

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний політехнічний університет



**АЛЬ-ДЖАСРІ ГАМАЛЬ ХАЛЕД МОХАМЕД**

УДК 004.9

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АКУСТИЧНОГО  
МУЛЬТИСЕНСОРНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕЧІЙ В  
ТЕПЛОТЕХНІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ**

05.13.06 – Інформаційні технології

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

Одеса 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент  
**Болтъонков Віктор Олексійович**,  
Одеський національний політехнічний  
університет,  
доцент кафедри інформаційних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
**Березький Олег Миколайович**,  
Тернопільський національний  
економічний університет,  
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії

доктор технічних наук, професор  
**Вичужанін Володимир Вікторович**,  
Одеський національний морський  
університет,  
завідувач кафедри інформаційних  
технологій

Захист відбудеться "28" вересня 2017 р. о 13:30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01 Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 400а.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий "23" серпня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

О. Є. Колесніков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з можливих шляхів вирішення глобальної задачі енергозбереження є запобігання або мінімізація втрат, викликаних течіями теплоносія в різному теплотехнічному обладнанні за рахунок використання автоматизованих систем технічного діагностування. Актуальність застосування таких систем посилює той факт, що течії теплоносія є найбільш частою передаварійною подією при експлуатації дорогого і важкодоступного теплотехнічного обладнання високого тиску з температурою водяного теплоносія до 320°C при робочих тисках до 16 МПа. Крім того, підвищення значущості систем технічної діагностики пояснюється зростаючою потребою автоматизації раннього виявлення та локалізації течій теплоносія в умовах фізично і морально застарілого парку теплотехнічного обладнання України, що на 85% відпрацювало свій ресурс.

Однак існуючі системи діагностування течій на основі контролю масового або об'ємного балансу теплоносія, вимірювання вологості повітря в зоні розташування теплотехнічного агрегату і відеоспостереження, незважаючи на високу вартість застосовуваних компонентів, дають можливість встановити факт виникнення течії лише на якісному рівні і оцінити її місце розташування з точністю до ділянки агрегату, що діагностується. У цьому випадку більш ефективними для діагностики течій в енергетичному обладнанні є акустичні системи, що містять кілька сенсорів (мікрофонів) для реєстрації інтенсивного звукового сигналу, який виникає при витоку перегрітого теплоносія через мікрodefekt. Однак в умовах технологічних приміщень з великою кількістю працюючих агрегатів і машин, де загальний рівень фонового акустичного шуму досягає 90 дБ і більше, відношення сигнал/шум (ВСШ) при виявленні і обробці акустичного сигналу різко знижується і становить (+10...-10) дБ. В таких умовах, відомі акустичні системи діагностування також не забезпечують необхідну достовірність виявлення факту течії і не дозволяють з необхідною точністю визначити її місце розташування.

Все це призвело до того, що в даний час при побудові акустичних систем технічного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні існує протиріччя між підвищеними вимогами до достовірності раннього виявлення і точності локалізації течій, з одного боку, і обмеженістю можливостей такого діагностування в умовах низького ВСШ, з іншого.

Розв'язання цього протиріччя є перспективною і актуальною науково-технічною задачею, яка може бути вирішена шляхом розробки нової інформаційної технології діагностування течій на основі акустичних мультисенсорних мереж (АММ), що містять 10-25 розподілених в просторі акустичних сенсорів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з переліком пріоритетних напрямів наукових досліджень на період до 2015 року в галузі «Інформаційні та телекомунікаційні технології», затвердженим постановою № 943 Кабінету міністрів України від 07.09.2011, та пріоритетними напрямками науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ), зокрема в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри інформаційних систем – № 700-

145 «Моделі, методи та інструментальні засоби підтримки прийняття рішень з підвищення ефективності гідроаеродинамічних процесів в діючому енергетичному обладнанні» (№ ДР 0115U000413) – при безпосередній участі автора.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка і дослідження моделей, методів та інформаційної технології акустичного мультисенсорного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні для підвищення достовірності раннього виявлення та точності локалізації течій.

Для досягнення поставленої мети вирішені такі задачі:

- проаналізовано існуючі методи та системи діагностування течій;
- удосконалено модель формування поля сигналу від течії на  $M$  мікрофонах акустичної мультисенсорної мережі;
- розроблено метод кооперативного виявлення факту наявності течії із заданими показниками якості виявлення;
- удосконалено Time Difference of Arrival (TDOA)-модель оцінювання координат течії;
- розроблено метод локально-когерентної обробки сигналів для підвищення точності оцінки TDOA в умовах складного акустичного поля;
- розроблено метод оперативного контролю стану акустичної діагностичної мережі;
- розроблено інформаційну технологію мультисенсорного діагностування течій.

**Об'єкт дослідження** – процеси обробки акустичної інформації в автоматизованих системах технічного діагностування течій теплоносія.

**Предмет дослідження** – моделі, методи та інформаційна технологія мультисенсорного акустичного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні.

**Методи дослідження** – при проведенні дисертаційного дослідження були використані методи фізичної акустики при побудові моделі формування поля сигналу на елементах мультисенсорної мережі, методи статистичної теорії рішень при розробці методу кооперативного виявлення факту наявності течії, методи цифрової обробки сигналів і комп'ютерної геометрії при удосконаленні TDOA-моделі оцінювання координат течії і методу локально-когерентної обробки сигналів для підвищення точності оцінки TDOA, методи теорії ймовірностей і математичної статистики при комп'ютерному моделюванні та оцінці характеристик системи.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Наукова новизна дисертаційної роботи сформульована наступними положеннями:

1. **Вперше розроблено** метод кооперативного виявлення течії акустичної мультисенсорною мережею, в якому, на відміну від існуючих, для прийняття рішення використано енергетичний детектора Прайса-Урковіца та запропоновано три правила кооперативного виявлення, що дозволяє для заданого числа сенсорів в АММ і відношення сигнал / шум виявити факт течії із заданими ймовірностями вірного виявлення і хибної тривоги та тим самим підвищити достовірність раннього виявлення течій.

2. **Отримала подальший розвиток** модель формування поля сигналу від течії на  $M$  мікрофонах акустичної мультисенсорної мережі, яка полягає в можливості врахування залежності швидкості і затухання звуку від температури і вологості

повітря в приміщенні, що дозволяє зменшити похибки розрахунку акустичного поля на елементах АММ в автоматизованих системах технічного діагностування течій теплоносія.

**3. Отримала подальший розвиток** TDOA-модель оцінювання координат течії, яка полягає в використанні для представлення системи TDOA-рівнянь матричного вигляду, що дозволило оцінити вплив геометрії сенсорної мережі на похибку оцінювання координат течії і таким чином підвищити точність її локалізації.

**4. Вперше розроблено** метод локально-когерентної обробки сигналів для зменшення похибки оцінки TDOA в умовах складного акустичного поля, який відрізняється від відомих урахуванням когерентності сигналів на кожній парі сенсорів, що дозволяє в умовах складного акустичного поля в технологічному приміщенні суттєво підвищити точність локалізації місця течії теплоносія.

**5. Отримав подальший розвиток** метод оперативного контролю стану АММ, який полягає в можливості отримання та розрахунку оцінки обсягу еліпсоїда невизначеності оцінки координат точки розташування джерела тестового акустичного сигналу, що дозволяє розмістити джерело сигналу в безпосередній близькості від контрольованої акустичної мультисенсорної мережі.

**Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:**

На підставі розроблених моделей і методів розроблено розроблена інформаційна технологія (ІТ), яка є складовою частиною автоматизованої системи технічного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні, що апробована та впроваджена на підприємстві «Южная энергосервисная компания ЭСКО ЮГ».

Основні положення дисертаційного дослідження використані в навчальному процесі Одеського національного політехнічного університету кафедрою інформаційних систем в лекційних курсах, лабораторних практикумах, при курсовому і дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення та практичні результати, подані в дисертаційній роботі, були отримані автором особисто. Робота [4] виконана без співавторів. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача такий: [1,6,8,10] – вдосконалені модель і інформаційна технологія оцінювання координат течії; [2] – розроблено та досліджено новий метод оперативного контролю мультисенсорної мережі; [3,8] – розроблено метод кооперативного виявлення сигналу від течії; [4,9,11] – розроблено методикку синтезу геометрії мультисенсорної мережі; [5,7] – розроблено та досліджено метод локально-когерентної оцінки затримки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових семінарах кафедри інформаційних систем ОНПУ і наступних наукових конференціях:

– III Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ – Одеса – 2014), 23-25 вересня 2014 р., Одеса;

– Міжнародний науково-практичний семінар молодих вчених та студентів «Програмовані логічні інтегральні схеми та мікропроцесорна техніка в освіті і

виробництва», 28 – 29 квітня 2016 р., Луцьк;

– XVII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології» (СІЕТ-2016), 23 – 27 травня 2016 р., Одеса;

– IV Українсько-німецька конференція «Інформатика. Культура. Техніка», 30.06-02.07.2016, Одеса;

– II Міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерна алгебра та інформаційні технології» (КАІТ-2016), 21 – 26 серпня 2016 р., Одеса;

– V Міжнародна науково-практичної конференція «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ - Одеса -2016), 20 – 22 вересня 2016 р., Одеса.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 11 робіт, у тому числі 5 статей у наукових журналах з переліку видань, рекомендованих МОН України, 6 – в працях та тезах доповідей міжнародних конференцій.

### **Структура і об'єм роботи.**

Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, посилань до 102 літературних джерел та 3 додатків. Повний об'єм дисертації – 163 сторінки, у тому числі додатків – 28 сторінок. Дисертація містить 37 рисунків і графіків, отриманих в результаті комп'ютерних розрахунків та 6 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, задачі, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначена наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про публікації та апробацію результатів дисертаційної роботи.

**У першому розділі** виконаний аналіз існуючих автоматизованих систем технічного діагностування течій водяного теплоносія в енергетичному обладнанні високого тиску. Розглянуто технології діагностування, засновані на вимірі вологості повітря в зоні контролю, технології, засновані на відеоспостереженні в видимому і інфрачервоному діапазонах, методи контролю об'ємного і масового балансу теплоносія, акустичні методи з малою кількістю сенсорів. Встановлено, що всі існуючі технології не дозволяють забезпечити гарантовані показники достовірності діагностики, а саме ймовірності правильного виявлення і помилкової тривоги при встановленні факту течії, і гарантовану точність діагностування – похибку визначення координат течії в зоні контролю в умовах низьких відношень сигнал / шум.

Крім того, в існуючих системах відсутня можливість оперативного контролю самої системи діагностики при її експлуатації. Це в разі відмови елементів діагностичної системи ставить під сумнів всі результати процесу діагностування.

Сформульована мета дослідження і його задачі. Зокрема, в якості основної інформаційної технології діагностування течій запропонована реєстрація інтенсивного акустичного сигналу, що виникає в місці течії, системою розподілених в зоні контролю акустичних сенсорів (мікрофонів) – акустичною мультисенсорною мережею (АММ) з подальшою обробкою вимірювальної інформації для встановлення факту течії і оцінювання її координат.

У другому розділі на основі інформаційної бази для дослідження розроблені модель формування поля на елементах мультисенсорної мережі і метод кооперативного виявлення сигналу від течії.

**Вихідна інформаційна база для дослідження.** В якості вихідної інформаційної бази для досліджень використані реальні записи акустичних сигналів, які зареєстровані на спеціальному вимірювальному теплофізичному стенді в процесі експерименту, поставленого в НДЛ «Атомспецавтоматика» ОНПУ під керівництвом д.т.н., проф. О.В. Корольова. В ході експерименту створювалися штучні течії теплоносія через калібровані мікродефекти з сосуду, в якому підтримувався тиск в межах від 0,5 до 16 МПа при температурах 120-320°C. Виникаючі при витoku акустичні сигнали реєструвалися каліброваними вимірювальними мікрофонами. Загальна база даних містить 185 записів у вигляді звукових файлів в dat-форматі.

Аналіз сигналів дозволив встановити, що типовий сигнал від течії теплоносія є широкосмуговим процесом із загальним рівнем звукового тиску 75-98 дБ і енергетичним спектром, який добре апроксимується моделлю «рожевого шуму» тобто процесом зі спектром  $S(f)=Af^1$ . На рис. 1 показані часовий фрагмент типового сигналу і характерний енергетичний спектр.

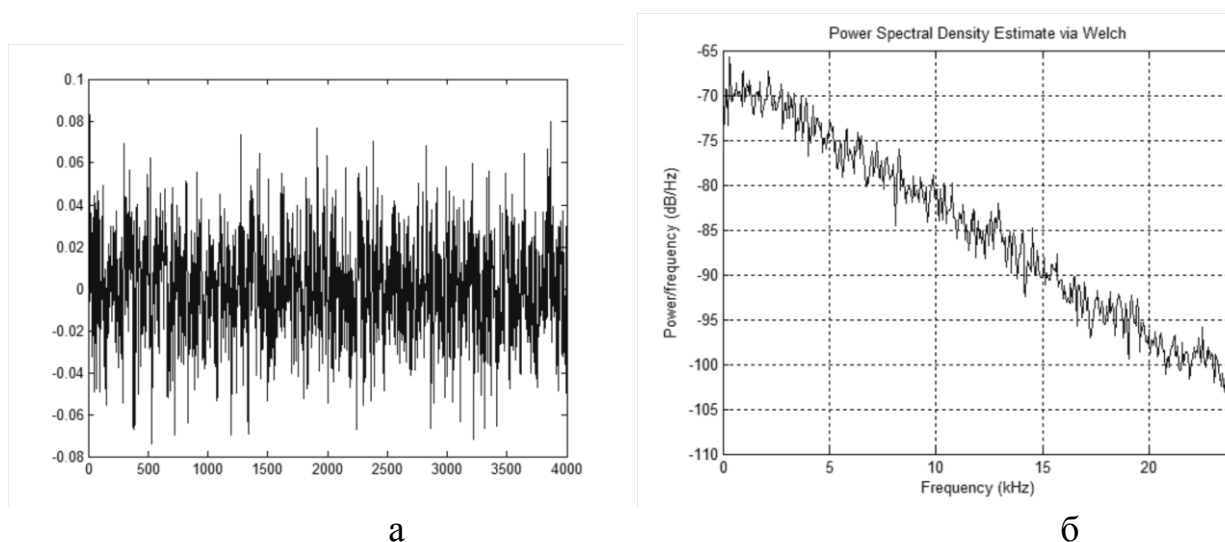


Рисунок 1 – Часовий фрагмент запису типового сигналу від течії та його енергетичний спектр за Уелчем

Для моделювання сигналів на розподіленій в зоні контролю довільній кількості сенсорів на підставі запису реального сигналу розроблена модель формування поля сигналу від течії на  $M$  мікрофонах акустичної мультисенсорної мережі. При поширенні сигналу  $A s_0(t)$  від джерела з координатами  $s_0(x_0, y_0, z_0)$  до  $i$ -го сенсора АММ з координатами  $s_i(x_i, y_i, z_i)$  враховуються такі явища і процеси:

– затримка сигналу на час  $\tau = \frac{|s_0 - s_i|}{c}$ ,  $c$  - швидкість звуку в технологічній зоні контролю, що залежить від температури  $t^\circ C$  і відносної вологості повітря  $RH\%$ :

$$c = (331,296 + [0,606 t^\circ C])(1 + [RH\% \cdot 9,604 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{0,032(t^\circ C - (0,004 t^\circ C))}]), \quad (1)$$

- затування через геометричну дивергенцію  $A_{div}(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{|s_0 - s_i|}{d_0}$  ( $d_0 = 1 \text{ м}$ ),
- частотно-залежне поглинання звуку в повітрі  $\alpha(f)$  згідно до стандарту ISO 9613-1:1993.

В силу частотної залежності сигнал з урахуванням поглинання в повітрі на  $i$ -му сенсорі розраховується за схемою, наведеною на рис. 2 із застосуванням дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

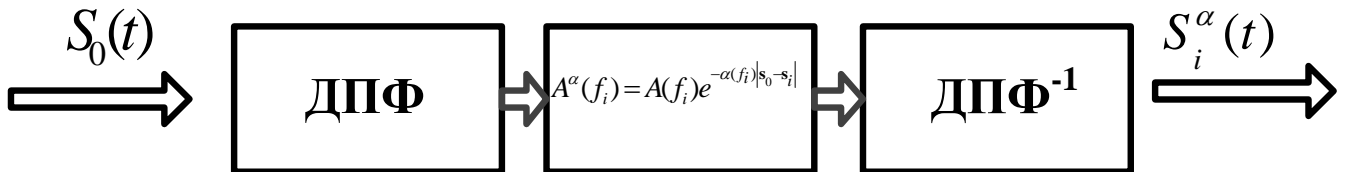


Рисунок 2 – Схема розрахунку частотно-залежного затування звуку

Застосування запропонованої моделі дозволяє в діапазоні температур повітря ( $+10^\circ\text{C}$ – $+90^\circ\text{C}$ ) і відносної вологості (30%–95%) зменшити похибку розрахунку затримки сигналу на 2-7% і рівню звукового тиску на 2-4 дБ на кожному сенсорі АММ в порівнянні зі спрощеною моделлю  $s_i = s_0(t - \tau_i)$ , що застосовувалася раніше. Таким чином суттєво зменшено похибки розрахунку акустичного поля на елементах АММ в автоматизованих системах технічного діагностування течій теплоносія.

Для забезпечення раннього виявлення факту течії в умовах низьких ВСШ з гарантованими показниками розроблено **метод кооперативного виявлення течії теплоносія в акустичній мультисенсорній мережі**. Якість раннього виявлення сигналу від течії оцінюється ймовірностями вірного виявлення і хибної тривоги. Для виявлення широкосмугового сигналу, яким є акустичний сигнал від течії, застосовано енергетичний детектор Прайса-Урковіца, що містить смуговий фільтр з досить широкою смугою пропускання (широкосмуговий фільтр – ШСФ), квадратичний детектор, інтегратор і пристрій порівняння (рис. 3).

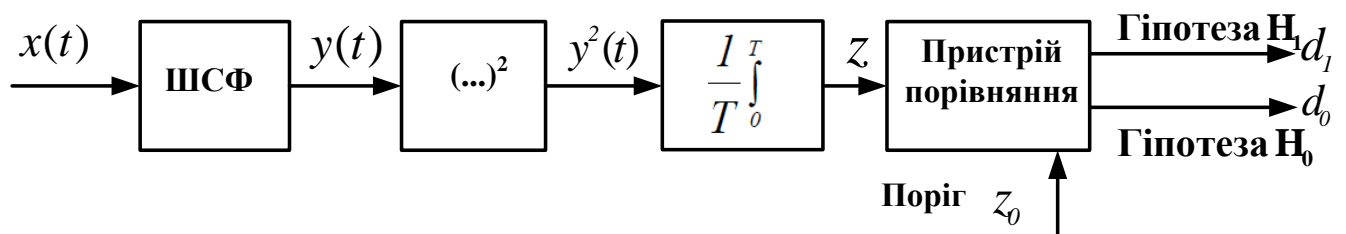


Рисунок 3 – Структура енергетичного детектора

Для такого детектора ймовірності вірного виявлення  $P_{\text{вв}}$  і хибної тривоги  $P_{\text{хт}}$  для встановленого за Прайсом-Урковіцем порогом виражаються як



$$P_{\text{вв}} = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{z}), \quad P_{\text{xm}} = \frac{\Gamma(u, \frac{z}{2})}{\Gamma(u)}, \quad (2)$$

де  $Q_u$  узагальнена Q-функція Маркума ( $Q_u(a, b) = \int_0^{\infty} \frac{x^u}{a^{u-1}} e^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{u-1}(ax) dx$ ),  $\gamma = \frac{E}{N}$  – відношення сигнал / шум (ВСШ),  $I_{u-1}(\dots)$  – функція Інфельда порядку  $(u-1)$ ,  $\Gamma(\dots)$  і  $\Gamma(\dots, \dots)$  – повна і неповна гамма-функція відповідно.

Розглянуто багатоканальне або кооперативне виявлення сигналу в мережі з  $M$  акустичних сенсорів (рис. 4).

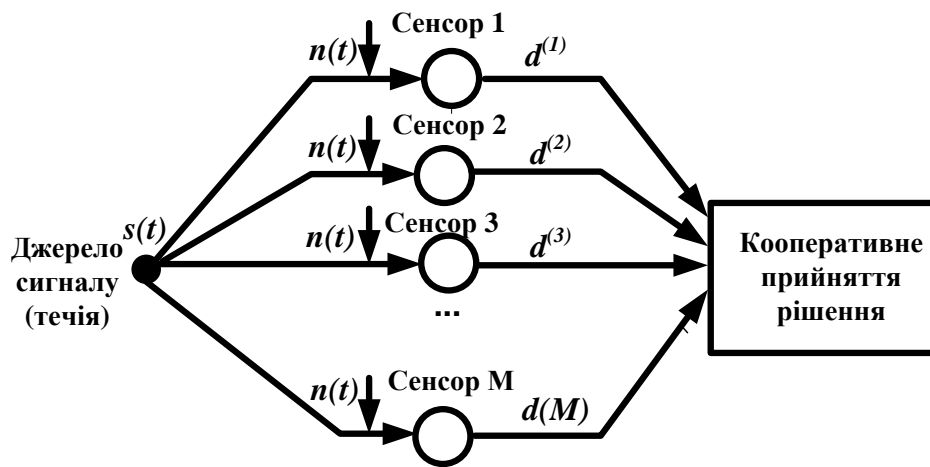


Рисунок 4 – Схема кооперативного виявлення сигналу від течії

Запропоновано три окремих варіанта кооперативного вирішального правила.

1. Правило AND (І). Відповідно до цього правила рішення про наявність сигналу приймається, якщо на всіх сенсорах прийнято незалежне рішення про його наявність. Показники якості виявлення в цьому випадку

$$P_{\text{вв,AND}} = \prod_{i=1}^M P_{\text{вв},i}, \quad P_{\text{xm,AND}} = \prod_{i=1}^M P_{\text{xm},i}. \quad (3)$$

2. Правило OR (АБО). Рішення про наявність сигналу приймається, якщо хоча б на одному з сенсорів прийнято незалежне рішення про його наявність. Для цього випадку:

$$P_{\text{вв,OR}} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{\text{вв},i}), \quad P_{\text{xm,OR}} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{\text{xm},i}). \quad (4)$$

3. Правило MAJORITY (БІЛЬШІСТЬ). Рішення про наявність сигналу приймається при його виявленні хоча б половиною сенсорів. Для даного правила

$$P_{\text{вв,MAJORITY}} = \sum_{l=\lfloor M/2 \rfloor}^M C_N^l P_{\text{вв},i}^l (1 - P_{\text{вв},i})^{M-l}, \quad P_{\text{xm,MAJORITY}} = \sum_{l=\lfloor M/2 \rfloor}^M C_N^l P_{\text{xm},i}^l (1 - P_{\text{xm},i})^{M-l}. \quad (5)$$

Якість виявлення описується робочою характеристикою або ROC-кривою. На рис.5 показаний приклад ROC-кривої для мережі з  $M=25$  сенсорів і ВСШ = 0 дБ.

Задача визначення гарантованих показників якості виявлення сформульована в наступному вигляді: нехай потрібно визначити найкращу робочу точку ROC-кривої, в якій забезпечується максимальна ймовірність  $P_{\text{вв}}^*$  при мінімальній ймовірності  $P_{\text{xm}}^*$ . Такою точкою є точка ROC-кривої, що має мінімальне віддалення від «ідеальної точки» (0,1)  $d_{01}$  (рис. 6) – в подальшому будемо називати таку точку оптимальною за  $d_{01}$ -критерієм. Метод кооперативного виявлення течії теплоносія акустичною мультисенсорною мережею, що гарантує оптимальні показники  $P_{\text{вв}}^*$  і  $P_{\text{xm}}^*$  за  $d_{01}$ -критерієм, складається з наступних етапів.

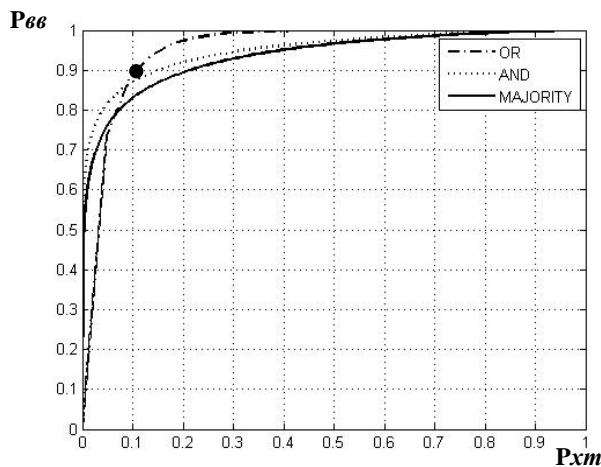


Рисунок 5 – ROC-крива для АММ з 25 сенсорів та ВСШ=0 дБ.

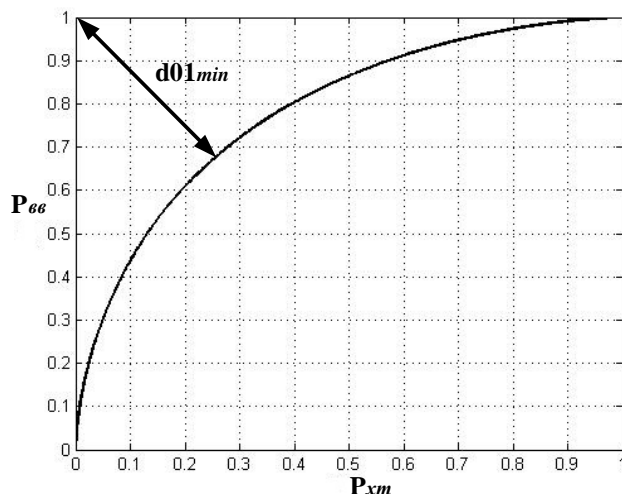


Рисунок 6 – Визначення точки, оптимальної за  $d_{01}$ -критерієм

**Етап 1.** Задається ймовірність хибної тривоги в діапазоні  $P_{\text{xm}} \in [0,1]$ .

**Етап 2.** Розраховуються пороги  $z$  виявлення за співвідношеннями Прайса-Урковіца.

**Етап 3.** З виразу (2) для заданого ВСШ розраховуються ймовірності вірного виявлення  $P_{\text{вв}}$ .

**Етап 4.** З виразів (3) - (5) розраховуються  $P_{\text{вв}}$  і  $P_{\text{xm}}$  для трьох кооперативних вирішальних правил і будуються ROC-криві для  $P_{\text{xm}} \in [0,1]$ .

**Етап 5.** З трьох побудованих кривих обирається в якості робочої крива для того кооперативного правила, яка має найбільшу площу під кривою AUROC (Area Under Receiver Operating Characteristic), оскільки саме цей показник характеризує якість кооперативного правила виявлення.

**Етап 6.** На обраній ROC-кривій обирається робоча точка за  $d_{01}$ -критерієм. Знайдена точка забезпечує гарантовані показники раннього виявлення течії для заданої кількості сенсорів, ВСШ і обраного кооперативного правила –  $P_{\text{вв}}^*$  і  $P_{\text{xm}}^*$ .

У третьому розділі отримала подальший розвиток **TDOA-модель оцінювання координат течії**, зокрема, розроблені метод локально-когерентної обробки сигналів для підвищення точності оцінки TDOA в умовах складного акустичного поля і метод оперативного контролю стану мультисенсорної діагностичної системи на основі TDOA-моделі.

TDOA системи визначення координат джерела звуку засновані на оцінюванні різниць часів приходу (англ. – Time Difference of Arrival) сигналу на кожен пару сенсорів АММ  $\tau_{ij}$  з номерами  $i, j$ .

Для АММ з приймачів можна побудувати систему нелінійних рівнянь для кожної четвірки (тетраедра) сенсорів, які не лежать в одній площині:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2 + (z_0 - z_j)^2} &= c\tau_{ij}, \\ \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2 + (z_0 - z_j)^2} - \sqrt{(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2 + (z_0 - z_k)^2} &= c\tau_{ik}, \\ \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \sqrt{(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2 + (z_0 - z_k)^2} &= c\tau_{il}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, N, l = 1, \dots, N, i \neq j \neq k \neq l,$$

де  $(x_0, y_0, z_0)$  - координати джерела сигналу (течії),  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $(x_j, y_j, z_j)$ ,  $(x_k, y_k, z_k)$ ,  $(x_l, y_l, z_l)$  - координати сенсорів, що утворюють тетраедр,  $c$  – швидкість звуку в повітряному середовищі.

Показано, що кожне з рівнянь системи (6) описує гіперболоїд обертання в просторі, який поверхнею положення джерела сигналу. Із системи гіперболічних рівнянь (7) потрібно оцінити координати джерела  $\hat{\mathbf{s}}$ .

TDOA-задачу в загальному вигляді сформульовано так. Нехай АММ складається з  $M$  сенсорів, розташованих в точках  $\mathbf{r}_i \in \mathcal{R}^D$ ,  $i = 1, \dots, M$ ,  $D = 2, 3$ . Джерело розташоване в точці  $\mathbf{s} \in \mathcal{R}^D$ . Відстань між джерелом звуку і приймачем позначимо  $d_i(\mathbf{s}) = \|\mathbf{s} - \mathbf{r}_i\|$ . Різниця відстаней сенсорів і від джерела становить  $d_{ij}(\mathbf{s}) = d_i(\mathbf{s}) - d_j(\mathbf{s})$ . Тоді  $\tau_{ij} = \frac{d_{ij}(\mathbf{s})}{c} + n_{ij}$  є TDOA сигналу від джерела на пару сенсорів  $i$  та  $j$ , тут  $n_{ij}$  – похибка оцінювання TDOA. Нехай  $I$  – множина, що складається з  $N$  пар сенсорів, оцінки TDOA яких використовуються для оцінювання координат джерела. Вводяться вектори розмірності  $N \times 1$ :

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{ij} \\ \vdots \\ \tau_{ij} \end{bmatrix}_{i,j \in I}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_{ij} \\ \vdots \\ d_{ij} \end{bmatrix}_{i,j \in I}, \quad \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_{ij} \\ \vdots \\ n_{ij} \end{bmatrix}_{i,j \in I}.$$

Модель акустичного сигналу на просторово розподіленій мультисенсорній мережі з оцінками TDOA виглядає таким чином

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{\mathbf{d}(\mathbf{s})}{c} + \mathbf{n}. \quad (7)$$

Процедура оцінювання координат джерела течії на основі TDOA-моделі розбивається на 2 етапи.

**Етап 1.** Оцінювання TDOA  $\tau_{ij}$  для кожної пари мікрофонів, що входять до складу АММ і формування вектора оцінок TDOA. З них формується оцінка вектора  $\hat{\mathbf{t}}$ . Для оцінки TDOA застосовується оцінка аргмаксимуму взаємно-кореляційної функції (ВКФ) сигналів  $s_i(t)$  та  $s_j(t)$ , зареєстрованих парою сенсорів з номерами  $i, j$  для зсувного вікна довжиною  $L$ .

$$\hat{\tau}_{ij} = \arg \max_{0 \leq n \leq (L-1)} \sum_{n=0}^{L-1} s_i[n] s_j[n - \Delta\tau]. \quad (8)$$

Для широкосмугових сигналів, до яких відноситься шум від течії, ВКФ має вигляд, зручний для оцінювання максимуму, зокрема вона має досить гострий пік (рис. 7).

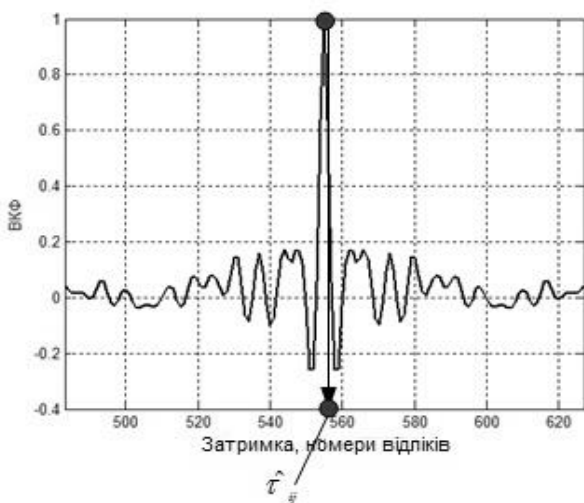


Рисунок 7 – Оцінка  $\hat{\tau}_{ij}$  за максимумом ВКФ

приміщення і технологічних об'єктів, що знаходяться в ньому, та затухання звукового сигналу на різних шляхах. Ці частотно-залежні процеси порушують когерентність сигналів, що приходять на сенсори, і призводить до додаткової похибки в оцінюванні  $\tau_{ij}$ , що в свою чергу вносить додаткову похибку в оцінку координат течії. Для її зменшення розроблений метод поліпшення оцінки TDOA з

урахуванням функції взаємної когерентності  $\gamma_{xy}(f) = \frac{G_{xy}(f)}{\sqrt{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}}$ , де  $G_{xx}(f)$  і

$G_{yy}(f)$  – власні, а  $G_{xy}(f)$  – взаємні спектри потужності сигналів  $x(t)$  та  $y(t)$ , що приймаються парою сенсорів. Використовується квадрат модуля когерентності (КМК), причому порогом когерентності, вище якого когерентність вважається суттєвою для широкосмугових сигналів, служить величина (0,75-0,8). На рис.8 показані спектральна щільність потужності (СЩП) акустичних сигналів, зареєстрованих парою сенсорів з групи, що складається з 8-ми мікрофонів в приміщенні і відповідний КМК. Аналіз картини КМК дозволяє встановити, що в окремих частотних діапазонах когерентність сигналів досить висока ( $\gamma_{xy}^2(f) > 0,8$ ). В

У зсувному вікні може утворитися кілька піків ВКФ. В цьому випадку істинний пік ВКФ визначається за алгоритмом Штефеса-Рау.

**Етап 2.** Складання і вирішення системи гіперболічних рівнянь для оцінки  $\mathbf{s} = (x_0, y_0, z_0)$ . Результати різних алгоритмів розв'язання системи рівнянь (6) детально розглянуті в розділі 4.

У технологічних приміщеннях, в яких розміщені зони контролю, існують багаторазові перевідбиття акустичних сигналів від стін

подальшому будемо називати ці області областями локальної когерентності (Local Coherence Area - LCA) або «вікнами когерентності».

Метод локально-когерентної обробки сигналів для підвищення точності оцінки TDOA складається з таких етапів.

**Етап 1.** Для кожної пари сенсорів розраховується функція КМК  $\gamma_{xy}^2(f)$  у діапазоні частот, що аналізується.

**Етап 2.** Оцінюється  $\max_f \gamma_{xy}^2(f)$ . Якщо  $\max_f \gamma_{xy}^2(f) < 0,8$ , то Вихід. У разі загальної

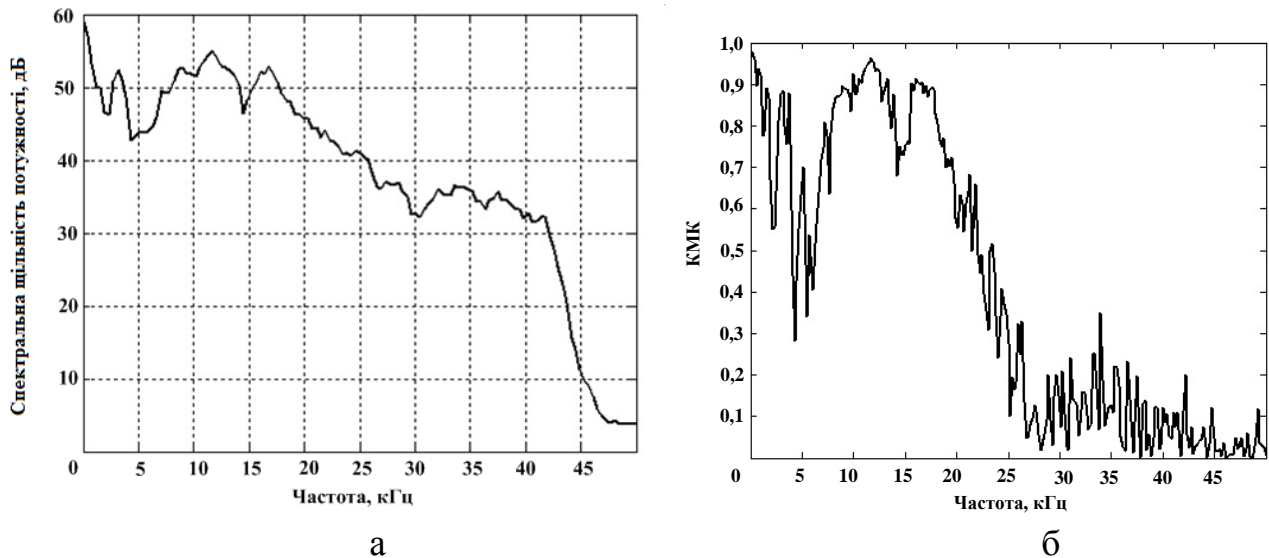


Рисунок 8 – СЩП і КМК для сигналу в умовах складного розповсюдження

низької когерентності на парі сенсорів, цю пару виключається з подальшого розгляду, оскільки від неї не слід очікувати якісної оцінки TDOA.

**Етап 3.** Якщо  $\max_f \gamma_{xy}^2(f) > 0,8$ , перехід до етапу 4.

**Етап 4.** Для функції КМК визначаються області локальної когерентності («вікна когерентності»), тобто частотні області  $(f_n, f_v)_k$ , де виконується умова  $\gamma_{xy}^2(f) > 0,8$ ,  $k = 1, \dots, N_{LCA}$ , де  $k$  – номер вікна когерентності,  $N_{LCA}$  – загальне число вікон когерентності в частотному діапазоні, що аналізується,  $(f_n, f_v)_k$  – відповідно нижня і верхня частотна межа  $k$ -го вікна.

**Етап 5.** Якщо  $(f_v - f_n)_k < 200$  Гц, вікно з номером  $k$  виключається з подальшого розгляду, як таке, що має малу ширину.

**Етап 6.** Для всіх виявлених  $N_{LCA}$  вікон когерентності синтезуються смугові фільтри з частотами зрізу  $(f_n, f_v)_k$ .

**Етап 7.** Сигнали  $x(t)$  та  $y(t)$ , прийняті парою сенсорів, пропускаються через синтезовані смугові фільтри, що відповідають виявленим вікнам когерентності.

**Етап 8.** Для кожної пари профільтрованих сигналів обчислюється ВКФ і оцінка TDOA  $\hat{\tau}_{ij}^{(k)} = \arg \max_{\tau \in T} \hat{R}_{ij}(\tau)$ .

**Етап 9.** Усереднюються отримані оцінки TDOA.

На рис. 9 і в таблиці 1 представлений приклад результатів застосування запропонованого методу.

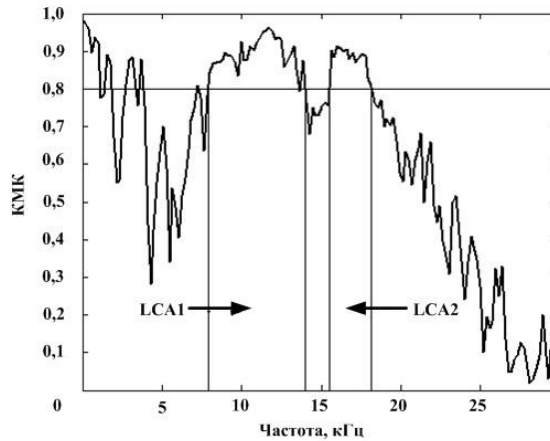


Рисунок 9 – Приклад застосування методу в ситуації, представленої на рис.8

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз точності оцінювання координат течії

Координати течії	Істинні значення	Оцінки, що отримані прямою обробкою	Похибки оцінювання при прямій обробці	Оцінки, що отримані локально-когерентною обробкою	Похибки оцінювання при локально-когерентній обробці
$x$	6,55 м	7,03 м	7,32%	6,67 м	1,83%
$y$	7,22 м	6,84 м	5,26%	7,04 м	2,49%
$z$	0,60 м	0,82 м	3,67%	0,61 м	1,61%

На основі запропонованого методу на достатній вибірці оцінено точність локалізації течії в умовах складного розповсюдження. Встановлено, що точність оцінювання координат течії при локально-когерентній обробці істотно підвищується: зокрема відносна похибка оцінювання координат течії зменшується в 2-4 рази в порівнянні з некогерентною обробкою.

Матрична модель (7) дає можливість дослідити вплив геометрії АММ на точність оцінювання координат. Потенційна точність оцінювання вектора визначається нижньою межею Крамера-Рао (Cramer-Rao Lower Bound, CRLB):

$$\sigma^2_{\hat{s}}(\mathbf{s}) \geq \mathbf{CRLB}_{\hat{s}}(\mathbf{s}). \quad (9)$$

CRLB визначається як зворотна інформаційна матриця Фішера

$$\mathbf{J}^{-1} = (c\sigma)^2 (\mathbf{G}\mathbf{G}^T)^{-1}, \quad (10)$$

де  $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_{ij} \dots \dots]_{i,j \in I}$ ,  $\mathbf{g}_{ij} = \mathbf{g}_i - \mathbf{g}_j$ ,  $\mathbf{g}_i = \frac{\mathbf{s} - \mathbf{r}_i}{\|\mathbf{s} - \mathbf{r}_i\|}$ ,  $\mathbf{g}_i$  – одиничний вектор, що з'єднує точки  $i$ -го сенсора та джерела,  $\mathbf{G}$  – геометрична матриця задачі розмірності  $D \times N$ , що містить в стовбцях різниці вектори  $\mathbf{g}_{ij}$ .

Видно, що на точність оцінювання координат джерела впливає не тільки дисперсія оцінювання TDOA  $\sigma$ , але і геометрія АММ. Вираз  $GDOP = \sqrt{\text{trace}[\mathbf{GG}^T]^{-1}}$  називається геометричним фактором або GDOP (Geometric Dilution of Precision) і може приймати значення від 0 до  $\infty$  в залежності від геометрії розташування сенсорів. Далі будемо орієнтуватися на значення  $GDOP = (4-6)$ , що згідно з сучасними літературними даними відповідає «досить хорошій точності» оцінювання координат. На рис. 10 показані плоскі проекції GDOP для тетраедра з 4-х сенсорів для різних конфігурацій тетраедрів.

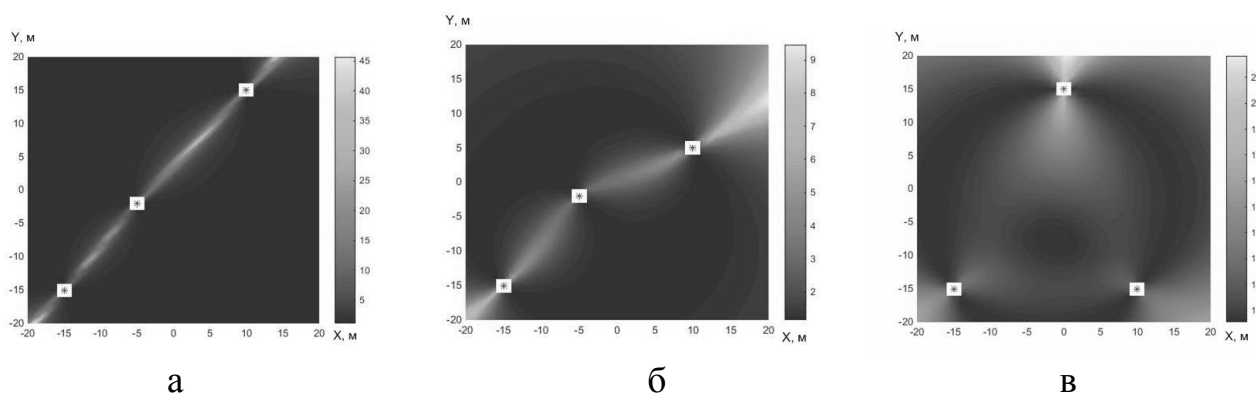


Рисунок 10 – Плоскі проекції GDOP для тетраедру з 4-х сенсорів для різних конфігурацій тетраедрів (а, б - умовно «погана» геометрія розташування сенсорів, в - умовно «хороша» геометрія розташування сенсорів

Показано, що максимальна точність оцінювання координат досягається тільки при розташуванні мікрофонів в вершинах правильних багатогранників (платонічних тіл). Однак при розміщенні сенсорів в технологічній зоні контролю доступні не всі її точки. Точки, в яких можна розмістити сенсори, назвемо технологічно доступними. Розроблено методику синтезу геометрії АММ для виробничого приміщення, що гарантує потенційну точність оцінки координат течії з заданим GDOP. Показано, що для кожного елементарного тетраедра, утвореного сенсорами, величина GDOP обернено пропорційна його об'єму:  $GDOP = \frac{1}{6} \cdot \frac{B}{V}$ . Об'єм елементарного тетраедра

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix} \quad (11)$$

Тому при формуванні конфігурації АММ необхідно прагнути до максимізації обсягів всіх тетраедрів, що утворюють мережу. При формуванні геометрії мережі виключаються компланарні або «близькі до компланарних» тетраедри, тобто ті тетраедри, для яких визначник в виразі (11) близький до нуля або дорівнює нулю.

На рис.11 показані результати апробації методики синтезу геометрії АММ на прикладі рішення задачі розміщення сенсорів в 24-х можливих точках прямокутного приміщення розмірами 15\*15\*10 м. В якості точок, доступних для розміщення

сенсорів, взяті 24 точки з випадковими координатами, рівномірно розподіленими в межах приміщення. В результаті синтезу в АММ залишилося 14 точок розміщення сенсорів, що гарантує GDOP не більше 4. Апробація показала, що шляхом синтезу раціональної геометрії розміщення сенсорів можна досягти локалізації течії з гарантованою похибкою.

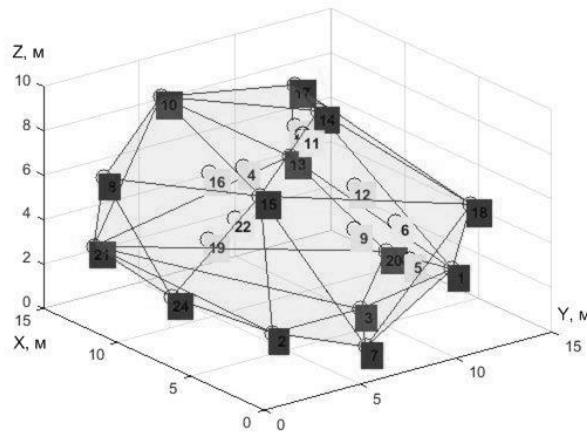


Рисунок 11 – Приклад вирішення задачі розміщення сенсорів в 24-х технологічно доступних точках прямокутного приміщення

Для оцінки поточного стану елементів АММ на основі TDOA-моделі розроблено **метод оперативного контролю стану акустичної діагностичної системи**. Особливістю застосування АММ для діагностики течій є досить тривала їх експлуатація на видаленні від центру обробки інформації, при цьому, як правило, температурні і мікрокліматичні умови експлуатації досить жорсткі (приміщення електричних теплових і атомних електростанцій, бойлерних тощо, які характеризуються високою температурою і високою вологістю повітря при виникненні течії). В таких умовах неминучі відмови сенсорних елементів мережі.

Для контролю необхідно в межах АММ створити тестове звукове поле, для цього в технологічному приміщенні, де розміщена АММ, розміщується випромінювач тестового сигналу. У відомому аналогу методу оперативного контролю джерело тестового сигналу повинно знаходитися на достатньому видаленні від АММ, щоб забезпечити умову падіння плоскої хвилі на будь-яку пару сенсорів. Така умова не завжди здійснима в реальних технологічних умовах. Розроблено новий метод оперативного контролю, який не має обмежень на розташування випромінювача тестового сигналу.

Джерело еталонного сигналу розміщується в точці приміщення з відомими координатами. Для кожного тетраедру, утвореного сенсорами, шляхом вирішення системи рівнянь (6) оцінюються координати джерела тестового сигналу при багаторазово повторюваних вимірах координат джерела на базі TDOA-моделі TDOA і будується коваріаційна матриця оцінки вектору відомих координат джерела  $\mathbf{R}_0$ :

$$\mathbf{C}(\mathbf{R}) = (\hat{\mathbf{R}} - \mathbf{R}_0)(\hat{\mathbf{R}} - \mathbf{R}_0)^T. \quad (12)$$



Геометрично коваріаційна матриця оцінки координат джерела інтерпретується як довірчий еліпсоїд, тобто еліпсоїд, всередині якого із заданою вірогідністю укладаються всі випадкові оцінки вектора  $\mathbf{R}(x, y, z)$ . Коваріаційна матриця діагоналізується і розраховується об'єм довірчого еліпсоїда  $V_{ijkl}^{ellips}$ . Далі будується порогова функція:

$$\Delta_{ijkl} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } V_{ijkl}^{ellips} \leq Th, \\ 0, \text{ в іншому випадку} \end{cases}, \text{ де } Th - \text{ деякий поріг.} \quad (13)$$

В якості порогової статистики вибирається середньоквадратичне значення довірчого еліпсоїда для всіх тетраедрів, утворених сенсорами мережі:

$$Th = \sqrt{1/P \sum_{i \neq j \neq k \neq l} (V_{ijkl}^{ellips})^2}, \quad (14)$$

де  $P = C_n^4 - M_{plane}$ ,  $M_{plane}$  – число тетраедрів, що лежать в одній площині, якщо такі тетраедри існують, то вони виключаються з розгляду.

Будується індикаторна функція

$$Ind(i, j, k) = \sum_{l \in M - \{i, j, k\}} \Delta_{ijkl}, \quad (15)$$

де  $M$  - множина номерів всіх сенсорів мережі.

Множина індикаторних функцій для кожного сенсора мережі:

$$IND(i) = \{Ind(i, j, k), i \in M - \{i\}, j \in M - \{i\}, k \in M - \{i\}\}. \quad (16)$$

Для сенсора, що відмовив, з номером  $m$  всі TDOA, оцінені з його участю, будуть невірними і відповідно матимуть нульове значення індикаторної функції  $Ind$ .

Оскільки АММ експлуатуються при досить низьких відношення сигнал / шум – (-5...-10) дБ – у якості тестового сигналу використана М-последовність і фазоманіпульований сигнал, сформований на її основі:

$$s(t) = A \cos[2\pi ft + \pi / 2 \cdot M(t)], \quad (17)$$

де  $A$  – амплітуда сигналу,  $f$  – несуча частота,  $M(t)$  – модулююча М-последовність. Застосовано бінарну М-последовність  $M(t)$ , що приймає значення  $\{+1, -1\}$ , довжиною  $n = 2^m - 1$  елементів ( $m$  – порядок М-последовності). Метод апробовано для АММ з 24 елементів з  $n=127$  і несучою частотою  $f = 40$  Гц. Результати апробації представлені в таблиці 2 і на рис. 12. Запропонований метод дозволяє виявити відмову сенсору з високою достовірністю в умовах низьких ВСШ..

Таблиця 2 – Показники якості оперативного контролю в залежності від ВСШ

ВСШ (дБ)	Ймовірність похибки першого роду	Ймовірність похибки другого роду
5	0	0
0	0	0
-3	0	0
-5	0,04	0
-10	0,12	0,04
-15	0,12	0,08

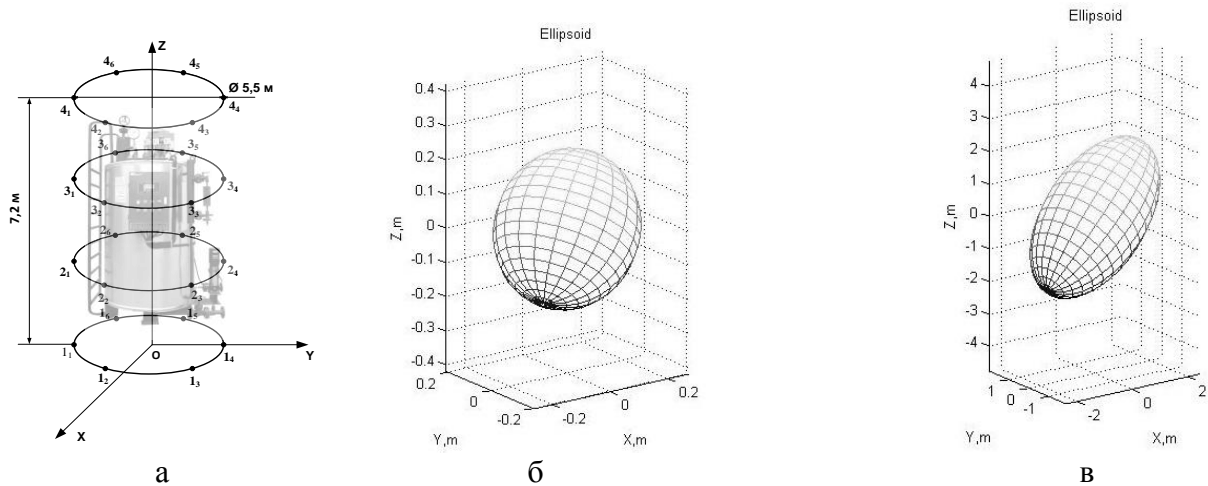


Рисунок 12 – Апробація методу оперативного контролю АММ: а - конфігурація мережі, б, в - вид довірчого еліпсоїда для АММ з сенсорів  $4_1 2_1 2_3 2_5$  (б - всі сенсори справні,  $V^{ellips} = 0.04 \text{ м}^3$ , в - відмова сенсора  $4_1$ ,  $V^{ellips} = 28,36 \text{ м}^3$ )

**У четвертому розділі** на основі запропонованих методів і моделей розроблена ІТ акустичного мультисенсорного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні (рис.13).

ІТ має три режими функціонування:

- режим проектування, в якому бере участь розробник діагностичної системи,
- режим експлуатації, в якому бере участь оператор теплоенергетичної установки (ТЕУ),
- режим оперативного контролю, в якому також бере участь оператор теплоенергетичної установки (ТЕУ) і який в цілому подібний до режиму експлуатації.

Система діагностування течій побудована на основі формування АММ з MEMS мікрофонів. Робочій частотний діапазон MEMS мікрофонів становить (20 ... 20000) Гц, чутливість – (20...40) дБ відносно 1мВ / Па. Для наявних на ринку MEMS мікрофонів зазвичай не нормуються характеристики надійності, однак наявність оперативного контролю і низька вартість дозволяють забезпечити необхідну надійність системи багаторазовим рівнем резервування сенсорів.

На основі розробленої ІТ спроектована автоматизована система технічного діагностування течій, яка складається з інтерфейсної підсистеми для використання проектувальником системи або оператором ТЕУ і серверної підсистеми, в якій відбувається обробка інформації та її архівування. Система спроектована в клієнт-серверній архітектурі. Серверна підсистема реалізована у вигляді чотирьох компонентів: Matlab Web-сервера, застосувань, сервера Matlab-застосувань, на якому виконуються всі обчислювально ємні процедури, і двох серверів баз даних (БД): сервер БД «Сигнали», де зберігаються всі записи сигналів від течій і сервера БД «Діагностика», на якому архівуються всі події і дії системи діагностування (рис.14).

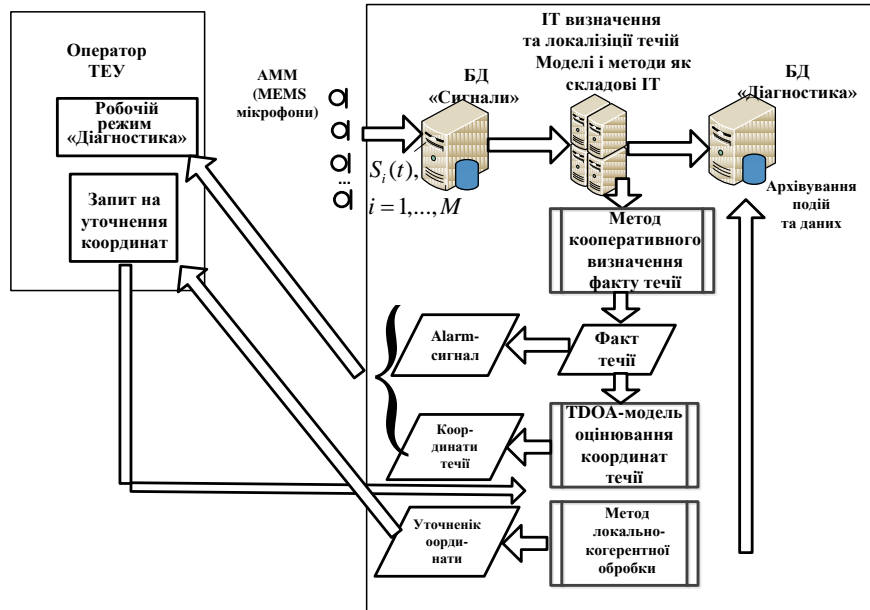


Рисунок 13 – Схема інформаційної технології автоматизації діагностування течій (режим експлуатації)

Проведено моделювання діагностичної системи в цілому з метою підтвердження характеристик, які забезпечуються розробленою ІТ. Моделювання проводилося на платформі характеристиками CPU: Intel Hex-Core CPUs 2.5 GHz; RAM: 1 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Win7.3 / 64.

Моделювання методу кооперативного виявлення сигналу течії на 1500 реалізаціях «сигнал + гаусів білий шум» тривалістю по 30 с кожна показує, що система забезпечує виявлення сигналу течії при ВСШ = (10 ... -5) дБ з ймовірністю вірного виявлення (0,90 ... 0,93) і ймовірністю хибної тривоги (0,09 ... 0,12) з відхиленням від зазначених показників не більше 6%.

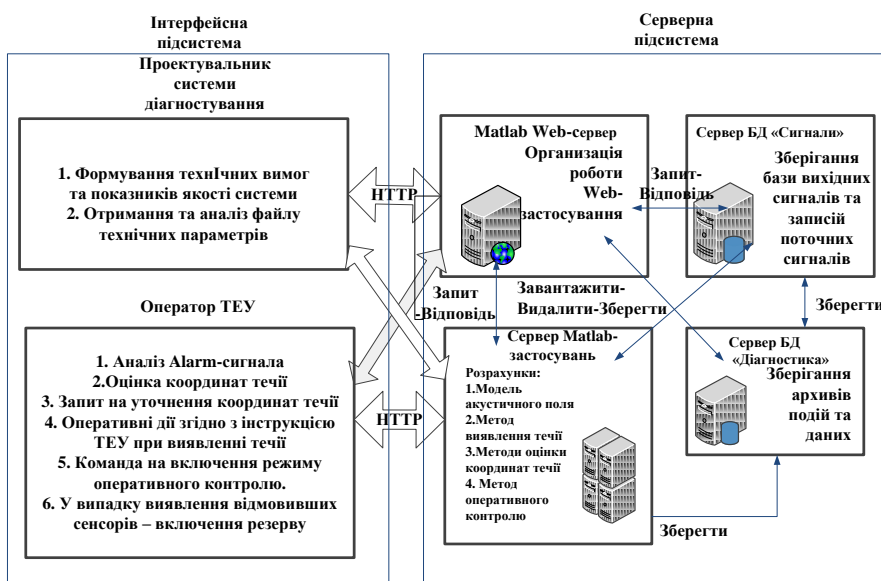


Рисунок 14 – Структура автоматизованої системи діагностування течій

Дослідження різних алгоритмів розв'язання системи гіперболічних рівнянь (6) (другий етап оцінювання координат течії на основі TDOA-моделі) показало, то найбільш швидкодіючим і гарантуючим максимальну точність оцінювання є алгоритм Левенберга-Марквардта. Він обраний в якості основного при локалізації течії. Встановлено, що при зазначених вище відношеннях сигнал/шум автоматизована система технічного діагностування з 12-20 сенсорів забезпечує оцінку координат течії з середньоквадратичною похибкою, що не перевищує 0,72 м.

Система

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача раннього виявлення і локалізації течій теплоносія в теплотехнічному обладнанні шляхом розробки інформаційної технології акустичного мультисенсорного діагностування течій. При цьому отримано такі основні результати:

1. Аналіз існуючих систем діагностування показав, що відомі автоматизовані системи технічного діагностування течій не дозволяють забезпечити необхідні достовірність діагностування і точність локалізації течії, а саме: показники виявлення факту течії – ймовірності вірного виявлення і хибної тривоги і гарантовану похибку оцінювання розташування течії. Сформульовані і обґрунтовані цілі і задачі, проблеми та шляхи їх вирішення, обраний напрямок створення ІТ акустичного мультисенсорного акустичного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні.

2. Удосконалено модель формування акустичного поля сигналу від течії на  $M$  сенсорах акустичної мультисенсорної мережі на підставі одного запису, модель враховує температуру і вологість повітря в приміщенні, що дозволяє зменшити похибки розрахунку акустичного поля на елементах АММ в автоматизованих системах технічного діагностування течій теплоносія.

3. Розроблено метод кооперативного виявлення течії акустичної мультисенсорною мережею на підставі детектора Прайса-Урковіца і трьох правил кооперативного виявлення, що дозволяє для заданого числа сенсорів в АММ і відношення сигнал/шум виявити факт течії із заданими ймовірностями вірного виявлення і хибної тривоги та тим самим підвищити достовірність раннього виявлення течій.

4. Отримала подальший розвиток TDOA-модель оцінювання координат течії, який полягає в використанні для представлення системи TDOA-рівнянь матричного вигляду, що дозволило оцінити вплив геометрії сенсорної мережі на похибку оцінювання координат течії і таким чином підвищити точність її локалізації.

5. Розроблено метод локально-когерентної обробки сигналів для зменшення похибки оцінки TDOA в умовах складного акустичного поля, який відрізняється від відомих урахуванням когерентності сигналів на кожній парі сенсорів, що дозволяє в умовах складного акустичного поля в технологічному приміщенні суттєво підвищити точність локалізації течії теплоносія.

6. Розроблено метод оперативного контролю стану акустичної мультисенсорної діагностичної системи, заснований на оцінці обсягу еліпсоїда невизначеності оцінки координат точки розташування джерела тестового акустичного сигналу, що дозволяє розмістити джерело сигналу в безпосередній близькості від контрольованої акустичної мережі.

7. На підставі розроблених моделей і методів розроблено інформаційну технологію, яка є складовою частиною автоматизованої системи технічного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні на основі акустичних мультисенсорних мереж, система дає можливість отримати з 15-20 сенсорами такі показники визначення: ймовірність правильного визначення – 0,8-0,9, при ймовірності хибної тривоги 0,1-0,12 та середньоквадратичну похибку визначення координат течії 0,70-0,72 м при відношеннях сигнал/шум (+10...-5) дБ. Система побудована з недорогих компонентів і дає змогу суттєво зменшити енергетичні і економічні витрати при автоматизованому технічному діагностуванні течій в теплотехнічному обладнанні.

8. Отримані в роботі наукові результати і програмне забезпечення впроваджені на підприємстві «Южная энергосервисная компания ЭСКО ЮГ» і в навчальний процес кафедри інформаційних систем Одеського національного політехнічного університету.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:**

### **Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації**

1. Болтенков В.А. Исследование акустических систем мониторинга течей теплоносителя / В.А. Болтенков, Г.Х.М. Аль-Джасри. – 2015. – Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – Вип. 20. – С. 16-22. (*Фахове видання, індексування: РИИЦ*).

2. Болтенков В. А. Оперативный контроль состояния акустических сенсорных сетей / В. А. Болтенков, Г. Х. М. Аль-Джасри // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. - № 2-3. - С. 39-46. — (*Фахове видання, індексування: Ulrich's Periodicals Directory, CrossRef, DOAJ, Google Scholar Google Scholar, РИИЦ*).

3. Аль-Джасри Г.Х.М. Алгоритмы кооперативного обнаружения течи теплоносителя в акустической сенсорной сети / Г.Х.М. Аль-Джасри, В.А. Болтенков, П.П. Червоненко // Электротехнические и компьютерные системы. – Одесса : ОНПУ, 2016. – № 21 (97). – С. 92 – 97. (*Фахове видання, індексування: Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar, РИИЦ*).

4. Аль-Джасри Г.Х.М. Синтез геометрии сенсорной сети акустической диагностики течей теплоносителя // Электротехнические и компьютерные системы. – Одесса : ОНПУ, 2016. – № 23 (99). – С. 139 – 145. (*Фахове видання, індексування: Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar, РИИЦ*).

5. Аль-Джасри Г.Х.М. Локально-когерентная обработка измерительной информации в системах акустического мониторинга течей теплоносителя / Г.Х.М. Аль-Джасри, В.А. Болтенков, П.П. Червоненко // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – Луцьк : ЛНТУ, 2016. – № 23. – С. 5 – 11. (Фахове видання, індексування: *Index Copernicus International, Open Academic Journals Index, РИНЦ*).

### **Опубліковані праці апробаційного характеру**

6. Аль-Джасри Г.Х.М., Болтенков В.А., Касьяненко Б.В.. Исследование алгоритмов локализации источников звука на основе TDOA-технологий / Аль-Джасри Г.Х.М., Болтенков В.А., Касьяненко Б.В.// Інформаційні управляючі системи та технології: Мат. III Міжнародної науково-практичної конференції (ІУСТ – Одеса – 2014), 23-25 вересня 2014 р., Одеса. – С. 76 – 79.

7. Аль-Джасри Г.Х.М. Локально-когерентная обработка измерительной информации в системах акустического мониторинга течей теплоносителя / Г.Х.М. Аль-Джасри, В.А. Болтенков, П.П. Червоненко // Програмовані логічні інтегральні схеми та мікропроцесорна техніка в освіті і виробництві. Міжнар. наук.-практ. семінар молодих вчених та студентів, 28 – 29 квітня 2016 р. : Зб. тез доп. – Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2016. – С. 13 – 14.

8. Аль-Джасри Г.Х.М. Исследование алгоритмов обнаружения сигнала течи теплоносителя в акустической сенсорной сети / Г.Х.М. Аль-Джасри, В.А. Болтенков // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2016): Тр. XVII междуна. научно-практ. конф., 23 – 27 мая 2016 г., Одесса, 2016. – С. 46 – 47.

9. Аль-Джасри Г.Х.М. Метод построения геометрии сенсорной сети для акустической диагностики течей в теплотехническом оборудовании / Г.Х.М. Аль-Джасри, В.А. Болтенков // IV Українсько-німецька конференція «Інформатика. Культура. Техніка».30.06-02.07.2016: Зб. тез доп. – Одеса : ОНПУ, 2016. – С. 62–63.

10. Al-Jasri G.Kh.M. The study of methods for solving systems of TDOA-equations in sound source localization problems / G.Kh.M. Al-Jasri, V. Boltenkov // «Комп'ютерна алгебра та інформаційні технології» (КАІТ-2016) : II міжнар. конф., 21 – 26 серпня 2016 р.: Тези доп. – Одеса: Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, 2016. – С. 5.

11. Аль-Джасри Г.Х.М. Оценка потенциальной точности определения местоположения источника звука на основе TDOA-технологий / Г.Х.М. Аль-Джасри, В.А. Болтенков. // Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-ОДЕСА-2016): Мат. міжн. науково-практ. конф., 20 – 22 вересня 2016 р.– Одеса: «Видавінформ» НУ «ОМА», 2016. – С. 308-310.

## ABSTRACT

**Al-Jasri Gamal Khaled Mohammed. Information technology for multisensory acoustic leaks diagnostics in heating equipment. – Manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.06 – «Information technologies». – Odessa National Polytechnic University, Ministry of science and education of Ukraine, Odessa, 2017.

The models, methods and information technology (IT) for acoustic multisensory diagnostics of heat transfer leaks in heat engineering equipment have been developed and investigated in the dissertation. IT is based on the applying of an acoustic multisensory network (AMN) for receiving of an acoustic signal that arises during the pressure heat transfer leak through microdefects. The method for cooperative detection of the leak with the maximum probability of correct detection with a minimal probability of false alarm has been developed. The TDOA model for each pair of acoustic sensors in the network has been improved. The model is presented in a matrix form, which allowed taking into account the influence of the geometry of AMN on the leak coordinates estimation error. The method for operative control of the sensors state and detection of sensor parametric fault in the process of operation has been proposed. An automated system for the diagnosis of heat transfer leaks was created on the basis of IT. The system allows detecting a leak with guaranteed indicators of detection quality and localized it with guaranteed error.

**Keywords:** information technology, leaks in heat engineering equipment, acoustic multisensory network, TDOA, estimation of leak coordinates.

## АНОТАЦІЯ

**Аль-Джасрі Гамаль Халед Мохамед. Інформаційна технологія акустичного мультисенсорного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – «Інформаційні технології». – Одеський національний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2017.

У дисертації розроблені і досліджені моделі, методи та інформаційна технологія (ІТ) акустичного мультисенсорного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні. ІТ заснована на прийомі акустичною мультисенсорною мережею (АММ) акустичного сигналу, що виникає при течії теплоносія через мікродефекти. Розроблено метод кооперативного виявлення факту течії з максимальною ймовірністю вірного виявлення при мінімальній ймовірності хибної тривоги. Удосконалено модель оцінки координат течії по різниці часів приходу сигналу (ТДОА) на кожній парі акустичних сенсорів мережі. Модель представлена в матричному вигляді, що дозволило врахувати вплив геометрії АММ на похибку оцінки координат течії.

Запропоновано метод оперативного контролю стану сенсорів в процесі експлуатації. На основі ІТ побудована автоматизована система діагностування течій,

що дозволяє виявити течію з гарантованими показниками якості виявлення та її локалізації.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, течії в теплотехнічному обладнанні, акустична мультисенсорна мережа, TDOA, оцінка координат течії.

## АННОТАЦІЯ

**Аль-Джасри Гамаль Халед Мохаммед. Інформаційна технологія акустичного мультисенсорного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні. – На правах рукописи.**

Дисертація на соискание ученої ступені кандидата технічних наук по спеціальності 05.13.06 – «Інформаційні технології». – Одеський національний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2017.

В дисертації розроблені і досліджені моделі, методи і інформаційна технологія (ІТ) акустичного мультисенсорного діагностування течій в теплотехнічному обладнанні. ІТ ґрунтується на прийомі акустичної мультисенсорної мережі (АМС) інтенсивного акустичного сигналу, що виникає при течії теплоносія через мікродіфекти.

Установлено, що існуючі акустичні технології виявлення течій теплоносія в теплотехнічному обладнанні в умовах інтенсивних технологічних шумів не забезпечують виявлення течії і її локалізацію с потрібними показниками якості. Для забезпечення цих показників якості діагностування в умовах низьких відношень сигнал/шум пропонується збільшити кількість просторових каналів за рахунок застосування мультисенсорної мережі з 12-25 акустичними сенсорами.

Сформована інформаційна база дослідження на основі записів реальних сигналів від течій, зареєстрованих на спеціальному випробувальному теплофізичному стенді. Пропонується удосконалена модель формування акустичного поля на сенсорах АМС на основі запису реального сигналу з урахування параметрів мікроклімату в технологічному приміщенні, що дозволяє підвищити точність моделювання.

Розроблено метод кооперативного виявлення факта течії з максимальною ймовірністю правильного виявлення при мінімальній ймовірності ложної тривоги. Метод ґрунтується на застосуванні кооперативних правил: І, ІЛИ, і БОЛЬШИНСТВО при об'єднанні результатів виявлення на окремих сенсорах АМС.

Для підвищення точності оцінювання координат течії в умовах складного акустичного поля в технологічному приміщенні розроблено метод локально-когерентної обробки сигналів. Метод ґрунтується на розрахунку функції взаємної когерентності сигналів на кожній парі сенсорів мережі.

Удосконалено модель оцінювання координат течії по різниці часів прийому сигналу (TDOA) на кожній парі акустичних сенсорів мережі. Модель представлена в матричному вигляді, що дозволило врахувати вплив геометрії АМС на



ошибку оценки координат течи. Разработана методика размещения сенсоров в контролируемой зоне, обеспечивающая значения геометрического фактора потери точности (GDOP), не превосходящего 4.

Предложен метод оперативного контроля состояния сенсоров в процессе эксплуатации. Метод основан на излучении тестового фазоманипулированного сигнала, модулированного M-последовательностью. Метод позволяет установить наличие в АМС сенсора с параметрическим отказом.

На основе предложенных моделей и методов разработаны интегрированная ИТ и автоматизированная система диагностирования течей. Система спроектирована в клиент-серверной архитектуре и содержит две SQL базы данных (БД) – БД акустических сигналов и БД событий, происходящих в системе в процессе диагностирования.

Система диагностирования предусматривает функционирование в трех режимах: проектирование, диагностика и текущий контроль состояния АМС. При отношениях сигнал/шум (10...-5) дБ система с 12-20 сенсорами позволяет обнаружить факт течи с вероятностью правильного обнаружения (0,90 ... 0,93) при вероятности ложной тревоги не выше (0,09 ... 0,12) и оценить координаты течи со среднеквадратической погрешностью, не превышающей 0,72 м.

Полученные в работе научные результаты и программное обеспечение внедрены на предприятии «Южная энергосервисная компания ЭСКО Юг» и в учебный процесс кафедры информационных систем Одесского национального политехнического университета.

**Ключевые слова:** информационная технология, течи в теплотехническом оборудовании, акустическая мультисенсорная сеть, TDOA, оценка координат течи.