної і радіаційної складових із застосуванням сенсорів теплового потоку і температури при дослідженні тепलोзахисних властивостей огорожувальних конструкцій об'єктів теплоенергетики регламентовано рядом нормативних документів, зокрема, ДСТУ 4035 [18] та методикою М00013184.5.023-01 «Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції» [19], де представлено методи вимірювань поверхневої густини сумарного теплового потоку та методику обчислень коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та довкіллям, а також наведено аналіз методичних похибок вимірювання та надано рекомендації щодо підбору сенсорів з урахуванням умов проведення досліджень.

Поверхневу густину сумарного теплового потоку крізь огорожувальні конструкції вимірюють із застосуванням сенсорів, виконаних згідно з [16], які розташовують на контрольованій поверхні нормально до напрямку теплового потоку. У випадку конвективно-радіаційного теплообміну огорожувальних конструкцій і доквілля, обумовленого наявністю ненульової різниці температур поверхні та доквілля, дійсне значення поверхневої густини сумарного теплового потоку обчислюють за формулою:

$$q_{\Sigma_0} = q_{\alpha} + q_{\varepsilon_{PE3}} , \quad (5.5)$$

де  $q_{\alpha}$  – поверхнева густина конвективної складової сумарного теплового потоку, обумовленого наявністю ненульової різниці температури контрольованої поверхні та доквілля, яку обчислюють за формулою:

$$q_{\alpha} = \alpha \cdot (T_D - T_{OK}) , \quad (5.6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конвективного теплообміну – характеристика інтенсивності конвективного теплообміну між контрольованою поверхнею огорожувальної конструкції і доквіллям;  $T_D$ ,  $T_{OK}$  – температура, відповідно, доквілля і поверхні огорожувальної конструкції;  $q_{\varepsilon_{PE3}}$  – поверхнева густина потоку результуючого теплового випромінення, що дорівнює різниці потоків поглиненого теплового випромінення й потоку власного теплового випромінення, яку обчислюють за формулою:

$$q_{\varepsilon_{PE3}} = q_{ПОГЛ} - q_{ВЛ} , \quad (5.7)$$

де  $q_{ПОГЛ}$  – поверхнева густина потоку теплового випромінення, поглиненого контрольованою поверхнею, що обчислюється за формулою:

$$q_{ПОГЛ} = A \cdot q_{ПАД} , \quad (5.8)$$

де  $q_{ПАД}$  – поверхнева густина потоку теплового випромінення, що падає на контрольовану поверхню від зовнішнього джерела теплоти,  $A$  – поглинальна здатність – безрозмірна характеристика поверхні тіла, що дорівнює відношенню поверхневих густин потоків теплового випромінення: поглиненого даним тілом і падаючого на його поверхню;  $A$  обчислюють за формулою:

$$A = q_{ПОГЛ} / q_{ПАД} ; \quad (5.9)$$

$q_{ВЛ}$  – поверхнева густина потоку власного теплового випромінення огорожувальної конструкції, обумовленого її власною температурою, відмінною від термодинамічного нуля, і залежного від випромінюва-



льної здатності контрольованої поверхні;  $q_{БЛ}$  обчислюють за формулою:

$$q_{БЛ} = \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_{OK}}} \cdot T_{OK}^4, \quad (5.10)$$

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – стала Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_{t_{h_{OK}}}$  – інтегральний напівсферичний ступінь чорноти контрольованої поверхні – безрозмірна характеристика, що дорівнює відношенню інтегральних випромінювальних здатностей даного й абсолютно чорного тіла при одній і тій же температурі.

Формула (5.5) з урахуванням (5.6) – (5.8) і (5.10) набуває вигляду:

$$q_{\Sigma_0} = \alpha \cdot (T_D - T_{OK}) + A_{OK} \cdot q_{ПАД} - \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_{OK}}} \cdot T_{OK}^4. \quad (5.11)$$

У випадку теплообміну ОК з довкіллям за відсутності додаткових джерел теплового випромінення поверхневу густину сумарного теплового потоку крізь контрольовану поверхню за відсутності сенсора, встановленого на ній, обчислюють за формулою:

$$q_{\Sigma_0} = \alpha_{\Sigma_0} \cdot (T_D - T_{OK}), \quad (5.12)$$

де  $\alpha_{\Sigma_0}$  – первинний сумарний коефіцієнт теплообміну огорожувальної конструкції з довкіллям.

Оскільки результат вимірювання поверхневої густини сумарного теплового потоку та її дійсне значення неоднакові через неідентичність температурних полів контрольованої поверхні за наявності на ній сенсорів та за відсутності додаткового джерела випромінення, то дійсне значення шуканої поверхневої густини сумарного теплового потоку крізь контрольовану поверхню огорожувальної конструкції обчислюють за формулою:

$$q_{\Sigma_0} = q_{\Sigma_{ВИМ}} \cdot (K^q)^{-1}, \quad (5.13)$$

до якої, як результат вимірювання поверхневої густини сумарного теплового потоку  $q_{\Sigma_{ВИМ}}$  із застосуванням сенсора, беруть значення, обчислені за формулою:

$$q_{ВИМ} = K \cdot E, \quad (5.14)$$

де  $K$  – коефіцієнт перетворення сенсора теплового потоку (градуювальний коефіцієнт);  $E$  – термоЕРС, генерована сенсором;  $K^q$  – критерій ступеню спотворення первинного теплового потоку, дорівнює відношенню густини вимірюного значення  $q_{ВИМ}$  до густини первинного (дійсного)  $q_0$  теплового потоку:

$$K^q = q_{ВИМ} / q_0 . \quad (5.15)$$

Алгоритм визначення значення критерію  $K^q$  наведено у додатку Б методики М00013184.5.023 [19].

Дійсні значення поверхневої густини конвективної і радіаційної складових сумарного теплового потоку та коефіцієнтів теплообміну ОК з довкіллям знаходять за наступним алгоритмом:

а) обчислюють коефіцієнт сумарного теплообміну  $\alpha_{\Sigma_0}$ , виходячи з (5.9) з урахуванням (5.10), за формулою:

$$\alpha_{\Sigma_0} = q_{\Sigma_{ВИМ}} \cdot (K^q)^{-1} \cdot (T_D - T_{ОК})^{-1} , \quad (5.16)$$

де  $q_{\Sigma_{ВИМ}}$ ,  $T_D$  і  $T_{ОК}$  – результати вимірювань відповідних величин із застосуванням сенсорів теплового потоку і температури;

б) обчислюють коефіцієнт радіаційного теплообміну  $\alpha_{\varepsilon_0}$  за формулою:

$$\alpha_{\varepsilon_0} = \sigma \cdot \varepsilon_{ПП_0} \cdot (T_D^4 - T_{ОК}^4) \cdot (T_D - T_{ОК})^{-1} , \quad (5.17)$$

де  $\varepsilon_{ПП_0}$  – приведений інтегральний ступінь чорноти контрольованої поверхні, що обчислюється для різних випадків теплообміну за наступними формулами:

1)  $\varepsilon_{ПП_0} = \varepsilon_{ПП_{ОК}} = \varepsilon_{t_{h_{ОК}}}$  – у випадку теплообміну сірої поверхні огорожувальної конструкції в оточенні чорного середовища;

2)  $\varepsilon_{ПП_0} = \varepsilon_{ПП_{ОК}} = (\varepsilon_{t_{h_1}}^{-1} + \varepsilon_{t_{h_2}}^{-1})^{-1}$  – у випадку теплообміну між двома необмеженими паралельними площинами, де індексом позначена «1» контрольована поверхня;

3)  $\varepsilon_{ПП_0} = \varepsilon_{ПП_{ОК}} = (\varepsilon_{t_{h_1}}^{-1} + (\varepsilon_{t_{h_2}}^{-1} - 1) \cdot S_1 / S_2)^{-1}$  – у випадку теплообміну в замкненому просторі, утвореному двома поверхнями з площами  $S_1$  і  $S_2$ , з яких індексом «1» позначена контрольована поверхня огорожувальної конструкції;

4)  $\varepsilon_{ПП_0} = \varepsilon_{ПП_{ОК}} = \varepsilon_{t_{n_1}} \cdot \varepsilon_{t_{n_2}}$  – у випадку теплообміну між двома довільними поверхнями з обмеженими площами, з яких одна («1») – контрольована поверхня,  $\varepsilon_{t_n}$  – інтегральний нормальний ступінь чорноти. У додатку В методики М00013184.5.023 [19] наведені довідкові дані про числові значення інтегрального нормального  $\varepsilon_{t_n}$  і інтегрального напівсферичного  $\varepsilon_{t_h}$  ступенів чорноти різних матеріалів і покриттів у залежності від температури поверхні;

в) обчислюють коефіцієнт конвективного теплообміну  $\alpha$  за формулою:

$$\alpha = \alpha_{\Sigma_0} - \alpha_{\varepsilon_0}, \quad (5.18)$$

застосовуючи результати обчислень за формулами (5.16) і (5.17);

г) обчислюють поверхневу густину конвективної складової сумарного теплового потоку за формулою (5.6) з використанням результату обчислень за формулою (5.18);

д) обчислюють, виходячи з формули (5.5), поверхневу густину радіаційної складової сумарного теплового потоку за формулою:

$$q_{\varepsilon_0} = q_{\Sigma_0} - q_{\alpha}, \quad (5.19)$$

використовуючи результати обчислень за формулами (5.13), (5.14), (5.16), (5.17).

У випадку теплообміну огорожувальної конструкції з доквіллям за наявності додаткових джерел теплового випромінення (наприклад, радіатори, випромінювачі, потужні світильники, працююче енергетичне устаткування та ін.) або за умов неоднакових ступенів чорноти поверхонь ОК і сенсорів, поверхневу густину сумарного теплового потоку крізь поверхню ОК обчислюють за формулою (5.5), яка з урахуванням формул (5.6) – (5.8) і (5.10), набуває вигляду:

$$q_{\Sigma_0} = \alpha \cdot (T_d - T_{OK}) + A_{OK} \cdot q_{пад} - \sigma \cdot \varepsilon_{th_{OK}} \cdot T_{OK}^4. \quad (5.20)$$

У випадку теплообміну ОК з доквіллям за наявності додаткових джерел випромінення для експериментального визначення поверхневої густини сумарного теплового потоку, його конвективної і радіаційної складових та коефіцієнтів теплообміну з доквіллям застосовують два сенсори теплового потоку, що мають однаковий термічний опір ( $R_1 = R_2$ ), але контрастні терморадіаційні характеристики ( $\varepsilon_{th_1} \neq \varepsilon_{th_2}$  і  $A_1 \neq A_2$ ), і сенсори температури для вимірювання температури доквілля ( $T_d$ ), поверхні ОК ( $T_{OK}$ ) та відкритих поверхонь обох сенсорів теплового потоку ( $T_1$  і  $T_2$ ).

Дійсні значення поверхневої густини сумарного теплового потоку та його складових і коефіцієнтів теплообміну з доквіллям визначають, виходячи із системи трьох рівнянь теплового балансу, аналогічних (5.20), відповідно, для поверхні ОК і поверхонь обох сенсорів теплового потоку, встановлених на огорожувальній конструкції, за наступним алгоритмом:

а) обчислюють дійсне значення поверхневої густини сумарного теплового потоку за формулою:

$$q_{\Sigma_0} = \left[ \left( q_{ВИМ_1} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_1}} \cdot T_1^4 \right) \cdot (A_{OK} - A_2 \cdot \Delta T_{OK} / \Delta T_2) + \right. \\ \left. + \left( q_{ВИМ_2} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_2}} \cdot T_2^4 \right) \cdot (A_1 \cdot \Delta T_{OK} / \Delta T_2 - A_{OK} \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2) - \right. \\ \left. - \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_{OK}}} \cdot T_{OK}^4 \cdot (A_1 - A_2 \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2) \right] / (A_1 - A_2 \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2) \quad (5.21)$$

де  $\Delta T_1 = T_D - T_1$ ,  $\Delta T_2 = T_D - T_2$ ,  $\Delta T_{OK} = T_D - T_{OK}$  – різниці значень температури, виміряних із застосуванням сенсорів температури;  $q_{ВИМ_1}$ ,  $q_{ВИМ_2}$  – результати вимірювання густини сумарного теплового потоку, відповідно, першим і другим сенсорами теплового потоку, встановленими на поверхні ОК;

б) обчислюють поверхневу густину потоку теплового випромінювання, що падає на поверхню ОК, за формулою:

$$q_{ПАД} = \left( (q_{ВИМ_1} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_1}} \cdot T_1^4) - (q_{ВИМ_2} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_2}} \cdot T_2^4) \Delta T_1 / \Delta T_2 \right) / (A_1 - A_2 \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2) \quad (5.22)$$

в) обчислюють поверхневу густину потоку поглиненого теплового випромінювання за формулою:

$$q_{ПОГЛ} = A_{OK} \cdot q_{ПАД} \quad (5.23)$$

з використанням результату обчислень за формулою (5.22);

г) обчислюють поверхневу густину потоку власного теплового випромінювання за формулою (5.10);

д) обчислюють поверхневу густину потоку результуючого теплового випромінювання за формулою (5.7), використовуючи результати обчислень за формулами (5.10) і (5.23);

е) обчислюють коефіцієнт сумарного теплообміну за формулою:

$$\alpha_{\Sigma_0} = q_{\Sigma_0} / \Delta T_{OK} \quad (5.24)$$

з використанням результату обчислення за формулою (5.10);

ж) обчислюють коефіцієнт конвективного теплообміну за формулою:

$$\alpha = \frac{A_1 \cdot (q_{ВИМ_2} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_2}} \cdot T_2^4) - A_2 \cdot (q_{ВИМ_1} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_1}} \cdot T_1^4)}{\Delta T_2 \cdot (A_1 - A_2 \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2)}; \quad (5.25)$$

з) обчислюють поверхневу густину конвективної складової сумарного теплового потоку за формулою (5.6), використовуючи результат обчислень за формулою (5.25).

Вибір алгоритму визначення дійсних значень поверхневих густин сумарного теплового потоку, його конвективної і радіаційної складових та коефіцієнтів теплообміну з довкіллям роблять, оцінюючи ступе-

ні впливу додаткових джерел теплового випромінення на результат вимірювання.

Якщо відношення суми значень поверхневої густини потоку теплового випромінення всіх присутніх додаткових джерел до результату вимірювання поверхневої густини сумарного теплового потоку крізь огороджувальні конструкції ОК задовольняє умові

$$\sum_{i=1}^N q_{\text{ДОД}_i} / q_{\Sigma_{\text{ВИМ}}} \leq 0,05, \quad (5.26)$$

де  $N$  – кількість додаткових джерел теплового випромінення, то реалізують алгоритм для випадку теплообміну ОК з довкіллям за відсутності додаткових джерел теплового випромінення, у протилежному випадку – алгоритм обчислень для теплообміну за їх наявності.

Для кожного додаткового джерел теплового випромінення обчислюють:

$$q_{\text{ДОД}_i} = \varepsilon_{\text{ПР}_i} \cdot \varphi_i \cdot (T_{\text{ДОД}_i}^4 - T_{\text{ОК}}^4), \quad (5.27)$$

де  $\varepsilon_{\text{ПР}_i}$  – приведений інтегральний ступінь чорноти  $i$ -го додаткового джерел теплового випромінення, при цьому

$$\varepsilon_{\text{ПР}_i} \approx \varepsilon_{t h_{\text{ОК}}} \cdot \varepsilon_{t n_{\text{ДОД}_i}}, \quad (5.28)$$

де  $\varepsilon_{t h_{\text{ОК}}}$  – інтегральний напівсферичний ступінь чорноти поверхні ОК;

$\varepsilon_{t n_{\text{ДОД}_i}}$  – інтегральний нормальний ступінь чорноти  $i$ -го джерел теплового випромінення, якщо  $\varepsilon_{t h_{\text{ОК}}}$  і  $\varepsilon_{t n_{\text{ДОД}_i}}$  не менше 0,7;  $\varphi_i$  – кутовий коефіцієнт випромінення, що визначається для різних випадків розташування джерел теплового випромінення відносно контрольованої поверхні ОК згідно з додатком Д методики [19];  $T_{\text{ДОД}_i}$  – температура поверхні додаткових джерел теплового випромінення.

**Засоби моніторингу теплофізичних параметрів теплогенеруючих установок.** При виборі засобів вимірювань для обстеження конкретного ОК необхідно врахувати багато факторів: тип огороджувальної конструкції, її характеристики, наявність внутрішніх включень контрастної теплопровідності (наприклад, закладних деталей), ступінь шорсткості поверхні, умови теплообміну ОК з довкіллям тощо. Рекомендації щодо вибору типу сенсорів теплового потоку для різних об'єктів, виходячи з умов проведення досліджень, виду ОК та ступеню чорноти матеріалу поверхонь наведені в розділі 3.

При виконанні моніторингу теплогенеруючих установок за відсутності додаткових джерел теплового випромінення та за можливості

забезпечення однакових ступенів чорноти поверхонь вимірювального сенсора і ОК застосовують перетворювачі згідно ДСТУ 3756 [16] (рис. 5.12) в комплекті зі стандартним засобом вимірювання напруги постійного струму, а також нестандартизовані спеціалізовані цифрові вимірювачі теплового потоку і температури моделей ИТП-22, ИТП-23, ИТП-23М, ИТП-24 [15, 19] (рис. 5.13).

Для контролю теплофізичних параметрів ОК зазвичай використовують сенсори двох моделей: у жорсткому (рис. 5.12, *а*) та у гнучкому (рис. 5.12, *б*) виконанні, в яких конструктивно об'єднані первинні перетворювачі теплового потоку та температури [15].

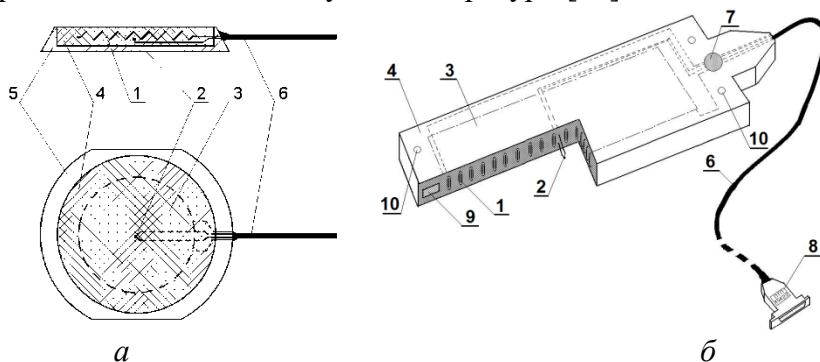


Рис. 5.12. Конструктивні схеми сенсорів теплового потоку:

*а* – в жорсткому виконанні; *б* – в гнучкому виконанні

- 1 – батарея біметалевих термоелементів; 2 – перетворювач температури;
- 3 – теплосприймальна чутлива зона; 4 – охоронна зона; 5 – корпус;
- 6 – потенціалоз'ємні проводи; 7 – мітка для позначення теплосприймальної поверхні; 8 – роз'єм для підключення сенсора до вторинної апаратури;
- 9 – пластина кріплення; 10 – монтажні отвори

В сенсорах обох моделей вмонтовано вимірювач температури для визначення температури поверхні ОК на основі хромель-алюмелевої термопари зі статичною характеристикою перетворення типу ТХА (К) згідно з [17], робочий спай якої розташовано у центрі сенсора теплового потоку.

Сенсори температури генерують термоЕРС, пропорційну різниці температури між робочим і опорним спаями, до якої з мостової схеми додається сигнал, пропорційний температурі опорного спаю. Сумарний сигнал відповідає значенню температури поверхні ОК.

Для зручності роботи корпус кожного з сенсорів жорсткого виконання закріплено на висувній телескопічній штанзі із вмонтованим температурним сенсором для визначення температури повітря поблизу



Рис. 5.13. Вимірювачі теплового потоку і температури моделей ИТП-22К (а), ИТП-23М (б) з комплектом сенсорів

поверхні ОК. Цей сенсор також є хромель-алюмелевою термопарою, робочий спай якої розміщено в корпусі, виготовленому з тонкостінної металевої трубки.

Розміщення сенсорів на поверхнях ОК показано на рис. 5.14. При необхідності вимірювання густини теплового потоку одночасно декількома сенсорами, розташованими в різних точках контрольованої поверхні, доцільно забезпечувати таку відстань між сусідніми сенсорами, за якої виключається вплив кожного на температурне (або теплове) поле іншого.

Ідентичні за конструктивним виконанням жорсткі сенсори можуть мати різні терморадіаційні характеристики теплосприймальних поверхонь в залежності від завдань дослідження ОК. Наприклад, при обстеженні об'єктів, що обшиті зовні металом (алюмінієм, нержавіючою сталлю та ін.), застосовується сенсор, покриття теплосприймальної поверхні якого має ступінь чорноти  $0,20 \pm 0,02$ . В інших випадках під час вимірювань застосовуються сенсори зі ступенем чорноти поверхні  $0,92 \pm 0,02$ . Якщо ступінь чорноти поверхні теплообміну ОК відрізняється від ступеня чорноти поверхні сенсора більш ніж на  $\pm 0,05$ , то для забезпечення вірогідності результатів вимірювання на теплосприймальну поверхню сенсора наносять тонке покриття з терморадіаційними характеристиками, наближеними до таких поверхні огорожувальної конструкції.

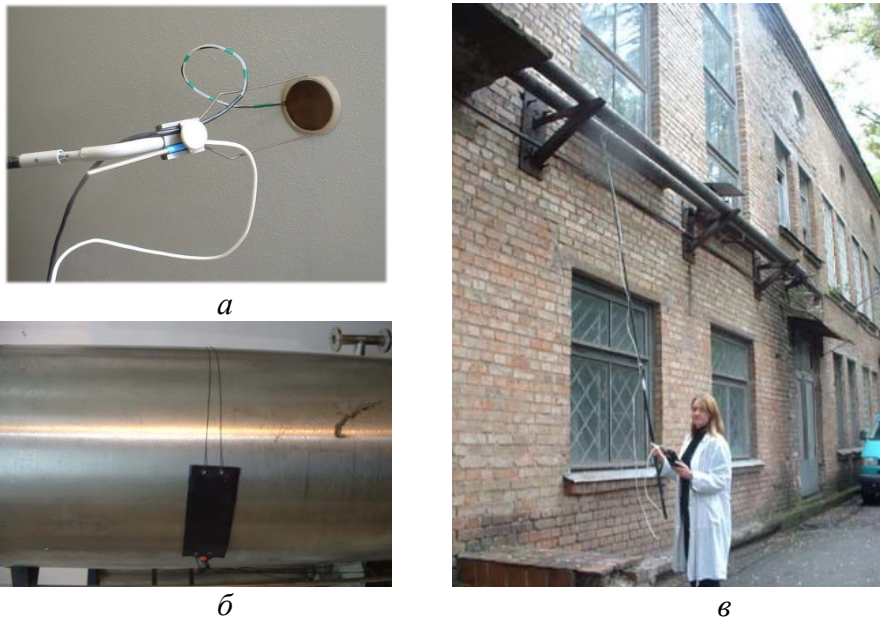


Рис. 5.14. Розміщення сенсорів на поверхнях контролю:  
 а – жорсткого на пласкій поверхні обмурівки котла, б – гнучкого на  
 циліндричній поверхні трубопроводу, в – використання  
 телескопічної штанги для контролю високо розташованих об'єктів

При відсутності такого вирівнювання дійсне значення густини теплового потоку визначають розрахунковим шляхом за методикою, що враховує виміряні значення конвективної і радіаційної складових теплообміну, а також температури поверхні ОК і середньої температури поверхонь, що оточують його. Так, у випадку, коли поверхні конструкцій, ґрунту, будівель і споруд, що оточують досліджуваний об'єкт, мають приблизно однакову температуру і ступені чорноти, близькі до 1,0 (від 0,75 до 1,0), наближений розрахунок може бути виконаний за формулою:

$$q_0 \approx q_{\text{вим}} - \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{ППП}} - \varepsilon_{\text{П}}) \cdot \left( (t_{\text{П}} + 273)^4 - (t_{\text{НП}} + 273)^4 \right) \quad (5.29)$$

де  $t_{\text{П}}$  і  $t_{\text{НП}}$  – температура поверхні ОК і середня температура навколишніх поверхонь, °С;  $\varepsilon_{\text{ППП}}$  і  $\varepsilon_{\text{П}}$  – ступінь чорноти вільної поверхні сенсора і ступінь чорноти поверхні ОК (значення для різних матеріалів систематизовані в методиці [19]).

При контролі теплофізичних параметрів теплогенеруючих установок за наявності додаткових джерел теплового випромінення або при неможливості забезпечення однакових ступенів чорноти поверхонь



сенсора і ОК застосовують два сенсори, що мають однаковий тепловий опір, але контрастні терморадіаційні характеристикти, і додаткові сенсори для вимірювання температури поверхонь ОК, обох сенсорів теплового потоку і довкілля. Як приклад, на рис. 5.15 наведено теплометричний пристрій РКТП-2.

Пристрій РКТП-2 є пластскою конструкцією з габаритами  $40 \times 100 \times 4$  мм, що містить два сенсор теплового потоку, змонтовані на загальній ізотермічній підкладці. Вільні поверхні обох сенсорів мають контрастні ступені чорноти, діапазон значень яких складає від 0,85 до 0,90 для «чорного» і від 0,02 до 0,25 для «білого». Також пристрій забезпечений сенсорами температури для вимірювання температури ізотермічної пластини і оточуючого повітря. Вимірювальна інформація через електронний блок подається на комп'ютерну об-

робку за відповідною програмою. Розрахунки проводять за алгоритмом, описаним формулами (5.21) – (5.25). Пристрій РКТП-2 дозволяє проводити контактні вимірювання значень коефіцієнта теплообміну і густини потоку теплового випромінення, проте вимірювання здійснюються локально, що є недоліком цього пристрою. Переустановка пристрою на нову точку поверхні об'єкту вимагає витрат часу на перемотаж і стабілізацію теплового режиму ОК і самого пристрою.

Тому найбільш продуктивними є безконтактні вимірювання густини потоку падаючого теплового випромінення спеціалізованим приладом, наприклад, радіометром моделі РАП-12Д [15]. Такий прилад (рис. 5.16) є абсолютним порожнинним приймачем напівсферичного теплового випромінення і побудований за диференціальною схемою на базі термоелектричних сенсорів теплового потоку.

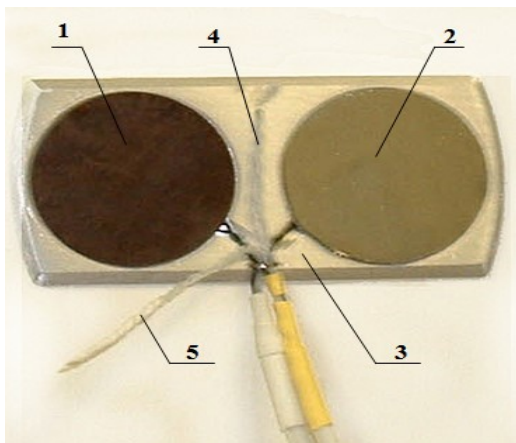


Рис. 5.15. Зовнішній вигляд пристрою РКТП-2: 1 – «чорний» сенсор теплового потоку; 2 – «білий» сенсор теплового потоку; 3 – ізотермічна пластина; 4 – сенсор температури поверхні ОК; 5 – сенсор температури оточуючого повітря

Виходячи із співвідношення геометричних розмірів теплосприймальної порожнини радіометра РАП-12Д виконується співвідношення  $A_{РАД} = \varepsilon_{РАД}$ , тому за результатами вимірювань густина потоку падаючого теплового випромінювання може бути визначена за формулою:

$$q_{ПАД} = (q_{ВИМ} + q_{РАД_0}) / A_{РАД} = (\bar{E}_{РАД} \cdot K_{РАД}) / A_{РАД} + \sigma \cdot T_{РАД}^4, \quad (5.30)$$

де  $q_{ВИМ} = K_{РАД} \cdot \bar{E}_{РАД}$  – густина теплового потоку, виміряна радіометром;

$K_{РАД}$  і  $\bar{E}_{РАД}$  – градувальний коефіцієнт і середнє арифметичне значення сигналів радіометра РАП-12Д, виміряних в усталеному тепловому режимі;  $T_{РАД}$  – власна термодинамічна температура радіометра.

Зазвичай енергетичне обладнання має великі габарити, а теплові процеси вирізняються значною тривалістю у часі, тому для проведення моніторингу їх теплотехнічних параметрів і характеристик доцільним є застосування багатоканальних вимірювальних систем з можливістю накопичення даних для подальшої обробки. Таким вимогам відповідає універсальний багатоканальний вимірювальний комплекс «Ресурс» [15, 20]

(рис. 5.17). Основним вузлом комплексу «Ресурс» є вимірювальний блок 1, який може бути змонтований як у вигляді стаціонарного блоку, так і у переносному кейсі. Для вирішення різних за-

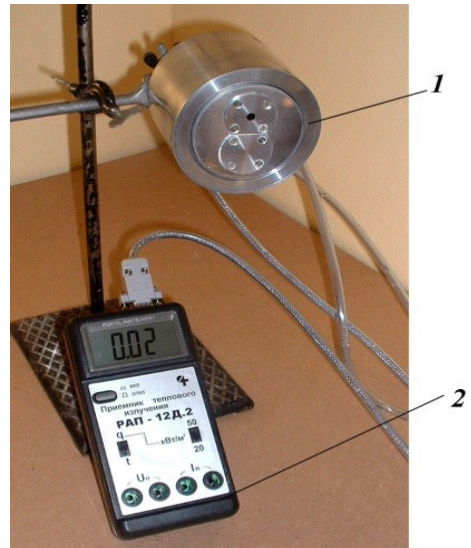


Рис. 5.16. Приймач теплового випромінювання РАП-12Д: 1 – приймальний пристрій; 2 – вторинний цифровий пристрій

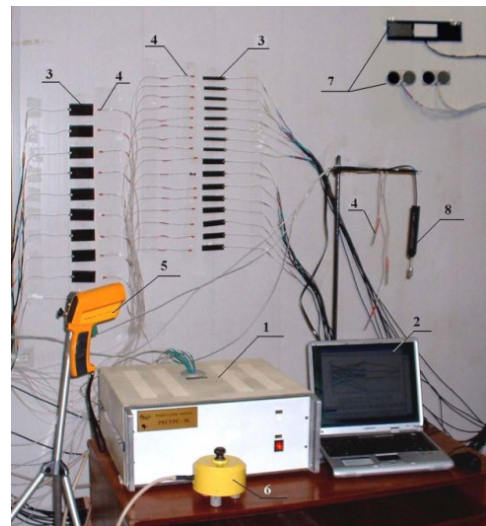


Рис. 5.17. Вимірювальний комплекс «Ресурс» з комплектом вимірювальних сенсорів та приладів

вдань до вимірювального блоку 1 приєднують різноманітні сенсори та пристрої:

- комплект термоелектричних вимірювальних сенсорів теплового потоку 3 та температури 4 ;
- пірометр для безконтактного вимірювання температури об'єкту 5 ;
- зондовий вимірювач коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів 6;
- пристрої для визначення коефіцієнтів конвективного та радіаційного теплообміну 7;
- сенсор вологості повітря 8.

Вимірювальна інформація надходить до ноутбуку 2, де опрацьовується спеціалізованим програмним забезпеченням.

Основні технічні характеристики комплексу «Ресурс»:

- діапазон вимірюваних значень поверхневої густини теплового потоку від 10 до 200 Вт/м<sup>2</sup>;
- відносна похибка вимірювання поверхневої густини теплового потоку  $\pm 4\%$ ;
- діапазон вимірюваних значень температури від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ ;
- основна абсолютна похибка вимірювання температури  $\pm 1,0\text{K}$ .

В залежності від завдань, які повинен вирішувати конкретний екземпляр комплексу, він може мати повний або частковий набір первинних перетворювачів та пристроїв, а також різну кількість вимірювальних каналів – від 16 до 96. Вимірювальний блок комплексу дозволяє послідовно у довільному порядку вимірювати напругу по всіх каналах. На його корпусі розташовані з'єднувачі для підключення первинних перетворювачів. Блок побудовано на основі модулів серії I-7000, що призначені для створення промислових вимірювальних мереж. Базовими елементами блоку є модулі типу I-7018 – модулі восьмиканальних 16-розрядних АЦП для вимірювання малих (термопарних) сигналів. Вони об'єднані між собою шиною інтерфейсу RS-485, а для зв'язку з комп'ютерним послідовним інтерфейсом RS-232 застосовано модуль перетворювача інтерфейсів типу I-7520. Для кожного з модулів типу I-7018 програмно з комп'ютера можна задавати свій діапазон вимірювань з ряду  $\pm 15\text{ мВ}$ ;  $\pm 50\text{ мВ}$ ;  $\pm 150\text{ мВ}$ , що дає змогу послідовно вимірювати вихідні сигнали різноманітних сенсорів з необхідною роздільною здатністю

Вимірювальний блок має вбудований пристрій стабілізації опорних спаїв термопар, температура якого враховується при визначенні температури за допомогою відповідних сенсорів.

Програмне забезпечення комплексу «Ресурс» дозволяє створювати індивідуальні конфігураційні файли для кожного ОК, тобто визначати порядок опитування каналів, проміжок часу між опитуванням каналів, швидкість обміну та номер порту комп'ютера. При роботі здійснюється вимірювання сигналів за заданою програмою, їх первинна обробка, видача у вікно на екрані комп'ютера як у вигляді таблиці, так і у вигляді графіка зміни у часі. Одночасно дані запам'ятовуються в комп'ютері у текстовому файлі, що дає змогу проводити їх подальше опрацювання.

*Комплект первинних перетворювачів* комплексу «Ресурс» містить сенсори теплового потоку з вбудованими сенсорами температури типу хромель-копель, а також набір сенсорів температури для визначення температури поверхні ОК, повітря біля неї, теплоносія у трубопроводі (з можливістю їх занурення в гільзи трубопроводів).

Сучасне енергетичне та технологічне обладнання характеризується нестаціонарними режимами роботи, імпульсним введенням енергії, змінним навантаженням. Для моніторингу таких об'єктів необхідно застосовувати первинні сенсори теплового потоку та температури, а також вторинну апаратуру з малим часом перетворення, передачі та обробки сигналів.

Стала часу сенсорів теплового потоку типу допоміжної стінки пропорційна квадрату його товщини, тому зменшення сталої часу потребує зменшення товщини звичайного сенсора, що, у свою чергу, призводить до зменшення чутливості. Сенсори з корегуючою термоелектричною батареєю, як показано у підрозділі 3.3, мають сталу часу на порядок меншу [21]: якщо для звичайних сенсорів у вигляді пластини товщиною 2 мм стала часу складає приблизно 20...30 с, то для сенсорів з корегуючою термобатареєю тієї ж товщини стала часу не перевищує 1 с. Для проведення досліджень нестаціонарних теплових процесів комплекс «Ресурс» доцільно комплектувати такими сенсорами та стрічковими термопарами зі сталою часу на рівні 0,3 с.

Модулі I-7018, на базі яких побудовано вимірювальний блок, дозволяють опитувати вісім каналів за 0,1 с. Така швидкість достатня для побудови відносно невеликої вимірювальної системи на 8 – 16 каналів. У разі необхідності проведення вимірювань по більшій кількості каналів, вторинна апаратура будується на іншій елементній базі. Так, наприклад, модуль E14-140 може проводити вимірювання по 16 диференційним або 32 каналам з «загальною землею»; розрядність 14 біт, частота дискретизації в одноканальному режимі 100 кГц, в багатоканальному – 20 кГц.

**Зондовий вимірювач коефіцієнта теплопровідності.** Для оперативного дослідження та регулярного контролю якості теплоізоляції енергетичних об'єктів комплекс «Ресурс» комплектується переносним приладом – зондовим вимірювачем коефіцієнта теплопровідності твердих теплоізоляційних і будівельних матеріалів (поз. 6 на рис. 5.17). У приладі реалізовано метод локального теплового впливу на обмежену зону плоскої поверхні контрольованого матеріалу при диференціальному способі вимірювання різниці значень густини теплового потоку і температури в зоні нагрівання і незбуреній зоні та обчисленні коефіцієнта теплопровідності [15, 22]. Перевага цього методу полягає в можливості проведення досліджень на зразках неправильної форми з однією плоскою поверхнею, у тому числі і на готових виробах без підготовки спеціального зразка конкретної форми.

Основними елементами теплового блоку приладу є три зонди, сполучені конструктивно з ніжками-опорами, прикріпленими до основи корпусу. Один із зондів є робочим, призначеним для завдання локального теплового впливу на обмежену зону поверхні ОК. Другий зонд є референтом, а третій призначено для визначення температури, при якій отримані результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності. Розрахунок коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  проводиться за формулою:

$$\lambda = f(q_1 - q_2)/(T_1 - T_2), \quad (5.31)$$

де  $f$  – поліноміальна апроксимаційна функція, що визначається при градуванні приладу із застосуванням еталонних мір теплопровідності;  $q_1$  і  $q_2$  – теплові потоки крізь робочий зонд та зонд-референт;  $T_1$  і  $T_2$  – температури на поверхні зразка, виміряні робочим зондом та референтом.

При необхідності підвищення вірогідності результатів спостережень і визначення коефіцієнта теплопровідності, усередненого по всій контрольованій поверхні зразка, роблять декілька (не менше трьох) перестановок теплового блоку на нове місце поверхні ОК.

Для комплексного моніторингу теплотехнічних (теплофізичних) параметрів і характеристик теплогенеруючих об'єктів із застосуванням комплексу «Ресурс» розроблено методику [23], в якій поєднано переваги безконтактного і контактного способів вимірювань та суміщено прямі вимірювання та розрахункові методи визначення коефіцієнта теплообміну. Методика полягає у виконанні наступних експериментальних і обчислювальних операцій:

1) попередньо розбити контрольовану поверхню ОК на імовірно однорідні й однакові за площею вимірювальні зони;

2) просканувати поверхні вимірювальних зон за допомогою пірометра, підключеного до ноутбука, і побудувати поля значень поверхневої температури за відповідною комп'ютерною програмою;

3) виявити в отриманому температурному полі характерні зони, в яких спостерігається найбільша кількість однакових значень температури.

У разі доступності операторові цих вимірювальних зон необхідно розмістити на поверхні кожної характерної зони по два сенсори теплового потоку з вбудованими сенсорами температури, що мають контрастну за ступенем чорноти зовнішні поверхні, або пристрій РКТП, записати покази «білого» і «чорного» сенсорів і розрахувати значення  $q_{\Sigma_0}$  по формулі (5.11) з урахуванням формул (5.22) і (5.25).

Для випадків з важкодоступними поверхнями треба:

– зробити повторне розбиття поверхні на уточнені вимірювальні зони з виділенням не лише характерних, а й аномальних зон, для яких отримані максимальні та мінімальні значення температур;

– виконати в уточнених зонах безконтактні виміри температури за допомогою пірометра і визначити густину потоку падаючого теплового випромінювання радіометром РАП-12Д, а також температури повітря в пристінному шарі будь-яким вимірювачем температури, екранованим від дії сторонніх джерел теплового випромінювання;

4) вибрати розрахункову формулу для обчислення коефіцієнта  $\alpha$  виходячи з виду, розмірів і просторового розташування поверхні ОК, умов теплообміну її з довкіллям і наявності вимушеного руху повітря біля досліджуваної поверхні ОК;

5) розрахувати густину сумарного теплового потоку по формулі (5.11) з урахуванням (5.22) або (5.30) і обчислити середнє арифметичне значення сумарного теплового потоку  $\bar{q}_{\Sigma}$  по всій поверхні ОК :

$$\bar{q}_{\Sigma} = \left( \sum_{n=1}^N q_{\Sigma_n} \cdot S_n \right) / \sum_{n=1}^N S_n, \quad (5.32)$$

де  $S_n$  – площа  $n$ -ї вимірювальної зони,  $N$  – кількість зон;

б) уточнити значення  $\bar{q}_{\Sigma}$  з урахуванням істотних відмінностей в аномальних вимірювальних зонах;

7) порівняти уточнене значення  $\bar{q}_{\Sigma}$  з нормативними значеннями теплових втрат для цього типу енергетичного об'єкту.

Експериментальну апробацію методики здійснено при комплексному дослідженні тепловтрат теплофікаційного водогрійного газового котла типу ТВГ-8. Дослідження виконане з метою співставлення ре-

зультатів вимірювань, отриманих безконтактним і контактним способами. При цьому для безконтактного вимірювання температури застосовано пірометр «Fluke-574», для контактного – перетворювачі температури, вбудовані в сенсори, якими також вимірюють значення густини результуючого теплового потоку. Окремо реєструвались значення температури повітря біля котла. Визначення густини падаючого потоку теплового випромінювання безконтактним способом виконане за допомогою радіометра РАП-12Д.

Згідно регламенту, в зв'язку з нерівномірністю розподілу тепловтрат, поверхню об'єкту поділено на оптимальну кількість однакових ділянок за площею. На рис. 5.18 показано розбивку поверхонь по зонах та результати вимірювань теплофізичних параметрів у кожній з них. Верхнє число є значенням густини теплового потоку, виміряне сенсором теплового потоку, нижнє – температура поверхні, що виміряна перетворювачем температури та пірометром, значення яких співпадають в межах похибки вимірювання.

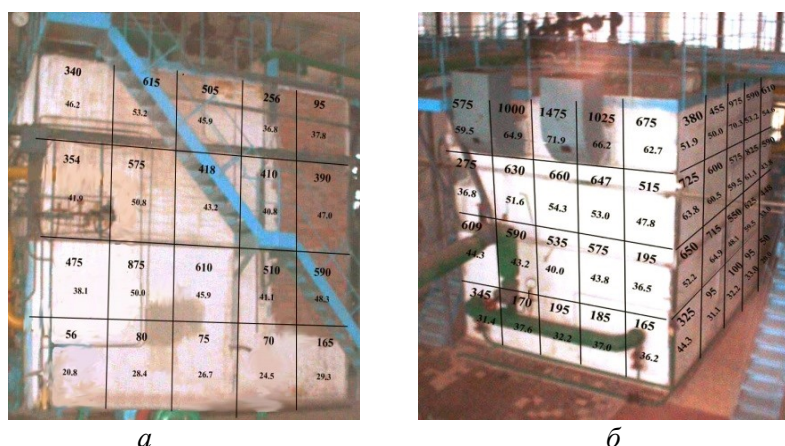


Рис. 5.18. Розподіл теплових потоків та температури по правій боковій (а) та по лівій боковій і тильній (б) поверхнях котла ТВГ-8

Для достовірного аналізу результатів досліджень було обрано праву бічну поверхню котла, на яку не впливала робота іншого теплоенергетичного устаткування. Результати обстеження теплового стану правої бічної поверхні котла ТВГ-8 показано на рис. 5.19 у вигляді експериментальних точок. Поряд представлено графіки розрахункових залежностей густини теплового потоку від різниці значень температури поверхні і повітря  $q = f(\Delta T)$ . Криві 1 – 3 отримані на підставі розв'язання рівняння (5.11) і обчислення середнього значення коефіцієнта конвективного теплообміну  $\alpha$  розрахунковим методом, заснова-

ним на використанні відомих критеріальних рівнянь і напівемпіричних залежностей, отриманих при дослідженні вільної конвекції для поверхонь різних розмірів, геометрії і розташування в просторі [23, 24].

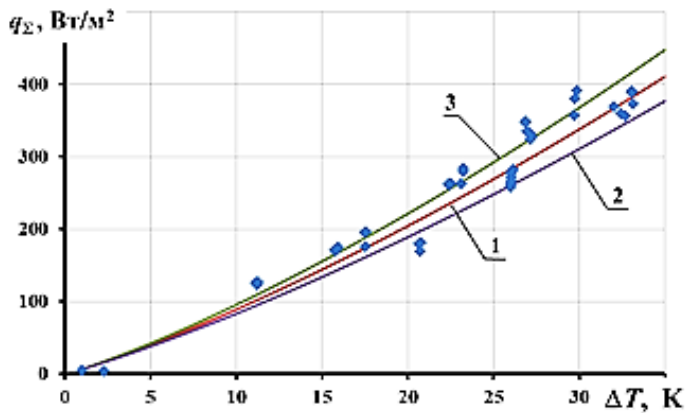


Рис.5.19. Залежність густини сумарного теплового потоку від різниці значень температури поверхні котла і навколишнього повітря:

- ◆ – експериментальні точки, отримані при контактних вимірюваннях,
- 1...3 – розрахункових залежності

Криві 2 і 3 отримані на підставі рівняння (5.11) і локальних значень коефіцієнта  $\alpha$ , обчислених для висот, що відповідають нижній (висота 0,7 м) і верхній (висота 4,8 м) точкам установки сенсорів.

Аналіз даних рис. 5.19 свідчить, що більшість експериментально отриманих точок лежить уздовж розрахункових кривих, а розбіжність результатів контактних і безконтактних вимірювань не перевищує 6%. З одержаних даних виходить, що значення теплового потоку, отримані контактним способом і розраховані за результатами безконтактних вимірювань, відповідають один одному в межах похибки вимірювань.

Таким чином, методика обстеження теплового стану енергетичних об'єктів, заснована на безконтактному вимірюванні температури, використанні спеціалізованих приладів для вимірювання густини падаючого теплового потоку і коефіцієнта теплообміну, дозволяє одержати коректні значення теплового потоку крізь огорожувальні конструкції ОК. Результати обстеження дозволяють об'єктивно оцінити тепловий стан енергетичного об'єкту, наприклад, обмурівки і теплової ізоляції котла або іншого теплоенергетичного устаткування, із зазначенням критичних зон, в яких можливі пошкодження елементів конструкції, що призводять до невикористаних тепловтрат.



**Література**

1. *Воробьев Л. И., Грищенко Т. Г., Декуша Л. В.* Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т.70, № 5. – С. 828–839.
2. *Патент України № 108312.* Кондуктивний калориметр / Назаренко О.О., Бабак В.П., Бутова З.А., Воробйов Л.Й., Декуша Л.В., заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ; опубл.: 10.04.2015, бюл.№ 5.
3. *Патент України № 101716.* Калориметр теплового потоку / Грищенко Т. Г., Декуша Л. В., Бутова З. А., Назаренко О. О., Воробйов Л. Й.; заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ; опубл.: 25.04.2013.
4. *Воробьев Л.И., Декуша Л.В., Назаренко О.А., Грищенко Т.Г.* Улучшение эксплуатационных характеристик кондуктивных бомбовых калориметров // Пром. теплот-ка. – 2015. – Т. 37, № 7. – С. 84-85.
5. *Бутова З.А., Воробйов Л.Й.* Калориметричний аналіз твердого та рідкого біопалива // Научные труды SWorld. – 2016. – Т. 2, № 1 (42). – С. 38-42.
6. *Степанов Д.В.* Котельні установки промислових підприємств: навчальний посібник / Д.В. Степанов, Є.С. Корженко, Л.А. Боднар. – Вінниця: ВНТУ. – 2011. – 120 с.
7. *Чепель В.М., Шур И.А.* Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий. – Л.: Недра. – 1980. – 892 с.
8. *Воликов А.Н., Новиков О.Н., Окатьев А.Н.* Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах // Энергонадзор-информ. — 2010. – №1. – Т.43. – С. 54-57.
9. *Кучерук В.Ю., Дудатьев І.А.* Огляд методів контролю складу димових газів котельних установок // Збірник наукових праць ОДАТРА. – 2013. – №1. – Т.2. – С. 50-58.
10. *Шкаровский А.Л., Новиков О.Н., Окатьев А.Н.* Энергоэкологические принципы управления процессом сжигания топлива // Датчики и системы. –2002. – №10. – С. 41-44.
11. *Бабак В.П., Запорожець А.О.* Система якості горіння повітряно-паливної суміші в котлоагрегатах малої та середньої потужності // Методи та прилади контролю якості. – 2014. – №2. – С. 106-114.
12. *Патент України № 101842.* Система контролю якості згорання палива в котлоагрегатах / Бабак В.П., Назаренко О.О., Запорожець А.О.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 25.09.2014; опубл. 12.10.2015, Бюл. №19.

13. *Патент* України №102512. Система контролю якості горіння / Бабак В.П., Назаренко О.О., Запорожець А.О.; заявник та патенто-власник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 25.09.2014; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21.
14. *Геращенко О.А.* Основы теплотриии. – К.: Наук. думка, 1972. – 172 с.
15. *Приборы* для теплофизических измерений : Каталог [Электронный ресурс]. – Киев : ИТТФ НАН Украины, 2010.
16. *Енергозбереження.* Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови : ДСТУ 3756–98 (ГОСТ 30619–98) – К: Держстандарт України, 2000. – 21 с.
17. *Перетворювачі* термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворювання : ДСТУ 2837–94 (ГОСТ 3044–94).
18. *Енергозбереження.* Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та доквіллям : ДСТУ 4035-2001. – К.: Держстандарт України, 2001. – 43 с.
19. *Визначення* теплових потоків крізь огорожувальні конструкції : Методика М00013184.5.023–01 / Розробники: Т.Г.Грищенко, Л.В.Декуша [та ін.] – К.: ЛОГОС, 2002. – 131 с.
20. *Декуша Л. В., Менделеева Т.В., Воробьев Л.И., Декуша О.Л.* Теоретическое обоснование прибора для экспресс-определения коэффициентов теплопроводности твердых материалов // Промышленная теплотехника. – К., 2004.– Т.26, № 4. – С. 76–82.
21. *Вимірювально-діагностичний комплекс “Ресурс”* для типових об’єктів котлів, котельного обладнання та трубопроводів / А.А. Долинський, Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Л.Й. Воробйов [та ін.] // Сб. ”Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”. – К.: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, 2006. – С. 255-260.
22. *Оперативное* определение тепловых потерь объектов энергетики бесконтактным способом / А.А. Долинский, Л.В. Декуша [и др.] // Промышленная теплотехника. – К., 2007. – № 3. – С. 100-109.
23. *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справочник. – Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 214 с.
24. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

## 6. МОНІТОРИНГ ТРУБОПРОВОДІВ І ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ

### 6.1. Методи і засоби контролю втрат теплових мереж

У системах централізованого теплопостачання значна частка тепловтрат (за деякими даними до 20...30%) припадає на теплові мережі. Це пов'язано з тим, що третина всіх теплових магістралей зношена і знаходиться в аварійному стані. Оскільки ремонт і перекладка теплотрас дуже дорогі, визначення необхідності і черговості таких робіт набувають першорядного значення. Виробники труб для теплотрас та будівельно-монтажні організації зацікавлені в нарощуванні обсягу робіт, не завжди враховуючи реальний стан теплотрас і економічну ефективність проведених робіт. Правильне визначення черговості перекладки теплотрас дозволить заощадити енергоресурси і мінімізувати витрати. Тривалість експлуатації теплотраси не є основним критерієм необхідності перекладки, оскільки на стан трубопроводу і теплоізоляції впливає безліч факторів, починаючи від конструкції траси, типу ґрунту і рівня ґрунтових вод і закінчуючи якістю монтажу, нанесення ізоляції і режимом експлуатації. Досить достовірним критерієм стану теплотраси є реальні питомі (на 1 м довжини) тепловтрати на ділянці мережі. Допустимі питомі тепловтрати для трубопроводів різних діаметрів нормовані, однак, оскільки ці норми розроблені кілька десятиліть тому [1], не враховують можливостей сучасних теплоізоляційних матеріалів і цін на енергоносії, вони навряд чи можуть бути єдиним і об'єктивним критерієм необхідності перекладки теплотраси.

На магістральних ділянках теплотрас при великих значеннях енергії, що передається, відносні тепловтрати значно менше похибки вимірювань сучасних промислових теплотічильників. Тому проводять дорогі періодичні випробування тепломереж, при яких окремі ділянки з'єднують в кільце і при малій витраті теплоносія (води) вимірюють перепади температури на кожній з ділянок. У зв'язку з цим досить актуальною є розробка методів вимірювань і апаратури, що дозволяють проводити контроль тепловтрат на ділянках теплотрас в режимах, близьких до експлуатаційних.

Потужність інтегральних тепловтрат  $Q_{TB}$  на ділянці теплотраси може бути розрахована як відношення різниці повних енергій теплоносія, що пройшов початок і кінець контрольованої ділянки, до тривалості вимірювань:

$$Q_{TB} = \left( \int_{\tau_1}^{\tau_2} T_{M1} \cdot R_{M1} \cdot C_V \cdot d\tau - \int_{\tau_1 + \Delta\tau_1}^{\tau_2 + \Delta\tau_2} T_{M2} \cdot R_{M2} \cdot C_V \cdot d\tau \right) / (\tau_2 - \tau_1), \quad (6.1)$$

де  $\tau_1$  і  $\tau_2$  – початковий і кінцевий моменти проведення вимірювань на початку ділянки;  $\Delta\tau_1$  і  $\Delta\tau_2$  – тривалість проходження ділянки теплотраси об'ємом води, що надійшли на ділянку, відповідно, в початковий і кінцевий моменти вимірювання;  $T_{M1}$  і  $T_{M2}$  – миттєві значення температури води на початку і в кінці ділянки;  $R_{M1}$  і  $R_{M2}$  – миттєві значення об'ємної витрати води на початку і в кінці ділянки;  $C_V$  – об'ємна теплоємність води.

У загальному випадку змінними величинами є не тільки температури  $T_{M1}$  і  $T_{M2}$ , але і витрати  $R_{M1}$  і  $R_{M2}$ , внаслідок чого  $\Delta\tau_1$  і  $\Delta\tau_2$  не однакові. Теплоємність  $C_V$  є функцією температури і тиску. Таким чином, для точного визначення потужності тепловтрат необхідно проводити вимірювання не тільки температур, але і витрат теплоносія на початку і кінці ділянки, та визначати час проходження ділянки теплоносієм.

При відносно невеликій зміні температури, характерній для теплотрас,  $C_V$  теплоємність можна вважати постійною. При постійній витраті теплоносія  $R_{M1} = R_{M2} = R$  тривалості проходження ділянки є рівними:  $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \Delta\tau$ . У цьому простому випадку обчислення тепловтрат може бути виконано за формулами:

– потужність інтегральних тепловтрат на ділянці:

$$Q_{TB} = (T_1 - T_2) \cdot R \cdot C_V, \quad (6.2)$$

– питомі тепловтрати (на одиницю довжини трубопроводу):

$$Q_{ПИТ} = Q_{TB} / L, \quad (6.3)$$

де  $L$  – довжина ділянки;  $T_1$  – середня температура теплоносія на початку ділянки за час від  $\tau_1$  до  $\tau_2$ ;  $T_2$  – середня температура теплоносія в кінці ділянки за час від  $(\tau_1 + \Delta\tau)$  до  $(\tau_2 + \Delta\tau)$ .

Співвідношення (6.2) дозволяє достовірно визначати тепловтрати тільки в разі прецизійних вимірювань різниць середньої температури теплоносія на початку і кінці ділянки.

Розроблена методика вимірювань і прецизійна апаратура ІМРТ-1, призначені для визначення перепаду температури теплоносія, що виникає внаслідок тепловтрат через теплоізоляцію на ділянці теплової мережі [2–4]. Створений комплекс приладів «Траса», що дозволяє крім

температури теплоносія на початку і кінці ділянки, додатково вимірювати температуру повітря і ґрунту. У комплекси апаратури ІМРТ-1 і «Траса» входять по дві ідентичні вимірювальні станції, калібрувальний термостат з набором еталонних ртутних термометрів і програмне забезпечення. Кожна вимірювальна станція містить перетворювачі температури (ПТ) і спеціалізований вимірювальний пристрій (ВП). Зовнішній вигляд вимірювальної станції комплексу «Траса» представлено на рис. 6.1.

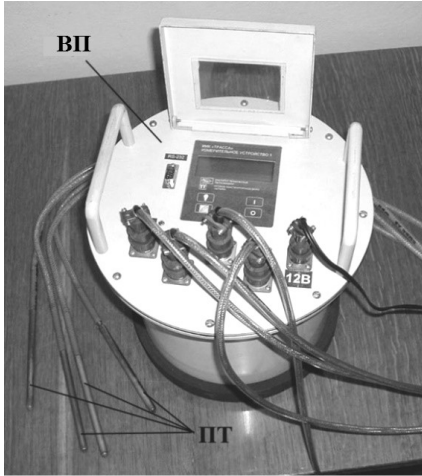


Рис. 6.1. Зовнішній вигляд вимірювальної станції комплексу «Траса»

Конструкція сенсорів температури обумовлена установкою в спеціальні гільзи трубопроводів теплотраси. Сенсор температури є термометром опору, який виконано у вигляді тонкостінної трубки з нержавіючої сталі діаметром 6,2 мм і довжиною 240 мм. Всередині трубки поміщено чутливий елемент, виконаний у вигляді спіралі з мідного дроту діаметром 0,05 мм з електричним опором 1000 Ом при 0 °С. Для стабілізації характеристик перетворювач зістарений протягом 500 годин при температурі 160 °С. Мікропроцесорний вимірювальний пристрій забезпечує вимірювання і опрацювання сигналів сенсорів температури, індикацію і

запам'ятовування температури в незалежній флеш-пам'яті. Обсяг пам'яті дозволяє зберігати дані про вимірювання температури, проведені протягом 10 діб з періодичністю 30 секунд. Вимірювання електричного опору термометра опору проводяться за схемою несиметричного мосту з живленням стабільним струмом [5, 6]. Елементи мостової схеми, відібрані з однієї партії прецизійних резисторів за мінімальними відхиленнями від номіналу, мають малі однакові значення температурного коефіцієнта опору та конструктивно розташовані в тому ж корпусі, що і чутливий елемент, що виключає вплив підвідних проводів на точність вимірювання. Стабілізатор струму, що живить вимірювальний міст, виконаний за схемою зі зворотним зв'язком по струму через термометр опору, а напруга в діагоналі моста підсилюється за допомогою прецизійного підсилювача з малими значеннями напруг і струмів зміщення. Всі функціональні електронні вузли, що забезпечують точність вимірювань, поміщені в спеціальний термостат, вбудований у вимірю-

вальний пристрій, і незалежно від умов експлуатації працюють при температурі  $(60 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ , що забезпечує стабільність їх характеристик. Для компенсації нелінійності функції перетворення сенсорів температури, перерахунок значень опору чутливого елемента в значення температури здійснює мікропроцесорний пристрій за допомогою апроксимуючого полінома, коефіцієнти якого визначено експериментально для кожного екземпляра сенсора при налаштуванні приладу. Вбудований таймер з автономним батарейним живленням дозволяє здійснювати прив'язку проведених вимірювань за часом. Вимірювальний пристрій має конструкцію, що забезпечує захист від пилу і бризок води, всі елементи управління та індикації розміщені під герметичною прозорою кришкою. Електроживлення в умовах експлуатації здійснюється або від автомобільного акумулятора напругою 12 В, або через зовнішній блок живлення від мережі 220 В, 50 Гц.

Калібрувальний термостат, призначений для звірення чутливих елементів сенсорів температури та визначення поправок до їх показань, використовується при перевірці метрологічних характеристик приладів. Термостат, виконаний у вигляді масивного дюралюмінієвого циліндра з електричним нагрівачем і теплоізоляцією на поверхні, має установчі гнізда для робочих сенсорів температури та еталонних ртутних термометрів і підтримує задану стабільну температуру в діапазоні від 30 до 130  $^\circ\text{C}$ .

Програмне забезпечення дозволяє перезаписувати накопичені у вимірювальному пристрої дані на жорсткий диск ПК, обчислювати середні значення температури за будь-який заданий проміжок часу, розраховувати поправки за результатами звірення сенсорів температури з еталонними термометрами і вносити їх в результати вимірювань.

Внаслідок теплообміну по настановній арматурі та з'єднувальному кабелю при встановленні термометра в гільзі на трубопроводі виникає додаткова похибка вимірювання. Похибка залежить від глибини занурення термометра в теплоносій, від геометричних розмірів і теплопровідності арматури і сенсора температури, від коефіцієнта теплообміну між теплоносієм і гільзою термометра, від різниці температур теплоносія і навколишнього повітря. Для найбільш несприятливих умов експлуатації та конструкцій настановної арматури при зануренні чутливого елемента сенсора на глибину більше 25 см додаткова похибка становить приблизно 0,005 К і може бути зменшена в 3...5 разів шляхом ретельної теплоізоляції місця установки термометра.

У відповідності до методики проведення випробувань встановлюють по одній вимірювальній станції в оглядових колодязях або павіль-

йонах теплотраси на кінцях контрольованої ділянки, а сенсори температури поміщають в штатні трубки-гільзи (див. рис. 6.2). Вимірювання температури теплоносія проводять протягом декількох діб.

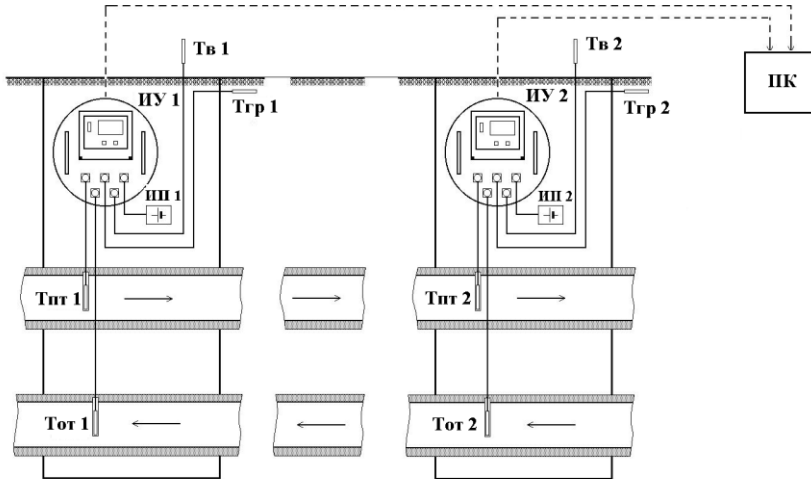


Рис. 6.2. Схема розміщення і з'єднання елементів апаратури «Траса» на ділянці теплотраси: ВП1, ВП2 – вимірювальні пристрої; ДЖ1, ДЖ2 – джерела живлення; ПК – персональний комп'ютер; ПЗ – програмне забезпечення; Т – перетворювачі температури, що вимірюють температуру, відповідно, Тпр – прямого трубопроводу, Тот – зворотного трубопроводу, в – повітря, гр – ґрунту

Після закінчення вимірювань прилади знімають з теплотраси, підключають до ПК та переписують накопичену інформацію через послідовний інтерфейс. За допомогою калібрувального термостату проводять звірення сенсорів температури з еталонними термометрами і визначають поправки до накопичених даних. ПК розраховує середні значення температури на кінцях випробуваної ділянки теплотраси, за якими, за наявності додаткової інформації про витрату теплоносія під час випробувань, визначають значення інтегральних та питомих тепловтрат.

Для прикладу, на рис. 6.3 показано результати записів температури протягом доби на діючій магістральній теплотрасі між київською ТЕЦ-6 і котельнею РТС-6. Початкова точка контрольованої ділянки – ІП1 павільйон, кінцева точка – насосна РТС-6. Загальна довжина ділянки – 2970,7 м, в тому числі довжина надземної прокладки – 146,5 м, підземної – 2824,2 м; діаметр трубопроводу  $D_y = 1200$  мм.

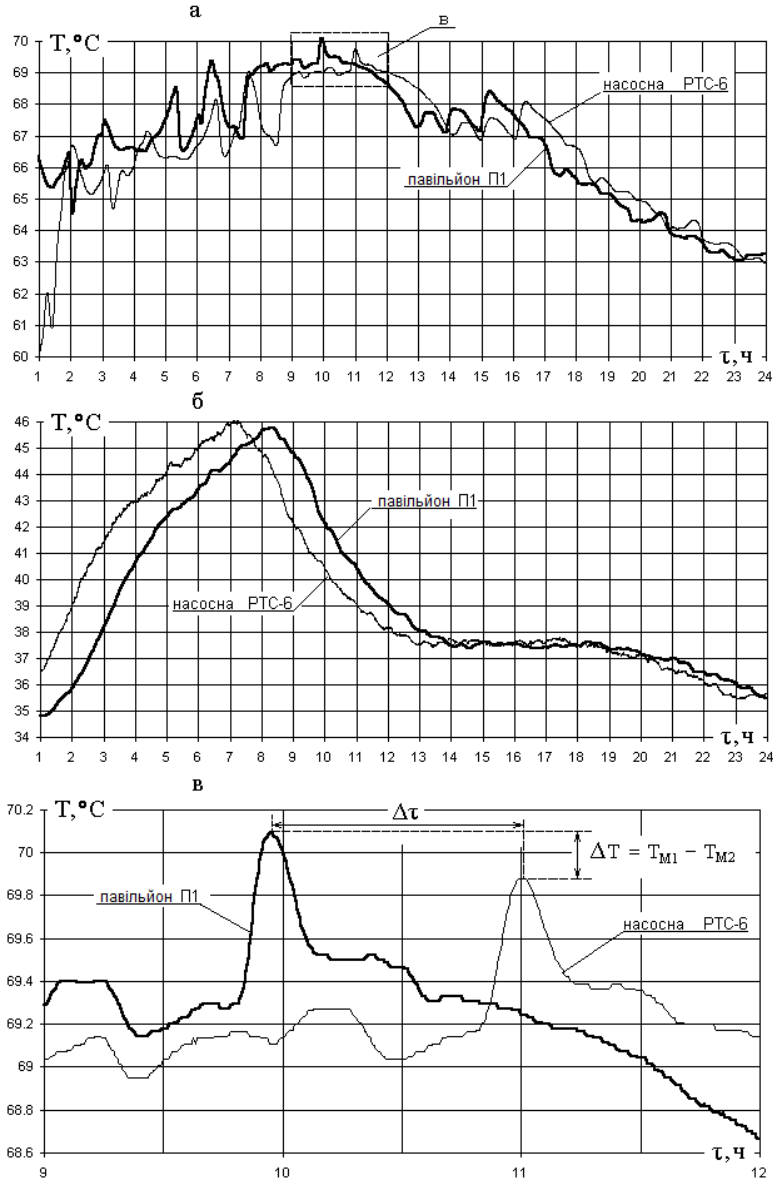


Рис. 6.3. Результати запису температури протягом доби:  
 а – в трубопроводі, що подає; б – в зворотному трубопроводі;  
 в – фрагмент графіка в збільшеному масштабі

Випробування проведені при режимі роботи тепломережі з витратою близько 7000 т / год, а також при експериментальному режимі зі зниженою витратою теплоносія близько 3000 т/год. Як видно з пред-



ставлених графіків, за записаними за допомогою апаратури з високою роздільною здатністю змінами температури теплоносія в трубопроводі можна спостерігати динаміку споживання енергії і характерні особливості підтримання температури і витрати теплоносія на ТЕЦ.

Порівняння зміни температури на початку і в кінці ділянки дозволяє використовувати ІМРТ-1 як тепловий міточний витратомір [7]. Як мітки використовуються флуктуації температури, що спричинені роботою теплогенеруючого обладнання, а за часом проходження міток через ділянку теплотраси визначаються швидкість руху і витрату теплоносія.

Середній перепад температури в прямому трубопроводі на досліджуваній ділянці склав приблизно 0,05 К при випробуваннях з витратою близько 7000 т / год і 0,105 К при зниженій витраті теплоносія. З урахуванням похибок і розкиду результатів вимірювань, питомі тепловтрати на ділянці не перевищували  $Q_{уд} = 176$  Вт / м. Значення тепловтрат на верхній межі інтервалу достовірності менше гранично допустимих тепловтрат, за методикою встановлених ОРГРЕС [1] для досліджуваного типу теплотрас при середньорічній різниці температури теплоносія і повітря 65 °С.

У різні інтервали часу перепад температури на ділянці зворотного трубопроводу становив від декількох тисячних до 0,02 К. Оскільки отримані значення фактично не перевищують похибок вимірювання, вони лише якісно свідчать про малі тепловтрати в зворотному трубопроводі, які не роблять істотного впливу на значення загальних втрат енергії.

Запропонована методика може застосовуватися для визначення тепловтрат на ділянках теплотрас, обладнаних штатними гільзами в трубопроводах. Однак більша частина трубопроводів такими гільзами не обладнана. Спроби використовувати термометри різних конструкцій для визначення температури теплоносія шляхом вимірювання температури зовнішньої поверхні труби виявилися безуспішними в зв'язку з тим, що похибки таких вимірювань порівнянні або перевищують зниження температури теплоносія на ділянці теплотраси, викликане тепловтратами. Тому запропоновано створити спеціалізовані прилади, що дозволяють точно вимірювати температуру теплоносія на підставі спільних вимірювань температури і теплового потоку на поверхні трубопроводу.

Розроблений накладний комбінований перетворювач (НКП) теплового потоку і температури, який виконаний у вигляді еластичної (гнучкої) намагніченої пластини, товщиною приблизно 2...3 мм. Така конс-

трукція дозволить легко встановлювати перетворювач на металеву поверхню трубопроводу (рис. 6.4).

НКП має два чутливі елементи: сенсор температури (ПТ) у вигляді малогабаритного високоомного платинового термометра опору і сенсор (перетворювач) теплового потоку (ПТП) [8, 9]. Результати спільних вимірювань температури і теплового потоку на поверхні трубопроводу дозволяють визначити

температуру теплоносія  $T_{тн}$  за формулою:

$$T_{тн} = T_{ВІМ} + q \cdot (R_k + R_{ТР} + R_{КОНВ}), \quad (6.4)$$

де  $T_{ВІМ}$  – виміряна температура поверхні труби;  $q$  – густина теплового потоку від поверхні труби;  $R_k$  – термічний опір контакту між ПТ та поверхнею труби;  $R_{ТР}$  – термічний опір металевій стінці труби;  $R_{КОНВ}$  – термічний опір конвективного теплообміну між теплоносієм і трубою.

Тепловий опір контакту між сенсором температури та поверхнею труби  $R_k$  може бути зменшено і стабілізовано за рахунок застосування теплопровідних мастил. Тепловий опір металевій стінці труби  $R_{ТР}$  залежить від товщини і матеріалу стінки і може бути розрахований для всієї номенклатури використовуваних труб. Тепловий опір теплообміну між теплоносієм і трубою  $R_{КОНВ}$  є величиною, зворотною коефіцієнту теплообміну  $\alpha$ , який може бути розрахований в залежності від швидкості руху теплоносія і його властивостей [10, 11]. Таким чином, значення всіх теплових опорів для розрахунку температури теплоносія в трубі можна визначити за інформацією про тип труби, її температуру і швидкість руху теплоносія. Розрахунки показують, що значення поправок, зумовлених відмінністю виміряної температури поверхні труби і температури теплоносія, знаходяться в діапазоні 0,05...0,5 К.

У комплект апаратури входять накладні комбіновані перетворювачі НКП, два електронних блоки, що дозволяють протягом 10 діб записувати сигнали первинних вимірювальних перетворювачів; калібрувальний термостат для звірення сенсорів температури та визначення поправок до їх показів; ПК і відповідне програмне забезпечення.

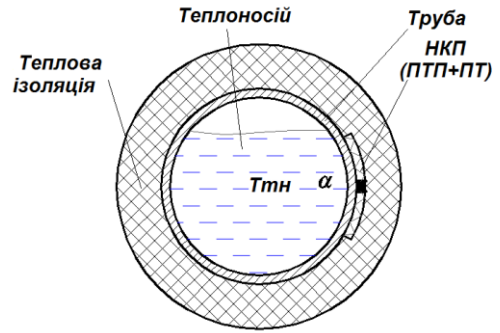


Рис. 6.4. Перетворювач НКП на металевій поверхні труби

Методика проведення випробувань полягає в наступному:

– встановлюють перетворювачі НКП з використанням теплопровідних мастил на очищену металеву поверхню труби виходу та повернення води на початку і кінці ділянки. Установку проводять на бічну поверхню труби для виключення впливу на результати вимірювання донних відкладень і бульбашок повітря. Поверх НКП встановлюють теплову ізоляцію (рис. 6.4);

– підключають вихідні ланцюги НКП до електронних блоків (рис. 6.5) і протягом декількох діб проводять запис сигналів сенсорів температури та теплового потоку;

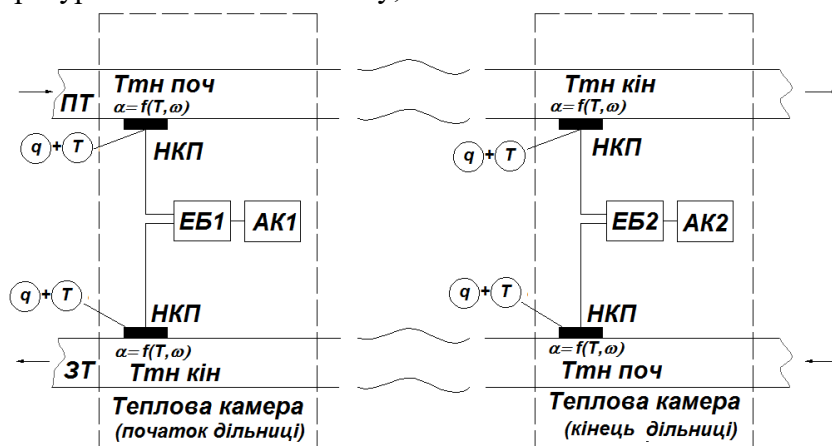


Рис. 6.5. Схема розміщення і з'єднання елементів апаратури ТРАССА-2 при проведенні випробувань ділянки теплотраси:

ПТ, ЗТ – прямий і зворотний трубопроводи, відповідно;

НКП – накладний комбінований перетворювач теплового потоку і температури; ЕБ1, ЕБ2 – електронні блоки; АК1, АК2 – акумулятори

– після завершення випробувань проводять перезапис файлів накопиченої інформації з електронних блоків в персональний комп'ютер;

– проводять звірення сенсорів температури НКП, для чого встановлюють їх в калібрувальний термостат з температурою, значення якої лежить в діапазоні проведених вимірювань, і визначають поправки до показів (рис 6.6.);

– вводять в ПК значення поправок, а також інформацію про тип труби на випробуваній ділянці. За тепловими мітками розраховують швидкість руху (витрату) теплоносія, розраховують значення теплових опорів і значення температури теплоносія за формулою (6.4) з урахуванням поправок, визначених при звірненні НКП;

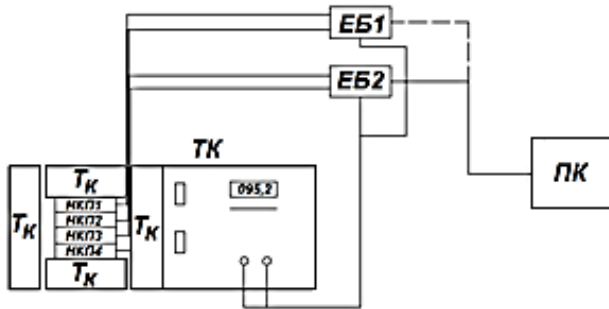


Рис. 6.6. Схеми розміщення та з'єднання елементів апаратури ТРАССА-2 при виконанні звірення робочих НКП з еталонним термометром:  
 НКП1 ... НКП4 – накладні комбіновані перетворювачі теплового потоку і температури; ЕБ1, ЕБ2 – електронні блоки; ТК – термостат калібрувальний,  $T_k$  – температура калібрування, ПК – персональний комп'ютер

– визначають різниці температури теплоносія на початку і кінці випробуваної ділянки для виходу та повернення води, розраховують інтегральні і питомі тепловтрати на випробуваній ділянці.

Розглянуті методики та засоби дозволяють при режимі роботи теплотраси, близькому до експлуатаційного, визначати інтегральні і питомі тепловтрати на ділянках теплотрас, як обладнаних гільзами для термометрів, так і не обладнаних гільзами, при цьому не потрібно відключати споживачів теплоти.

## 6.2. Моделі акустичних сигналів витоків рідини в трубопроводах

Для моніторингу стану діючих трубопроводів теплотехнічного обладнання. широкі можливості і перспективи мають акустичні контактні методи виявлення витоків у трубопроводах, які можуть використовуватися як самостійно, так і в комбінації з іншими методами діагностики і контролю, наприклад, тепловими.

Основними завданнями подальшого розвитку методів акустичного контактного течешування є підвищення завадостійкості та чутливості до витоків, точності їх локації і розширення типів контрольованих об'єктів. Успішне вирішення цих завдань можливо на основі використання сучасних математичних моделей акустичних сигналів витoku і полягає у визначенні нових інформативних характеристик і параметрів та розробці методів і алгоритмів обробки сигналів витoku.

**Модель формування акустичного сигналу витоку рідини в трубопроводі.** Розглянемо діагностичну ділянку трубопроводу (рис. 6.7), на якій в точках  $x_1$  і  $x_2$  встановлені приймальні перетворювачі.

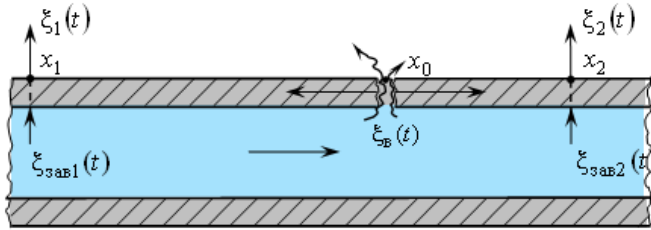


Рис. 6.7. Схема ділянки, що діагностується

При виникненні течії в деякій точці  $x_0$  об'єкту діагностування внаслідок перепаду тиску відбувається витік робочої рідини з труби, що супроводжується генерацією широкосмугових акустичних коливань з неперервним спектром. В такій системі утворюється декілька джерел пружних коливань середовища в зоні течії і в самому трубопроводі.

Сформований акустичний сигнал витіку  $\xi_B(t)$  поширюється трубопроводом в обидві сторони від точки  $x_0$  і реєструється двома перетворювачами, встановленими вздовж труби в точках  $x_1$  і  $x_2$ . На виході перетворювачів отримуємо електричні сигнали  $\xi_1(t)$  та  $\xi_2(t)$ , які мають різні часові затримки по відношенню до сигналу витіку  $\xi_B(t)$ . Ці затримки залежать як від відстані між джерелом сигналу витіку і перетворювачами, так і від швидкості поширення акустичних хвиль у середовищі.

Акустичний сигнал витіку  $\xi_B(t)$  при поширенні по акустикоелектронному каналу, до якого входить об'єкт діагностування та електроакустичний перетворювач, може суттєво змінюватись внаслідок розбіжності хвиль, поглинання, розсіювання і дифракції, а також через дисперсії швидкості звуку і загасання. При взаємодії з поверхнею об'єкта випромінені хвилі відбиваються і трансформуються, а при поширенні по стінці об'єкта контролю акустичні хвилі зазнають багаторазових відбиттів.

Необхідно чітко розрізняти дисперсне й бездисперсне поширення сигналу, тобто залежність швидкості поширення сигналу від частоти. У трубопроводах, що транспортують рідкі середовища, процес поширення акустичних хвиль являє собою змішану картину; на вхід прийомного перетворювача може надходити декілька сигналів від того само-

го джерела витоку, що переносяться різними типами хвиль [12]. Умови виникнення цих хвиль і швидкість їх поширення визначаються параметрами об'єкта (товщиною стінки трубопроводу, густиною й температурою рідини, що транспортується) і параметрами контролю (відстанню між прийомними перетворювачами, їх робочою частотою) [13].

Крім акустичного сигналу витоку приймальні перетворювачі реєструють також акустичні завади  $\xi_{зав1}(t)$  і  $\xi_{зав2}(t)$ , серед яких важливою є шум, що створюється рухом потоку робочої рідини.

Моделі сигналів  $\xi_1(t)$  та  $\xi_2(t)$  можуть мати різну форму подання й записуватись з різним ступенем математичної деталізації. Вибір того рівня складності, що робить модель корисною, визначається з погляду ефективності її використання при діагностуванні за допомогою конкретного методу.

Трубопровід має складну структуру, в яку входять труби різного діаметру й довжини, розгалуження, повороти, запірна й регулююча арматури та ін. Для побудови моделі системи – тракт поширення акустичного сигналу, розглянемо досліджувану ділянку трубопроводу як систему типу «чорний ящик» з одним входом і одним виходом, де відбувається формування, передача, прийом і перетворення спостережуваних сигналів. Тоді закон зв'язку між входом і виходом системи має вигляд

$$y(t) = W_t \{x(t)\}, \quad x(t) \in X, \quad y(t) \in Y,$$

де  $X$  – простір впливів,  $Y$  – простір відгуків,  $W_t \{\cdot\}$  – оператор, що описує систему.

У випадку наявності течії сигнал  $\xi_B(t)$ , обумовлений витоком, поширюється різними акустичними трактами (рис. 6.8): 1 – безпосередньо по стінці трубопроводу; 2 – через робочу речовину із трансформацією на межі зі стінкою трубопроводу; 3 – крізь прийомне середовище із трансформацією на межі зі стінкою трубопроводу, зокрема через повітря, що оточує трубопровід. Тут  $W_t \{\cdot\}$  – оператор, що описує проходження кожним трактом,  $k$  – номер тракту.

Для побудови діагностичної моделі акустичного контактного те- чошукання зробимо наступні припущення.

1. Трубопровід на ділянці, що діагностується – циліндричний, з однорідного пружного матеріалу (сталі, чавуну, і т.п.). Робоча речовина – рідина.

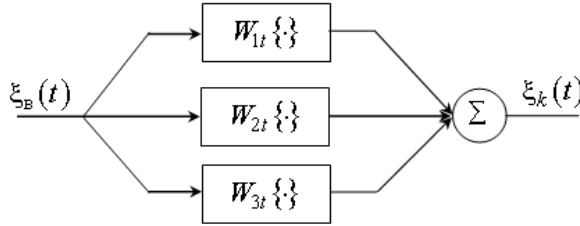


Рис. 6.8. Схема системи з одним входом і одним виходом та з декількома трактами

2. Рух рідини трубою – одновимірний, зі швидкістю руху менше, ніж швидкість звуку; рідина малостискувана.

3. У загальному випадку сигнал витоку  $\xi_B(t)$  і акустичні завади  $\xi_{зав}(t)$  є нестационарними випадковими процесами, оскільки залежать від тиску в трубопроводі і температури теплоносія.

4. Досліджуваний сигнал реєструється електроакустичними перетворювачами, встановленими на стінках трубопроводу в точках  $x_1$  і  $x_2$ .

5. Акустичний тракт середовища має лінійні властивості, відбиття від меж об'єкта і трансформація типів хвиль відсутня.

6. Електроакустичний перетворювач здійснює лінійне перетворення з компонентами вектора зсувів або поверхнею циліндра, або частинок середовища, що заповнює. Електричними завадами знехтуємо.

При сформульованих припущеннях 1–6, загальна модель сигналу на виході перетворювачів має наступний вигляд:

$$\xi(t) = A_{\text{ЕАП}} \{ A_{\text{сер}} [\xi_B(t) + \xi_{зав}(t)] \} = A_T \{ \xi_B(t) \} + A_{\text{ЕАП}} \{ \xi_{зав}(t) \},$$

де  $\xi_B(t)$  і  $\xi_{зав}(t)$  – акустичні сигнали витоку і завад відповідно;  $A_{\text{ЕАП}}$  і  $A_{\text{сер}}$  – лінійні оператори, що описують електроакустичний перетворювач і середовище розповсюдження;  $A_T$  – добуток цих операторів, що описує акустико-електронний тракт: джерело витоку рідини – вихід перетворювача.

Структурна схема формування акустичного сигналу наведена на рис. 6.9.

Тут  $h_{0,k}(r, t)$ ,  $h_{1,k}(t, \tau)$ ,  $k = 1, 2$  – імпульсні характеристики трубопроводу, які характеризують просторову координату  $r$  і акустичний

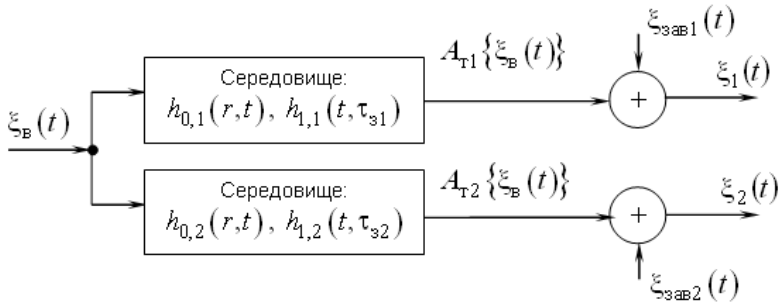


Рис. 6.9. Схема формування досліджуваного акустичного сигналу

тракт розповсюдження сигналів на ділянках  $l_1 = x_0 - x_1$  і  $l_2 = x_2 - x_0$ ;  $\tau_{31}$ ,  $\tau_{32}$  – затримки надходження сигналу витоку в точки  $x_1$  і  $x_2$ ,

$$\tau_{31} = l_1/c, \quad \tau_{32} = l_2/c,$$

де  $c$  – швидкість звуку в трубопроводі.

Для спрощення задачі прийемо, що електричний тракт не вносить спотворень, тобто  $A_{ЕАП} = 1$ . Акустичний тракт характеризується інтегральними коефіцієнтами послаблення  $A_1 = A_{Т1}(t)$ ,  $A_2 = A_{Т2}(t)$ , які враховують послаблення сигналу витоку на ділянках  $l_1 = x_0 - x_1$  і  $l_2 = x_2 - x_0$ .

Таким чином, модель сигналів  $\xi_1(t)$  і  $\xi_2(t)$  на виході перетворювачів має наступний вигляд:

$$\xi_1(t) = \xi_{в1}(t) + \xi_{зав1}(t) = A_1 \xi_{в}(t, \tau_{31}) + \xi_{зав1}(t), \quad (6.5)$$

$$\xi_2(t) = \xi_{в2}(t) + \xi_{зав2}(t) = A_2 \xi_{в}(t, \tau_{32}) + \xi_{зав2}(t). \quad (6.6)$$

На коротких інтервалах спостереження (біля декількох хвилин), які достатні для обробки [14], ці сигнали можна вважати стаціонарними. З фізичних міркувань можна припустити, що сигнал витоку й завади є незалежними процесами; завади в точках  $x_1$  і  $x_2$  теж можна вважати незалежними процесами з однаковими імовірнісними характеристиками

Розглянемо ймовірнісні характеристики сигналів  $\xi_1(t)$  і  $\xi_2(t)$ , що реєструються приймальними перетворювачами, які можуть виступати як діагностичні характеристики.

Формули для знаходження математичного сподівання  $m_1, m_2$ , дисперсій  $D_1$  і  $D_2$  сигналів (6.5), (6.6) з урахуванням властивостей адитив-



вності [15], та їх взаємної кореляційної функції  $R_{12}(\tau)$  мають вигляд

$$m_1(t) = m_1 = A_1 m_B + m_{\text{зав}}, \quad m_2(t) = m_2 = A_2 m_B + m_{\text{зав}},$$

$$D_1(t) = D_1 = A_1^2 D_B + D_{\text{зав}}, \quad D_2(t) = D_2 = A_2^2 D_B + D_{\text{зав}},$$

$$R_1(t_1, t_2) = R_1(t_2 - t_1) = R_1(\tau) = A_1^2 R_B(\tau) + R_{\text{зав}}(\tau),$$

$$R_2(t_1, t_2) = R_2(t_2 - t_1) = R_1(\tau) = A_2^2 R_B(\tau) + R_{\text{зав}}(\tau),$$

$$R_{12}(t_1, t_2) = R_{12}(t_2 - t_1) = R_{12}(\tau) = A_1 A_2 R_B(\tau - \tau_0),$$

де  $\tau_0$  – зсув кореляційної функції  $R_B(\tau)$ ,  $\tau_0 = \tau_{32} - \tau_{31}$ .

Функція  $R_{12}(\tau)$  має максимум в точці  $\tau = \tau_0$ , який дорівнює

$$\max_{\tau} R_{12}(\tau) = R_{12}(\tau_0) = A_1 A_2 D_B.$$

Оскільки сигнал витоку й завада не обов'язково мають гауссівський закон розподілу миттєвих значень, то більш повними характеристиками є щільності ймовірностей і характеристичні функції цих процесів. З врахуванням того, що сигнал витоку й завада є незалежними та стаціонарними, щільності ймовірностей і характеристичні функції результируючих сигналів мають такий вигляд:

$$p_1(x) = p_{B1}(x) \otimes p_{\text{зав1}}(x), \quad p_2(x) = p_{B2}(x) \otimes p_{\text{зав2}}(x), \quad (6.7)$$

$$f_1(u) = f_{B1}(u) f_{\text{зав1}}(u), \quad f_2(u) = f_{B2}(u) f_{\text{зав2}}(u). \quad (6.8)$$

Проте на практиці для процесів з негауссівським законом розподілу одержати в явному вигляді вирази для законів розподілу складових виразів (6.7), (6.8), вдається в деяких окремих випадках, отже необхідно застосовувати наближені методи. Зокрема для знаходження щільності ймовірностей, що мало відрізняється від гауссівської, широко використовується ряд Грама – Шарльє [14, 16], який для стандартної щільності ймовірностей при врахуванні поліномів до шостого порядку має наступний вигляд:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \left(1 + \frac{\gamma_3}{6} H_3(x) + \frac{\gamma_4}{24} H_4(x) + \frac{\gamma_5}{120} H_5(x) + \frac{\gamma_6 + 10\gamma_3^2}{720} H_6(x)\right), \quad (6.9)$$

де  $\gamma_s = \kappa_s / \kappa_2^{s/2}$  – кумулянтні коефіцієнти  $s$ -го порядку,  $H_s(x)$  – поліноми Ерміта.

Простішими інформативними характеристиками є одновимірні кумулянтні функції. Для стаціонарних процесів одновимірні кумулян-

тні функції не залежать від часу і є числами, які назвемо кумулянтами й для спрощення запису позначимо  $\kappa_s[\xi]$ . Кумулянти сигналів (6.5) і (6.6) дорівнюють:

$$\kappa_s[\xi_1] = A_1^s \kappa_s[\xi_B] + \kappa_s[\xi_{зав}], \quad \kappa_s[\xi_2] = A_2^s \kappa_s[\xi_B] + \kappa_s[\xi_{зав}],$$

де  $\kappa_s[\xi_B]$ ,  $\kappa_s[\xi_{зав}]$  – кумулянти сигналу витоку і завади, відповідно.

Отже, як діагностичні характеристики для виявлення сигналів витоку рідини в трубопроводі доцільно вибрати дисперсію й кумулянти вище другого порядку, а для визначення місця розташування – взаємну кореляційну функцію.

**Математичні моделі акустичного сигналу витоків рідини в трубопроводах.** Важливу роль для акустичного контактного пошуку витоків має кавітаційний режим течі, який супроводжується потужними кавітаційними шумами, що перевищують на порядок і більше шуми турбулентності. Кавітація є процесом нестійкої зміни розмірів парогазових бульбашок при знакозмінному тиску в рідині, які виникають, ростуть, нелінійно пульсують і схлопуються з утворенням ударних хвиль і кумулятивних струменів.

Кавітаційні бульбашки є зародками (ядрами) кавітації. Їх зростання може відбуватися як внаслідок дифузії розчиненого газу в бульбашці (газова кавітація), так і внаслідок втрати стійкості при швидкому розширенні бульбашки (парова кавітація). У [17, 18] показано, що при газовій кавітації випромінюється акустичний сигнал із малим енергетичним рівнем, тоді як парова кавітація характеризується енергійним схлопуванням бульбашок, внаслідок чого виникають ударні хвилі, які є причиною інтенсивного шуму.

Кавітацію слід розглядати як випадковий процес, оскільки розподіл бульбашок за розмірами, кількістю і простором об'єму має статистичний характер, залежний від розподілу зародків кавітації, газомісту, міжфазних меж, параметрів середовища та ін. Розглянемо основні стохастичні моделі сигналу витоку, створюваного паровою кавітацією.

**Процеси Бунімовича – Райса.** Вважаємо виконаними наступні припущення:

1) у випадкові моменти часу  $t_k$  відбуваються схлопування кавітаційних бульбашок, внаслідок чого виникають елементарні звукові імпульси;

2) імовірність  $P_n(\Delta t)$  того, що в інтервалі  $\Delta t$  виникне рівно  $n$  імпульсів, залежить тільки від  $\Delta t$  та  $n$  і не залежить від положення цього інтервалу на часовій осі;

3) кількість  $v(\Delta t_1)$  і  $v(\Delta t_2)$  елементарних імпульсів, які виникають протягом інтервалів часу  $\Delta t_1$  і  $\Delta t_2$ , що не перекриваються, є незалежними випадковими величинами;

4) імовірність появи на малому інтервалі  $\Delta t$  більше одного імпульсу є величиною більшого порядку малості в порівнянні з  $\Delta t$ ;

5) форма елементарного звукового імпульсу однакова для всіх кавітуючих бульбашок і описується не випадковою функцією  $h(t)$ ,  $h(t)=0$  при  $t < 0$ ;

6) амплітуди елементарних імпульсів  $\eta_k$  характеризують газоміст в рідині, однаково розподілені і є незалежними між собою і з  $t_k$  випадковими величинами;

7) кавітаційний шум у момент часу  $t$  є результатом накладення випадкового числа елементарних імпульсів.

На підставі сформульованих припущень моделлю акустичного сигналу витоку рідини є процеси Бунімовича – Райса [19]:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} \eta_k h(t - t_k), \quad (6.10)$$

де  $v(t)$  – однорідний процес Пуассона з параметром  $\lambda$ ;  $t_k$  – пуассонівський потік подій.

**Пуассонівські імпульсні процеси.** Для більш повного відображення в математичній моделі фізики утворення сигналу витоку скоригуємо умови 2) і 5):

2) число елементарних імпульсів  $v(\Delta t)$  може залежати від положення інтервалу  $\Delta t$  на осі часу;

5) форма імпульсів може бути різною для різних моментів часу  $t_k$  і залежати від вектора випадкових величин  $\boldsymbol{\eta}_k$ .

За таких припущень і незмінних інших умов моделлю акустичного сигналу витоку є пуассонівські імпульсні випадкові процеси [19]

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} h(t, t_k, \boldsymbol{\eta}_k), \quad (6.11)$$

де  $v(t)$  – неоднорідний процес Пуассона з математичним сподіванням  $\Lambda(t)$ ;  $t_k$  – моменти виникнення імпульсів  $t_k \in [0, \infty)$ ;  $h(t, \tau, \boldsymbol{\eta})$  – детермінована функція змінних  $t$  і  $\tau$ , залежна від вектора випадкових пара-

метрів  $\boldsymbol{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_n)$ ;  $\boldsymbol{\eta}_k$  – послідовність незалежних  $n$ -вимірних однаково розподілених випадкових векторів, незалежних від  $t_k$ .

Зазвичай використовується спрощений варіант моделі (6.11):

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} \eta_k h(t - t_k, \varepsilon_k), \quad t > 0, \quad (6.12)$$

де  $v(t)$  – однорідний процес Пуассона з параметром  $\lambda$ ;  $\eta_k$  і  $\varepsilon_k$  – скалярні незалежні випадкові величини. Очевидно, що модель (6.12) відрізняється від моделі (6.11) тільки присутністю випадкової величини  $\varepsilon_k$ . В загальному випадку процес (6.12) нестационарний, однак для  $t \gg \tau_0$ , де  $\tau_0$  – тривалість (ефективна тривалість) елементарного імпульсу, його можна вважати стаціонарним [20].

**Лінійні випадкові процеси.** Моделі (6.10) і (6.11) є окремими випадками лінійних випадкових процесів, які достатньо добре досліджені в теоретичному плані та визначаються за формулою [19]

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) d\eta(\tau),$$

де  $h(t, \tau)$  – не випадкова функція, а  $\eta(\tau)$  – однорідний випадковий процес з незалежними приростами. Нехай функція  $h(t, \tau)$  задовольняє умові  $h(t, \tau) = h(t - \tau)$ . Тоді процес

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) d\eta(\tau)$$

є стаціонарним у вузькому сенсі.

**Математичні моделі шумів потоку, що рухається.** При виявленні витоків акустичним контактним методом завадами є акустичні процеси, що не несуть інформацію про витоки, зокрема шуми, створювані потоком рідини, що рухається в трубопроводі; шуми, що виникають у трубопроводі при проходженні очисних пристроїв; шуми навколишнього середовища, що виникають внаслідок розмиву трубопроводу; шуми від ударів і тертя; шуми від працюючого устаткування (наприклад насосів). До основних джерел процесів шумоутворення в трубопроводі також відносяться елементи трубопроводу – вигини, звуження прохідного перетину, гнучкі вставки та ін., наявність яких призводить до сплесків на частотній характеристиці. У напірних трубопроводах

швидкість потоку рідини становить більше 0,5 м/с, режим руху – турбулентний.

Окрім швидкості руху рідини перехід до турбулентного режиму може бути обумовлений плавною або раптовою зміною діаметра труби, зміною форми потоку рідини. Турбулентний рух за своєю сутністю є рухом несталим; всі гідравлічні характеристики й, зокрема, швидкості в кожній точці зайнятого турбулентним потоком простору змінюються з часом. Течія у трубі стає повністю розвиненою лише на відстані п'ятдесяти (або більше) висот перетину труби від входу. Для загасання збурювань, внесених у потік вигинами труби, відгалуженнями й змінами перетину потрібен час.

Пульсації тиску, обумовлені утвореннями вихору при турбулентності, викликають механічні коливання трубопроводу. Частота збудження гідродинамічної вібрації знаходиться за формулою [21, 22]

$$f_{\text{в}} = St \cdot v/d,$$

де  $St$  – число Струхалія, що характеризує утворення вихрів у потоці рідини або газу;  $v$  – швидкість потоку рідини;  $d$  – діаметр труби. Число Струхалія приймає не єдине значення, для розвинутої турбулентності  $St \approx 0,2$ . Основна енергія зосереджена в області великомасштабних пульсацій [23, 24].

Класичними рівняннями, що описують турбулентний рух, є хвильові рівняння Нав'є – Стокса [23]. Вони ефективні у тих випадках, коли відомою є досить точна локація витоків, тоді як практичне рішення задачі для протяжних ділянок може бути запропоновано тільки теоретично. Хвильові рівняння у формі Лайтхілла [17, 24] дозволяють пояснити фізичну природу джерел виникнення звукових хвиль. Складання рівнянь Нав'є – Стокса [21] у кореляційній формі ще не забезпечує рішення задачі, оскільки якщо навіть виключити із цих рівнянь складові, що описують дію або тиск і виразити їх параметри поля швидкості, то й тоді кількість невідомих перевищить кількість рівнянь. Проте, дане рівняння має цінність для трактування характеру розвитку турбулентності під дією сил інерції, тиску й в'язкості.

Характеристики турбулентної течії – швидкість  $\mathbf{u}$  і тиск  $p$ , є випадковими функціями простору  $\mathbf{x}$  й часу  $t$ , тому перспективним представляється опис турбулентного руху потоку рідини на основі ймовірного підходу [25, 26].

Якщо модуль швидкості  $\mathbf{u}$  в деякій точці простору – часу  $(\mathbf{x}, t)$  описується щільністю ймовірностей  $p(|\mathbf{u}|)$ , то моменти  $s$ -го порядку

визначені виразом

$$\alpha_s [\mathbf{u}] = \mathbf{M} \left\{ |\mathbf{u}|^s \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} |\mathbf{u}|^s p(|\mathbf{u}|) d|\mathbf{u}|, s = 1, 2, \dots, \infty.$$

Для однорідної турбулентності статистичні величини мають властивість ергодичності [23], математичне сподівання  $m = \alpha_1 [\mathbf{u}] = \overline{|\mathbf{u}|}$  покладається рівним нулю (риска означає часове осереднення). Тоді момент другого порядку  $\alpha_2 [\mathbf{u}] = D[\mathbf{u}]$  називається дисперсією й характеризує енергію флуктуаційного руху.

Акустичні завади, які виникають у напірних трубопроводах при транспортуванні робочої рідини, характеризуються інтенсивним турбулентним шумом зі спектром від одиниць до сотень кілогерц і мають спектральну щільність виду

$$S(f) \sim f^{-b},$$

де  $b$  – деяка стала. Для однорідної турбулентності вважають [23], що щільність імовірностей пульсацій швидкості розподілена за нормальним законом.

З фізичної точки зору турбулентний шум є імпульсним гідроакустичним процесом, тому його математичною моделлю можуть бути лінійні випадкові процеси [19]:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) dw(\tau),$$

де  $h(t, \tau)$  – детермінована функція,  $w(\tau)$  – вінерівський процес.

### 6.3. Статистичний аналіз акустичних сигналів витоків рідини в трубопроводах

Складність і різноманітність фізичних процесів виникнення та поширення акустичних сигналів витоків [21, 24, 27, 28] обмежують можливість аналітичних методів розв'язку задачі виявлення витоків в трубопроводах. У зв'язку з цим для аналізу інформативності імовірнісних характеристик акустичного сигналу витоків представляється доцільним використовувати експериментальні методи.

Експериментальні дослідження акустичних сигналів витоків рідини [21, 27–29] обмежуються аналізом спектральних і кореляційних функцій, причому залежності цих функцій від зміни тиску в трубі та діаметра течії вивчені недостатньо. Метою наведених нижче результатів дос-

ліджень є статистичний аналіз у низькочастотній області залежності щільності імовірностей, кумулянтних, спектральних і кореляційних функцій сигналів витоків від зміни тиску та діаметра течі.

**Установка для фізичного моделювання витоків рідини в трубопроводах.** Для отримання достовірних результатів статистичного аналізу акустичних сигналів витоків необхідно проводити експеримент на трубі з відомими розмірами течі, забезпечити регулювання та контроль тиску в трубі та виключити вплив шуму потоку рідини, що рухається в трубі, та зовнішніх шумів.

Сформульованим вимогам задовольняє розроблена та виготовлена у відділі теплотехніки, діагностики та оптимізації в енергетиці Інституту технічної теплофізики НАН України установка (рис. 6.10), що дозволяє здійснювати фізичне моделювання течі в трубі та проводити експериментальні дослідження сигналів витоків у стоячій воді [30].

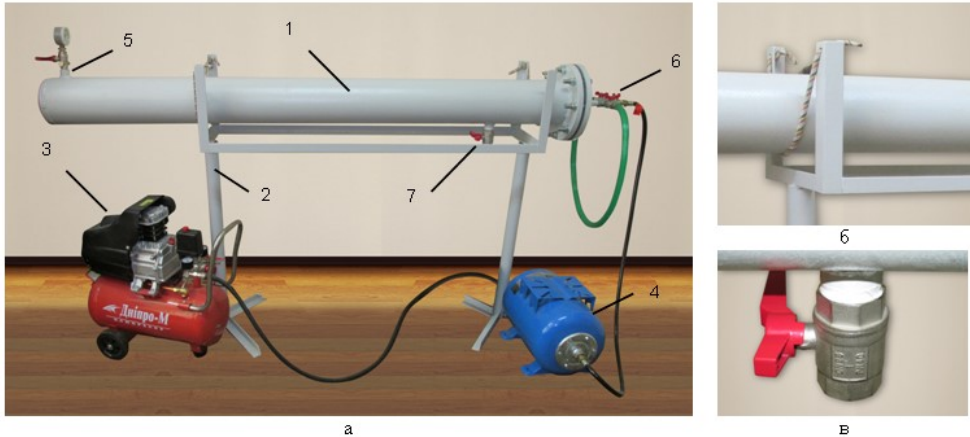


Рис. 6.10. Фото установки для фізичного моделювання та експериментального дослідження витоків у трубопроводі:  
*а* – зовнішній вигляд всієї установки; *б* – кріплення труби до стійки;  
*в* – вузол для імітації течі

Установка складається з таких вузлів: труба (циліндричний бак) 1, стійка 2, поршневий повітряний компресор з регулятором тиску 3, бак (гідроаккумулятор) 4, регулятор рівня тиску в трубі з манометром 5, вузол розподілу подачі-зливу води в трубі з кульковими кранами 6, вузол для імітації течі в трубі 7.

Розглянемо конструкцію й принцип роботи установки.

Основною складовою частиною установки є сталева труба діаметром 159 мм і товщиною стінки 7 мм. Кінці труби закриті заглушками еліпсоїдної форми, причому одна з них із фланцевим з'єднанням, що

дозволяє проводити чищення труби, або навпаки, додавати домішки для відтворення середовища відповідним експлуатаційним умовам. Робочим середовищем усередині труби може бути як рідина, так і газ. Для забезпечення акустичної розв'язки труба підвішена на канатах, які закріплені в стійці (див. рис. 6.10, б).

У трубу через вузол подачі і регулювання надходить рідина, надлишковий тиск якої може досягати до 8 атм. Тиск у трубопроводі створюється поршневим повітряним компресором з ресивером, тиск у ресивері компресора задається за допомогою регулятора тиску. Контроль над тиском можливий за манометрами, один із яких установлений на трубі, інший – на компресорі. Подача або скидання тиску в трубі установки здійснюється клапаном з ручним керуванням, наявним на виході ресивера компресора.

У конструкцію установки входить гідроакумулятор ємністю 22 л, що дозволяє реалізувати сталість тиску в трубі в режимі імітації витoku води за рахунок компенсації втрат води через течу. Ресивер компресора підключається до гідроакумулятора за допомогою гнучкого шланга через спеціальний клапан, вмонтований у днище гідроакумулятора (при приєднаному шлангу клапан відкритий). Усередині гідроакумулятора встановлена гумова камера, що заповнена водою, на яку тисне повітря. Таким чином, вода не насичується повітрям і не контактує із металевим корпусом. При роботі установки на стисненому повітрі ресивер компресора підключається безпосередньо на вхід трубопроводу через перехідник, минаючи гідроакумулятор.

На трубі встановлена арматура, що забезпечує заповнення камери гідроакумулятора і труби установки водою від водопроводу. Надлишкове повітря можна спустити через спеціальний муфтовий кран, установлений на трубі, контролюючи тиск по встановленому тут же манометрі. Після того, як при відкритих арматурах гідроакумулятор і труба установки повністю заповнені водою, перекривається надходження води й включається компресор на необхідний тиск. В арматурах є штуцер зі шлангом, що забезпечує злив води.

Для роботи стенду в режимі імітації витoku рідини або газу в патрубках на трубі (див. рис. 6.10, в) встановлюється насадка з наскрізним отвором циліндричної форми з мідними стінками, через яку і відбувається витікання робочої речовини в атмосферу. Є шість насадок, у яких довжина «основного» каналу збігається з товщиною труби (7 мм), а діаметри наскрізних отворів дорівнюють 0,5; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 2,1 мм. На рис. 6.11 наведений ескіз насадки та її зовнішній вигляд разом з мон-



тажним ключем. Конструкція кріплення труби (див. рис. 6.10, б) дозволяє просто здійснювати зміну насадки.

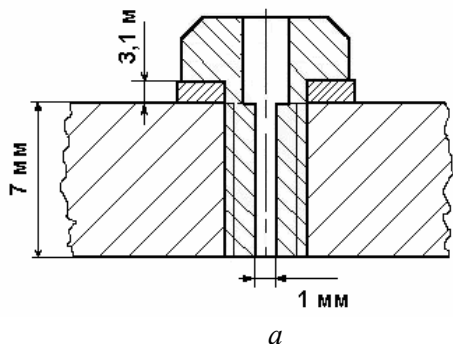


Рис. 6.11. Насадка: а – ескіз; б – зовнішній вигляд

Теча може бути перекрита краном, встановленим на патрубку. Додатково для відтворення натурних умов отвір патрубка накривається мікропористим тілом.

**Експериментальні дослідження імовірнісних характеристик акустичного сигналу витoku.** Експерименти проводилися на установці при тиску в трубі 2, 4 і 6 атм і наступних розмірах каналу: насадка 1 – діаметром 1 мм і насадка 2 – діаметром 2,1 мм.

Збір та опрацювання акустичних сигналів витoku здійснювалися мобільною системою для зйому, реєстрації та опрацювання акустичних сигналів, до складу якої входять п'єзoeлектричний акселерометр KD 39 (робочий діапазон частот до 13 кГц, чутливість по напрузі 5 мВ/(м/с<sup>2</sup>)); підсилювач заряду LP-03 (коефіцієнт підсилення по напрузі 24 дБ); підсилювач – фільтр РУ2-11; модуль АЦП ADA-1406 (розрядність 14 біт, частота дискретизації до 350 кГц); ноутбук.

Акселерометр кріпився за допомогою цементуючої шпильки на шліфовану поверхню труби на відстані 50 мм від патрубка. Параметри запису сигналів витoku наступні: частота дискретизації 150 кГц; кількість відліків 10<sup>6</sup> (тривалість запису близько 6,5 с); частота зрізу фільтра нижніх частот 13 кГц.

За допомогою розроблених алгоритмів і програм [14] здійснювався запис сигналів на жорсткий диск з їх подальшою обробкою, яка містила в собі оцінювання наступних імовірнісних характеристик – кумулянтів, кумулянтних коефіцієнтів, щільностей імовірностей, спектральних щільностей, кореляційних функцій.

**Попередній аналіз.** Проаналізовано залежність рівня сигналів витoku від місця установки перетворювачів на трубі (рис. 6.12). Точка з

координатою  $x_1$  розташована поблизу течі, на відстані 0,05 м від неї; точка з координатою  $x_2$  – напроти течі. Акселерометри кріпилися за допомогою цементуючої шпильки на шліфвану поверхню труби.



Рис. 6.12. Схема установки перетворювачів

Дослідження проводилися при тиску в трубі 6 атм, діаметр течі дорівнював 1 мм. Вимірювалися середні квадратичні відхилення (СКВ) електроакустичних шумів і сигналу витоку, а також розраховувалися рівні  $L_\sigma$  вібрацій цих процесів за формулою

$$L_\sigma = 20 \lg \{ \sigma[a] / a_0 \},$$

де  $\sigma[a]$  – середнє квадратичне відхилення віброприскорення  $a$ ,  $a_0$  – опорний рівень віброприскорення,  $a_0 = 10^{-6} \text{ м/с}^2$ . Результати досліджень наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. СКВ та рівень сигналу витоку в різних точках знімання

Точка знімання сигналу	СКВ, м/с <sup>2</sup>	Рівні, дБ
1	0,7869	117,92
2	0,5367	114,60

З наведених у табл. 6.1 результатів випливає, що рівень сигналу в точці  $x_2$  менше ніж рівень сигналу в точці  $x_1$  на 3,3 дБ, що становить не більше 3 %. Тому в наступних дослідженнях сигнал витоку знімався в точці  $x_1$ .

Визначимо відношення сигналу витоку в точці  $x_1$  до завади (с/з), яка створюється електроакустичним трактом, через їх середні квадратичні відхилення. Результати вимірювань наведені в табл. 6.2.

З табл. 6.2 випливає, що в точці  $x_1$  відношення с/з становить не менше, ніж 40 дБ.

Таблиця 6.2. Середні квадратичні відхилення та рівні

Вимірюваний процес	Параметри	
	СКВ, В	Рівні, дБ
Електроакустична завада	0,0094	79,48
Суміш електроакустичної завади із сигналом	1,0537	120,45

На рис. 6.13 наведені оцінки спектральних щільностей електроакустичного шуму і сигналу витоку, які отримані на основі модифікованих періодограм із застосуванням швидкого перетворення Фур'є (перекриття сусідніх сегментів 50 %). Розмір прямокутного вікна даних становив 1024 відліків, що дає роздільну здатність по частоті  $\Delta f \approx 146,5$  Гц.

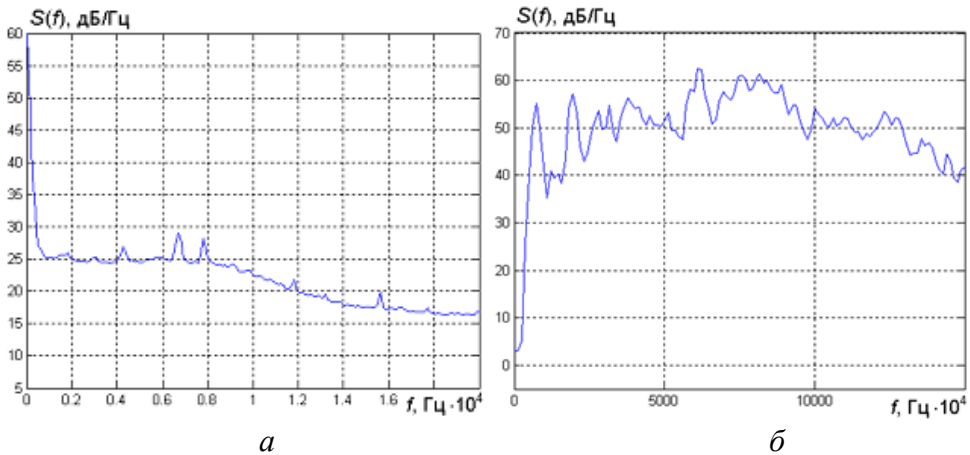


Рис. 6.13. Спектральні щільності: *a* – шумів тракту; *б* – сигналу витоку

Із графіків рис. 6.13 видно, що спектральна щільність сигналу витоку перевищує спектральну щільність шумів тракту в середньому на 50 дБ у всьому частотному діапазоні.

Подальші експерименти проводилися при тиску в трубі 2, 4 і 6 атм і наступних розмірах каналу: насадка 1 – діаметром 1 мм і насадка 2 – діаметром 2,1 мм.

Типові реалізації сигналів витоку при діаметрі течі 2,1 мм наведені на рис. 6.14 для різних значень тисків у трубі: *a* – 2 атм (117,5 дБ), *б* – 4 атм (123,1 дБ), *в* – 6 атм (124,6 дБ). У дужках наведені рівні вібрації відносно  $a_0=10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>.

Приведемо результати дослідження типових реалізацій сигналів витоку [31].

**Кумулянтний аналіз.** У табл. 6.3 наведено значення оцінок кумулянтів  $\hat{\kappa}_s, s = \overline{2,6}$ , які обчислювалися на підставі формул зв'язку кумулянтів з моментами [14, 16] та оцінок цих моментів.

З даних табл. 6.3 випливає, що з ростом тиску значення кумулянтів парних порядків зростають для обох насадок. Абсолютні значення кумулянтів непарних порядків зростають, за винятком  $\hat{\kappa}_3$  для насадки 2 і тиску 6 атм.

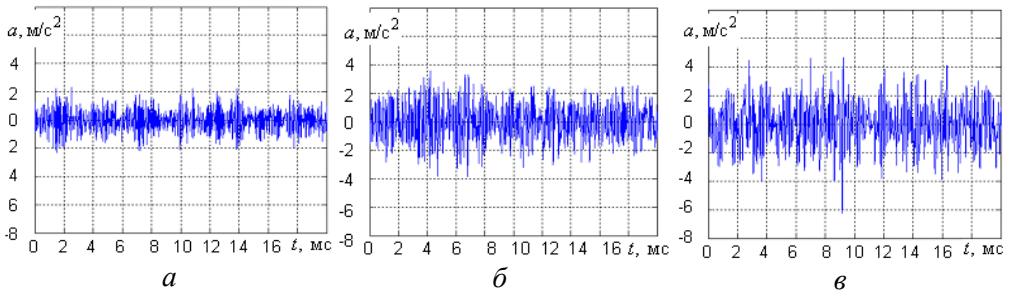


Рис. 6.14. Реалізації сигналів витоку для різних значень тисків

При зміні діаметра течі з 1 до 2,1 мм абсолютні значення кумулянтів зростають (за винятком  $\hat{\kappa}_6$ ), зокрема, при тиску 6 атм  $\hat{\kappa}_2$  відрізняються в 2,65 разів. З ростом тиску величина відношення кумулянтів одного порядку зменшується.

Таблиця 6.3. Значення оцінок кумулянтів

Тиск, атм	Насадка 1					Насадка 2				
	$\hat{\kappa}_2$	$\hat{\kappa}_3$	$\hat{\kappa}_4$	$\hat{\kappa}_5$	$\hat{\kappa}_6$	$\hat{\kappa}_2$	$\hat{\kappa}_3$	$\hat{\kappa}_4$	$\hat{\kappa}_5$	$\hat{\kappa}_6$
2	0,028	$-4,1 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$-1,8 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	0,56	0,001	0,12	0,004	0,27
4	0,171	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,013	$3,8 \cdot 10^{-5}$	0,006	1,95	0,017	0,36	-0,025	0,35
6	1,085	$-2,7 \cdot 10^{-3}$	0,385	0,006	0,724	2,88	-0,003	0,78	0,43	0,65

Визначимо величину  $\delta_n$ , що характеризує сумарний внесок кумулянтів  $\kappa_s, s = \overline{3, n}$ , відносно дисперсії  $\kappa_2$ , таким чином:

$$\delta_n = \left( \sum_{s=3}^n |\hat{\kappa}_s| / \hat{\kappa}_2 \right) 100 \% .$$

Використовуючи дані табл. 6.3 отримуємо, що величина  $\delta_6$  при тиску 6 атм для насадки 1 становить 103 %, а для насадки 2 – 49,8 %. Таким чином, для збільшення чутливості виявлення витоків рідини в трубопроводах доцільно враховувати кумулянти вищих порядків, а величина  $\delta_n$  може бути використана як діагностичний параметр.

В табл. 6.4 наведено значення оцінок кумулянтних коефіцієнтів  $\hat{\gamma}_s, s = \overline{3, 6}$ . З даних табл. 6.4 випливає, що при всіх тисках для обох насадок абсолютні значення коефіцієнтів асиметрії  $\hat{\gamma}_3$  менші за 0,008, а  $\hat{\gamma}_5$

– менші за 0,12. Зі збільшенням діаметра течі значення кумулянтних коефіцієнтів  $\hat{\gamma}_4$  і  $\hat{\gamma}_6$  зменшуються.

Таблиця 6.4. Значення оцінок кумулянтних коефіцієнтів

Тиск, атм	Насадка 1				Насадка 2			
	$\hat{\gamma}_3$	$\hat{\gamma}_4$	$\hat{\gamma}_5$	$\hat{\gamma}_6$	$\hat{\gamma}_3$	$\hat{\gamma}_4$	$\hat{\gamma}_5$	$\hat{\gamma}_6$
2	-0,0079	0,8253	-0,1178	3,4665	0,0019	0,3655	0,0164	1,5328
4	0,0051	0,4181	-0,0009	0,9882	0,0064	0,095	-0,0047	0,046
6	-0,0025	0,3100	0,0142	0,4843	-0,0006	0,0935	0,0305	0,0270

Найбільші значення ці коефіцієнти мають для насадки 1 при тиску 2 атм ( $\hat{\gamma}_4=0,8253$ ;  $\hat{\gamma}_6=3,4665$ ), що показує істотну відмінність закону розподілу сигналів витоку від гауссівського. Для насадки 2 при тисках 4 і 6 атм абсолютні значення всіх коефіцієнтів  $\hat{\gamma}_s, s=3,6$ , не перевищують 0,1, тому розподіл сигналів витоку в цьому випадку можна вважати гауссівським.

**Аналіз щільності ймовірностей.** На рис. 6.15 наведено графіки оцінок щільностей ймовірностей  $\hat{p}(x)$ , які отримані для центрованих і нормованих сигналів витоку на основі ряду Грама – Шарльє [14, 16, 31], який для стандартної щільності ймовірностей при врахуванні поліномів до шостого порядку має вигляд (6.9), при чому  $\hat{\gamma}_s, s=3,6$  – оцінки кумулянтних коефіцієнтів (див. табл. 6.4).

З рис. 6.15 видно, що при різних діаметрах течі й тисках отримані щільності ймовірностей  $\hat{p}(x)$  практично однакові та мають форму,

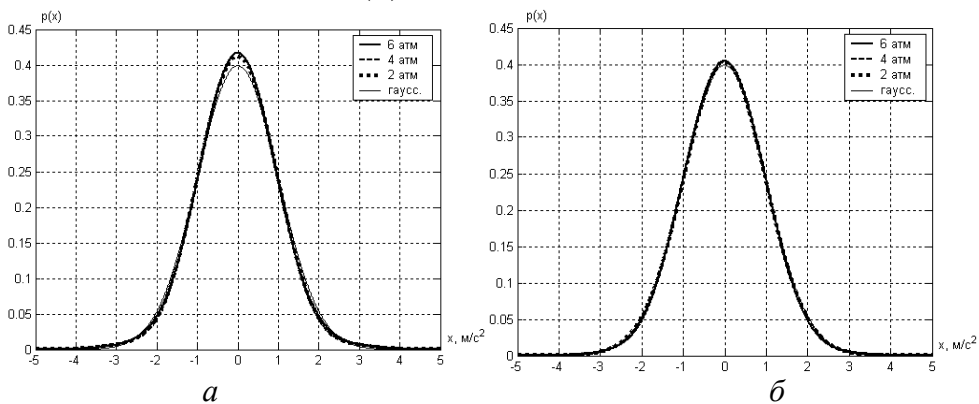


Рис. 6.15. Оцінки стандартних щільностей ймовірностей:  
а – насадка 1, б – насадка 2

близьку до кривої стандартної гауссівської щільності ймовірностей  $p_n(x)$ . У табл. 6.5 наведено значення величини  $\max |\hat{p}(x) - p_n(x)|$ .

Таблиця 6.5. Відстані між оцінками щільностей ймовірностей і стандартною гауссівською щільністю ймовірностей

Тиск, атм	Насадка 1	Насадка 2
2	0,0133	0,0060
4	0,0177	0,0044
6	0,0182	0,0045

З рис. 6.15 і табл. 6.5 випливає, що щільності ймовірностей сигналів витoku є малоінформативними характеристиками при визначенні діаметра течії й тиску.

**Спектрально-кореляційний аналіз.** На рис. 6.16 наведено оцінки спектральних щільностей сигналів витoku відносно опорного рівня прискорення  $a_0=10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>, які отримані на основі модифікованої періодограмної оцінки [14] із застосуванням швидкого перетворення Фур'є при перекритті сусідніх сегментів 50%.

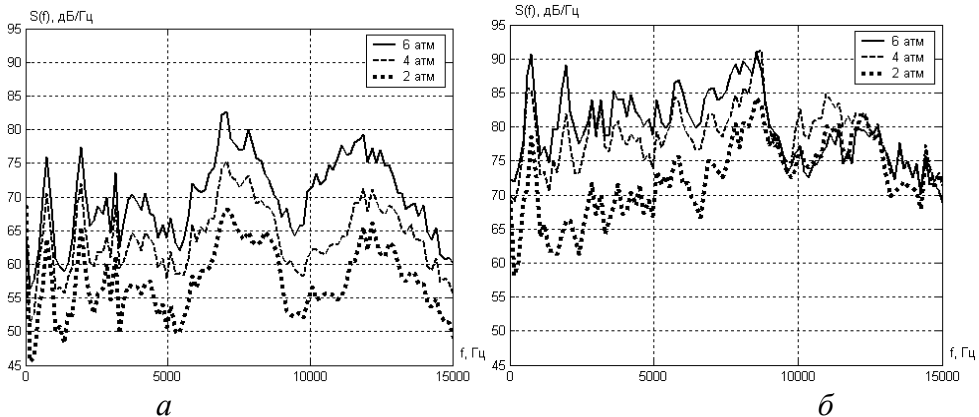


Рис. 6.16. Оцінки спектральних щільностей:  
а – насадка 1, б – насадка 2

Розмір прямокутного вікна даних становив 1024 відліків, що забезпечило роздільну здатність по частоті  $\Delta f \approx 146,5$  Гц. Спектральна щільність шуму вимірювального тракту практично постійна у всьому робочому частотному діапазоні й дорівнює 24 дБ/Гц.

З рис. 6.16, а видно, що для насадки 1 при різних тисках зміна частотних залежностей має подібний характер, причому максимум оцінки

спектральної щільності зосереджений на частоті близько 7,1 кГц, максимальна різниця між оцінками при тисках 2 і 4 атм рівна 9,7 дБ на частоті 3,3 кГц, а при тисках 4 і 6 атм – 13,6 дБ на частоті 11,1 кГц. Для насадки 2 (рис. 6.16, б) максимум спектральної щільності зосереджений на частоті близько 8,6 кГц. З рис. 6.16 випливає, що спектральна щільність сигналів витоку може бути використана при визначенні діаметра течі.

На рис. 6.17 наведено оцінки нормованих кореляційних функцій сигналів витоку, отримані за стандартними формулами [14] із застосуванням трикутного кореляційного вікна шириною  $10^{-3}$  с, яка обернено пропорційна ефективній ширині спектральної щільності 1 кГц.

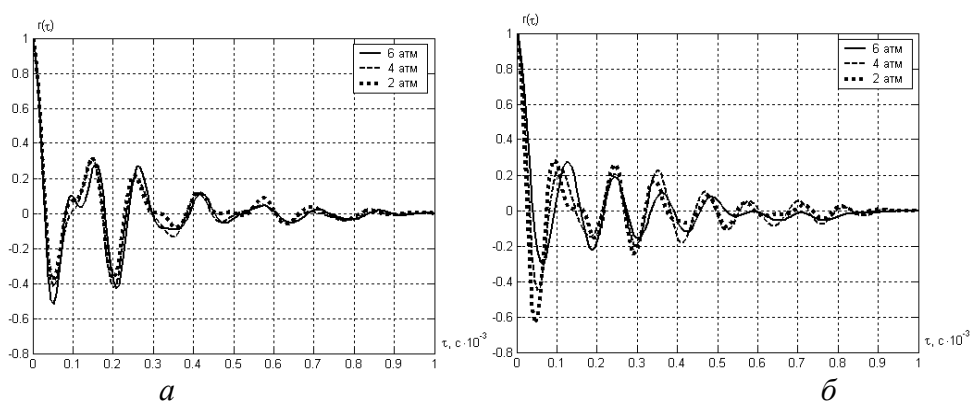


Рис. 6.17. Оцінки нормованих кореляційних функцій:  
а – насадка 1, б – насадка 2

З рис. 6.17 видно, що оцінки нормованих кореляційних функцій мають подібний згасаючий осцилюючий характер і мало залежать від величини тиску в трубопроводі для обох насадок. Швидкість загасання для насадки 2 менше, ніж для насадки 1, а інтервали між нулями кореляційних функцій для різних насадок відрізняються – дорівнюють приблизно 0,14 мс (насадка 1) і 0,116 мс (насадка 2), що відповідає частотам максимумів спектральних щільностей 7,1 кГц і 8,6 кГц для цих насадок (див. рис. 6.16). Тому довжина інтервалу між нулями кореляційних функцій і кількість нуль-перетинів цих функцій можуть бути використані при визначенні діаметра течі.

**Аналіз впливу смужової фільтрації.** Розгляд спектральних щільностей на рис. 6.16 дозволив зробити висновок, що у сигналів витоку існують три характерні смуги частот: 1 – 0...5 кГц, 2 – 5...10 кГц, 3 – 10...15 кГц.

Для проведення аналізу імовірнісних характеристик сигналів виток у цих смугах частот початкові реалізації сигналів піддавались цифровій фільтрації [32] за допомогою фільтрів Баттерворта з відповідними видами й порядками фільтрів (рис. 6.18), розрахунковими значеннями згасання  $A(f)$  на відповідних частотах:

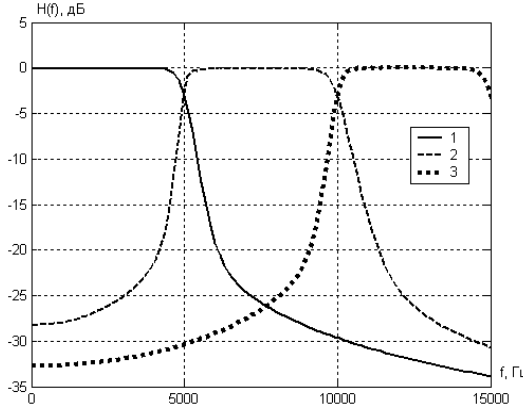


Рис. 6.18. Амплітудно-частотні характеристики цифрових фільтрів

1 – ФНЧ, 15 порядок,  $A(5 \text{ кГц})=3\text{дБ}$ ,  $A(6 \text{ кГц})=20 \text{ дБ}$ ;

2 – смуговий фільтр, 8 порядок,  $A(4 \text{ кГц})=20 \text{ дБ}$ ,  $A(5 \text{ кГц})=3 \text{ дБ}$ ,  $A(10 \text{ кГц})=3\text{дБ}$ ,  $A(11 \text{ кГц})=20 \text{ дБ}$ ;

3 – смуговий фільтр, 8 порядок,  $A(9 \text{ кГц})=20 \text{ дБ}$ ,  $A(10 \text{ кГц})=3 \text{ дБ}$ ,  $A(15 \text{ кГц})=3\text{дБ}$ ,  $A(16 \text{ кГц})=20 \text{ дБ}$ .

Дослідження проведені для двох насадок при тиску в трубі 6 атм.

На рис. 6.19 наведено оцінки спектральних щільностей, на рис. 6.20 – оцінки нормованих кореляційних функцій для двох насадок після проведення фільтрації в трьох смугах частот.

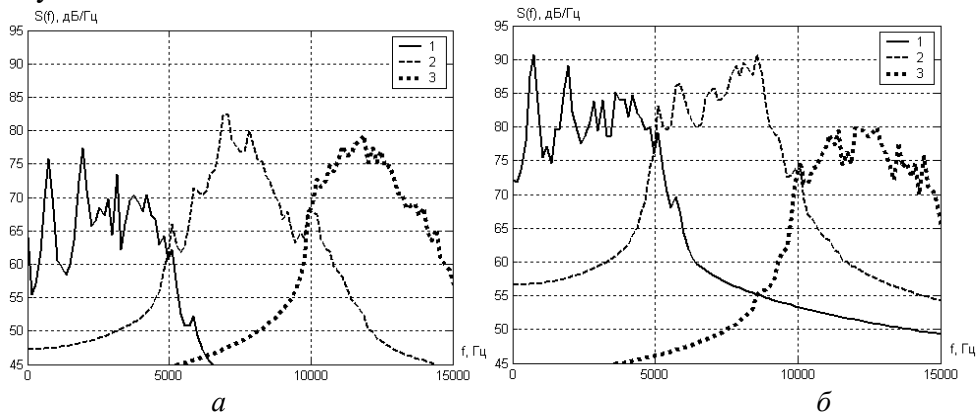


Рис. 6.19. Оцінки спектральних щільностей для трьох смуг частот: а – насадка 1, б – насадка 2; 1 – 0...5 кГц, 2 – 5...10 кГц, 3 – 10...15 кГц

Оцінки нормованих кореляційних функцій для обох насадок мають подібний згасаючий осцилюючий характер, при цьому для смуг 5...10 кГц і 10...15 кГц інтервали часу проходження через нуль приблизно відповідають частотам максимальних значень спектральних щільнос-



тей на рис. 6.16: насадка 1 – 7 кГц та 11,9 кГц, насадка 2 – 8,6 кГц та 12,5 кГц відповідно.

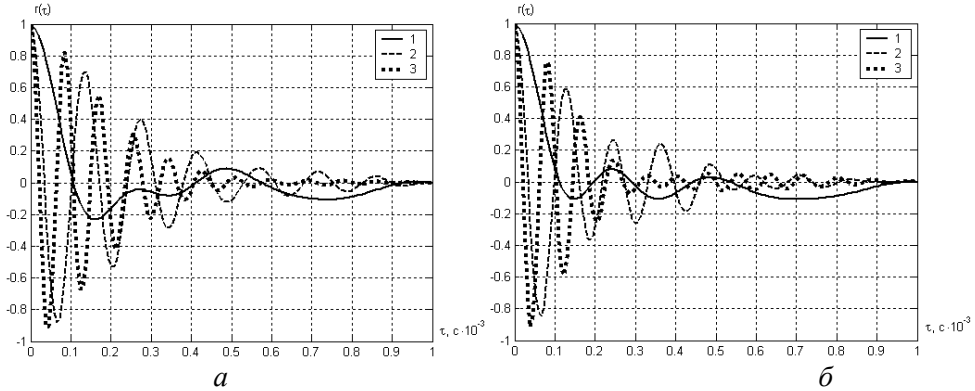


Рис. 6.20. Оцінки нормованих кореляційних функцій для трьох смуг частот: а – насадка 1, б – насадка 2; 1 – 0...5 кГц, 2 – 5...10 кГц, 3 – 10...15 кГц

У табл. 6.6 і 6.7 наведено значення оцінок кумулянтів і кумулянтних коефіцієнтів відповідно для двох насадок після проведення фільтрації в трьох смугах частот.

Таблиця 6.6. Значення оцінок кумулянтів для трьох смуг частот

Смуга частот, кГц	Насадка 1				
	$\hat{\kappa}_2$	$\hat{\kappa}_3$	$\hat{\kappa}_4$	$\hat{\kappa}_5$	$\hat{\kappa}_6$
0...5	0,149	$-4,9 \cdot 10^{-4}$	0,0037	$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,001
5...10	0,807	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0,194	0,0011	0,074
10...15	0,107	$-1,7 \cdot 10^{-7}$	0,020	$3,3 \cdot 10^{-7}$	0,060
	Насадка 2				
0...5	1,00	-0,0029	0,10	-0,082	0,10
5...10	1,60	$-1,4 \cdot 10^{-4}$	0,44	-0,021	1,67
10...15	0,22	$8,3 \cdot 10^{-7}$	0,0074	$-8,1 \cdot 10^{-8}$	0,0021

Як видно з табл. 6.6 значення оцінок кумулянтів парних порядків для смуги частот 5...10 кГц найбільші серед всіх смуг частот. Видно, що суми значень оцінок кумулянта  $\hat{\kappa}_2$  для трьох смуг частот практично дорівнюють значенням  $\hat{\kappa}_2$  з табл. 6.3. Оцінки кумулянтів непарних порядків близькі до нуля: найбільше абсолютне значення становить 0,082 для  $\hat{\kappa}_5$  (насадка 2, смуга 0...5 кГц). Як видно з табл. 6.7 абсолютні значення оцінок кумулянтних коефіцієнтів непарних порядків не перевищує 0,081 для ( $\hat{\gamma}_5$ , насадка 2, смуга 0...5 кГц).

Таблиця 6.7. Значення оцінок кумулянтних коефіцієнтів для трьох смуг частот

Смуга частот, кГц	Насадка 1				Насадка 2			
	$\hat{\gamma}_3$	$\hat{\gamma}_4$	$\hat{\gamma}_5$	$\hat{\gamma}_6$	$\hat{\gamma}_3$	$\hat{\gamma}_4$	$\hat{\gamma}_5$	$\hat{\gamma}_6$
0...5	-0,011	0,140	0,057	0,149	-0,0030	0,10	-0,081	0,10
5...10	$6 \cdot 10^{-5}$	0,287	0,0024	0,119	$6,8 \cdot 10^{-5}$	0,17	-0,0064	0,41
10...15	$-6,4 \cdot 10^{-6}$	1,445	$-4 \cdot 10^{-5}$	23,9	$8,1 \cdot 10^{-6}$	0,16	$-3,6 \cdot 10^{-6}$	0,20

Значення оцінок кумулянтних коефіцієнтів парних порядків більше відрізняються від нуля: найбільше значення дорівнює 23,9 для  $\hat{\gamma}_6$  (насадка 1, смуга 10...15 кГц). Для діапазонів частот 5...10 кГц і 10...15 кГц значення оцінок парних кумулянтних коефіцієнтів  $\hat{\gamma}_4$  і  $\hat{\gamma}_6$  (за винятком насадки 1, смуга 5...10 кГц) перевищують відповідні значення з табл. 6.4 для 6 атм.

Таким чином, статистичний аналіз сигналів витоку рідини показав, що кумулянти й кумулянтні коефіцієнти вищих порядків найбільш чутливі до зміни діаметра течі й тиску. Стандартні щільності ймовірностей сигналів витоку при зміні діаметра течі й тиску практично однакові й збігаються зі стандартною гауссівською щільністю ймовірностей. Спектральні щільності для насадки 1 мають подібний характер при різних тисках, але істотно відрізняються від спектральної щільності для насадки 2. При визначенні діаметра течі інформативними параметрами можуть бути довжина інтервалу між нулями кореляційних функцій і число нуль-перетинів цих функцій.

**Статистичний аналіз зміни ймовірнісних характеристик сигналу витоку при його поширенні.** Сигнал витоку рідини при поширенні по трубопроводу зазнає змін, які пов'язані з акустичними характеристиками тракту. Теоретичний розрахунок таких змін не представляється можливим, тому доцільним є проведення експериментальних досліджень, що дозволяють на основі статистичного аналізу визначити зміни ймовірнісних характеристик сигналу витоку при його поширенні.

Два акселерометри встановлені на відстані 1 м один від одного (рис. 6.21) у точці з координатою  $x_1$  – поблизу течі (на відстані 0,05 м від неї) і в точці з координатою  $x_2$  – на відстані 1,05 м від течі, тобто 1 м від точки  $x_1$ .

Сигнали вводились у ноутбук по двох каналах із частотою дискре-

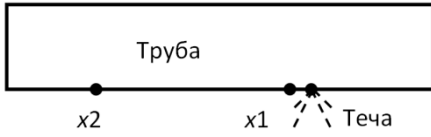


Рис. 6.21. Схема установки датчиків

трубі 2, 4 і 6 атм і постійному діаметрі каналу, який дорівнював 1 мм. Типові реалізації акустичного сигналу витoku наведені на рис. 6.22–6.24: *a* – сигнал у точці  $x_1$ ; *b* – сигнал у точці  $x_2$ .

тизації 150 кГц на канал, частота зрізу ФНЧ становила 13 кГц. Число відліків, що використовувались для обробки, становило  $10^6$ .

**Величина загасання.** Дослідження проводилися при тисках у

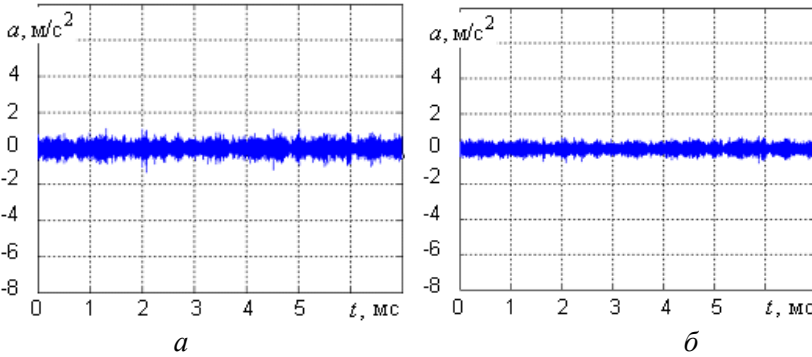


Рис. 6.22. Реалізації сигналів витoku при поширенні на 1 м при тиску 2 атм

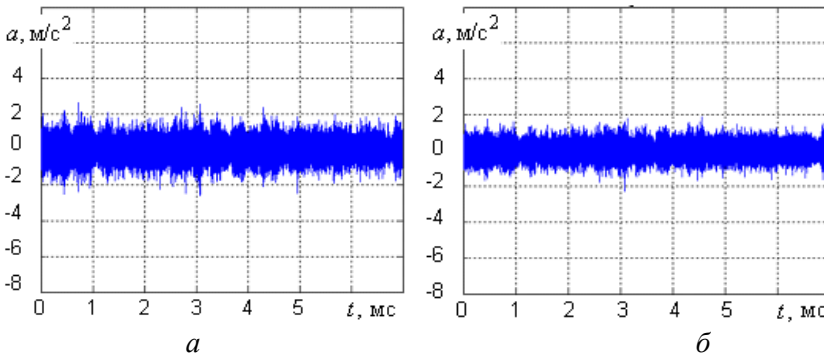


Рис. 6.23. Реалізації сигналів витoku при поширенні на 1 м при тиску 4 атм

Для визначення загасання акустичного сигналу витoku на відстані 1 м вимірювались середні квадратичні відхилення сигналів витoku у точках з координатами  $x_1$  і  $x_2$ .

У табл. 6.8 наведені відношення середніх квадратичних відхилень сигналів у точках  $x_1$  і  $x_2$ , а також різниця цих параметрів, виражена у рівнях сигналу відносно опорного рівня віброприскорення  $a_0=10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>.

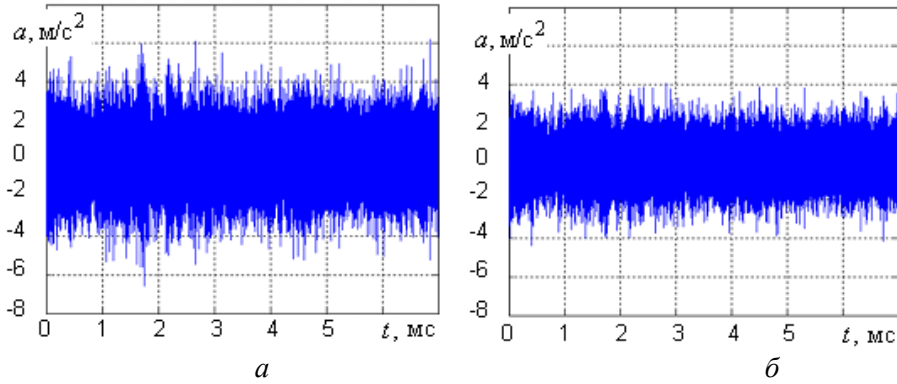


Рис. 6.24. Реалізації сигналів витoku при поширенні на 1 м при тиску 6 атм

Таблиця 6.8. Загасання сигналу витoku на відстані 1 м

Тиск, атм	$\sigma_2/\sigma_1, 1/м$	$L_{\sigma_2} - L_{\sigma_1}, дБ$
2	0,73	-2,67
4	0,80	-1,95
6	0,74	-2,56

З наведених даних випливає, що загасання сигналу на відстані 1 м при тисках у трубі 2, 4 і 6 атм приблизно однакові і не перевищує 3 дБ. Тому подальші дослідження проводилися при тиску у трубі 6 атм і діаметрі каналу 1 мм.

**Спектрально-кореляційний аналіз.** Оцінки спектральних щільностей сигналів витoku в точках  $x_1$  і  $x_2$  відносно опорного рівня віброприскорення  $a_0=10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> наведені на рис. 6.25, а, оцінки нормованих кореляційних функцій – на рис. 6.25, б.

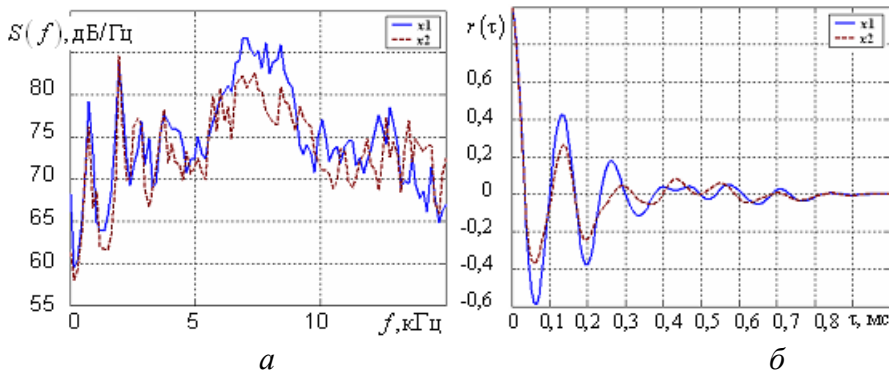


Рис. 6.25. Оцінки спектральних щільностей і кореляційних функцій сигналів витoku

З рис. 6.25, а видно, що оцінки спектральних щільностей у точках  $x_1$  і  $x_2$  мають подібний характер, причому максимум зосереджений на частоті близько 7 кГц, різниця між оцінками спектральних щільностей біля цього максимуму становить 4,4 дБ.

Максимальна різниця між оцінками становить: у нулі – 6,9 дБ; у діапазоні частот 0...5 кГц – 8,1 дБ на частоті 3,2 кГц; у діапазоні частот 10...13 кГц – 8,9 дБ на частоті 12,3 кГц.

Оцінки нормованих кореляційних функцій (див. рис. 6.25, б) мають подібний загасаючий осцилюючий характер, причому швидкість загасання кореляційної функції в точці  $x_2$  менше, ніж у точці  $x_1$ . Інтервали між нулями кореляційних функцій сигналів витоків в точках  $x_1$  і  $x_2$  трохи розрізняються – дорівнюють приблизно 0,14 мс ( $x_1$ ) і 0,135 мс ( $x_2$ ), що відповідає частотам 7,1 і 7,5 кГц максимумів спектральних щільностей для цих точок.

**Аналіз щільностей імовірностей.** Графіки оцінок стандартних щільностей імовірностей сигналів витоків в точках  $x_1$  і  $x_2$  та стандартної гауссівської щільності ймовірностей  $p_n(x)$  наведені на рис. 6.26.

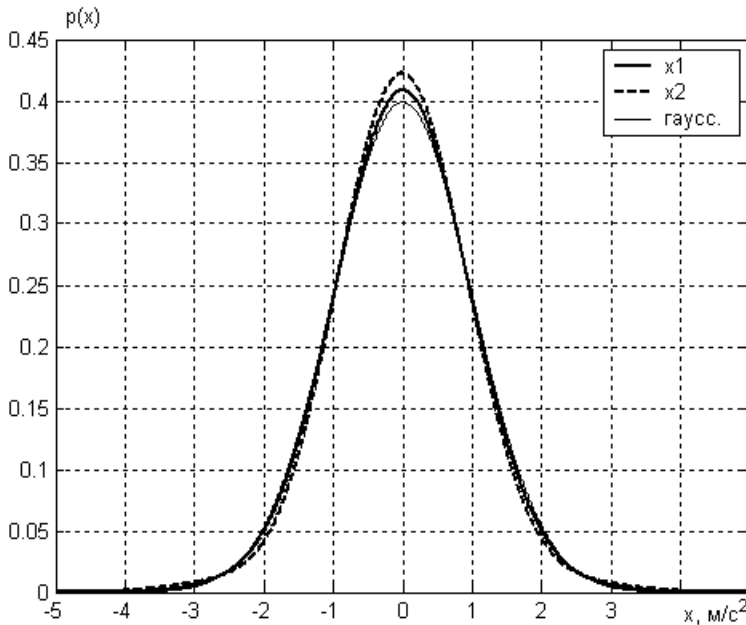


Рис. 6.26. Оцінки щільностей імовірностей сигналів витоків

З рис. 6.26 видно, що щільності ймовірностей сигналів витоку в точках  $x_1$  і  $x_2$  практично співпадають, для них величина  $\max|\hat{p}(x) - p_n(x)| = 0,024$ , але відрізняються від гауссівської щільності ймовірностей.

**Кумулянтний аналіз.** Результати оцінювання кумулянтів і кумулянтних коефіцієнтів сигналів витоку в точках  $x_1$  і  $x_2$  наведені в табл. 6.9, 6.10. З даних табл. 6.9, 6.10 випливає, що при поширенні сигналу витоку в трубі на відстані 1 м при 6 атм значення відношення кумулянтів і кумулянтних коефіцієнтів парних порядків зменшуються, а непарних – збільшуються.

Таблиця 6.9. Кумулянти сигналу витоку

Точка	$\kappa_2$	$\kappa_3$	$\kappa_4$	$\kappa_5$	$\kappa_6$
1	1,0851	-0,00267	0,38459	0,00643	0,72371
2	0,60123	-0,0033	0,10301	-0,00982	0,08011
$\kappa_{s,2} / \kappa_{s,1}$	0,55408	1,23596	0,26784	-1,52722	0,11069

Таблиця 6.10. Кумулянтні коефіцієнти сигналу витоку

Точка	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$
1	-0,00249	0,30999	0,014219	0,48429
2	-0,00677	0,27496	-0,0282	0,33684
$\gamma_{s,2} / \gamma_{s,1}$	2,71888	0,8867	-1,98326	0,69553

Експериментальні дослідження показали, що при поширенні сигналу витоку на відстань 1 м загасання не перевищує 3 дБ/м. Істотні зміни характеру спектральних щільностей, кореляційних функцій і щільностей ймовірностей сигналів витоку, пов'язаних з поширенням і загасанням відсутні. Кумулянтні коефіцієнти парних порядків на відстані 1 м зменшуються, а непарних – збільшуються.

**Література**

1. МУ 34-70-080-84. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных и паровых тепловых сетях. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1986. – 72с.
2. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Беспрозванный А.А., Самокиш А.И., Воробьев Л.И., Гайдучек А.В., Ненюк А.Т. Контроль теплопотерь на участках теплотрасс // Энергетика и электрификация –2000. – №8 – С. 44–48.
3. Бабак В.П., Воробйов Л.Й., Декуша Л.В., Красильников О. И., Назаренко А.О., Полобюк Т.А. Система моніторингу втрат в тепломережах // Нова тема. - №1, 2012. – С. 36-39.
4. Воробйов Л.Й., Декуша Л.В., Трикоз П.І. Прилади контролю теплового стану тепломереж / Промисловостіміста – інноваційний шлях розвитку // Матеріали Київської міської науково-практ. конф. – К.: ТОВ “ДІА”, 2002. – С. 230–236.
5. Температурные измерения. Справочник / Геращенко О.А. и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 704 с.
6. Линеверг Ф. Измерение температур в технике. Справочник. Пер. с нем. – М.: Изд-во “Металлургия”, 1980. – 544 с.
7. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества / Справочник. – Л.: Машиностроение, 1989.
8. Геращенко О.А. Основы теплотметрии.–К.: Наук. думка, 1972.– 192с.
9. ГОСТ 30619-98 (ДСТУ 3756-98) Энергосбережение. Преобразователи теплового потока термоэлектрические общего назначения. Общие технические условия. – К.: Госстандарт Украины, 2000. – 21 с.
10. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 212 с.
11. Кутателадзе С.С. теплопередача и гидродинамическое сопротивление//Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
12. Кузнецов Н.С. Использование теории гидродинамического шума для поиска утечек жидкости в подземных трубопроводах / Н.С. Кузнецов, П.С. Панасюк // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 6. – С. 6–14.
13. Жуков А.В. Распространение акустических волн в нефтепроводах / А.В. Жуков, А.Н. Кузьмин // Журнал "В мире НК". – 2011. – № 3 (сентябрь). – <http://www.interunis-ural.ru/section/54/>.

14. *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія / за ред. В.П. Бабака.* – К.: Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015. – 512 с.
15. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
16. *Крамер Г.* Математические методы статистики / Г. Крамер; пер. с англ. А.С. Мони́на и А.А. Петро́ва; под ред. А.Н. Колмогоро́ва. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
17. *Миниович И.Я.* Гидродинамические источники звука / И.Я. Миниович, А.Д.Перник, В.С.Петровский. – Л.: Судостроение, 1972. – 480с.
18. *Левковский Ю.Л.* Структура кавитационных течений / Ю.Л. Левковский. – Л.: Судостроение, 1978. – 224 с.
19. *Марченко Б.Г.* Линейные случайные процессы и их приложения / Б.Г. Марченко, Л.Н. Щербак. – К.: Наук. думка, 1975. – 143 с.
20. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
21. *Дробот Ю.Б.* Акустическое контактное течеискание / Ю.Б. Дробот, В.А. Грешников, В.Н. Бачегов. – М.: Машиностроение, 1989. – 120с.
22. *Орыняк И.В.* Применение метода начальных параметров к анализу связанных гидромеханических колебаний трубопроводных систем. Сообщение 3. Анализ вынужденных вибраций паропроводов энергоблока ВВЭР-1000 / И.В. Орыняк, А.С. Батура, С.А. Радченко, С.М. Агеев // Проблемы прочности. – 2012. – № 2. – С. 113–124. – Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PPT\\_2012\\_2\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PPT_2012_2_10).
23. *Петровский В.С.* Анализ нестационарных акустических процессов. Теоретические основы / В.С. Петровский. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 224 с.
24. *Овчинников А. Л.* Особенности распространения сигналов акустической эмиссии утечек в трубопроводах с жидкостью и аппаратура контроля герметичности. автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 05.11.13 «Приборы и методы контроля природ. среды, веществ, материалов и изделий» / Овчинников Алексей Львович. – Томск, 2006. – 19 с.
25. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – М.: Наука, 1978. – 463 с.



26. *Рожков В.А.* Вероятностные модели океанологических процессов / В.А.Рожков, Ю.А.Трапезников. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 272с.
27. *Владимирский А.А., Владимирский И.А., Семенюк Д.Н.* Уточнение диагностической модели трубопровода для повышения достоверности течеискания // *Акустичний вісник.* – 2005. – Т. 8, № 3. – С. 3–16.
28. *Кузнецов Н.С., Тарасюк П.С.* Использование теории гидродинамического шума для поиска утечек жидкости в подземных трубопроводах // *Контроль. Диагностика.* – 2000. – № 6. – С. 6–14.
29. *Строганов В.А., Хоролитч В.Н.* Экспериментальное исследование сигналов утечек подземных трубопроводов // *Вісник СевНТУ. Вип. 101: Інформатика, електроніка, зв'язок: зб. наук. пр.* – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – С. 29–32.
30. *Красильников А.И., Полобюк Т.А.* Установка для физического моделирования и экспериментального исследования утечек в трубопроводе // *Метрологія та прилади.* – 2014. – № 1; II (45). – С. 147–150.
31. *Красильников А.И., Березун В.С., Полобюк Т.А.* Статистический анализ физических моделей акустических сигналов утечки жидкости в трубопроводе // «*КОНСОНАНС–2015*», акустичний симпозіум, 29–30 вересня 2015 р.: Збірник праць. – К.: Інститут гідромеханіки НАН України, 2015. – С. 116–121.
32. *Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е.* Обработка сигналов. – К.: Либідь, 1999. – 496с.

## 7. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ

Загальні втрати теплової енергії на об'єкті споживання можуть сягати 35%. За даними енергоаудитів тепловтрати в будівлях розподіляються наступним чином:

- через зовнішні стіни втрачається 30-40%,
- перекриття даху 15-20%,
- вентиляцію 10-15%,
- вікна і двері 10-20%,
- перекриття підвалу близько 5%.

Основним завданням моніторингу теплоспоживання є виявлення потенціалу будівлі щодо зниження тепловтрат, насамперед, через огорожувальні конструкції, та оцінка ефективності (або навіть доцільності) впровадження тих чи інших заходів з енергозбереження.

### 7.1 Методи і засоби моніторингу огорожувальних конструкцій будівель

Експлуатація житлових та громадських будинків здійснюється протягом багатьох десятиріч, і найважливішою є проблема надійності теплоізоляційної оболонки, її спроможності забезпечувати прийнятний при проектуванні будинку рівень теплозахисту та, відповідно, показники тепловитрат на забезпечення необхідних тепловологісних комфортних умов у приміщеннях. Показники теплової надійності та енергоефективності потрібно розглядати в єдиному методичному комплексі при проектуванні та оцінюванні будівель. Тому показники енергоефективності та теплової надійності теплоізоляційної оболонки мають вирішальне значення при оцінюванні експлуатаційних параметрів будинку в цілому, і моніторингу теплоспоживання, зокрема.

**Комбінований метод обстеження огорожувальних конструкцій** поєднує в собі дистанційний (за допомогою тепловізійної техніки) якісний аналіз температурних полів зовнішніх огорожувальних конструкцій та інструментальне визначення теплотехнічних показників навколишнього середовища – температури, вологості, тиску та швидкості руху повітря поблизу поверхонь огорожувальних конструкцій – з кількісними контактними вимірюваннями значень поверхневої густини теплового потоку та температури обстежуваної поверхні та повітря поблизу них в представницьких зонах. Теплотехнічні характеристики теплоізоляційної оболонки будівель визначають за наявності знач-

ного температурного напору, що становить не менше ніж 15 К, при включеній системі опалення в холодний період року, або в весняно-осінній період за рахунок штучного підігрівання або підсиленої вентиляції повітря всередині приміщення.

Теплотехнічне обстеження будівель з метою визначення фактичних значень теплового опору огорожувальних конструкцій, опору теплопередаванню та теплових втрат крізь неї і встановлення ступеню відповідності стану тепलोзахисту будівлі (споруди) сучасним нормативним вимогам складається з таких робіт:

- підготування до обстеження;
- візуальне обстеження об'єкту;
- основне тепловізійне обстеження;
- контактні вимірювання опору теплопередаванню крізь огорожувальні конструкції;
- опрацювання та оформлення результатів вимірювань.

При *підготуванні до обстеження* огорожувальних конструкцій в натурних умовах потрібно, по-перше, ознайомитися з технічною документацією і, по-друге, вибрати і підготувати необхідні засоби вимірювальної техніки (ЗВТ). Необхідно ознайомитися з проектною документацією, енергетичним паспортом (за наявності) та нормативно-технічними документами, що стосуються будівлі (споруди), включаючи вивчення будівельних креслень фасадів, планів, деталей огорожувальних конструкцій з геометричною прив'язкою до лінійних розмірів будівлі в цілому, та розглянути загальні відомості про будівлю, у тому числі норми з опору теплопередаванню, що діяли під час будівництва, а також термін експлуатації, дані про проведені раніше роботи з ремонту, модернізації та (або) реконструкції, про кліматичний район розташування будівлі, особливості навколишнього ландшафту. Це дозволить визначити місця розташування утеплювачів, закладних елементів і стояків та зон з теплопровідними включеннями, що впливають на розподіл температури по поверхні обстежуваної ОК, і попередньо вибрати представницькі зони, а також визначити очікувані значення основних теплотехнічних характеристик ОК за енергетичним паспортом або проектною документацією чи, у разі їх відсутності, попереднім розрахунком з використанням додаткових даних про теплофізичні характеристики будівельних матеріалів [1, 2].

Враховуючи рекомендації нормативних документів [1, 2] виконується вибір та комплектування потрібних ЗВТ та допоміжного устаткування.

Шляхом *візуального обстеження* умов експлуатації і технічного стану огорожувальних конструкцій за зовнішніми ознаками виявляються в будівельних елементах із зовнішнього та внутрішнього боків будівлі можливі дефекти та пошкодження, які знижують теплозахисні властивості. До них можна віднести:

а) в цегляних стінах – деформації та пошкодження, що з'явилися в результаті нерівномірної осадки фундаменту, впливу теплових і динамічних дій (тріщин в кладці по осях колон, сколів цеглин, пошкодження опорних вузлів перетинок тощо), руйнування та відшарування цеглини і розчину із зовнішнього боку цегляних стін; сколи, мокрі плями і замочені стіни через незадовільне відведення води з покрівлі, руйнування цокольної частини стін внаслідок замочування (при розморожуванні та порушенні гідроізоляції), місця руйнування кладки на карнизах та підвіконних ділянках;

б) в панельних стінах – зсуви та перекоси (прогини) стінових панелей в площині стін, руйнування елементів закладання у стиках стінових панелей (цементні закладання, ущільнені прокладки, герметизувальні мастики) відшарування захисних шарів в стінових панелях з оголенням та кородуванням арматури, кородовані закладові деталі, опорні вузли і арматура панелей, місця з порушеним антикорозійним шаром деталей кріплення, а також деформації вузлів кріплення стінових панелей внаслідок нерівномірної осадки фундаментів, теплових і динамічних дій (зсувів опорних вузлів, руйнування швів в панелях та ін.);

в) на покрівельних покриттях – зниження несучої здатності залізобетонних покрівельних плит (тобто руйнований захисний шар бетону, оголена та кородована арматура, зруйновані опорні плити, наявність на внутрішній поверхні плит тріщин, наскрізних отворів, вологих плям) ; місця з корозійним ураженням профільного настилу, підвищеним зволоженням утеплювачів, відсутність зчеплення пароізоляційного шару з гофрами профільного настилу і утеплювача з пароізоляцією, розривів, проколів і здуття покрівельного килима, ступеню збереження в ньому бітумної основи, фарби або захисного шару, неспівпадіння сполучення покрівлі з вертикальними конструкціями (стінами, парапетами), невідповідності ухилів покрівлі та водостоків вимогам проекту, а також товщини шарів покривів та матеріалів, що застосовані в них, проектним рішенням, застій води в розжолобку покрівлі, засмічення водостоків та водоприймальних пристроїв, наявність навантажень на покриття, що не передбачені проектом, відкладення матеріалів, сміття, частин устаткування, снігового покриву, місцевої нальоді тощо; порушення герметичності швів і сполучень віконних і дверних рам та відсутність при-

строїв відкривання віконних рам, парпетних плит або інших засобів захисту на карнизних ділянках стін, фартухів, жолобів на підвіконних та інших ділянках стін з водовідведенням;

г) на внутрішніх поверхнях огороджувальних конструкцій – ознаки порушення температурно-вологісного режиму (мокрі плями, сліди паморозі, обледеніння на поверхні зовнішньої стіни, в кутах тощо).

За результатами цього візуального обстеження складається відомість виявлених дефектів, що погіршують теплозахисні властивості огороджувальних конструкцій. За наявності численних дефектів і пошкоджень, вказаних у відомості дефектів, а також ознак незадовільного температурно-вологісного режиму всередині приміщень, приймається рішення щодо оформлення протоколу про доцільність або недоцільність продовження обстеження. У випадку визнання недоцільності подальших робіт приймається рішення про дату повторного обстеження стану теплозахисту після усунення виявлених недоліків.

По закінченні візуального обстеження, включаючи оцінювання умов експлуатації будинку та метеоумов на момент обстеження, та прийняття рішення щодо продовжування випробувань готують поверхні, які підлягають обстеженню, оцінюють метеоумови і вимірюють показники навколишнього середовища, які повинні відповідати таким вимогам:

- швидкість вітру не більше 4 м/с при обстеженні будівель з опором теплопередаванню огороджувальних конструкцій на рівні (1,0 – 2,0) м<sup>2</sup>·К/Вт і 2,0 м/с при обстеженні будівель з опором теплопередаванню більше ніж 2,0 м<sup>2</sup>·К/Вт;
- відносна вологість повітря не більше 80% за температури 20 °С;
- атмосферний тиск 84 ... 106,7 кПа (630 ... 800 мм рт. ст.);
- температура повітря -15 ... +30 °С.

Вимірювання показників зовнішнього навколишнього середовища виконують поблизу будівлі на відстані не більше ніж 20 м, на висоті 1,5 від поверхні землі, а для вимірювань на даху – не менше 2 м над найбільш високою ділянкою покрівлі. Швидкість вітру вимірюють в тих самих точках, в яких виміряні температура та відносна вологість повітря. Вимірювання в різних точках слід виконувати синхронно або з мінімальним розривом у часі.

Температуру та відносну вологість повітря всередині приміщення вимірюють у центральній зоні приміщення на висоті 1 ... 1,5 м від підлоги. Повний цикл одиничних вимірювань температури, відносної вологості повітря та швидкості руху повітря всередині приміщення вико-

нують одночасно на різних рівнях будівлі не менше трьох разів за період обстеження.

За відсутності серйозних відхилень показників навколишнього середовища від перелічених вимог виконують **оглядову тепловізійну зйомку** зовнішньої поверхні з одночасним фотографуванням будівлі та вимірюванням лінійних та кутових розмірів з метою визначення представницьких зон з характерними базовими і аномальними ділянками та їх площі. За результатами аналізу термограм та отриманих температурних полів остаточно вибирають представницьку зону (зони), які включають максимально можливу кількість різних типів характерних термічно однорідних ділянок, наприклад, фрагмент фасаду будівлі, що містить однорідну ділянку стіни, вікно, надвіконну балку, ділянку стіни уздовж теплових комунікацій тощо. На рис. 7.1 приведено приклад відбору характерних ділянок на фасаді будинку.

Обрану представницьку зону (зони) поверхні огорожувальної конструкції розбивають на характерні термічно однорідні ділянки для проведення повного обсягу безконтактних і контактних вимірювань та визначають серед них бездефектні, що мають неоднакову конструкцію, які приймають за базові, а також ділянки з відхилами поверхневої температури – аномальні. До цих ділянок відносять ділянки, температура зовнішньої поверхні яких відрізняється від температури характерної базової ділянки більше ніж на 2 К.

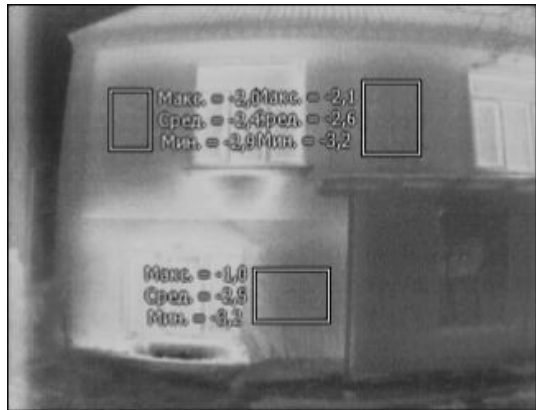


Рис. 7.1. Приклад визначення характерних ділянок на фасаді будинку

**Основне тепловізійне обстеження** теплоізоляційної оболонки будівлі (споруди) направлене на безконтактне вивчення розподілів поверхневої температури огорожувальних конструкцій з одночасним уточненням даних обмірних робіт для обчислення значень площі вибраних представницьких зон і окремих характерних ділянок, базових й аномальних. Структуру і зміст робіт з основного тепловізійного обстеження огорожувальних конструкцій показано на рис. 7.2.

Під час основного тепловізійного обстеження автоматично контролюють показники навколишнього середовища, зокрема середньо-

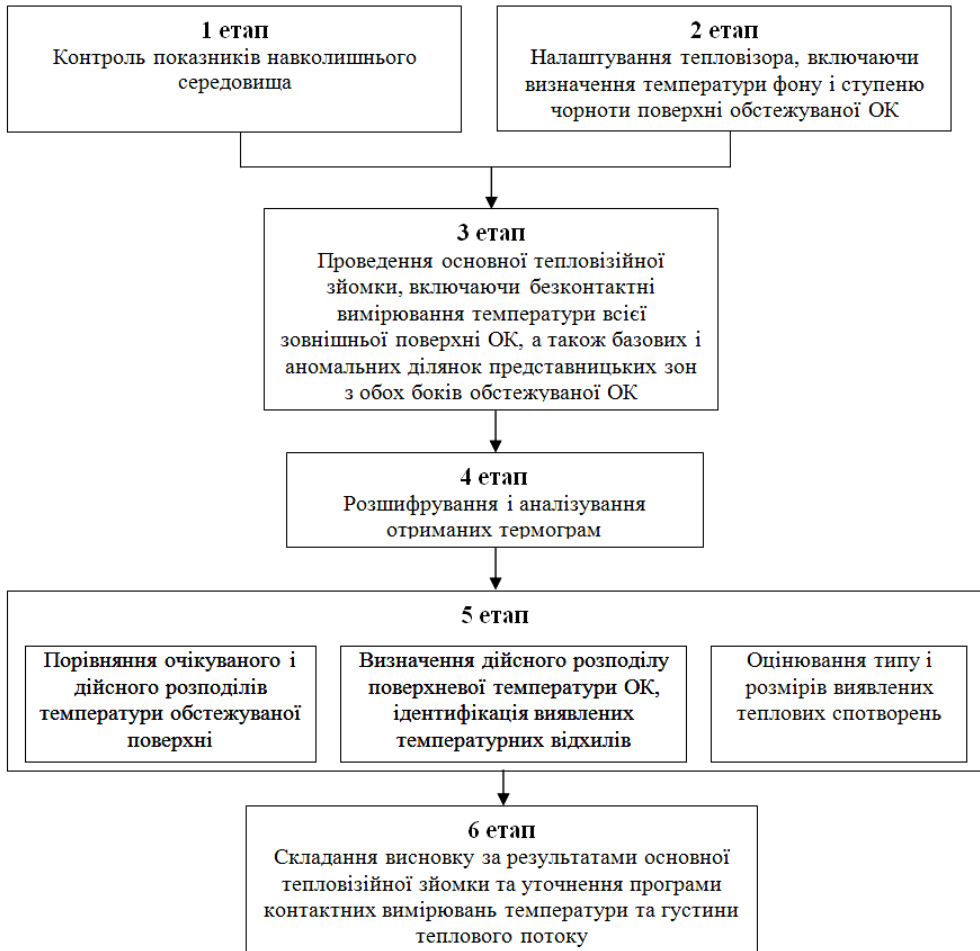


Рис. 7.2. Структурна блок-схема проведення робіт з безконтактного визначення температурних полів обстежуваної ОК (основного тепловізійного обстеження)

добові значення температури зовнішнього та внутрішнього повітря.

При цьому результати вимірювання температури та відносної вологості зовнішнього повітря, швидкості та напрямку вітру зіставляють з даними спостережень найближчих метеостанцій за період проведення натурних обстежень, а також середньомісячними та багатомісячними.

Проте вказані данні спостереження показників метеоумов, а також інші необхідні кліматичні характеристики району можна отримати безпосередньо на метеостанціях, з періодичних видань і довідників.

Якщо отримані показники навколишнього середовища відповідають вимогам до їх значень для проведення тепловізійного обстеження,

приступають до безконтактного обстеження будівлі шляхом термографування огорожувальних конструкцій із застосуванням тепловізійної техніки, починаючи з налаштування тепловізора згідно з вказівками, що надані в його експлуатаційному документі. При цьому, заздалегідь визначають температуру фону і ступінь чорноти (коефіцієнт випромінювання) обстежуваних поверхонь в актуальному для тепловізора спектральному діапазоні.

За результатами основної тепловізійної зйомки уточнюють межі, геометричні розміри і площі ділянок, ступінь їх термічної однорідності, наявність теплопровідних включень, мостиків холоду, а також місця розташування контактних сенсорів теплового потоку і температури на характерних базових ділянках.

Детальне термографування внутрішньої поверхні базових і виявлених аномальних ділянок виконують усередині приміщення послідовно по намічених ділянках з покадровим записом термограм (рис. 7.3).

Термографування верхніх поверхів висотних будівель проводять всередині приміщень, якщо неможливо близько підійти до них з балкона або сусідніх споруд. Якщо огорожувальні конструкції верхніх поверхів висотних будівель мають таку ж конструкцію, що і на нижніх поверхах, і немає інформації про наявність дефектів в них, то термографування верхніх



Рис. 7.3. Термографування внутрішньої поверхні базових і виявлених аномальних ділянок

поверхів можна обмежити загальним зовнішнім оглядовим знімком, що охоплює всю стіну. Для виявлених температурних відхилів встановлюють їх тип і розміри та можливі причини, наслідком яких вони є (наприклад, дефекти і пошкодження теплоізоляції, недостатність або відсутність теплоізоляційних шарів, наявність вологи, проникнення повітря та інше). Розміри та можлива причина виявленої аномальної ділянки можуть бути встановлені, виходячи з досвіду робіт з термографування, теплотехнічних розрахунків, інших досліджень, а також за допомогою використання довідкових термограм для порівняння з отриманими на обстежуваній огорожувальній конструкції. Довідкові термограми можуть бути отримані в лабораторії або в реальних умовах при випробуванні аналогічних огорожувальних конструкцій (безде-



фектних і з конкретними дефектами) за ідентичних умов навколишнього середовища при вимірюваннях.

За результатами термографування аномальних ділянок усередині будівлі визначають їх межі та площу, оцінюють можливість випадання роси і уточнюють межі та площу поверхні конденсації. На термограмах представницьких зон, знятих усередині будівлі, відзначають ділянки з найнижчою температурою, обчислюють можливі значення температури цієї ділянки на підставі розрахункової температури повітря всередині приміщення та зовні.

За термограмами аномальних ділянок оцінюють їх розміри, і, якщо площа аномальної ділянки перевищує 5% від загальної площі всіх аналогічних характерних базових ділянок і може вплинути на результати розрахунку приведенного опору теплопередаванню, приймається рішення про необхідність контактних вимірювань на цих ділянках.

За наявності в огорожувальній конструкції представницьких зон з теплопровідними включеннями також приймається рішення про виконання контактних досліджень цих включень. У разі неможливості установки контактних сенсорів на зовнішні поверхні цих зон слід провести ретельні безконтактні вимірювання поверхневої температури за допомогою тепловізора або оптичного пірометра [3-5]. Такі вимірювання проводять періодично з інтервалом (2 – 3) години протягом всього періоду виконання контактних вимірювань.

За результатами основного тепловізійного обстеження уточнюють обсяг робіт з контактного обстеження та місця встановлення первинних сенсорів теплового потоку і температури. При складанні схеми розміщення сенсорів враховують всі ділянки огорожувальних конструкцій, на яких необхідно знайти опір теплопередаванню, тобто базові бездефектні ділянки, що мають різну конструкцію, а також ділянки з аномальними значеннями температури поверхні. Базові ділянки для контактних вимірювань доцільно вибирати так, щоб якомога більша їх кількість була сконцентрована в одній представницькій зоні – для зручності одночасних вимірювань. Як правило, представницьку зону вибирають в кутовому приміщенні, фасад якого виходить на північ, північний схід або північний захід.

Метою *контактних вимірювань теплотехнічних параметрів і характеристик* (значень поверхневої температури та густини теплового потоку) із залученням результатів вимірювання показників навколишнього середовища є визначення фактичних значень теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій в період теплоспоживання. Отримане значення приведенного опору теплопередаванню крізь

огороджувальні конструкції застосовують при обчисленні показників, які потрібні для оформлення вкладишу до енергетичного паспорту будівлі.

Перед початком контактних вимірювань відповідно до уточненої схеми встановлюють сенсори, як правило, на внутрішню поверхню огороджувальної конструкції в центрі термічно однорідної зони, при цьому робочі поверхні сенсорів мають бути нормальні до напрямку вимірюваного теплового потоку (рис. 7.3). Для вимірювання температури поверхонь сенсори температури встановлюють як на внутрішньому, так і зовнішньому боці огороджувальної конструкції.



Рис. 7.3. Внутрішній вигляд приміщень під час контактних вимірювань

При встановленні сенсорів теплового потоку на відповідне місце обстежуваного об'єкту слід дотримуватися таких правил:

- місце встановлення сенсорів має бути вибрано на відстані від деталей та вузлів, які мають високу теплосприймальну здатність (наприклад, металеві заставні деталі, елементи вентиляційних систем тощо);
- поверхня в місці встановлення сенсора має бути по можливості зачищена до зняття відчутної шорсткості та не мати кривизни;
- у площині контакту з об'єктом не повинно бути повітряних пазирів;
- сенсори необхідно екранувати від будь-яких зовнішніх впливів, що призводять до виникнення градієнта температури на їх поверхні;
- ступінь чорноти теплосприймальної поверхні сенсора повинна бути близька до ступеню чорноти обстежуваної поверхні. Його значення не повинно відрізнятися від значення ступеню чорноти обстежуваної поверхні більше ніж на  $\pm 0,03$ .

У разі застосування сенсора теплового потоку з вбудованим перетворювачем температури, чутливий елемент якого розміщено у приповерхневому шарі однієї з робочих поверхонь сенсора, його встановлюють так, щоб робоча поверхня з вмонтованим чутливим елементом (спаєм термопар) була звернена до навколишнього середовища.

Електричні сигнали сенсорів теплового потоку та температури реєструють безпосередньо через встановлений інтервал часу протягом декількох повних діб (детальніше критерії оцінення достатності терміну вимірювання розглянуті в ДСТУ ISO 9869 [6]). Для цього доцільне застосування автоматизованих засобів вимірювання і реєстрації даних, наприклад, комп'ютеризованого інформаційно-вимірювального комплексу, які проводять запис інформації у формі, зручній для подальшого комп'ютерного опрацювання за допомогою спеціалізованих програм або універсальних програмних пакетів. Зокрема, це може бути вимірювальний комплекс «Ресурс» (див. розділ 5) у пересувному виконанні (вимірювальний блок розміщено у переносному кейсі) та оснащений комплектом спеціалізованих сенсорів теплового потоку розміром 100×100, 40×80, 20×80 та 12×80 мм для встановлення на фрагментах стін, склі віконних блоків та інших типах огорожувальних конструкцій.

**Алгоритм опрацювання вимірювальної інформації.** Вимірювана інформація, яку отримують під час теплотехнічного обстеження будівлі (споруди), містить лінійні розміри для обчислення площі окремих характерних ділянок і представницьких зон та загальної площі теплоізоляційної оболонки будівлі й довжини теплопровідних включень огорожувальних конструкцій, а також масиви поточних значень сигналів первинних сенсорів теплового потоку та температури і покази інших задіяних пристроїв й приладів.

За результатами обмірних робіт, які виконані шляхом прямих вимірювань лінійних і кутових величин за допомогою відповідних ЗВТ або непрямих вимірювань із застосуванням геометричного репера за термограмами і фотографіями детальної зйомки (якщо таку інформацію не можна почерпнути з проектної документації), обчислюють площу теплоізоляційної оболонки  $A_0$  та всіх ділянок  $A_n$ , як базових, так і аномальних, а також довжину всіх теплопровідних включень  $l_m$ . Подальше опрацювання вимірних сигналів сенсорів та показів інших приладів при застосуванні комп'ютеризованої вимірювальної системи здійснюють за допомогою спеціалізованих програм або програмних пакетів типу Microsoft Excel.

За результатами вимірювання сигналів сенсорів температури у мілівольтах обчислюють поточні значення температури поверхонь огорожувальних конструкцій ( $T_{BH_i}^{\Pi}$  і  $T_{ЗОВ_i}^{\Pi}$ ) та повітряного середовища ( $T_{BH_i}^{HC}$  і  $T_{ЗОВ_i}^{HC}$ ). При цьому значення температури в градусах Цельсія визначають:

– за показами вторинного вимірювального приладу (у мілівольтах) з урахуванням стандартних таблиць номінальних статичних характеристик перетворення термоелектричних сенсорів – термопар та фактичної температури термостатування опорних спаїв термопар;

– за показами вторинного вимірювального приладу з урахуванням стандартних таблиць номінальних статичних характеристик перетворення сенсорів – термометрів опору за ДСТУ 2858 [24];

– за показами цифрового табло при застосуванні контактних чи безконтактних цифрових вимірювачів температури.

За результатами вимірювання сигналів сенсорів теплового потоку вторинними вимірювальними приладами обчислюють поточні значення густини теплового потоку  $q_{ВИМ_i}$ , у ватах на метр квадратний, як добуток поточних показів вторинного вимірювального приладу  $E_{sens_i}$ , на градувальний коефіцієнт сенсора  $K_{sens}$  за формулою:

$$q_{ВИМ_i} = K_{sens} \cdot E_{sens_i}, \quad (7.1)$$

За результатами вимірювання поточних значень густини теплового потоку  $q_{ВИМ_i}$ , температури поверхонь  $T_{BH_i}^{\Pi}$  і  $T_{ЗОВ_i}^{\Pi}$  та повітря поблизу них  $T_{BH_i}^{HC}$  і  $T_{ЗОВ_i}^{HC}$  для кожної ділянки  $n$ -го типу з  $N$  обстежених контактним способом обчислюють усереднені за певний період часу значення:

– температури поверхонь огорожувальних конструкцій  $\bar{T}_{BH_n}^{\Pi}$  і  $\bar{T}_{ЗОВ_n}^{\Pi}$ , повітря навколишнього середовища у граничних шарах цих поверхонь з обох боків ділянки  $\bar{T}_{BH_n}^{HC}$  і  $\bar{T}_{ЗОВ_n}^{HC}$  та оберненої до прилеглого граничного шару навколишнього середовища поверхні сенсора, застосованого для вимірювання густини теплового потоку,  $\bar{T}_{sens_n}^{\Pi}$ ;

– поверхневої густини теплового потоку,  $q_{ВИМ_n}$ .

Усереднення значень цих величин здійснюють за період часу, що дорівнює одній повній добі (24 години), або за кілька повних діб. За усереднені значення перелічених величин слід брати середнє арифметичне поточних значень кожної величини, що виміряні через однакові проміжки часу.

Далі для кожної ділянки  $n$ -го типу з  $N$  обстежених обчислюють за усереднених значень вимірних величин, усереднені значення таких **теплотехнічних параметрів**:

*температурного перепаду* за формулою:

$$\Delta \bar{T}_{OK_n}^{\Pi} = \bar{T}_{BH_n}^{\Pi} - \bar{T}_{ЗОВ_n}^{\Pi}; \quad (7.2)$$

де  $n = 1, 2, \dots, N$ ;

*температурного напору* за формулою:

$$\Delta \bar{T}_n^{HC} = \bar{T}_{BH_n}^{HC} - \bar{T}_{ЗОВ_n}^{HC}; \quad (7.3)$$

*температурного перепаду між HC та прилеглою поверхнею* ділянки, тобто на відповідному граничному шарі за формулами:

$$\Delta \bar{T}_{BH_n} = \bar{T}_{BH_n}^{HC} - \bar{T}_{BH_n}^{\Pi}, \quad (7.4)$$

$$\Delta \bar{T}_{ЗОВ_n} = \bar{T}_{ЗОВ_n}^{\Pi} - \bar{T}_{ЗОВ_n}^{HC}; \quad (7.5)$$

*фактичної густини теплового потоку* за формулою:

$$\bar{q}_n = \bar{q}_{\text{вим}_n} \cdot \frac{\bar{T}_{BH_n}^{HC} - \bar{T}_{BH_n}^{\Pi}}{\bar{T}_{BH_n}^{HC} - \bar{T}_{ПП_n}^{\Pi}}; \quad (7.6)$$

Для кожної ділянки  $n$ -ого типу з  $N$  обстежених обчислюють усереднені значення основних **теплотехнічних характеристик** огороджувальних конструкцій, а саме:

*теплового опору* з урахуванням формул (7.2) і (7.6):

$$\bar{R}_{OK_n} = \Delta \bar{T}_{OK_n}^{\Pi} / \bar{q}_n, \quad (7.7)$$

або з урахуванням формули розрахунку теплового опору за значеннями товщини конструкції та її ефективної теплопровідності:

$$\bar{R}_{OK_n} = d_n / \bar{\lambda}_{E\Phi_n}; \quad (7.8)$$

*опору теплопередаванню крізь ділянку* у разі відсутності теплопровідних включень за формулою:

$$\bar{R}_{\Sigma_n} = \Delta \bar{T}_n^{HC} / \bar{q}_n. \quad (7.9)$$

За відомих усереднених значень коефіцієнтів теплообміну  $\alpha_{BH}$  та  $\alpha_{ЗОВ}$  та теплового опору  $\bar{R}_{OK_n}$ , усереднене значення опору теплопередаванню  $\bar{R}_{\Sigma_n}$  крізь ділянку  $n$ -го типу обчислюють за формулою:

$$\bar{R}_{\Sigma_n} = 1 / \alpha_{BH} + \bar{R}_{OK_n} + 1 / \alpha_{ЗОВ}. \quad (7.10)$$

Для конкретних типів огороджувальних конструкцій в якості відомих значень коефіцієнтів теплообміну  $\alpha_{BH}$  та  $\alpha_{ЗОВ}$ , як правило, беруть нормативні дані:  $\alpha_{BH} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  і  $\alpha_{ЗОВ} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  (див. додаток Е до ДВН В.2.6-31 [1]).

У відповідності з таблицею Ф3 із ДБН В.2.6-31 [1], для кожного з будівельних елементів оболонки будівлі, повинні бути вказані характерні термічно однорідні ділянки, що входять до їх складу (наприклад, для будівельного фрагмента «стіна» це є цегляні кладки, залізобетонні перекриття, панелі, стики панелей тощо). Також повинні бути приведені наступні дані:

сумарна площа ділянок кожного типу  $\sum_{n=1}^N A_n$ ,

сумарна довжина всіх теплопровідних включень  $\sum_{m=1}^M l_m$ ,

загальна площа всіх обстежених будівельних елементів  $A_0$ .

Якщо для будь якої характерної ділянки вимірювання виконано в кількох точках (наприклад, в трьох по висоті приміщення), то в таблицю записують середні арифметичні значення теплового опору та опору теплопередаванню.

Також повинні бути розраховані усереднені значення приведенного теплового опору і приведенного опору теплопередаванню крізь будівельні елементи оболонки будівлі при цьому:

усереднене значення приведенного теплового опору, що розраховують для термічно неоднорідного будівельного елементу оболонки будівлі, який містить  $N$  типів характерних термічно однорідних ділянок, обчислюють за формулою з урахуванням (7.7) або (7.8):

$$\bar{R}_{PP}^{OK} = \sum_{n=1}^N A_n / \sum_{n=1}^N (A_n / \bar{R}_{OK_n}), \quad (7.11)$$

усереднене значення приведенного опору теплопередаванню крізь термічно неоднорідну огорожувальну конструкцію (або неоднорідний елемент оболонки), що містить  $N$  типів характерних термічно однорідних ділянок, обчислюють за формулою з урахуванням (7.9) або (7.10):

$$\bar{R}_{\Sigma PP} = \sum_{n=1}^N A_n / \sum_{n=1}^N (A_n / \bar{R}_{\Sigma_n}), \quad (7.12)$$

усереднене значення приведенного опору теплопередаванню крізь неоднорідну огорожувальну конструкцію, яка містить крім  $N$  типів характерних термічно однорідних ділянок ще  $M$  лінійних теплопровідних включень з відомими значеннями лінійних коефіцієнтів теплопередавання  $\bar{U}_{l_m}$ , обчислюють за формулою:

$$\bar{R}_{\Sigma PP}^{TB} = A_0 / \left[ \sum_{n=1}^N (A_n / \bar{R}_{\Sigma_n}) + \sum_{m=1}^M (\bar{U}_{l_m} \cdot l_m) \right]. \quad (7.13)$$

Додатково розраховують значення приведеної густини теплового потоку крізь термічно неоднорідну огорожувальну конструкцію, що

містить крім  $N$  типів характерних термічно однорідних ділянок ще  $M$  лінійних теплопровідних включень, за формулою (7.6), або з урахуванням даних, отриманих (7.13) за такою формулою:

$$\bar{q}_{TP}^{TB} = \frac{\Delta \bar{T}^{HC}}{A_0} \left[ \sum_{n=1}^N \left( A_n / \bar{R}_{\Sigma_{TPn}} \right) + \sum_{m=1}^M \left( l_m \cdot \bar{U}_{l_m} \right) \right]. \quad (7.14)$$

За цими розрахунковими даними за необхідності можна далі обчислити такі величини:

*усереднене значення трансмісійного коефіцієнту теплопередавання* крізь огорожувальні конструкції будівлі (споруди) за формулою:

$$\bar{U}_{TP} = \bar{q}_{TP}^{TB} / \Delta \bar{T}^{HC} = \left[ \sum_{n=1}^N \left( A_n / \bar{R}_{\Sigma_{TPn}} \right) + \sum_{m=1}^M \left( l_m \cdot \bar{U}_{l_m} \right) \right] / A_0; \quad (7.15)$$

*загальні трансмісійні тепловтрати будівлі* за опалювальний період обчислюють за формулою:

$$Q_{TP} = \bar{U}_{TP} \cdot A_{БВД} \cdot D_d \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 10^{-9}, \text{ ГДж}, \quad (7.16)$$

де  $A_{БВД}$  – загальна площа оболонки опалюваної частини будівлі;  $D_d$  – кількість градусо-днів опалювального періоду, яку визначають залежно від температурної зони експлуатації будівлі згідно з додатком В ДБН В.2.2.6-31 [1].

За результатами теплотехнічного обстеження теплозахисту будівлі (споруди) мають бути оформлені такі документи:

– відомість дефектів за результатами візуального огляду всіх зовнішніх будівельних елементів та тепловізійної зйомки їх зовнішніх поверхонь;

– акт теплотехнічного обстеження будівлі (споруди) за результатами визначення теплотехнічних характеристик і параметрів із застосуванням тепловізійної техніки для безконтактних вимірювань температури і первинних сенсорів температури та теплового потоку для контактних вимірювань в сукупності з іншими задіяними приладами;

– протокол ступеню відповідності характеристик теплозахисту будівлі (споруди) нормативним вимогам за результатами оброблення вимірної інформації та порівнянням отриманих числових значень з даними НТД;

– вкладиш до енергетичного паспорту будівлі (споруди), за необхідності, що повинен відповідати вимогам ДБН В.2.6.-31 [1] та ДСТУ-Н БА.2.2-5 [8].

## 7.2. Системи керування теплоспоживанням будівель

Моніторинг процесу теплоспоживання зводиться, як правило, до контролю температури в приміщенні та температури теплоносія в системі, при цьому об'єктами дослідження виступають будівля та система теплоспоживання [9-13]. Система моніторингу процесу теплоспоживання використовує дані від приладів контролю та вимірювання систем керування теплоспоживанням (індивідуальних теплових пунктах). Узагальнена схема системи керування теплоспоживанням будівлі наведена на рис. 7.4.

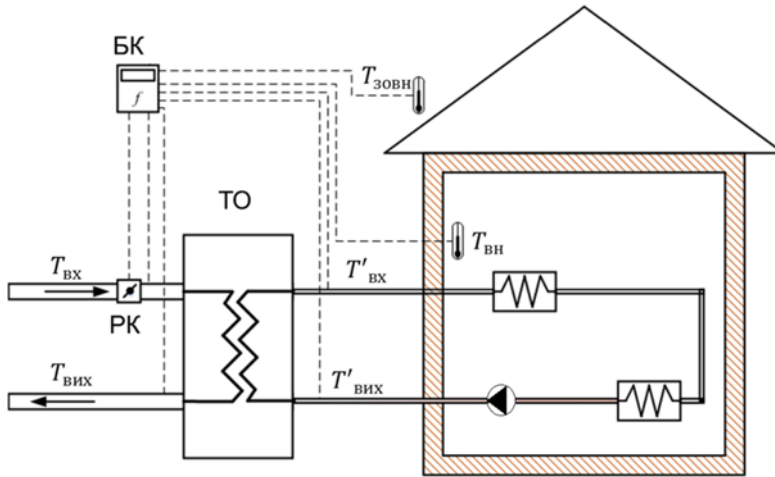


Рис. 7.4. Схема системи керування теплоспоживанням будівлі

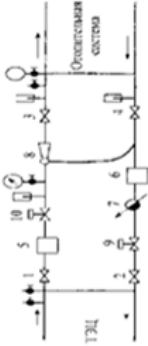
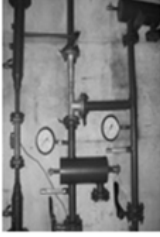
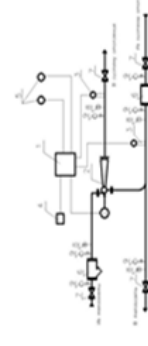

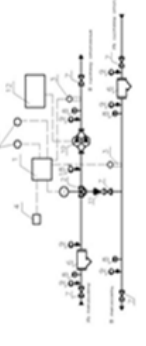

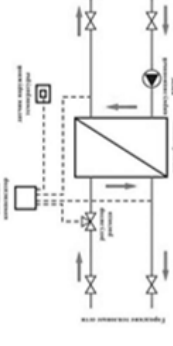

Система складається з датчиків вхідної та вихідної температури теплоносія у первинному та вторинному контурі  $T_{ВХ}$ ,  $T_{ВИХ}$ ,  $T'_{ВХ}$ ,  $T'_{ВИХ}$ , датчиків температури внутрішнього та зовнішнього повітря, блоку контролю та регулюючого клапану

Аналіз методів та засобів керування теплоспоживанням показує, що схемотехнічні рішення при проектуванні систем керування теплоспоживанням (надалі систем) залежать від характеристик об'єкта, технічних умов теплозабезпечення, метеофакторів тощо (табл. 7.1-7.2).

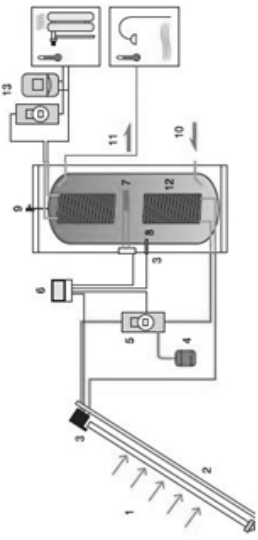
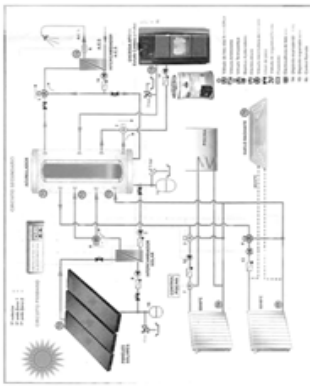
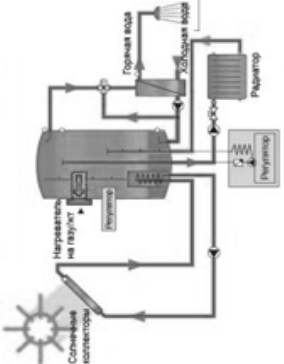
Основним елементом керування у тепловому пункті є регулятор температури. Аналіз існуючих засобів керування теплоспоживанням (регуляторів температури) (табл. 7.3), виявив низку обмежень, що







Таблиця 7.1 Порівняння індивідуальних теплових пунктів

Тип підключення	Обмеження	Схема підключення	Зовнішній вигляд
За залежною схемою з водострумним елеватором	Неможливість регулювання вихідної температури та необхідність точного розрахунку елементів елеватора		
За залежною схемою з регулюючим елеватором	Незадовільно працює на брудній воді та при зменшенні перерізу сопла зменшується ступінь ежекції та перепад тиску після елеватора		
За залежною схемою з трьохходовим змішувальним клапаном	Гідравлічно залежна система, можливість замерзання при аварійних режимах		
За незалежною схемою з пластинчатим теплообмінником	Використовують лише традиційні не відновлювані джерела енергії, яких з кожним роком стає все менше		

Таблиця 7.2 Теплові пункти з сонячними колекторами

Тип підключення	Обмеження	Схема підключення	
<p>За незалежною схемою з теплообмінником та сонячним колектором</p>	<p>Сонячна енергія використовується для опалення приміщень лише у випадках, коли температура теплоносія в колекторі перевищує 60-70°C, всі системи розраховані тільки у комбінації з індивідуальним традиційним джерелом енергії</p>		
			

Таблиця 7.3. Порівняння регуляторів температури

Спосіб регулювання	Обмеження	Зовнішній вигляд
за двохопозичійним законом регулювання та за тижневим графіком	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Відсутність можливості роботи в складі системи диспетчеризації;</li> <li>- Регулювання температури по двохопозичійному закону регулювання;</li> <li>- Відсутність можливості розширення апаратної частини;</li> <li>- Відсутність захисту обладнання при аварійних ситуаціях;</li> </ul>	
за ПІД законом регулювання та за режимом «день/ніч»	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Відсутність можливості розширення апаратної частини;</li> <li>- Відсутність функції відключення опалення;</li> <li>- Відсутність годинника реального часу з автоматичною зміною;</li> <li>- Відсутність функції захисту електроприводу;</li> <li>- Відсутність управління і захисту циркуляційного насоса.</li> </ul>	
за ПІ закону регулювання та за годинно-добовим режимом	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока вартість, карта з чіпом купується окремо;</li> <li>- Регулювання температури по ПІ - закону регулювання;</li> <li>- Опалювальний температурний графіку вигляді жорстко запрограмованих прямих, які не дозволяють провести більш гнучку настройку температури опалювальної системи</li> </ul>	
за ПІД законом регулювання та за індивідуальною температурно-часовою програмою; вбудованим реле за принципом Увімкнуті / Вимкнуті	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока вартість</li> <li>- Відсутність комерційного обліку;</li> <li>- Відсутність вибору закону регулювання</li> <li>- Регулятор складається з двох окремих блоків</li> </ul>	

зумовило необхідність розширення переліку функцій, які забезпечать ефективне керування теплоспоживанням, а саме:

- використання не тільки типових метеозалежних графіків, а й можливість їх коригування з урахуванням особливостей об'єктів теплоспоживання;

- розширення можливостей корекції теплового графіку залежно від часу доби, дня тижня, вихідних тощо;

- можливість введення додатково функції лічильника теплової енергії;

- використання мінімаксного критерію регулювання теплоспоживання для підтримання заданої температури в приміщеннях за умови мінімізації споживання теплової енергії від мережі централізованого теплопостачання, підтримання мінімально допустимої температури під час відсутності людей у приміщеннях тощо;

- зменшення витрат теплоти від мережі централізованого теплопостачання за рахунок використання альтернативних джерел енергії (наприклад, сонячної).

Для підвищення ефективності систем керування теплоспоживанням і можливості використання альтернативних джерел енергії були поставлені і вирішені наступні завдання:

- розроблення імітаційної моделі процесу теплообміну в будівлі за умови комбінованого теплопостачання з використання зовнішнього теплоносія та сонячної енергії як в стаціонарному, так і в динамічному режимах;

- дослідити функціонування блоку керування для оптимізації процесу керування теплоспоживанням з урахуванням теплової інерційності будівлі;

- створити експериментальний стенд системи керування теплоспоживанням будівель при комбінованому теплопостачанні з використанням традиційних енергоресурсів і сонячної енергії та провести його дослідження.

Математична модель системи теплоспоживання в динамічному режимі побудована методом електричної аналогії (рис. 7.5) [14]. Електричні напруги та струми в запропонованій моделі відповідають температурі та тепловому потоку, а опори та конденсатори – термічним опорам та теплоємності. Джерела напруги імітують джерела теплоти заданої температури.

Для вузлів А, В, Д еквівалентної схеми (рис. 7.5) отримують диференціальні рівняння балансу теплових потоків:

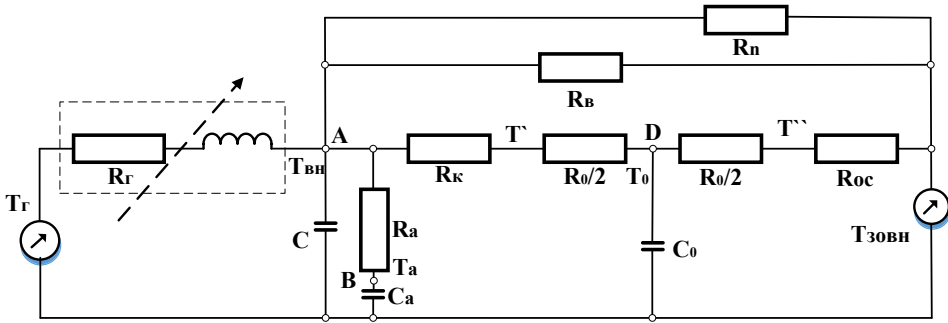


Рис. 7.5. Еквівалентна схема системи теплоспоживання

$$C \frac{dT_{BH}}{d\tau} = \frac{T_{\Gamma} - T_{BH}}{R_{\Gamma}} - \frac{T_{BH} - T_0}{R + 0,5R_0} - \frac{T_{BH} - T_{\alpha}}{R_{\alpha}} - \frac{T_{BH} - T_{ЗОВН}}{R_B} - \frac{T_{BH} - T_{ЗОВН}}{R_{\Pi}}$$

$$C_{\alpha} \frac{dT_{\alpha}}{d\tau} = \frac{T - T_{\alpha}}{R_{\alpha}}, \quad (7.17)$$

$$C_0 \frac{dT_0}{d\tau} = \frac{T_{BH} - T_0}{R_K + 0,5R_0} - \frac{T_0 - T_{ЗОВН}}{R_{OC} + 0,5R_0}, \quad (7.18)$$

де  $C$ ,  $C_{\alpha}$ ,  $C_0$  – теплоємність внутрішнього повітря, внутрішніх акумуляторів, огороження відповідно,  $T_{\Gamma}$  – температура на вході опалювального пристрою,  $T_0$  – середня температура огорожувальної конструкції,  $T_{\alpha}$  – температура внутрішніх акумуляторів,  $R_{\Gamma}$  – тепловий опір опалювального приладу,  $R_K$ ,  $R_{OC}$  – конвективні опори теплообміну,  $R_{\alpha}$  – тепловий опір конвективного теплообміну між внутрішнім повітрям та внутрішніми акумуляторами,  $R_B$  – еквівалентний тепловий опір системи вентиляції,  $R_{\Pi}$  – тепловий опір віконних та дверних отворів,  $\tau$  – час.

В результаті перетворень отримано:

$$\frac{dT_{BH}}{d\tau} = \frac{\mathcal{G}_K^*}{\mathcal{G}^*} \cdot \mathcal{G}_{\Gamma} \cdot T_{\Gamma} - \left( \mathcal{G}_K^* + \mathcal{G}_{OC}^* - \frac{1}{\mathcal{G}^*} \right) T_0 + \left( \frac{\mathcal{G}_K^*}{\mathcal{G}^*} \cdot \mathcal{G}_{BH} + \mathcal{G}_{OC}^* \right) T_{ЗОВН}, \quad (7.19)$$

$$T_{BH} = \left( \mathcal{G}_{\Gamma} \cdot T_{\Gamma} + \mathcal{G}_K^* \cdot T_0 + \mathcal{G}_{BH} \cdot T_{ЗОВН} \right) / \mathcal{G}^*, \quad (7.20)$$

де  $\mathcal{G}_k^* = (r_k + 0,5)^{-1}$ ,  $\mathcal{G}^* = \mathcal{G}_k^* + \mathcal{G}_\Gamma + \mathcal{G}_{BH}$ ,  $\mathcal{G}_{OC}^* = (r_{OC} + 0,5)^{-1}$ ,  $\mathcal{G}_\Gamma = r_\Gamma^{-1}$ ,  $\mathcal{G}_{BH} = r_{BH}^{-1}$ ,  $r_k = R_k / R_0$ ,  $r_{OC} = R_{OC} / R_0$ ,  $r_\Gamma = R_\Gamma / R_0$ ,  $r_{BH} = R_{BH} / R_0$ ,  $R_0 = H_0 / \lambda_0 \cdot F_0$ ,  $H_0$  – товщина поверхні огорожувальної конструкції,  $\lambda_0$  – коефіцієнт теплопровідності,  $F_0$  – площа поверхні огороження;  $R_k = 1 / \alpha_{BH}^{CT} \cdot F_{OC}$ ,  $\alpha_{BH}^{CT}$  – коефіцієнт конвективного теплообміну на внутрішній поверхні стіни,  $R_{OC} = 1 / \alpha_{3OBH}^{CT} \cdot F_{OC}$ ,  $\alpha_{3OBH}^{CT}$  – коефіцієнт конвективного теплообміну на зовнішній поверхні стіни,  $F_{OC}$  – площа поверхні стіни;  $R_\Gamma(\mathcal{G}) = 1 / \alpha_\Gamma \cdot F_\Gamma \cdot \varphi(\mathcal{G})$ ,  $\varphi(\mathcal{G}) = \mathcal{G} \cdot (1 - e^{-1/\mathcal{G}})$ ,  $\mathcal{G} = G \cdot c_\Gamma / \alpha_\Gamma \cdot F_\Gamma$ ,  $c_\Gamma$  – теплоємність теплоносія,  $\alpha_\Gamma$  – коефіцієнт конвективного теплообміну опалювального пристрою,  $F_\Gamma$  – площа поверхні опалювального пристрою;  $R_\Pi = 1 / \alpha_\Pi \cdot F_\Pi$ ,  $\alpha_\Pi$  – коефіцієнт конвективного теплообміну вікон,  $F_\Pi$  – площа поверхні вікон;  $R_B = 1 / G_B \cdot c_B$ ,  $c_B$  – середня ізобарна теплоємність повітря в температурному діапазоні  $[T_{3OBH}, T_{BH}]$ ,  $G_B$  – витрата повітря,  $G_B = V \cdot \rho \cdot m / 3600$ ,  $V$  – об'єм будівлі,  $\rho$  – середня густина повітря в температурному діапазоні  $[T_{3OBH}, T_{BH}]$ ,  $m = 353 / [73 + 0,5(T_{BH} - T_{3OBH})]$ .

Рівняння (7.20) вирішують методом Бернуллі:

$$T_{BH}(\tau) = (\alpha \cdot T_\Gamma + f \cdot T_{3OBH}) / b + (\alpha \cdot T_\Gamma + f \cdot T_{3OBH}) \cdot e^{-b\tau} / b. \quad (7.21)$$

Для забезпечення контурів системи від гідравлічних ударів та збурень важливим є аналіз стійкості та якості системи керування, який проводять з використанням імітаційної моделі системи (7.21).

Традиційно використовують два методи аналізу стійкості: шляхом визначення положення полюсів передаточної функції на комплексній площині та побудови імпульсної перехідної характеристики.

Властивості комплексної передаточної функції  $z(a,b)$  визначають положенням нуля ( $z_0(a,b)$ ) та полюсів ( $z_\Pi(a,b)$ ), ( $z_\Pi^*(a,b)$ ). Знаходять відповідність між положеннями цих точок на  $z$ -площині (рис. 7.6) і параметрами  $(a,b)$ .

Оскільки  $z_0$  може бути тільки дійсним числом, то для будь-яких  $a,b$  нулі лежать

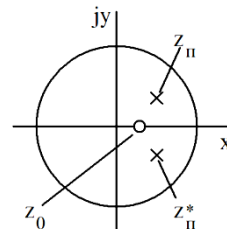


Рис. 7.6. Положення нуля і полюсів на  $z$ -площині

на дійсній осі  $x$ :

якщо  $a < b$ , то  $-\infty < x_0 < 0$  ;

якщо  $a = b$ , то  $x_0 = 0$  ;

якщо  $a > b$ , то  $0 < x_0$  .

Аналіз стійкості можна провести за критерієм Рауса-Гурвіца. Цей критерій накладає обмеження на коефіцієнти характеристичного полінома:

$$b_0 z^2 + b_1 z + b_2 = 0 : b_0 + b_1 + b_2 > 0, b_0 - b_1 + b_2 > 0, b_0 - b_2 > 0. \quad (7.22)$$

Система є стійкою в області  $0 < a < 1$ ,  $0 \leq b < 1$ .

Швидкодію системи описують імпульсною перехідною характеристикою, функція  $g(\tau)$  – реакція на вплив у вигляді короткого імпульсу одиничної площини. Приклад результату моделювання імпульсної перехідної характеристики наведений на рис. 7.7.

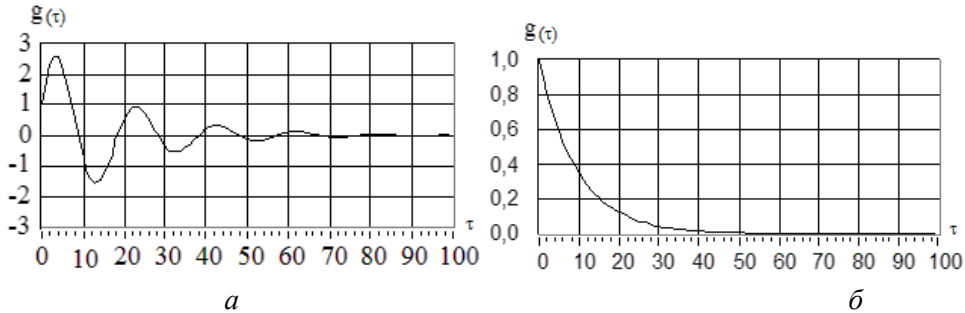


Рис. 7.7. Імпульсна характеристика  
 $a$  – коливальний процес,  $b$  – аперіодичний процес

В результаті моделювання встановлено, що динамічна модель системи при заданих нормованих параметрах є стійкою та дає похибку в межах 6 дБ, при цьому можна підбирати параметри, за яких система вчасно реагує на зміни метеоумов та вхідних даних.

Верифікація математичної моделі (7.22) здійснена за експериментальними даними теплових характеристик будівлі з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії. При цьому забезпечено:

- уточнення даних про величини коефіцієнтів теплового опору елементів огороження (рис. 7.8);
- уточнення коефіцієнту кратності вентиляції будівлі (рис. 7.9);
- побудова залежності коефіцієнта тепловіддачі на внутрішніх та зовнішніх поверхнях елементів огорожувальної конструкції будівлі від температури зовнішнього середовища (рис. 7.10).

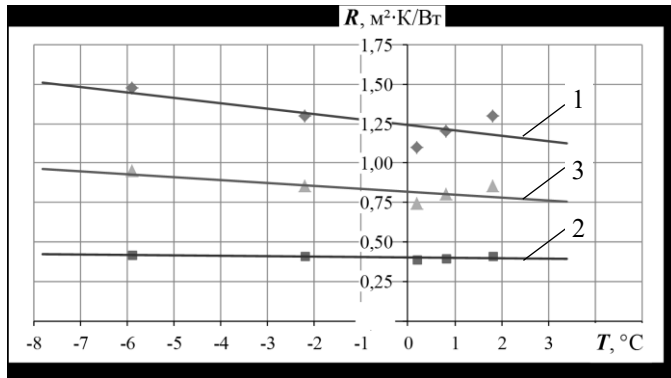


Рис. 7.8. Залежність коефіцієнтів теплового опору елементів огороження від температури зовнішнього середовища: 1 – на поверхні стіни; 2 – на поверхні скла; 3 – на поверхні віконної рами

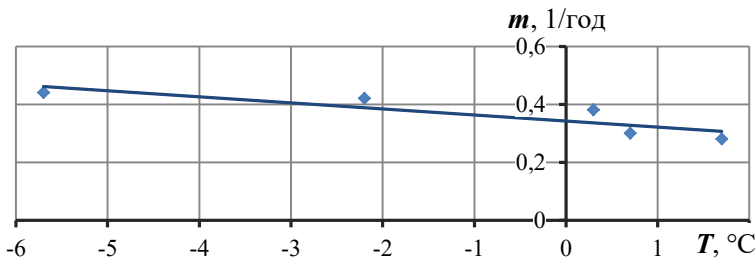


Рис. 7.9. Залежність коефіцієнтів кратності вентиляції будівлі від температури зовнішнього середовища

Порівняння експериментальних досліджень та моделювання з використанням системи MathCad (рис. 7.11) підтверджує прийнятну збіжність одержаних результатів.

Експериментально визначено діапазон часу виходу системи на заданий режим, при якому забезпечується захист від гідравлічних ударів, який коливається від 2 до 5 годин.

За результатами експериментальних досліджень розроблено та впроваджено ряд систем керування теплоспоживанням: з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії, з пластинчастим теплообмінником, з гідророзподільником, з кожухотрубним теплообмінником, з газовими та електрокотлами тощо (табл. 7.4).

Залежно від технічних умов теплопостачання об'єкту вибирається відповідне обладнання системи, включно з теплообмінниками, яке відповідає максимальній енергоефективності роботи об'єкту теплоспоживання.



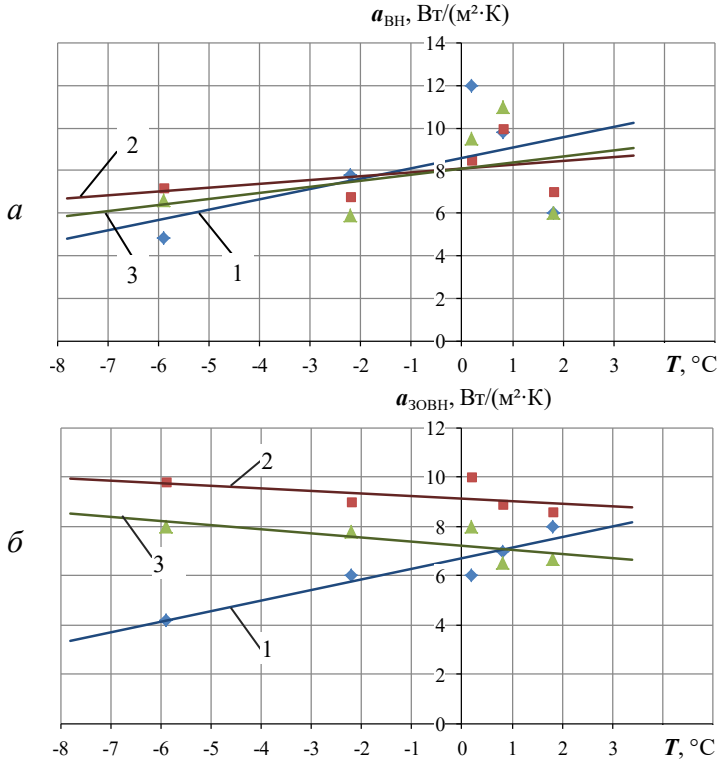


Рис. 7.10. Залежність коефіцієнтів тепловіддачі внутрішньої ( $a$ ) та зовнішньої ( $\delta$ ) поверхні огорожувальних конструкцій будівель від температури зовнішнього середовища: 1 – стіни; 2 – скла; 3 – віконної рами

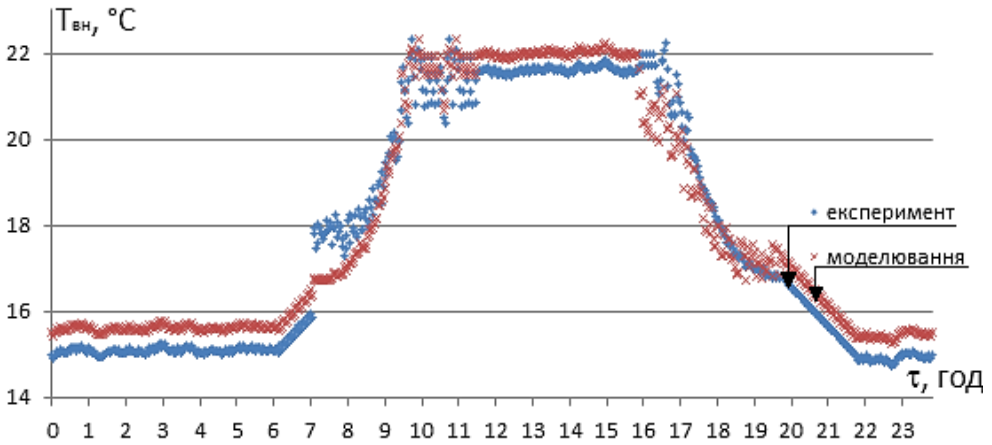





Рис. 7.11. Зміна температури повітря в приміщенні при зміні режиму керування

Таблиця 7.4. Впроваджені системи керування тепло споживанням

Місце впровадження	Особливості	Зовнішній вигляд	Зменшення енерговитрат, %
<p>ПТФ НАН України</p> <p>ДП «НТЦ новітніх технологій НАН України»</p>	<p>Системи керування з пластинчастими теплосбм інніками</p>		<p>До 30%</p> <p>До 20%</p>
<p>ДП «Київприлад»</p>	<p>Система керування з гідророзподілювачем</p>		<p>До 25%</p>
<p>Житловий будинок с. Тарасівка</p>	<p>Система керування в житловому будинку з газовими та елект рокотлами</p>		<p>До 20%</p>

Вибір схеми підключення до теплової мережі, як правило, пов'язаний з гідравлічними характеристиками самої мережі. Так при низькому перепаді тиску між прямим і зворотнім трубопроводом подаючої тепломережі, використання теплообмінника (незалежна схема) неможливо через значне падіння тиску на ньому.

Однією з найефективніших є система керування теплоспоживанням будівель з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії (рис. 7.12, 7.13) [15]. Експлуатація розробленої системи протягом опалювальних сезонів у 2012-2016 роках (рис. 7.13) [16] дала можливість 25-35% економії теплової енергії, в тому числі 4-6% за рахунок сонячної енергії.



Рис. 7.12. Фото системи керування теплоспоживанням з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії

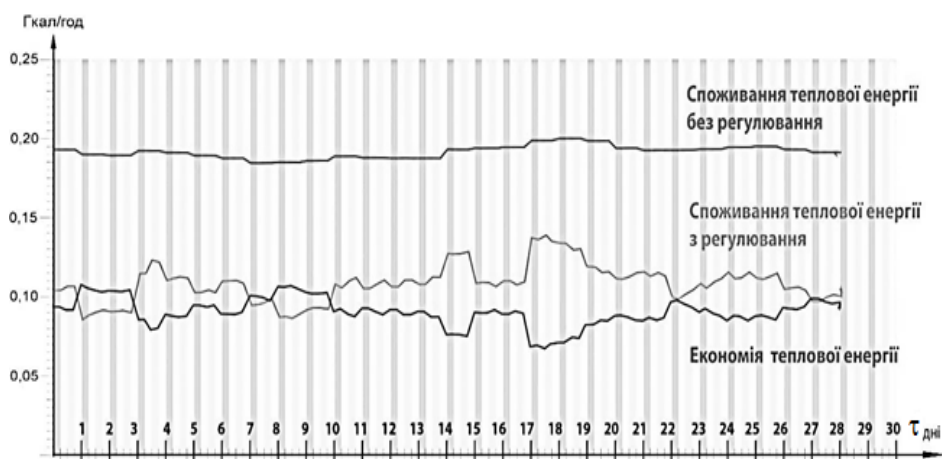


Рис. 7.13. Графік споживання теплової енергії за лютий 2016 р.

Термін окупності системи оцінюється у 3-4 роки враховуючи, що вартість сонячних колекторів з обов'язкою складає до 50% всієї вартості системи. Розрахункова вартість 1 кВт·год теплової енергії, отриманої від сонячних колекторів – 0,9 грн (за цінами на 01.01.2016 р.).

### **7.3. Побудова систем моніторингу теплоспоживання в масштабах мікрорайону та міста**

В загальному вигляді при побудові систем моніторингу в теплоенергетиці можна виділити такі основні різновиди систем моніторингу:

–система моніторингу теплопостачання – це комплексна система спостереження, діагностування стану, оцінки та прогнозу стану об'єктів генерації теплової енергії, стану теплових мереж та споживачів тепла;

–система моніторингу стану теплових мереж це комплексна система спостереження, діагностування стану, оцінки та прогнозу стану теплових мереж в процесі експлуатації;

–система моніторингу теплоспоживання – це система спостереження, діагностування стану теплотехнічних засобів на об'єктах споживачів теплової енергії та управління теплоспоживанням.

Метою створення і функціонування систем моніторингу об'єктів теплоенергетики є підвищення надійності і безпеки систем теплопостачання та тепло споживання, зменшення витрат на проведення відновлювальних робіт шляхом реалізації заходів по попередженню, запобіганню, виявленню і ліквідації аварійних ситуацій.

Процес моніторингу забезпечує постійне оперативне отримання достовірної інформації про функціонування об'єктів теплоенергетики. Моніторинг повинен дати можливість забезпечення ефективності вироблення, транспортування і споживання теплової енергії на рівні фізичних і економічних показників.

Послуга по теплопостачанню (опалення та гаряче водопостачання) повинна бути на відповідному рівні якості і встановлена відповідальність за дотримання договірних зобов'язань між усіма учасниками теплопостачання та тепло споживання.

Моніторинг є необхідним зворотним зв'язком, без якого ефективно управління і вдосконалення теплопостачання та теплоспоживання неможливе [17-19].

Структуру побудови систем моніторингу теплоспоживання будівель в цілому представлено на рис. 7.14 та 7.15 [17, 20].

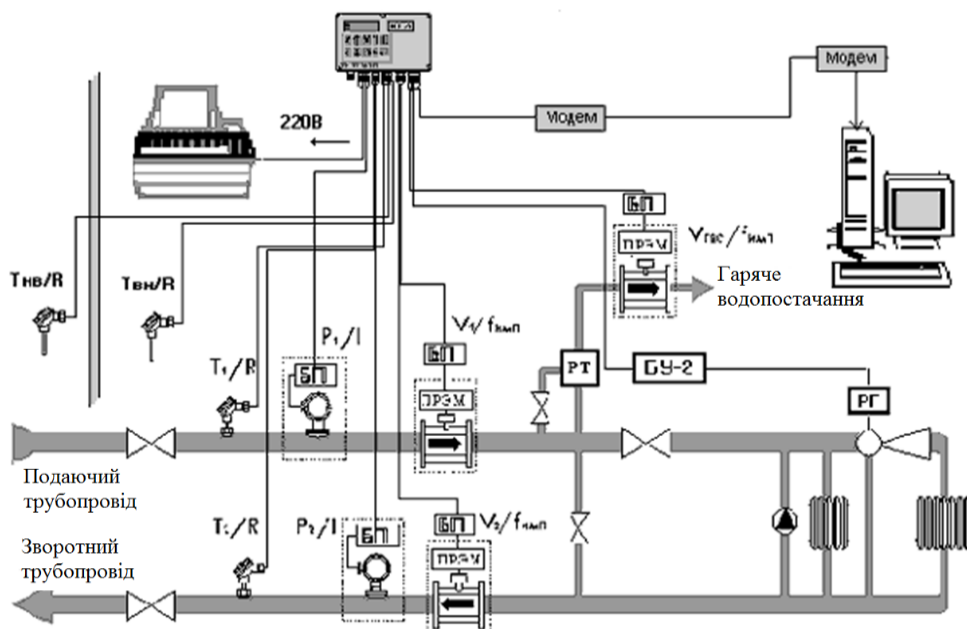


Рис. 7.14 Структура системи моніторингу теплоспоживання будівлі

Слід розрізняти поняття моніторингу та диспетчеризації, які широко вживаються в системах теплокомуненерго та житлово-комунальному господарстві.

*Система диспетчеризації* дозволяє автоматизувати процес обліку енергоресурсів, збору та надання інформації в зручному вигляді для оператора. Збір інформації з теплолічильників може бути здійснений в районі міста або цілому місті, підприємстві або будь-якому іншому місці, де потрібно автоматизований збір інформації про споживаних енергоресурсах систем теплоспоживання та контроль стану мереж тепловодопостачання. Застосування диспетчерської системи дозволяє оперативно реагувати на аварійні ситуації в мережах тепловодопостачання і вчасно усувати їх, не допускаючи серйозних наслідків. На основі зібраної інформації система може формувати звітні відомості параметрів теплоспоживання конкретних вузлів за обраний користувачем період, для подальшого надання в теплостачальних організацій. Зводити баланс постачання та споживання енергоресурсів, що дозволяє побудувати тісні відносини між постачальником і споживачем.

В єдину систему можуть бути об'єднані як один, так і декілька пунктів теплостачання і теплоспоживання та відповідно підрахунок і контроль теплової енергії (виробленої та спожитої) може здійснюватися як в маленьких, так і в більших масштабах, районах і містах [17, 18].

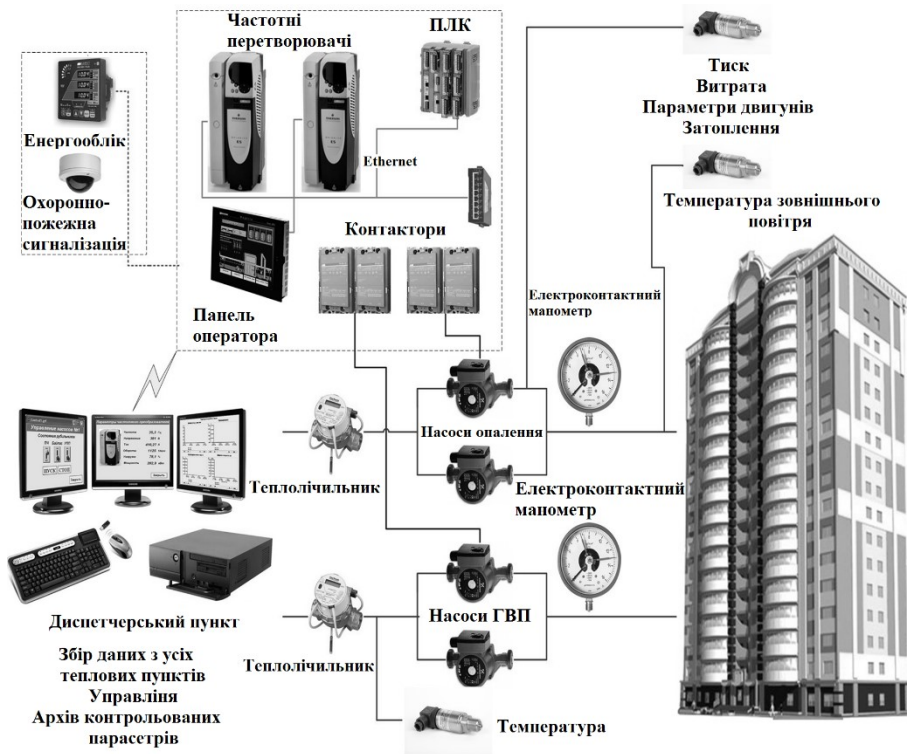


Рис. 7.15 Приклад структури системи моніторингу та диспетчеризації житлового будинку

Структура можливої реалізації систем диспетчеризації представлена на рис. 7.16 та 7.17.

Завдання, які вирішуються системою диспетчеризації:

- автоматичний збір даних з вимірювальних пристроїв;
- комерційний і технологічний облік енергоресурсів;
- автоматизоване регулювання опалення, гарячого та холодного водопостачання в теплових пунктах будинків;
- економія енергоресурсів;
- виявлення та усунення нештатних ситуацій;
- формування відомостей обліку за шаблонами;
- організація контролю над роботою устаткування і станом приміщень.

Система диспетчеризації дозволяє здійснювати:

- ведення обліку витрати енергетичних ресурсів;
- автоматичний моніторинг стану великого числа вузлів обліку і параметрів теплоспоживання;

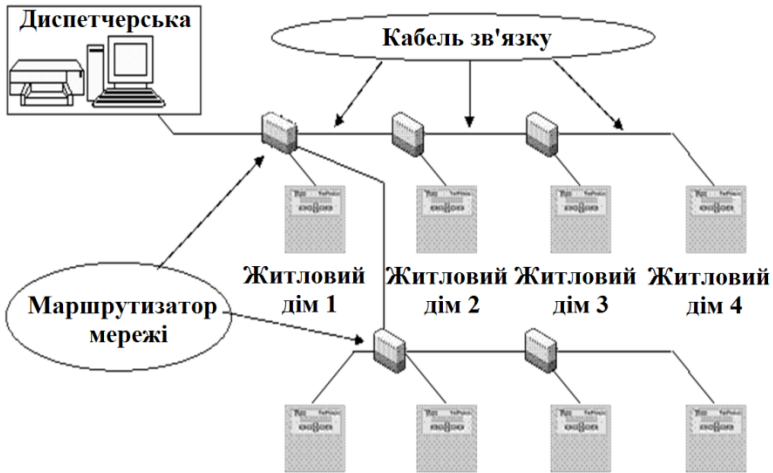


Рис. 7.16 Структура системи диспетчеризації теплоспоживання в масштабах мікрорайону

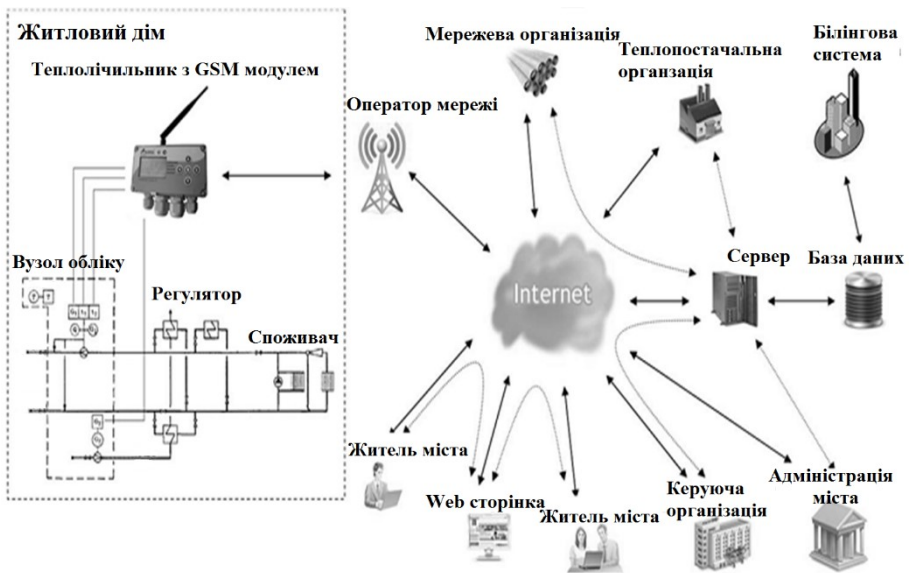


Рис. 7.17. Структура системи диспетчеризації теплоспоживання в масштабах міста

- організацію контролю та управління в режимі тепло- і енергопостачання;
- автоматичний аналіз режиму і видачу оперативних рекомендацій щодо підвищення ефективності тепловодопостачання.

Система диспетчеризації забезпечує економію ресурсів за кількома напрямками:

- зниження витрат за рахунок виявлення втрат у мережах теплопостачання;
- зниження витрат на експлуатацію та забезпечення безперебійної роботи обладнання за рахунок своєчасного реагування персоналу на потребують втручання ситуації;
- можливість комерційного зниження витрат на енергоносії за рахунок оптимального регулювання параметрів теплоспоживання та технологічного обліку енергоресурсів;
- ведення автоматизованого обліку експлуатаційних ресурсів інженерного обладнання для проведення своєчасного технічного обслуговування;
- забезпечення оперативної взаємодії експлуатаційних служб;
- планування проведення профілактичних і ремонтних робіт на інженерних системах;
- документування технологічних процесів, роботи інженерних систем і дій персоналу.

Система диспетчеризації дозволяє контролювати і управляти технологічними параметрами:

- контроль температури і тиску теплоносіїв;
- управління включенням і відключенням насосів;
- регулювання подачі (відпуску) теплоти на опалення будівель;
- регулювання температури води для гарячого водопостачання;
- регулювання перепаду тиску мережної води;
- регулювання відпустки холодного водопостачання.

Основний ефект від впровадження систем моніторингу об'єктів теплопостачання та теплоспоживання полягає в тому, що їх використання дозволяє забезпечити якісно новий рівень управління технологічними процесами вироблення, транспортування і споживання теплових ресурсів з використанням вимірювального обладнання нового покоління та сучасних інформаційних технологій.

Можливості систем моніторингу об'єктів теплопостачання та теплоспоживання орієнтовані на забезпечення безперебійного та якісного теплопостачання, підтримку оптимальних (енергоефективних) експлуатаційних режимів об'єктів теплоенергетики, а також отримання реального економічного ефекту і, як наслідок, стримування зростання тарифів на теплову енергію та гарячу воду.



**Література**

1. *ДБН В.2.6-31:2006* Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівлі – Київ: Мін. буд. України, 2006 – 64 с.
2. *Методика* М000013184.5.023-01 Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції // Нормативний документ Держкомітету України з енергозбереження та Державного комітету України з будівництва та архітектури. – Київ: Логос, 2002. – 131 с.
3. *Приборный парк* для проведення енергоаудита // Базовый образовательный центр «ЭнергоЦентрНГТУ». – Тамбов: НГТУ, 2011. – Сайт: <http://www.courses.edu.nstu.ru>. – 2011.
4. *Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др.* Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М.: Наука, 2002. - 476 с.
5. *Вавилов В.П., Александров А.Н.* Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003 – 76 с. [Библиотека электротехника / Приложение к журналу «Энергетик», – Вып. 9 (57)].
6. *ДСТУ ISO 9869:2006* Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання (ISO 9869:1994, IDT).
7. *ДСТУ 2858-94* Термоперетворювачі опору. Загальні технічні вимоги і методи випробувань.
8. *ДСТУ-Н БА.2.2-5:2007* Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції: – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 43 с.
9. *Сканави А.Н.* Отопление / А.Н. Сканави, Л.М. Махов. – М.: Издательство АСВ, 2008. – 576 с.
10. *Allard F.* European actions to improve energy efficiency of buildings / F. Allard , O.Seppänen // *Rehva Journal*. – 2008. – vol. 45. no. 1. – pp. 10-20.
11. *Torkar J.* Economical heat production and distribution/ J. Torkar , D. Goricanec , J. Krope // *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS Int. Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment – 2005*. – pp. 18-23.
12. *Petitjean R.* Total hydronic balancing: A handbook for design and troubleshooting of hydronic HVAC systems. – Gothenburg: TA AB, 1994. – 530p.
13. *Nazarenko A.O.* Automated system for regulation heat consumption / A.O. Nazarenko // *Safety in Aviation and Space Technologies : World*

- Congress, 25-27 September 2012. – К.: НАУ. – 2012. – Р. 3.5.54-3.5.58.
14. *Babak V.P.* Mathematical models automatized unit of heat consumption regulation with solar collectors and the heat accumulator / V.P. Babak, B.D. Bileka, A.O. Nazarenko // NDT days 2013 : Int. Conf., 17 – 21 June 2013. – Sozopol, Bulgaria., 2013 – P. 120-123.
  15. *Патент 72168* Україна, МПК (2012.01) F24J 2/00. Автоматизований тепловий пункт / А.А. Долінський, В.П. Бабак, О.О. Назаренко, Є.Г. Жовнорук, А.В. Тихонюк, А.О. Назаренко, заявник та власник Інститут технічної теплофізики НАН України. – и 201200779; заявл. 25.01.2012; опубл. 10.08.2012, Бюл. №15.
  16. *Назаренко А.О.* Експериментальні дослідження автоматизованого пункту керування теплоспоживанням / А.О. Назаренко // Промышленная теплотехника. – 2013. – №2 (35). – С. 43-49.
  17. *Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали. Т. 2: Механізми реалізації політики енергозбереження* / За ред. В.А. Жовтянського, М.М. Кулика, Б.С. Стогнія. – К.: Академперіодика, 2006. – 600 с.
  18. *Финогеев А.Г.* Система удаленного мониторинга и управления сетями теплоснабжения на базе сенсорных сетей / А.Г. Финогеев, В.Б. Дильман, В.А. Маслов, А.А. Финогеев // Прикладная информатика. – 2011. – № 3(33). – С. 83-89.
  19. *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія* / за ред. В.П. Бабака. – К.: Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015. – 512 с.
  20. *Соколов Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.

**Наукове видання**

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

**Бабак Віталій Павлович,**  
**Берегун Віктор Сергійович, Бурова Зінаїда Андріївна,**  
**Воробйов Леонід Йосипович, Декуша Леонід Васильович,**  
**Декуша Олег Леонідович, Запорожець Артур Олександрович,**  
**Ковтун Світлана Іванівна, Красильников Олександр Іванович,**  
**Назаренко Олег Олексійович, Полобюк Тетяна Анатоліївна**

**Апаратно-програмне забезпечення моніторингу  
об'єктів генерування, транспортування  
та споживання теплової енергії**

**Монографія**

*За редакцією чл.-кор. НАН України В. П. Бабака*

Підп. до друку 24.10.2016. Формат 60×80/16. Папір офс. №1.  
Гарн. Таймс. Умов. друк. арк. 17,2. Обл.-вид. арк. 18,6.  
Наклад 300 пр.

---

Віддруковано у друкарні ТОВ «Наш формат»  
01042, м. Київ, пр. Миру, 7, оф. 45.