

УДК 621.373.826; 621.378; 621.385.62

№ держреєстрації

Інв. № \_\_\_\_\_

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ  
(ХНУРЕ)**

61166, Харків, пр. Леніна, 14; тел.+30 (057) 702-10-13, факс: +38 (057) 702-10-13

**"ЗАТВЕРДЖЕНО"**

Проректор з наукової роботи,  
професор

М.І. Сліпченко

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 р.

**НАУКОВО-ДОСЛІДНА РОБОТА**

**ПОШУК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ СТВОРЕННЯ ТА  
ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДЖЕРЕЛ  
ЕНЕРГІЇ**

**(заключний)**

Науковий керівник НДР  
докт. фіз-мат. наук, проф.

Г.І. Чурюмов

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 р.

Результати роботи розглянуто на засіданні  
науково-методичної ради ХНУРЕ,  
протокол № 15 від "28" грудня 2011 р.

**2011**

## СПИСОК ВИКОНАВЦІВ

|                                   |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Керівник НДР                      | Г.І. Чурюмов          |
| докт. фіз.-мат.наук, професор     | (Заключення)          |
| Відповідальний виконавець НДР,    | А.І. Екезлі           |
| молодший науковий співробітник    | (Вступ)               |
| Керівник розділу 1                | О.І. Дохов            |
| канд. техн.наук, професор         | (висновки, розд.1)    |
| Керівник розділу 2                | Ю.П. Мачехін          |
| докт. техн.наук, професор         | (висновки, розд.2)    |
| Керівник розділу 3                | В.О. Стороженко       |
| докт. техн.наук, професор         | (висновки, розд.3)    |
| Керівник розділу 4                | І.В. Руженцев         |
| докт. техн.наук, професор         | (висновки, розд.4)    |
| Керівник розділу 5                | І.П. Захаров          |
| докт. техн.наук, професор         | (висновки, розд.5)    |
| Відповідальний виконавець         | В.Й. Стрільченко      |
| розділу 1, наук.співр.,           | (розділ 1)            |
| Відповідальний виконавець розділу | С. Мешков             |
| 3, канд. техн. наук, доцент       | (підрозділи 3.1, 3.2) |
| Відповідальний виконавець розділу | О.В. Дегтярьов        |
| 4, канд. техн. наук, ст.викладач  | (розділ 4)            |
| Провідний науковий співробітник,  | Г.М. Валєвахін        |
| канд. техн. наук                  | (підрозділ 1.2)       |
| Провідний науковий співробітник,  | О.Я. Контарь          |
| канд. техн. наук,                 | (підрозділи 1.2, 1.3) |
| Провідний інженер                 | М.Г. Писаренко        |
|                                   | (підрозділ 1.3.1)     |

Головний науковий співробітник,  
докт. техн. наук

Старший науковий співробітник

Провідний науковий співробітник,  
канд. техн. наук

Старший науковий співробітник

Доцент, канд. фіз.-мат. наук

Аспірант

Старший наук. співробітник

канд. техн. наук, доцент

Наук. співробітник

канд. техн. наук, ст. викладач

Науковий співробітник

Молодший наук. співробітник

Асистент

Старший викладач, канд. техн. наук

Доцент, канд. техн. наук

Старший викладач

Стажист-дослідник

І.І. Зима

(підрозділ 1.4)

О.І. Толстих

(підрозділ 1.3.2)

В.В. Жирнов

(підрозділ 1.4)

Е.Р. Галєєв

(підрозділи 1.1, 1.2)

Є.М. Одаренко

(підрозділ 2.1)

С.М. Кухтін

(підрозділ 2.2)

Р. Орел

(підрозділ 3.1.3)

С. Малик

(підрозділи 3.1, 3.2)

О. Мягкий

(підрозділ 3.3.3)

О. Бандурян

(підрозділ 3.3.3)

М.О. Крюков

(підрозділ 4.1)

Ю.В. Козлов

(підрозділ 4.2)

О.М. Нікітенко

(підрозділ 4.3)

Ю.П. Белокурський

(підрозділ 4.2)

О.С. Межевич

(підрозділ 4.3)

Аспірант

Водотика С.В.

(підрозділ 5.1)

Аспірант

Шевченко Н.С.

(підрозділ 5.2)

Молодший науковий співробітник

О.Б. Ісаєва

(розділи 1-5)

В виконанні НДР прийняли участь студенти Гребенік Д.М. (гр. МВТ 09-1), Решетняк М.В. (гр. МВТ 09-1) та магістри Пехота О.В. (підрозділ 2.3), Швачка Д. О. (підрозділ 2.4) і Шевченко О. М. (підрозділ 5.3, гр. МВТМ-10-1)

## РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження – фізичні процеси взаємодії електромагнітного випромінювання з активною та пасивною середою.

Предмет дослідження – частотні, спектральні, амплітудні та модуляційні характеристики електронних та лазерних джерел випромінювання, а також прилади та пристрої, в основу роботи котрих покладені нетрадиційні підходи.

Метою проекту є теоретичне та експериментальне дослідження особливостей електромагнітних процесів в широкому частотному діапазоні (від НВЧ до УФ діапазону) та використання отриманих результатів в новітніх енергоефективних екологічних електромагнітних технологіях та біомедицині.

В основу проекту покладено дослідження взаємодії електромагнітних полів НВЧ, інфрачервоного (ІЧ), оптичного та ультрафіолетового (УФ) діапазонів, а також постійних та змінних у часі магнітних полів, акустичних ультразвукових коливань та кавітації з різноманітними середовищами (лінійними та нелінійними), речовинами та матеріалами, виявлення позитивних результатів такої взаємодії та їх використання. Для створення новітніх джерел енергії передбачається проведення теоретичних та експериментальних досліджень фізичних процесів в мікрохвильових (магнетрони), квантових (оптоволоконні фемтосекундні лазери) та імпульсних УФ генераторах (застосування електричного розряду в атмосфері та безелектродних сірних ламп високого тиску). Розглядаються шляхи застосування основних отриманих теоретичних і практичних результатів в енергозберігаючих екологічно чистих технології (комбіноване НВЧ + УФ випромінювання) та біомедицині, а також в альтернативній енергетиці для одержання палива з біогенної сировини та виробка водню за допомогою енергії повітряних мас. Запропоновані технології запатентовані.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ, РЕЗОНАНС, НВЧ ТЕХНОЛОГІЯ, КАВІТАЦІЯ, ТЕРМОГРАФІЯ, АЕРОГІДРОДІНАМІЧНИЙ ГЕНЕРАТОР

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                             |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>ВСТУП .....</b>                                                                                                                                          |  |
| <b>1 ДОСЛІДЖЕННЯ Й РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ<br/>ТЕХНОЛОГІЙ ОДЕРЖАННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ<br/>ВПЛИВУ ПОЛІВ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ .....</b>         |  |
| 1.1 Аналіз сучасного стану проблеми. Теоретичні та експериментальні<br>дослідження комбінованого впливу полів різної фізичної природи .....                 |  |
| 1.1.1 Аналіз механізмів впливу НВЧ електромагнітного, магнітного<br>постійного та змінного полів, акустичних коливань і їхніх комбінованих<br>впливів ..... |  |
| 1.1.1.1 Аналіз механізмів впливу електромагнітного поля НВЧ діапазону ....                                                                                  |  |
| 1.1.1.2 Вода в електромагнітному полі .....                                                                                                                 |  |
| 1.1.1.3 Дослідження населеностей магнітних енергетичних рівнів води з<br>врахуванням протолітичної дисоціації .....                                         |  |
| 1.1.2 Кавітаційне збудження магнітних резонансів у рідких середовищах ....                                                                                  |  |
| 1.1.2.1 Кавітаційне збудження магнітного резонансу .....                                                                                                    |  |
| 1.1.2.2 Кавітаційна магнітна предисоціація рідини .....                                                                                                     |  |
| 1.1.2.3 Типи магнітних резонансів у рідині .....                                                                                                            |  |
| 1.1.3 Резонансна магнітоакустична обробка рідкої дисперсійної фази<br>робочого середовища .....                                                             |  |
| 1.1.3.1 Резонансна магнітоакустична обробка відходів нафтопереробки .                                                                                       |  |
| 1.1.3.2 Резонансна магнітоакустична обробка твердої дисперсної фази<br>робочого середовища .....                                                            |  |
| 1.2 Експериментальні дослідження комбінованого впливу<br>електромагнітного поля НВЧ діапазону на сільськогосподарські матеріали .                           |  |
| 1.2.1 Методика проведення досліджень .....                                                                                                                  |  |
| 1.2.2 Результати досліджень .....                                                                                                                           |  |
| 1.2.3 Дослідження ефективності резонансної магнітоакустичної обробки<br>води .....                                                                          |  |

|                                                                                                                                                                                                    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 1.3 Дослідження комбінованих впливів полів різної фізичної природи на речовини .....                                                                                                               |  |
| 1.3.1 Теоретичні та експериментальні дослідження комбінованих впливів ... електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону, магнітного постійного та змінного полів на речовини у твердій фазі ..... |  |
| 1.3.2 Теоретичні й експериментальні дослідження впливу .....                                                                                                                                       |  |
| гідродинамічної кавітації на рідкі органічні речовини і їхньої суміші з вуглеводневими матеріалами .....                                                                                           |  |
| 1.4 Розроблення енергоефективних НВЧ технологій та магніто-акустичного реактора .....                                                                                                              |  |
| 1.4.1 Удосконалення існуючих та розроблення нових комбінованих енергоефективних НВЧ технологій сушіння сипких продуктів .....                                                                      |  |
| 1.4.2 Розроблення магнето-акустичного реактора для резонансної обробки рідких речовин .....                                                                                                        |  |
| 1.4.2.1. Розробка технологічної схеми магнітоакустичного реактора .....                                                                                                                            |  |
| 1.4.3 Розробка функціональної схеми контролю й управління магнітоакустичного реактора .....                                                                                                        |  |
| 1.5 Висновки .....                                                                                                                                                                                 |  |
| <b>2 ОПТОВОЛОКОННІ ЛАЗЕРИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЗВ'ЯЗКУ, МЕДИЦИНИ ТА ВИМІРЮВАНЬ .....</b>                                                       |  |
| 2.1 Теоретичні основи накачки волоконного лазера                                                                                                                                                   |  |
| 2.2 Загальні принципи роботи волоконного лазера                                                                                                                                                    |  |
| 2.2.1 волоконні лазери на основі світловодів, легованих рідкоземельними елементами .....                                                                                                           |  |
| 3 Основні конструкції волоконних лазерів ....                                                                                                                                                      |  |
| 4 Кільцевий лазер на ербійовом волокні в режимі синхронізації мод                                                                                                                                  |  |
| 5 Компоненти системи ....                                                                                                                                                                          |  |
| 6 Методи опису поляризованого світла ....                                                                                                                                                          |  |
| 7 Рідки кристали ....                                                                                                                                                                              |  |

7.1 Типи рідких кристалів ...

7.2 Електронно-оптичні властивості рідких кристалів

8 Висновки

### **3 ТЕХНОЛОГІЇ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОГРАФІЧНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ .....**

3.1 Аналіз сучасного стану дослідження надлишкових температурних полів

3.1.1 Сутність методів і апаратура для дослідження надлишкових температурних полів .....

3.1.2 Сучасний стан і проблеми активного теплового контролю.....

3.1.3 Сучасний стан і проблеми термографії.....

3.2 Розвиток методів аналізу температурних полів .....

3.2.1 Розробка теплофізичних моделей неоднорідних структур .....

3.2.1.1 Теплофізична модель .....

3.2.1.2 Аналіз моделі та оцінка її адекватності .....

3.2.1.3 Програмна реалізація методу.....

3.2.1.4 Результати розрахунків та їх аналіз.....

3.2.2. Оптимізація процедур АТК в умовах наявності завад.....

3.2.3 Інформаційні ознаки і вирішуючі правила при діагностуванні газоперекачувального обладнання. ....

3.3 Застосування термографічних приладів для аналізу температурних полів .....

3. 1. Теплова дефектоскопія елементів авіаційних двигунів із сотовим теплозахисним покриттям .....

3.2 Застосування термографії для оцінювання змісту рідкої фази у газопроводах .....

3.3 Термографічне обстеження трубопроводів і паропроводів ЗАЕС .....

3.3.1 Результати термографічного обстеження .....

3.3.2 Методики обробки результатів обстеження і розрахунку чутливості термографічного методу до виявлення зменшення товщини стінок труб .....

|          |                                                                     |  |
|----------|---------------------------------------------------------------------|--|
| 3.3.3    | Аналіз результатів .....                                            |  |
| 3.4.     | Висновки .....                                                      |  |
| <b>4</b> | <b>РОЗРОБКА СПОСОБУ ОТРИМАННЯ, ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА</b>                    |  |
|          | <b>ВИКОРИСТАННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ЕНЕРГОНОСІЯ</b>               |  |
|          | <b>НА БАЗІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ .....</b>                  |  |
| 4.1      | Аналіз сучасного стану альтернативної енергетики в Україні .....    |  |
| 4.2      | Розробка вертикального аерогідродинамічного двигуна для системи з   |  |
|          | виробництва альтернативної енергії .....                            |  |
| 4.3      | Розробка способу отримання водню в системі з виробництва            |  |
|          | альтернативної енергії.....                                         |  |
| 4.4      | Розробка структурної схеми системи з виробництва                    |  |
|          | альтернативної енергії.....                                         |  |
| 4.5      | Розробка метрологічного забезпечення системи з виробництва          |  |
|          | альтернативної енергії.....                                         |  |
| 4.5.1    | Розробка структурної схеми вимірювальної системи з контролю         |  |
|          | параметрів роботи установки з виробництва альтернативної енергії    |  |
| 4.5.2    | Розробка засобу вимірювання потужності.....                         |  |
| 4.5.3    | Розробка віртуальних приладів.....                                  |  |
| 4.5.4    | Оцінка похибок вимірювальної системи з контролю параметрів          |  |
|          | роботи установки з виробництва альтернативної енергії.....          |  |
| 4.6      | Висновки.....                                                       |  |
| <b>5</b> | <b>ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОНІТОРИНГ НАВКОЛИШНЬОГО</b>                    |  |
|          | <b>СЕРЕДОВИЩА .....</b>                                             |  |
| 5.1      | Аналіз нормативної документації з вимірювання енергетичних          |  |
|          | параметрів електромагнітних полів та оцінювання невизначеності      |  |
|          | вимірювань .....                                                    |  |
| 5.1.1    | Огляд міжнародних та європейських документів з вимірювань           |  |
|          | параметрів ЕМС .....                                                |  |
| 5.1.2    | Аналіз стану вітчизняної нормативної та законодавчої бази в області |  |
|          | ЕМС .....                                                           |  |

|                                                                                                                                                                  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 5.1.3 Аналіз законодавчої та нормативної документації з забезпечення безпеки людини від впливу на неї випромінювань від устаткування стільникового зв'язку ..... |  |
| 5.1.4 Огляд нормативних документів з оцінювання невизначеності вимірювань енергетичних параметрів ЕМС .....                                                      |  |
| 5.2. Теоретичне дослідження особливостей оцінювання невизначеності вимірювань енергетичних параметрів ЕМС .....                                                  |  |
| 5.2.1 Аналіз основних особливостей вимірювань ЕМС та оцінювання їх невизначеності .....                                                                          |  |
| 5.2.2. Особливості оцінювання невизначеності вимірювання при вираженні вхідних величин в децибелах .....                                                         |  |
| 5.3. Розробка процедур оцінювання невизначеності вимірювань енергетичних параметрів електромагнітної сумісності .....                                            |  |
| 5.3.1 Процедура оцінювання невизначеності вимірювань щільності потоку енергії електромагнітного поля .....                                                       |  |
| 5.3.2 Процедура оцінювання невизначеності вимірювань вихідних параметрів Еталону –СН .....                                                                       |  |
| 5.3.3 Процедура оцінювання невизначеності вимірювань радіозавад від громадського наземного електротранспорту .....                                               |  |
| 5.4. Висновки .....                                                                                                                                              |  |
| <b>ЗАКЛЮЧЕННЯ</b> .....                                                                                                                                          |  |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....                                                                                                                          |  |
| Додаток А .....                                                                                                                                                  |  |
| Додаток Б. ....                                                                                                                                                  |  |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

|                      |                                                                                                   |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a, a_d$             | - температуропровідність матеріалів об'єкту і дефекту, відповідно, $\text{м}^2/\text{с}$ ;        |
| $H$                  | - поперечний розмір дефекту, $\text{мм}$ ;                                                        |
| $h$                  | - глибина положення дефекту, $\text{мм}$ ;                                                        |
| $L$                  | - поперечний розмір об'єкту, $\text{мм}$ ;                                                        |
| $q$                  | - об'ємна щільність потоку потужності, $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;                                   |
| $q_{\text{пов}}$     | - поверхова щільність потоку потужності, $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;                                 |
| $S$                  | - площа плями нагріву, $\text{м}^2$ ;                                                             |
| $T_{\text{max}}$     | - гранично температура нагріву поверхні об'єкту, $^{\circ}\text{C}$ ;                             |
| $\Delta T$           | - абсолютний температурний контраст, $^{\circ}\text{C}$ ;                                         |
| $\alpha$             | - коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/\text{К}\cdot\text{м}^2$ ;                                  |
| $\lambda, \lambda_0$ | - теплопровідність матеріалів об'єкту та дефекту, відповідно, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ; |
| $\varepsilon$        | - випромінювальна здатність поверхні об'єкту;                                                     |
| $c$                  | - теплоємність;                                                                                   |
| $\rho$               | - щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$ ;                                                             |
| $\delta$             | - розкриття дефекту, $\text{мм}$ ;                                                                |
| АТНК                 | - активний тепловий неруйнівний контроль;                                                         |
| НК                   | - неруйнівний контроль;                                                                           |
| ТК                   | - тепловий контроль;                                                                              |
| ГУ                   | - граничні умови;                                                                                 |
| ДТЗ                  | - джерело теплового збудження;                                                                    |
| ТНК                  | - тепловий неруйнівний контроль;                                                                  |
| ОК                   | - об'єкт контролю;                                                                                |
| ТФХ                  | - теплофізичні характеристики;                                                                    |
| РП                   | - реєструючий пристрій.                                                                           |
| АЦП                  | — аналогово-цифровою перетворювач;                                                                |

|                |                                                                                                               |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ВЕУ            | – вітроенергетична установка;                                                                                 |
| ВЕС            | – вітроелектростанція;                                                                                        |
| ВП             | – віртуальні прилади;                                                                                         |
| ЕОМ            | – електронно-обчислювальна машина                                                                             |
| ЗВТ            | – засіб вимірювальної техніки                                                                                 |
| ИСЦПК          | – вимірювальна система з цифровою обробкою сигналів на базі промислового комп'ютеру;                          |
| ККД            | – коефіцієнт корисної дії;                                                                                    |
| Н <sub>2</sub> | – молекула газу водню;                                                                                        |
| ПЗД            | – пристрій збору даних;                                                                                       |
| ПЗ             | – програмне забезпечення;                                                                                     |
| СКВ            | – середньоквадратичне відхилення;                                                                             |
| ЦОС            | – цифрова обробка сигналів;                                                                                   |
| LabVIEW        | – Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench – середовище розробки лабораторних віртуальних приладів |

## ВСТУП

Протягом останніх років були дослідженні фізичні процеси взаємодії електромагнітного поля НВЧ з різноманітними речовинами та середовищами, у тому числі з об'єктами біологічного походження. Результати цих досліджень були повідомлені науковій спільноті на сторінках провідних вітчизняних та іноземних фахових видань, а також захищені патентами. Подальший логічний розвиток цієї тематики полягає в звертанні уваги на фізичні процеси, що супроводжують взаємодію електромагнітного поля НВЧ, ІЧ, оптичного та УФ діапазону частот з вже згаданими речовинами та середовищами та їх використання в енергозберігаючих електромагнітних технологіях. Проведення таких досліджень неможливе без ефективних та доступних за ціною джерел випромінювання, побудова яких є дуже актуальним завданням для сучасної української науки та техніки.

Питання технологічного використання електромагнітної енергії в НВЧ діапазоні досить добре досліджені. Серед фундаментальних праць можна навести монографію І.О. Рогова, Ю.С. Архангельського, В.Я. Явчуновського, орієнтовану на певну предметну область, містять виклад оригінальних підходів до реалізації окремих класів технологічних процесів, пов'язаних із тривалим і інтенсивним нагріванням. Проте залишились мало вивчені аспекти комбінованих впливів НВЧ + УФ випромінювання, теплових та змінних у часі магнітних полів.

Широке застосування має лазерне випромінювання, особисто фемтосекундної тривалості. Ефективність використання таких лазерів забезпечується їх модуляційними характеристиками, а також поліпшеними частотними, спектральними та потужнісними характеристиками випромінювання.

Сучасний стан використання лазерів в промисловості, системах зв'язку, медицині та наукових дослідженнях базується на енергетичних та частотних характеристиках лазерного випромінювання. В технологічних процесах

обробки матеріалів суттєву роль виконує потужність, енергія та просторове розподілення лазерного випромінювання. В цій галузі існує гостра необхідність доставляти випромінювання від джерела до місця його застосування по оптичному волокну. У деяких випадках така відстань може складати від 500 м до 10 км, що є досить складним завданням. Завдяки особливості своєї конструкції оптоволоконні лазери є найкращими кандидатами на використання для вирішення таких завдань. Яскравим прикладом є лазери компанії IRE-Polus Group (США, Росія, Німеччина, Англія та Італія), яка є лідером у цій галузі. Ця компанія пропонує оптоволоконні лазери потужністю від 1 Вт до 10 кВт. Попри попит з боку вітчизняних підприємств, в Україні немає жодного виробника таких лазерів. Для налагодження випуску таких лазерів в Україні існують усі передумови. Але бракує результатів глибоких теоретичних досліджень фізичних процесів в активному середовищі таких лазерів та їх експериментального підтвердження. Зокрема з практичної точки зору треба дослідити процес нагнітання таких лазерів напівпровідниковими лазерними діодами.

Для вирішення поставлених завдань в роботі передбачене використання методів математичного моделювання та фізичного експерименту, в тому числі і на основі натурного моделювання. Застосовуваний при цьому підхід - максимальне використання наукового наробітку, створеного протягом попереднього років досліджень.

В основу роботи покладена ідея застосування комбінованих впливів різних фізичних полів на органічні та неорганічні речовини для забезпечення максимального ефекту при мінімальних затратах енергії.

При дослідженнях в ІЧ та оптичному діапазонах основні ідеї проекту містяться в тому, що для формування випромінювання оптоволоконних лазерів із заданими параметрами й управління його частотними, модуляційними та потужнісними характеристиками необхідно використовувати фізичні і технічні можливості оптоволоконних лазерів, у яких сформовані умови керування частотними параметрами, модуляційними та потужнісними характеристиками

випромінювання. По-перше, оскільки частотні та спектральні властивості випромінювання оптоволоконних лазерів залежать від конфігурації, параметрів їх резонаторів та властивостей оптичного волокна, то у проекті будуть досліджені фізичні умови розповсюдження та взаємодії лазерного випромінювання у резонаторах і оптичних волокнах. Зокрема увага приділятиметься багатожильним оптичним конструкціям з інтимізованим розташуванням волокон нагнітання та активних волокон. Ці фізичні умови будуть забезпечувати стабільність частоти випромінювання лазерних джерел, необхідну, наприклад, для прецизійної інтерферометрії. По-друге, модуляційними характеристиками оптоелектронних лазерів можна керувати через використання періодичних структур з заданими параметрами. Для цього будуть розроблені принципи технології виготовлення оптичних волоконних дзеркал та принципи технології зварення різнорідних волокон з брегговськими дзеркалами.

Таким чином, реалізація проекту базується на дослідженні умов оптичного нагнітання; дослідженнях нових конфігурацій резонаторів оптоволоконних лазерів та оптичних волокон, що складають ці резонатори; дослідженнях модуляційних характеристик активних середовищ оптоволоконних лазерів. При цьому використовуючи спеціальні методи управління частотою лазерів та ефективністю взаємодії випромінювання з квантовими середовищами, можна теоретично обґрунтовано та у деяких випадках практично підтверджено отримати умови реалізації якомога більш ефективного джерела лазерного випромінювання за доступною ціною для сучасних оптоелектронних та оптичних приладів.

В УФ діапазону бактерицидний ефект випромінювання пов'язано із впливом високо енергетичних квантів випромінювання на ДНК мікроорганізмів, порушенням її структури за рахунок розриву внутрішньомолекулярних зв'язків, що забезпечує бактеріостатичний або стерилізаційний ефект. Підвищення потужності випромінювання досягається, в першу чергу, за рахунок використання імпульсного режиму опромінювання.

При цьому досягається реалізація імпульсного адіабатичного механізму реакції об'єктів опромінювання, який полягає в зниженні інтегральної дози енергії, необхідної для досягнення стерилізаційного ефекту. Основна ідея частини проекту щодо розробки та створення технології бактерицидної оптичної обробки полягає в створенні високопотужного джерела імпульсного випромінювання з широким безперервним спектром на основі відкритого електричного розряду в атмосфері, який здійснюється в коаксіальному магнітоплазмовому компресорі торцевого типу.

Метою проекту є теоретичне та експериментальне дослідження особливостей електромагнітних процесів в широкому частотному діапазоні (від НВЧ до УФ діапазону) та використання отриманих результатів в новітніх енергоефективних екологічних електромагнітних технологіях та біомедицині.

# **1 ДОСЛІДЖЕННЯ Й РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОДЕРЖАННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВПЛИВУ ПОЛІВ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ**

1.1 Аналіз сучасного стану проблеми. Теоретичні та експериментальні дослідження комбінованого впливу полів різної фізичної природи

1.1.1. Аналіз механізмів впливу НВЧ електромагнітного, магнітного постійного та змінного полів, акустичних коливань і їхніх комбінованих впливів

В останні десятиліття активно проводяться дослідження, спрямовані на вдосконалення існуючих та створення більш ефективних, екологічних та енергозберігаючих технологій на основі використання різних фізичних полів. Сфера застосування таких технологій постійно розширюється. В хімії – активація хімічних процесів (використовується плазма, НВЧ-випромінювання, ультразвук, акустична та гідродинамічна кавітація, лазерне випромінювання, ультрафіолетове випромінювання та інше), в сільському господарстві – ультрафіолетове та НВЧ випромінювання для обробки посівного насіння. Широке застосування одержали, так звані, мікрохвильові технології основані на використанні електромагнітного випромінювання в НВЧ діапазоні ( $300 \div 300\,000$  МГц), в енергетиці – кавітація для виробництва паливних емульсій, в хімії, біології, медицині – магнітні поля. Все більше появляється праць з використання резонансних явищ в хімії, біології, технологічних процесах та інше [1–21].

1.1.1.1. Аналіз механізмів впливу електромагнітного поля НВЧ діапазону

Питанням практичного використання мікрохвильових технологій присвячено значний об'єм публікацій. Певну уяву про досягнення та існуючі проблеми застосування цих технологій можна одержати з наведеної літератури [7–21].

Електричні властивості речовини в діапазоні НВЧ характеризуються комплексною діелектричною проникністю:

$$\varepsilon^* = (\varepsilon' - i\varepsilon'') \cdot \varepsilon_0,$$

де  $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2 \times 10^{-7}} \approx 8.854187817 \times 10^{-12}$  Ф/м – діелектрична проникність вакууму,  $c$  – швидкість світла. Уявна і дійсна частина діелектричної проникності зв'язані між собою співвідношенням

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'},$$

де  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс кута діелектричних втрат, а  $\delta$  – різниця фаз між векторами поляризації та напруженістю змінного електричного поля.

Якщо середовище розповсюдження хвиль має провідність, яка в загальному випадку залежить від частоти, то діелектрична проникність середовища поширення електромагнітних хвиль буде мати вигляд

$$\varepsilon^*(\omega) = (\varepsilon' - i(\varepsilon'' + \frac{\sigma(\omega)}{\omega}))\varepsilon_0.$$

Нехтуючи ефектами запізнювання, тобто вважаючи, що  $|\varepsilon''| \ll \left| \frac{\sigma(\omega)}{\omega \varepsilon_0} \right|$ ,

діелектрична проникність буде визначатись формулою

$$\varepsilon^*(\omega) = (\varepsilon' - i \frac{\sigma(\omega)}{\omega})\varepsilon_0, \text{ або } \varepsilon^*(\omega) = (1 - i \operatorname{tg} \delta) \varepsilon_0 \varepsilon'$$

Під дією магнітного поля в провідникові виникає струм провідності, обумовлений переміщенням вільних електронів. У діелектрику ж відбувається переміщення зв'язаних зарядів, що входять до складу атомів і молекул, що

обумовлює струм зсуву. Відношення струму провідності до струму зсуву дорівнює величині  $\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''}$ .

Під дією електричного поля заряди в діелектрику перерозподіляються, відбудеться його поляризація.

У випадку змінного поля відбуваються більше складні явища, що залежать від структури діелектрика. Діелектрики можна розділити на неполярні (нейтральні) і полярні (дипольні). У перших еквівалентні сумарні заряди, рівні всім позитивним і всім негативним зарядам молекули збігаються в просторі – їхня алгебраїчна сума дорівнює нулю. У других еквівалентні сумарні заряди не збігаються в просторі, що обумовлює наявність у молекули (при відсутності зовнішнього поля) електричного моменту.

Молекули, що мають центр симетрії, є неполярними. Несиметричні молекули – полярні. При визначенні полярності потрібно враховувати не тільки хімічну формулу (сполука молекули), але й дійсне розташування зарядів у структурі молекули. Молекула  $\text{C}_2$  має центр симетрії й неполярна, тоді як молекула  $\text{H}_2\text{O}$ , що має структуру у вигляді рівнобедреного трикутника, – полярна й має електричний момент.

Існує кілька видів поляризації, що відповідають різним фізичним видам явища. Основні з них – електронної, іонної, дипольна і структурна поляризації. Електронна поляризація, що представляє собою зсув орбіт, по яких рухаються електрони навколо ядра атома, має місце у всіх діелектриках і характеризується дуже малим часом (порядку  $10^{-14} \dots 10^{-15}$  с) виникнення при додатку електричного поля. Іонна поляризація, що представляє собою зсув іонів, що утворюють гетерополярну (іонну) молекулу, при додатку електричного поля виникає за більший час – порядку  $10^{-12} \dots 10^{-13}$  с. Дані види поляризації ставляться в деформаційним, обумовленим взаємним зсувом (але не поворотом) зарядів у напрямку прикладеного поля. Температура на це явище практично не впливає.

Дипольна (ориентационная) поляризація являє собою орієнтацію молекул полярного діелектрика в напрямку прикладеного поля, ті впорядкована орієнтація молекул, що роблять хаотичні (теплові) флуктуаційні рухи. Час виникнення дипольної поляризації, що залежить від розмірів молекули й в'язкості речовини, може мінятися в надзвичайно широких межах – від  $10^{-14}$  до  $10^{-4}$  с.

Явища, аналогічні дипольної поляризації мають місце й при іншому виді іонної поляризації - макроструктурної, що спостерігається в щелочно-галлоїдних кристалах і кристалах ряду речовин з високою діелектричною проникністю. Фізиків цього явища можна представити за допомогою моделі псевдодиполя, коли утворюючі його іони зміщуються на відстані порядку молекулярних.

Характерна риса дипольної поляризації (на відміну від деформаційної) – обумовлене релаксацією молекул перетворення енергії електромагнітного поля в теплову.

Частотна залежність  $\epsilon'$  і  $\epsilon''$  для розглянутих видів поляризації представлена на рис. 1.1. Максимуми коефіцієнта втрат спостерігаються на частотах релаксації та резонансних частотах (для електронної та іонної поляризації). Оскільки для обробки речовин, що піддаються впливу електромагнітного поля (ЕМП), важливою характеристикою є глибина проникнення ЕМП, то для них становлять інтерес довжини хвиль не коротше сантиметрових.

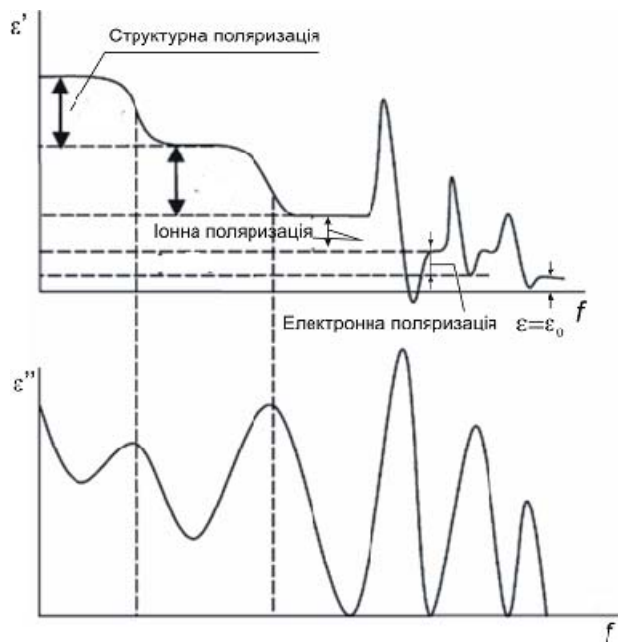


Рисунок 1.1 – Частотна залежність значень  $\varepsilon'$  і  $\varepsilon''$

Внесок різних видів поляризації в процес, що відбуваються в процеси, що відбуваються при дії ЕМП на речовину, досить різний. Наприклад, у дипольних молекул органічних речовин основний внесок становить іонна поляризація, значно менший - іонна; в іонних кристалів орієнтаційна поляризація відсутня.

Частотна залежність  $\varepsilon'$  і  $\varepsilon''$  для різних речовин різна. Так неполярні діелектрики мають досить малі втрати й досить слабку їхню залежність від частоти, але навіть невелика добавка полярної речовини до неполярного може викликати сильно виражену дисперсію в такої суміші. Аналогічно, введення помесей у полярну речовину може істотно змінити його діелектричні властивості. Настільки ж істотним є вплив на діелектрик і температури.

При наявності дипольної поляризації залежність діелектричної проникності від частоти описується формулами Дебая

$$\varepsilon' = \varepsilon(\infty) + \frac{\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2},$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty))\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2},$$

де  $\varepsilon(0)$  – діелектрична проникність при  $\omega = 0$ ,  $\varepsilon(\infty)$  – при  $\omega \rightarrow \infty$ ,  $\tau$  – час дипольної релаксації.

Резонансна поляризація являє собою пружно-іонну або пружну-дипольну й спостерігається на частотах ЕМП, що лежать поблизу частот власних коливань іонів або дипольних молекул. Така поляризація та пов'язані з нею резонансні втрати спостерігаються в ІЧ-діапазоні  $f = (3,95 \dots 750) \cdot 10^5$  ГГц.

Важливою параметром для обробки різних речовин ЕМП є глибина проникнення електромагнітного поля в речовину.

При наявності границі розділу вакуум-діелектрик із втратами електромагнітне поле проникає в середовище на глибину  $\Delta$ ,

$$\Delta = \frac{\tilde{n}}{\pi f \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}}.$$

де  $c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла.

У поверхневому шарі тече основна частина струму НВЧ, що супроводжує ЕМП. На глибині  $\Delta$  від поверхні середовища енергія ЕМП зменшується в  $e=2,718$  разів. Величина  $\Delta$  зменшується з ростом частоти  $f$ , дійсної частини  $\varepsilon'$  діелектричної проникності й втрат, обумовлених  $\operatorname{tg} \delta$ .

За рахунок релаксационних процесів, пов'язаних з поляризацією діелектриків (в основному орієнтаційної), відбувається перехід енергії ЕМП, що діє на дану речовину, у теплову енергію. При цьому для забезпечення рівномірності впливу поля речовина повинна бути ізотропною.

Питома потужність  $P_{\text{уд}}$ , що розсіюється в матеріалі, визначається формулою

$$P_{\text{уд}} = 5,56 \lambda \cdot 10^{-6} E^2 f \varepsilon' \operatorname{tg} \delta, \text{ кВт/м}^3, \quad (1.1)$$

де  $E$  - напруженість електричного поля, В/м;  $f$  - частота ЕМП, Гц.

З виразу (1.1) слідує, що потужність розсіювання в продукті прямо пропорційна квадрату напруженості поля  $E$ , частоті струму  $f$  і добутку  $\varepsilon' \operatorname{tg} \delta$ , що являє собою фактор втрат

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \quad (1.2)$$

Діелектрична проникність визначається речовиною, яка піддається впливу ЕМП, а збільшення напруженості поля  $E$  обмежується пробоем.

Теоретично рівномірне діелектричне нагрівання буде спостерігатися при однаковій напруженості поля на всіх ділянках продукту за умови повної його

однорідності, а також при відсутності втрат теплоти в навколишнє середовище. У дійсності продукт представляє гетерогенне середовище з нерівномірно розподіленими електричними властивостями, внаслідок чого тепловий ефект на різних її ділянках буде неоднаковим.

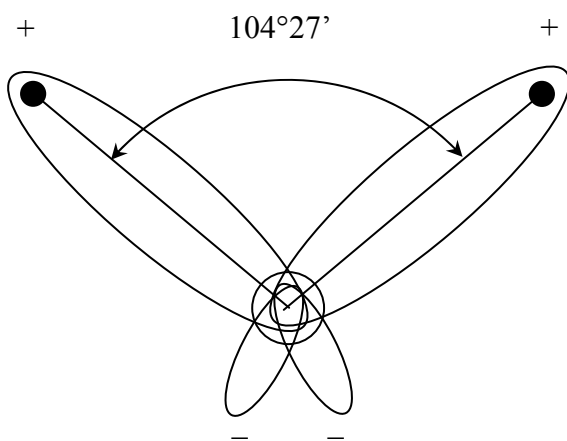
### Вода в електромагнітному полі

В багатьох технологічних процесах, що при обробці використовують опромінення електромагнітним полем, важливу роль відіграє вода, що міститься в оброблювальній речовині. Вода в речовині може бути у вільному виді, зв'язаному, абсорбованою поверхневою, міститися в клітинах біологічних об'єктів. В оброблюваній речовині може міститися від 50% до 99% води.

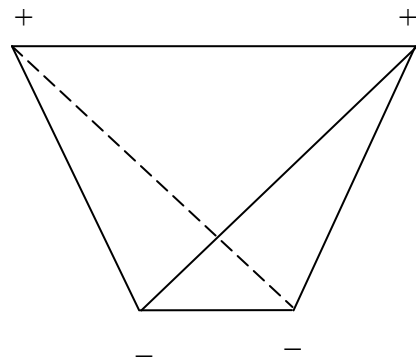
Для води дипольна поляризація відіграє головну роль. В біологічних об'єктах вода містить розчини солей і оболонки клітин поведуться подібно величезній поляризованій молекулі. Для такої структурної поляризації час релаксації при іонному характері мікрровключень із клітку становить  $10^{-8} \dots 10^{-3}$  с.

На рис. 1.2 схематично зображена будова молекули води. Молекула має 10 електронів (5 пар), одна пара електронів розположена поблизу ядра кисню, дві дві пари зовнішніх електронів попарно між кожним протоном і ядром кисню, дві пари – неподільні й направлені в протилежну від протонів сторону. Таким чином, в молекулі води існує чотири полюси заряду.

Електричний момент диполя  $6,2 \times 10^{-32}$  Кл·м.



а



б

Рисунок 1.2 – Будова молекули води:

а – структура електронних орбіт молекули; б – розположення полюсів заряду

Молекула води має некомпенсований магнітний момент і відноситься до діаманетиків. При відсутності магнітного поля вектори магнітних моментів направлені хаотично і сумарне магнітне поле відсутнє.

Діелектрична проникність води вона велика, для статичних електричних полів вона дорівнює 81, у той час як для більшості інших речовин вона не перевищує значення 10. Діелектрична проникність води зменшується не тільки в змінних в часі полях, але також і в просторово змінних полях, тобто вода є нелокально поляризованим середовищем.

Велике значення діелектричної проникності води пов'язане з тим, що вода сильно полярна рідина й має м'якою орієнтаційну ступінь свободи (тобто обертання молекулярних диполів). Під дією електричного поля диполі почнуть переорієнтуватися так, щоб послабити прикладене поле. Така картина спостерігається у будь-якій іншій полярній рідині, але вода завдяки великому значенню дипольного моменту молекул  $H_2O$  здатна дуже сильно (в 80 разів) послабити зовнішнє поле..

У змінних електричних полях діелектрична проникність води зменшується з ростом частоти прикладеного поля. В табл. В якості прикладу приведені діелектричні властивості води при різних частотах поля [22].

Таблиця 1.1 – Діелектричні властивості води при різних частотах

|    | $f$ , Гц         | $\epsilon^*$ | $tg\delta$ |
|----|------------------|--------------|------------|
| 3  | $3 \cdot 10^9$   | 79           | 0,3        |
|    | $9,5 \cdot 10^9$ | 30           | 0,9        |
|    | $24 \cdot 10^9$  | 27           | 1,0        |
| 10 | $3 \cdot 10^9$   | 79           | 0,23       |
|    | $9,5 \cdot 10^9$ | 36           | 0,60       |
| 20 | $1 \cdot 10^6$   | 80           | ....       |
|    | $1 \cdot 10$     | 80           | 0,065      |
|    | $3 \cdot 10^9$   | 78           | 0,17       |

|    |                  |    |      |
|----|------------------|----|------|
|    | $10 \cdot 10^9$  | 64 | 0,47 |
|    | $19 \cdot 10^9$  | 44 | 0,85 |
|    | $24 \cdot 10^9$  | 35 | 1,0  |
| 40 | $3 \cdot 10^9$   | 74 | 0,09 |
|    | $9,5 \cdot 10^9$ | 48 | 0,36 |
|    | $2 \cdot 10^9$   | 51 | 0,62 |
| 60 | $3 \cdot 10^9$   | 68 | 0,06 |
| 80 | $3 \cdot 10^9$   | 60 | 0,05 |

Така залежність пояснюється тим, що вода структурована речовина, окремі молекули пов'язані друг з другом водневими зв'язками й ці зв'язки обмежують індивідуальні рухи молекули  $H_2O$ . У змінних електричних полях молекулярні диполі прагнуть відстежити змінне поле. При невеликих частотах це відбувається. Проте, при збільшенні частоти переорієнтація утруднюється і зрештою диполі взагалі перестають реагувати на зовнішнє поле. Діелектрична проникність тепер визначається лише швидким атомно-молекулярним механізмом перерозподілу електричного заряду, що властиво усім речовинам.

- **Дослідження населеностей магнітних енергетичних рівнів води з врахуванням протолітичної дисоціації**

Населеності магнітних енергетичних рівнів характеризують здатності води, що перебуває у умовах магнітного поля, випромінювати та поглинати кванти енергії [24].

Ці здатності води обумовлені резонансними властивостями ядер атомів водню води, що входять до складу її молекул. Для ядер атомів водню (протонів) характерні особливого роду внутрішній рух – обертання навколо своєї осі, і особливі взаємодії [25].

Протони води прагнуть направляти свої магнітні моменти паралельно магнітному полю. При цьому відбувається зеєманівський розподіл протонів по двом геомагнітним енергетичним рівням: верхньому й нижньому. Протони, що перебувають на верхньому рівні орієнтовані проти поля, а, що перебувають на нижньому рівні – по полю.

Між верхнім і нижнім енергетичними рівнями відбуваються спонтанні квантові магнітні переходи. При цьому протони шляхом вільної прецесії міняють орієнтацію своїх магнітних моментів, збуджуючи в навколишньому просторі змінний магнітний потік [26].

Методом дослідження цих процесів є ядерний магнітний резонанс (ЯМР). При цьому розглядається [27] автономна система парамагнітних часток (протонів), яка при термодинамічній рівновазі приймає температуру молекулярної решітки води й підкоряється статистиці теплового руху молекул.

Через тепловий рух молекул води, перебуваючі у них протони постійно міняють орієнтацію. Між орієнтацією, наві'язаної геомагнітним полем, і дезорієнтацією, спричиненої тепловим рухом, установлюється рівновага, яка традиційно описується рівнянням Больцмана [27]

$$N(m) = A \cdot \exp [-W(m) / kT], \quad (1.3)$$

де  $A$  – константа розподілу;  $N(m)$  – число протонів на рівні  $m$ ;  $W(m)$  – магнітна енергія рівня  $m$ ;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана;  $T$  – температура води, К°.

У стані рівноваги число протонів на кожному енергетичному рівні статистично постійно. Від того, на якому енергетичному рівні перебувають протони, залежить їхня здатність випускати або поглинати енергію. Так, протони, що перебувають на верхньому енергетичному рівні, мають надлишок енергії, і тому їх кількість визначає випромінювальну здатність води. Кількість протонів, що перебувають на нижньому енергетичному рівні, визначає здатність води поглинати магнітну енергію.

Для природніх умов гідросфери й геомагнітного поля  $kt \gg \Delta W$ , і

$$N(m_1) = N/2 (1 + \Delta W/2kT) \quad (1.4)$$

$$N(m_2) = N/2 (1 - \Delta W/2kT) \quad (1.5)$$

При цьому больцманівська рівновага характеризується надлишком населеності нижнього енергетичного рівня, який визначається як різниця

$$P = N(m_1) - N(m_2) = N\Delta W/2kT = N\gamma\hbar b/4\pi kT, \quad (1.6)$$

де  $N = N(m_1) + N(m_2)$  – число протонів у зразку води;  $\Delta W = \gamma \hbar b / 2\pi$  – різниця енергій магнітних енергетичних рівнів;  $\hbar = 6,62606957 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постійна Планка;  $\gamma = 42,577469$  МГц  $\times$  Тл $^{-1}$   $2,675 \cdot 10^4$  с $^{-1}$ Тл $^{-1}$  · – гіромагнітне відношення для протона;  $B = 0,5 \cdot 10^{-4}$  Тл – індукція геомагнітного поля.

Величину  $P$  також називають магнітною поляризацією, яка характеризує ядерну намагніченість зразка [28].

Дослідження системи протонів, при яких ураховується тільки вплив температури молекулярної решітки, є спрощеними. При цьому не враховується, що система протонів і молекулярна решітка мають подібні чисельність, структуру, в'язкість, параметри іонізації, електропровідності та інше.

Мета дослідження полягає в тому, щоб уточнити показники больцмановського магнітної рівноваги для випадку протолитической дисоціації у воді.

Протолитическая дисоціація – це розпади молекул води на іони водню  $H^+$  і гідроксилу  $OH^-$ , що відбуваються внаслідок розривів атомних і водневих зв'язків. Енергія, затрачувана на один такий розпад, характеризує міцність зв'язку й називається енергією дисоціації. Енергія протолитической дисоціації води становить 5,12 еВ. Міцність водневих зв'язків становить 0,4 ... 1,2 еВ.

Дисоціація відбувається при зіткненнях молекул, електронних ударах, під впливом фотонів, що мають достатню енергією. Процес дисоціації є оборотним, тобто частини, що розпався молекули й водневі зв'язки води знову поєднуються. При цьому випромінюються кванти електромагнітної енергії ультрафіолетового та інфрачервоного діапазонів хвиль. Ці випромінювання мають високу просторову роздільну здатність і великою енергією в порівнянні з магнітною енергією протонів. Оскільки випромінювання цих квантів відбуваються усередині об'єму води, те кожне відновлення молекул і міжмолекулярних зв'язків супроводжується квантовим переходом і інверсією орієнтації мінімум одного протона. При цьому якщо квант енергії попадає в протон нижнього енергетичного рівня, останній переходить на верхній рівень і навпаки.

Таким чином, вплив протолитической дисоціації на показники больцмановского магнітної рівноваги можна врахувати, виключивши з аналізу число протонів  $N_{\text{дис}}$ , рівне числу диссоциированных молекул, і розподіливши їх інверсний вплив пропорційно населеностям магнітних енергетичних рівнів.

З урахуванням вищесказаного населеності магнітних енергетичних рівнів води можна визначити в такий спосіб:

$$\text{верхнього } R(m_2) = N/2 - N/2 \cdot \gamma \hbar B / 4\pi kT - N_{\text{дис}}/2 + N_{\text{дис}} \gamma \hbar B / 4\pi kT, \quad (1.7)$$

$$\text{нижнього } R(m_1) = N/2 + N/2 \cdot \gamma \hbar B / 4\pi kT - N_{\text{дис}}/2 + N_{\text{дис}} \gamma \hbar B / 4\pi kT \quad (1.8)$$

Різниця населеностей енергетичних рівнів при цьому рівняється:

$$\Delta R = R(m_1) - R(m_2) = P(1 - \alpha), \quad (1.9)$$

де  $N_{\text{дис}}$  – число диссоциированных молекул;  $\alpha = N_{\text{дис}}/N$  – ступінь дисоціації води.

Для чистої води при  $t = 22^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-9}$ .

Існування протолітичної дисоціації приводить до зменшення населеностей енергетичних рівнів і зниженню ядерної намагніченості води. При  $\alpha = 0$ , тобто при відсутності дисоціації в зразку води вірними залишаються вирази (1.4), (1.5) і (1.6).

Залежно від чистоти й температури вплив дисоціації на ядерні магнітні властивості води змінюються, оскільки змінюються ступінь дисоціації й концентрація водневих іонів. Отже, різні типи води – дистильована, дощова, звязана, внутрішньоклітинна та інше мають різні населеності магнітних енергетичних рівнів і різні здатності випромінювати й поглинати магнітну енергію.

Температурні залежності ступеня дисоціації та концентрації іонів носять експонентний характер

$$\alpha = \alpha_o \exp(-W_{\text{дис}}/kT), \quad (1.10)$$

$$N_{\text{дис}} = N_o \exp(-W_{\text{дис}}/kT), \quad (1.11)$$

де  $W_{\text{дис}}$  – енергія дисоціації води.

Оскільки  $W_{\text{дис}} \gg \Delta W$ , ці залежності мають більшу крутизну, ніж температурні залежності населеностей магнітних енергетичних рівнів, описаних виразом (1.3).

Отже, показники (1.7), (1.8), (1.9) мають більшу температурну чутливість, ніж показники (1.4), (1.5) і (1.6).

Оцінимо порядок величин, що входять у вираження (1.7) і (1.8) для умов чистої води, що перебуває в геомагнітнім полі з  $B = 0,5$  Гс, при температурі  $t = 22^\circ\text{C}$ .

Тому що в 1 літрі води втримується 55,5 моль  $\text{H}_2\text{O}$ , те величина  $N/2=27,75$  моль/л. Ця величина відповідає рівності населеностей верхнього й нижнього магнітних енергетичних рівнів для вырожденного випадку – відсутності геомагнітного поля.

Другий доданок характеризує зеемановський механізм формування населеностей. Його величина визначається індукцією геомагнітного поля й рівняється  $4,7 \cdot 10^{-9}$  моль/л.

Третій доданок характеризує диссоціонний механізм формування населеностей. Його величина рівняється  $4,99 \cdot 10^{-8}$  моль/л.

Четвертий доданок рівняється  $2,35 \cdot 10^{-16}$  моль/л.

Як видно, невироджені ядерні магнітні властивості води визначаються другим і третім доданками. Зееманівський і дисоційний механізми формування населеностей магнітних енергетичних рівнів мають близькі порядки величин.

При  $N_{\text{дис}} > P$  (1.12) дисоційний механізм маскує зееманівський подібно аддитивному шуму, утрудняючи експерименти з ЯМР в умовах геомагнітного поля. Тому при дослідженнях ЯМР в установках використовують динамічне орієнтування ядер електронами або збільшують індукцію магнітного поля на 4 ... 6 порядків і, як правило, не ведуть досліджень в умовах геомагнітного поля [28].

Так, як

$$N_{\text{аен}} = 10^{-pH} \quad (1.13)$$

вирази (1.7) і (1.8) можна записати в акому вигляді:

$$R(m_2) = \frac{1}{2}(N - P \cdot 10^{-pH} + \alpha P) \quad (1.14)$$

$$R(m_1) = \frac{1}{2}(N - P \cdot 10^{-pH} - \alpha P) \quad (1.15)$$

де  $pH$  – водневий показник води.

Отримані вирази показують залежність населеностей геомагнітних енергетичних рівнів води від її водневого показника  $pH$ . Умова маскування зеєманівського механізму дисоційним у цьому випадку можна записати в такому вигляді

$$pH < -\log P. \quad (1.16)$$

На підставі (1.14) і (1.15) можна стверджувати, що при розчиненні у воді кислоти відбувається зменшення населеностей магнітних енергетичних рівнів за рахунок дисоційного механізму. При розчиненні у воді лугу – вони збільшуються й досягають зеєманівського значення.

Відмітимо, що водневий показник води  $pH$  може змінюватися в межах чотирнадцяти порядків, але магнітні властивості води відчутно змінюються при  $pH < 8$ .

Згідно з (1.14) і (1.15) існує магнітна больцманівська рівновага води з врахуванням протолітичної дисоціації. Наявність рівноваги припускає й можливість її порушення збуренням одного або декількох взаємно зв'язаних параметрів води. З наведених міркувань видно, що такими взаємно зв'язаними параметрами є:  $B$ ,  $T$ ,  $\alpha$ ,  $ph$ ,  $R(m_1)$ ,  $R(m_2)$ ,  $P$ .

Ми показали вплив змін ступені дисоціації й водневого показника води на населеності її геомагнітних рівнів при фіксованій температурі й індукції магнітного поля. Інтерес також представляє й дослідження зворотного впливу збурювань населеностей на показники дисоціації.

### **Кавітаційне збудження магнітних резонансів у рідких середовищах**

Для розв'язку різних технічних завдань знаходять широке застосування протонна, електронна та акустична різновиди магнітного резонансу. Магнітний резонанс це вибіркове поглинання енергії електромагнітних або акустичних

хвиль певної частоти в речовині, що перебуває в магнітнім полі. Магнітний резонанс обумовлений ротацією протонів і електронів речовини навколо своєї осі й наявністю в них механічного спіну й магнітного моменту, що утворюють спінову систему. Збудження магнітного резонансу є не що інше, як розхитування цієї спінової системи для вирішення певних завдань. При використанні електромагнітних хвиль розхитування відбувається за рахунок магнітного впливу на магнітні моменти протонів або електронів, а при використанні акустичних хвиль – за рахунок спин-фононного впливу на їхні спіни.

Для збудження магнітного резонансу в зразку рідини останній повинен бути поміщений у поздовжнє постійне магнітне поле й поперечне змінне магнітне або акустичне поле. При впливі цих ортогональних полів протони й електрони прецесують зі своїми гіромагнітними частотами. Напруженість постійного магнітного поля визначає ці гіромагнітні частоти. Для збудження відповідного магнітного резонансу частота змінного поля повинна збігатися з власною гіромагнітною. При цьому відбувається резонансний зєсманівський розподіл часток по напрямках (по полю або проти поля) і по відповідних магнітних енергетичних рівнях (верхньому або нижньому). Квантові переходи протонів або електронів з верхнього рівня на нижній супроводжуються випромінюванням що свідчить про настання відповідного магнітного резонансу. Ці випромінювання мають магнітну природу в близькій зоні й електромагнітну - у дальній і можуть бути дистанційно виявлені спеціальними приймачами [30].

В багатьох випадках в якості поздовжнього постійного магнітного поля використовується природне геомагнітне поле (ГМП). Збудження змінного поля здійснюється індукційними або акустичними перетворювачами, на які подаються електричні сигнали резонансної частоти. Частота відповідного магнітного резонансу визначається напруженістю ГМП. Для природніх умов геомагнітного поля діапазон резонансних частот протонів розташований в області наддовгих хвиль, а електронів – в області середніх хвиль.

### • **Кавітаційне збудження магнітного резонансу**

Кавітація це утворення всередині рідини порожнин (кавітаційних бульбашок, або каверн), заповнених газом, парою або їх сумішшю. Колапс кавітаційних бульбашок супроводжується потужним акустичним випромінюванням. Тому в кавітаційній області рідина зазнає інтенсивного впливу, що проявляється в її нагрівання, деструкції їх кластерів і молекул, диспергуванні твердих тіл та ерозії їх поверхонь. Змінюючи умови протікання кавітації, можна підсилювати або послабляти різні кавітаційні ефекти. Тому, кавітація знаходить все ширше застосування в різних технологіях.

Очевидно, що в проблемі кавітації важливе місце займає виникнення акустичного магнітного резонансу. Якщо ступінь розвитку кавітації така, що у випадкові моменти часу виникає й тріскається безліч бульбашок, то викликане ними акустичне випромінювання проявляється у вигляді шуму із суцільним спектром. На практиці час колапсу кавітаційних бульбашок може становити від одиниць мілісекунд до десятих часток мікросекунди, відповідно й ширина спектру кавітаційного шуму може становити від кілогерц до мегагерц. На тлі суцільного спектру кавітаційного шуму спостерігається несуча частота, близька субгармоніка й гармоніки, що відображають частотний спектр поля, що викликає кавітацію.

Результати експериментів по реєстрації роторних випромінювань води, збуджених ультразвуковою кавітацією, наведені в роботі [31]. Показано, що при випромінюванні ультразвукового поля на частотах 1,5 – 1,7 МГц, виявлені електромагнітні випромінювання води на частоті 800 кГц. Проведений аналіз показав, що ця частота відповідає області близької субгармоніки акустичного перетворювача, призначеного для збудження ультразвукової кавітації, і гіромагнітній частоті електронів, що перебувають у геомагнітному полі, ослабленому залізобетонним приміщенням приблизно у два рази.

Отримані результати свідчать про те, що випромінювання може бути використане для індикації ультразвуку й кавітації, визначення порога кавітації

та параметрів кавітаційних бульбашок, непрямого вимірюванню напруженості магнітного поля в рідині.

### • **Кавітаційна магнітна предисоціація рідини**

Зараз існують дві основні концепції, що пояснюють процеси, що відбуваються в області кавітації – електрична й теплова [1]. В електричній концепції передбачається, що в кавітації основну роль відіграють механізми, пов'язані з виникненням електричних мікророзрядів. У тепловій концепції передбачається, що деструкція молекул відбувається як наслідок виникнення в при колапсі кавітаційних бульбашок високих температур, що створюють енергію зіткнень молекул, достатню для їхньої іонізації.

Предисоціація це підготовка молекул рідини до дисоціації шляхом ослаблення їх ковалентних і водневих зв'язків за рахунок порушення прецесії магнітних моментів протонів і електронів атомів при магнітному резонансі. Підготовлені молекули потім спонтанно дисоціюють при зіткненнях. У результаті магнітної предисоціації відбувається збільшення ступеня дисоціації речовини при незмінних температурі й тиску. Як показано в роботі [30], при магнітному резонансі у воді можуть з'являтися продукти гетеролітичної предисоціації у вигляді іонів  $H^+$  і  $OH^-$  і продукти гомолітичної предисоціації у вигляді радикалів  $H$  и  $OH$ . Настання магнітної предисоціації води виявляється, наприклад, побічно по зміні її водневого показника.

У роботі [1] наведені результати досліджень кавітуючої води методом спінових уловлювачів, які безпосередньо довели наявність у продуктах її розщеплення радикалів  $H$  и  $OH$ , а також продуктів їх рекомбінації у вигляді перекису водню  $H_2O_2$  і кислот: азотистої  $HNO_2$  і азотної  $HNO_3$ . Ці результати підтверджують припущення щодо кавітаційного збудження магнітного електронного резонансу та магнітної предисоціації води. Оскільки вони свідчать про дисоціацію молекулярних зв'язків води міцністю 9,16 еВ, те можна припустити що до існування кавітаційної предисоціації молекул інших рідин, що мають меншу міцність. Приміром, у біологічних об'єктах необхідно враховувати можливість дисоціації молекул води по гомолітичному типу при енергії 4,93 еВ і

деструкції C–C зв'язків біомакромолекул при енергії 3,6 еВ. Оскільки відзначені продукти деструкції молекул можуть впливати на живі тканини, досить актуальний і вимагає вивчення питання про безпечні дози й інтенсивності резонансного впливу кавітації.

Таким чином, явище кавітаційного збудження магнітного резонансу становить інтерес із енергетичної точки зору, тому що при цьому вдається викликати або запобігти деструкції молекул рідини. Наприклад, в обладнаннях теплотехніки, у яких досягнення необхідного ступеня дисоціації здійснюється за рахунок витрати первинно подводимой енергії, правильно організована кавітація дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії або показники вартість–ефективність.

#### • **Типи магнітних резонансів у рідині**

Комплексна магнітна резонансна обробка робочого середовища передбачає одночасне збудження кількох типів магнітних резонансів:

- протонного магнітоакустичного;
- електронного магнітоакустичного;
- магнітогідродинамічного;
- інші типи магнітного резонансу.

Магнітні резонанси збуджуються за допомогою електромагнітних і акустичних полів. При використанні електромагнітних полів збудження відбувається за рахунок магнітного впливу на магнітні моменти протонів або електронів, а при використанні акустичних полів – за рахунок спін-фононного впливу на їхні спіни. При цьому електромагнітні й акустичні поля відповідно мають однакові частоти.

#### **Електронний магнітоакустический резонанс**

Електронний магнітоакустический резонанс (ЭМАР) це збудження прецесії некомпенсованих магнітних моментів електронів у парамагнітних речовинах, що перебувають у постійному магнітном полі. Для збудження резонансу можуть використовуватись електромагнітні або (і) акустичні коливання. При резонансі відбувається виборкове поглинання енергії коливань

електронної гіромагнітної частоти, значення якої визначається напруженістю постійного магнітного поля та гіромагнітним відношенням електрону. В однакових магнітних полях частота електронного магнітоакустичного резонансу приблизно на три порядки вище протонного. Залежно від типу коливань, що збуджують електронний магнітоакустичний резонанс, ще називають електронним парамагнітним резонансом (ЕПР) або акустичним парамагнітним резонансом (АПР). Передача енергії електромагнітних коливань парамагнітним часткам при ЕПР відбувається безпосередньо, у той час як передача акустичної енергії при АПР відбувається за допомогою спінів – фононної взаємодії, тобто в результаті взаємодії магнітних моментів парамагнітних іонів з коливаннями навколишніх атомів та іонів решітки. Залежно від природи парамагнетика й внутрішніх магнітних і електричних полів ширина й форма резонансної характеристики робочого середовища можуть змінюватися. Можливі також відмінності резонансних характеристик ЕПР і АПР.

### **Протонний магнітоакустичний резонанс**

Протонний магнітоакустический резонанс (ПМАР) це збудження прецесії некомпенсованих магнітних моментів протонів у парамагнітних речовинах, що перебувають у постійном магнітному полі. Коливання, що збуджують резонанс, можуть бути магнітними або (і) акустичними. При резонансі відбувається виборкове поглинання енергії коливань протонної гіромагнітної частоти, значення якої визначається напруженістю постійного магнітного поля й гіромагнітним відношенням протона. Залежно від типу коливань, що збуджують протонний магнітоакустический резонанс, ще називають ядерним магнітним резонансом (ЯМР) або акустичним ядерним магнітним резонансом (АЯМР).

Залежно від природи парамагнетика і внутрішніх магнітних і електричних полів ширина й форма резонансної характеристики робочого середовища можуть змінюватися. Можливі також відмінності резонансних характеристик ЯМР і АЯМР.

Для природніх умов геомагнітного поля Землі міста Харкова магнітний резонанс протонів розташований в області звукових частот. Для його збудження можуть бути використані магнітні соленоїди або акустичні перетворювачі, на які подаються електричні сигнали резонансної частоти.

### **Магнітогідродинамічний резонанс**

Магнітогідродинамічний резонанс (МГД) резонанс обумовлений наявністю в твердих частках і кластерів робочого середовища електричних зарядів. При русі заряджених часток у магнітнім полі за рахунок появи сили Лоренца, що змінює їхню траєкторію, створюються передумови для руйнування іонних і механічних кластерів рідини.

Для порушення МГД резонансу в зразку рідини останній повинен бути поміщений у проточний резонатор, що містить поздовжнє постійне магнітне поле. При цьому рідина повинна протікати через МГД резонатор. Резонансна частота в цьому випадку визначається напруженістю магнітного поля, швидкістю й масою рідини.

### **Резонансна магнітоакустична обробка рідкої дисперсійної фази робочого середовища**

- **Резонансна магнітоакустическая обробка відходів нафтопереробки**

До складу дисперсійної фази робочого середовища можуть входити відпрацьовані масла, нафтошлами та інші відходи нафтопереробки, що є різновидом термостабільного високомолекулярної вуглеводневої сировини. Така вуглеводнева сировина відноситься до «неньютоновських» рідин. Такі рідини характеризуються структурою, що виникає внаслідок сплутування углеводородных ланцюгів і утворення механічних кластерів. Вони характеризуються більше фізичними силами зв'язку, чому ковалентними.

Це частіше можуть бути сили злипання, спікання або спайок. Тому традиційно для переробки углеводородного сировини використовуються в першу чергу методи, спрямовані на руйнування механічних кластерів. Практично ці методи зводяться до термолізу молекул та їх агрегатів у

проточних системах сублімації або гідродинамічних машинах. Основне завдання в удосконаленні термолізу полягає в збільшенні конверсії термостабільних високомолекулярних вуглеводнів у низькомолекулярні бензино-дизельні фракції з можливістю мінімізації виходу висококонденсованих залишкових продуктів.

У якості вторинних процесів, що дозволяють значно підвищувати глибину переробки нафти, на американських і західноєвропейських заводах віддають перевагу не дорогим процесам уповільненого коксування нафтових залишків і висбрекінг мазутов і гудронів, а також значно більш дорогі процеси каталітичного крекінгу й гідрокрекінгу вакуумних газойлей і мазутів.

Останнім часом розробляються методи засновані на використанні кавітаційно-акустичного термолізу, реалізованого на основі крекінгу й кавітаційно-акустичного впливу на мікрогідродинаміку рідких реакційних середовищ. Використання кавітації дозволяє знизити температуру й тиск крекінгу, а також уникнути небажаного закоксовуванню устаткування.

У цьому розділі аналізується можливість використання гідродинамічної машини для здійснення механічної та кавітаційно-акустичної переробки рідких сумішей.

Як було показано вище, ефективність кавітаційного впливу може бути підвищена, якщо при його організації враховуються магніторезонансні властивості кавітації та робочого середовища. Тому для поглиблення кавітаційних процесів гідродинамічна машина охоплена активним зворотним зв'язком через резонансний магнітоакустический реактор.

Об'єктами впливу при цьому є ковалентні СС і СН зв'язки високомолекулярних вуглеводнів і водневі зв'язки між ними й молекулами води. Для розв'язку зазначених завдань у резонансному магнітоакустическом реакторі збуджується магнітна предисоціація робочого середовища. При збудженні електронного резонансу відбувається ослаблення ковалентних зв'язків, що сприяє деструкції як високомолекулярних, так і

низькомолекулярних вуглеводнів. При порушенні протонного резонансу послабляються водневі зв'язки [32].

Як було показано вище, організація предисоціації в реакторі забезпечує можливість дисоціації молекул води по гетеролитическому типу при енергії 9,16 еВ. Це свідчить також і про можливість деструкції СС і СН зв'язків макромолекул, що мають енергії розриву відповідно:

- проста С-С зв'язок – 3,6 еВ;
- подвійна  $C = C$  зв'язок – 6,2 еВ;
- потрійна  $C \equiv C$  зв'язок – 8,1 еВ;
- простий С – Н зв'язок – 4,3 еВ.

#### • **Резонансна магнітоакустична обробка твердої дисперсної фази робочого середовища**

Механічні подрібнювачі твердої дисперсної фази в рідкому середовищі подрібнюють їх до десятих часток міліметра. Це часто недостатньо. Додаткове подрібнення твердої дисперсної фази може бути досягнуте за рахунок ультразвукової кавітації в резонансному магнітоакустичному реакторі.

Є дані, що при перевищенні порога виникнення кавітації під дією ультразвуку відбувається розщеплення високомолекулярних сполук, наприклад, крохмалю, нуклеиновых кислот, білкових речовин та інше. При цьому має місце пропорційність між інтенсивністю ультразвуку й руйнуючим ефектом.

Тонке роздрібнення твердих речовин і перехід у дисперсний стан з утвором гелю називається диспергуванням.

При ультразвуковому кавітаційному диспергуванню суспензії дисперсність продукту збільшується на кілька порядків у порівнянні з диспергуванням без застосування ультразвуку.

Середній розмір часток вихідного продукту може становити частки мікрометра. Здрібнювання твердої речовини відбувається під дією ударних хвиль, що виникають при колапсі кавітаційних бульбашок. Диспергування починається при інтенсивності ультразвуку, що перевищує порогу значення в

декілька Вт/см<sup>2</sup>. Величина порогу залежить від кавітаційної міцності рідини, стану поверхні твердої фази, а також від характеру й величини сил взаємодії між окремими частками твердої фази. Найбільше успішно ультразвукове диспергування відбувається при обробці аморфних і агрегованих речовин типу ґрунтів і гірських порід, при розщепленні матеріалів типу целюлози, азбесту, при дії на рослинні й тваринні клітини. Порівняно легко диспергується каолін, гіпс, слюда, сірка, графіт та інше.

Таким чином, для підвищення ефективності обробки рідкого середовища гідродинамічною машиною запропоновано використовувати резонансний магнітоакустичний реактор, що включається в ланцюг зворотного зв'язку турбулентно-кавітаційного модуля. При цьому в ланцюзі зворотного зв'язку робоче середовище піддається комплексному резонансному впливу змінних магнітних полів і акустичної кавітації в діапазонах звукових і ультразвукових частот. Зворотний зв'язок стає активною і вибірковою, що підвищує її ефективність і ефективність установки в цілому. Додатковий ефект може бути отриманий також за рахунок збудження магнітогідродинамічного резонансу під дією впливу на заряджені частки робочого середовища постійним магнітним полем.

Застосування резонансного магнітоакустичного реактора доцільне з енергетичної точки зору, тому що при цьому переробка макромолекул вуглеводнів і твердих часток відбувається при меншій витраті енергії. Правильно організована резонансна обробка дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії або показники ефективність-вартість турбулентно– кавітаційного модуля як за рахунок інтенсифікації процесів деструкції макромолекул і кластерів робочого середовища, так і за рахунок уповільнення процесів термополіконденсації залишкових продуктів. Це дозволяє досягнути, з однієї сторони перетворення високомолекулярних вуглеводнів палива у світлі нафтопродукти, а з іншого боку, одержати гранично концентровані відходи.

Експериментальні дослідження комбінованого впливу електромагнітного поля НВЧ діапазону на сільськогосподарські матеріали

Використання мікрохвильових технологій у промисловості, сільському господарстві, медицині визначається обставинами:

- здатність електромагнітних хвиль проникати вглиб матеріалів й впливати на весь його об'єм;
- відмінність діелектричної проникності різних матеріалів дозволяє здійснювати селективність нагрівання;
- можливість здійснення необхідного ступеня концентрації електромагнітної енергії в заданому об'ємі;
- наявність ряду специфічних біологічних ефектів, що не зводяться тільки до нагрівання об'єктів обробки. Ці ефекти дають основу для здійснення ряду процесів, що мають метою стимуляцію різних процесів життєдіяльності біологічних об'єктів і біохімічних виробничих процесів.

Проблема підвищення врожайності сільськогосподарських культур відноситься до ключових. У технологічному аспекті основні з них – підвищення лабораторної й польової схожості посівного насіння, прискорення вегетації рослин, підвищення їхньої стійкості до посухи, морозів, шкідників і патогенів, і, як наслідок – підвищення врожайності агрокультур.

Серед багатьох способів поліпшення якості посівного матеріалу є його передпосівна обробка різними методами. Практично застосовуються різні методи біостимуляції насіння: хімічні – із застосуванням хімічних препаратів (обробка в розчинах вітамінів, мікроелементів та фізіологічно-активних речовинах), біотичні (обробка продуктами життєдіяльності грибів, бактерій, виділеннями рослин), фізичні (опромінення лазерним, інфрачервоним, та ультрафіолетовим, гамма-випромінюванням, обробка електромагнітним полем і електричним полем, воднево-плазменна обробка та ін.),. Одним з перспективних напрямків є застосування мікрохвильової технології, коли більші економічні вигоди поєднуються зі значним екологічним ефектом.

Проведені в останні роки дослідження [33–35] дозволили зробити висновок: ефективність впливу мікрохвильової обробки на насіння залежить не тільки від режимів обробки й виду насінь, але також від біологічних особливостей сорту. Тому актуальними залишаються дослідження з визначення оптимальних режимів мікрохвильової обробки насінь різних сортів і видів.

Разом з Інститутом рослинництва ім. В.Я. Юр'єва УААН були проведені дослідження з метою дослідження комбінованого впливу на них ЕМП НВЧ діапазону та традиційних хімічних і біологічних засобів, а так само з метою визначення режимів обробки насінь зернових колосових культур (ярового ячменю сортів Аспект і Виклик, озимої пшениці сорту Астет).

### **Методика проведення досліджень**

Процес впливу електромагнітної енергії (ЕМЕ) НВЧ сантиметрового діапазону приводить до нагрівання насіння. Частина вологи, що виділяється при нагріванні, випаровується з поверхні насінь, що приводить до зменшення вологості з 14% до 9–7%. Зміна вологості й температури навколишнього повітря впливають на відсоток залишкової вологості й, відповідно, на ефект активізації схожості й інтенсивності проростання. Тому опромінення насінь проводили в закритих кришкою контейнерах, виготовлених зі спіненого полістиролу у вигляді прямокутного паралелепіпеда. Товщина стінок контейнера 15 мм, а кришки – 25 мм. Для виміру температури зерна після впливу ЕМЕ НВЧ у кришці виконаний отвір для установки хвостика термометра. Вимірювання температури дозволяє визначити енергії витрачену на нагрівання. Погрішність виміру обумовлена витратою частини енергії, що виділилася, на нагрівання корпусу й робочої рідини термометра. У всіх експериментах застосовувався генератор з діапазоном частот 2.5...3,4 ГГц, враховувалися температура й вологість насінь. Умови проведення експериментів забезпечували можливість регулювання рівня потужності ЕМЕ НВЧ, а також тривалість її впливу.

Вологість насіння складала 14%. Кожну наважку вагою 200 г почергово опромінювали ЕМП НВЧ у діапазоні частот 3,0 ГГц при витратах енергії 0,9 і

1,8кВт/1кг насіння. Через 7 днів (для зняття "шоку" дії екстремального факторів), зразки були оброблені препаратами й висіяні для визначення лабораторної схожості.

У якості хімічних і біохімічних засобів обробки насінь використовували такі препарати, що внесені до Переліку пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні:

- протруйник насіння Вітавакс 200 ФФ. Насіння зернових культур обробляли препаратом із рекомендованою фірмою нормою витрати 2,5-3,0 л в 10 л води на 1 тону;

- регулятори росту рослин: «Марс EL», „Радостим” – збалансована композиція регуляторів росту природного походження і синтетичних аналогів фітогормонів;

- Біопрепарати:

- „Альбіт” – містить очищену діючу з ґрунтових бактерій *Bacillus megaterium* і *Pseudomonas aureofaciens*. У природних умовах, дані бактерії мешкають на коріннях рослин, стимулюють їх ріст, захищають від хвороб і несприятливих умов зовнішнього середовища. До складу препарату входять речовини, що підсилюють ефект основної діючої речовини: збалансований стартовий набір макро- та мікроелементів. Альбіт не містить живих мікроорганізмів (а тільки діючі речовини з їх), що робить дію препарату більш стабільною, менш чутливою до впливу умов зовнішнього середовища.

Схожість визначали за методикою ДСТУ 4138-2002 [36].

## Результати досліджень

У попередніх дослідженнях (починаючи з 2009 р.) нами було виявлено ефект біостимуляції насіння мікрохвильовим електромагнітним надвисокочастотним полем (МХП НВЧ). Поряд з цим встановлено, що опромінювання з підвищеним режимом “доза - експозиція” призводить до пригнічення проростання насіння, або загибелі зародка. Причому інтенсивність пригнічення в різних сортів, а також партій насіння відбувалася по різному. На нашу думку в першу чергу гине насіння з ослабленою життєздатністю. Тому, щоб оздоровити ту чи іншу

партію насіння потрібно опромінювати його в такому режимі, який не викликає суттєвого зниження схожості й у подальшому зберігається ефект оздоровлення послідуєчих генерацій.

Передпосівна обробка насіння НВЧ опромінюванням збільшувала енергію проростання на 2-4 % та лабораторну схожість на 3-4 %, залежно від режиму опромінення. Додаткова обробка опроміненого насіння регулятором росту Марс EL сприяла подальшому їх збільшенню на 5-7 % та 5-6 % відповідно. Відмічено, що протруєння насіння Вітаваксом 200 ФФ сприяло збільшенню схожості насіння до 86 %, при 80 % на контролі, а згодом, при відлежуванні протруєного насіння протягом 19 діб схожість його зменшилась до 82 %, що зав'язано з негативним впливом протруйника на насіння при зберіганні (табл. 2.1).

**За результатами обліків, проведених в 2011 році можна стверджувати, що застосування визначених режимів опромінювання сприяє зниженню рівня поширеності та розвитку корневих гнилизн у посівах пшениці озимої.**

Так, передпосівна обробка насіння пшениці озимої сорту Астет МХП НВЧ та регулятором росту Марс EL забезпечила найменший рівень поширеності та розвитку корневих гнилизн перед збиранням – 8,2-12,5 % та 3,6-6,3 % відповідно, при 18,7 % та 9,4 % на контролі (рис. 1.3). Також низький рівень зазначених показників отримано за варіантом протруєння насіння Вітаваксом 200 ФФ - 9,7 % та 4,9 % відповідно.

Таблиця 1.2 – Енергія проростання та схожість насіння пшениці озимої сорту Астет після обробки НВЧ у різних режимах потужності та експозиції, 2011 р.

| № з/п | Варіант обробки насіння  | Енергія проростання, % |       |             |                | Схожість, %   |       |             |                |
|-------|--------------------------|------------------------|-------|-------------|----------------|---------------|-------|-------------|----------------|
|       |                          | дата закладки          |       | Середнє дні | ± до конт-ролю | дата закладки |       | Середнє дні | ± до конт-ролю |
|       |                          | 17.09                  | 05.10 |             |                | 17.09         | 05.10 |             |                |
| 1     | Контроль, без обробки    | 80                     | 82    | 81          |                | 80            | 84    | 82          |                |
| 2     | Вітавакс 200 ФФ, 2,5 л/т | 86                     | 80    | 83          | 2              | 86            | 82    | 84          | 2              |

|                   |                                               |     |    |    |   |     |    |    |   |
|-------------------|-----------------------------------------------|-----|----|----|---|-----|----|----|---|
| 3                 | НВЧ 1,8 кВТ/кг, 15 сек.                       | 82  | 84 | 83 | 2 | 83  | 86 | 85 | 3 |
| 4                 | НВЧ 1,8 кВТ/кг, 15 сек.<br>+ Марс EL, 0,2 л/т | 87  | 88 | 88 | 7 | 88  | 88 | 88 | 6 |
| 5                 | НВЧ 0,9 кВТ/кг, 45 сек.                       | 85  | 85 | 85 | 4 | 86  | 86 | 86 | 4 |
| 6                 | НВЧ 0,9 кВТ/кг, 45 сек.<br>+ Марс EL, 0,2 л/т | 86  | 85 | 86 | 5 | 86  | 87 | 87 | 5 |
| НІР <sub>05</sub> |                                               | 2,4 |    |    |   | 2,2 |    |    |   |

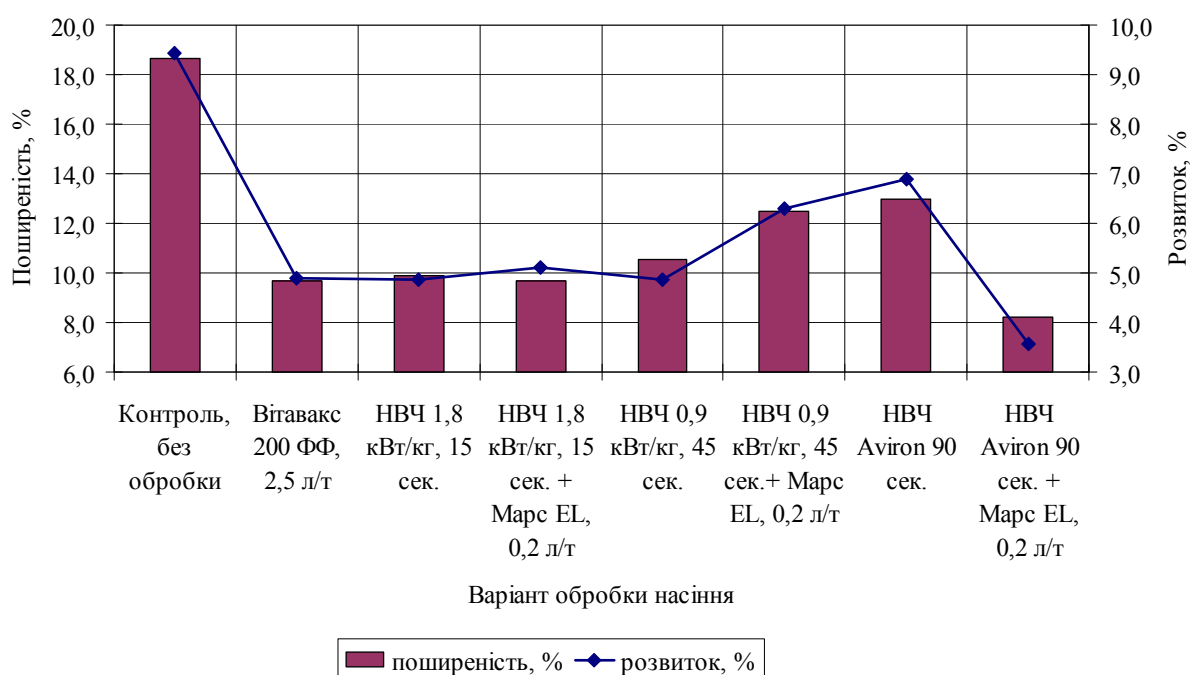


Рисунок 1.3 – Поширеність та розвиток збудників кореневих гнилизн на рослинах пшениці озимої у фазі повної стиглості залежно від варіанту обробки насіння, 2011 р.

Передпосівне опромінювання насіння істотно впливало на урожайність пшениці озимої. Як видно з наведених даних (табл. 1.3) значне збільшення урожайності зерна пшениці озимої - 0,29 т/га (або 7%), отримано у варіанті Мх-опромінення в режимі: 1,8 кВТ/кг насіння при експозиції 15 сек. Додаткове застосування регулятора росту рослин Марс EL сприяло подальшому збільшенню врожаю насіння, надбавка 0,44 т/га (або 10%). Найбільше збільшення урожайності насіння отримане при використанні режиму: 0,9 кВТ/кг

насіння при експозиції 45 сек., надбавка становить 0,55 т/га (або 12%). Додаткове застосування регулятору росту рослин Марс EL до подальшого збільшення врожаю не приводилось, надбавка 0,21 т/га (або 5%). Протруєння насіння повною нормою Вітавакса 200 ФФ (2,5 л/т), без опромінення насіння, сприяло підвищенню урожайності на 0,23 т/га або 5 %.

Таблиця 1.3 – Залежність урожайності пшениці озимої сорту Астет від застосування МХП НВЧ та рістрегулюючих препаратів, 2011 р., т/га

| №<br>п/п | Варіант обробки насіння                    | Урожайність,<br>т/га | +/- до<br>конт-<br>ролю | Надбавка,<br>% |
|----------|--------------------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------|
| 1        | Контроль, без обробки                      | 4,44                 |                         |                |
| 2        | Вітавакс 200 ФФ, 2,5 л/т                   | 4,66                 | 0,23                    | 5              |
| 3        | НВЧ 1,8 кВт/кг, 15 сек.                    | 4,73                 | 0,29                    | 7              |
| 4        | НВЧ 1,8 кВт/кг, 15 сек. + Марс EL, 0,2 л/т | 4,88                 | 0,44                    | 10             |
| 5        | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек.                    | 4,99                 | 0,55                    | 12             |
| 6        | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек.+ Марс EL, 0,2 л/т  | 4,64                 | 0,21                    | 5              |
| 7        | НВЧ Aviron 90 сек.                         | 4,69                 | 0,25                    | 6              |
| 8        | НВЧ Aviron 90 сек. + Марс EL, 0,2 л/т      | 4,69                 | 0,25                    | 6              |

Вміст сирої клейковини та білка в зерні при опроміненні насіння НВЧ в режимі 1,8 кВт/кг насіння і експозиції 15 с. зменшувався до 20,4-21,2 % та 12,0-12,1 % відповідно, при 22,4 % та 12,3 % на контролі, а опромінення насіння в режимі 0,9 кВт/кг насіння і експозиції 45 с. навпаки сприяло збільшенню сирої клейковини до 22,8-24,8 % (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Якість зерна пшениці озимої після після збору урожаю залежно від обробки насіння мікрохвильовим опромінюванням та рістрегулюючим препаратом, 2011 р.

| №<br>з/п | Варіант                  | Сира клейковина |                               | Число<br>падіння,<br>сек. | Вміст<br>білка в<br>зерні, % | Клас<br>зерна |
|----------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------|
|          |                          | кількість,<br>% | одиниц<br>і<br>ВДК<br>(група) |                           |                              |               |
| 1        | Контроль,<br>без обробки | 22,4            | 55-I                          | 376                       | 12,3                         | III           |
| 2        | Вітавакс 200 ФФ          | 22,4            | 50-I                          | 336                       | 12,4                         | III           |

|   |                                |      |       |     |      |     |
|---|--------------------------------|------|-------|-----|------|-----|
| 3 | НВЧ 15 с. 1,8 кВт/кг           | 20,4 | 40-II | 336 | 12,1 | III |
| 4 | НВЧ 15 с. 1,8 кВт/кг + Марс EL | 21,2 | 40-II | 377 | 12,0 | III |
| 5 | НВЧ 45 с. 0,9 кВт/кг           | 24,8 | 60-I  | 306 | 12,4 | II  |
| 6 | НВЧ 45 с. 0,9 кВт/кг + Марс EL | 22,8 | 40-II | 247 | 12,3 | III |

За підрахунками економічної ефективності вирощування пшениці озимої встановлено, що найбільші витрати на обробку насіння мав варіант з використанням повної норми протруйника Вітавакс 200 ФФ (2,5 л/т) – 78 грн./га, порівняно з витратами на мікрохвильове опромінення насіння та передпосівної обробки регулятором росту рослин Марс EL – 31-37 грн./га. Найбільш економічно вигідним виявилось застосування мікрохвильового опромінення насіння з потужністю 0,9 кВт/кг насіння та експозицією 45 секунд, яке забезпечило найбільшу урожайність зерна – 4,99 т/га. Так, порівняно з контролем, собівартість на зазначеному варіанті зменшилась на 54 грн/т, а чистий прибуток та рентабельність збільшились відповідно на 794 грн./га та 30 % (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Економічна ефективність вирощування пшениці озимої залежно від застосування МХП НВЧ та рістрегулюючих препаратів, 2011 р.

| Варіанти передпосівної обробки насіння | Урожайність, т/га | Витрати на обробку насіння, грн./га | Затрати, грн./га | Собівартість, грн./т | Чистий прибуток, грн./га | Рентабельність, % |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------|-------------------|
| Контроль, без обробки                  | 4,44              | –                                   | 2418             | 545                  | 4242                     | 175               |
| Еталон:<br>Вітавакс 200 ФФ, 2,5 л/т    | 4,66              | 78                                  | 2496             | 536                  | 4494                     | 180               |
| НВЧ 1,8                                | 4,73              | 31                                  | 2449             | 518                  | 4646                     | 190               |

|                                            |      |    |      |     |      |     |
|--------------------------------------------|------|----|------|-----|------|-----|
| кВт/кг, 15 сек.                            |      |    |      |     |      |     |
| НВЧ 1,8 кВт/кг, 15 сек. + Марс EL, 0,2 л/т | 4,88 | 37 | 2455 | 503 | 4865 | 198 |
| НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек.                    | 4,99 | 31 | 2449 | 491 | 5036 | 206 |

МХ-опромінювання у режимі 1,8 кВт/кг насіння і експозиції 15 сек. забезпечило збільшення чистого прибутку та рівня рентабельності на 404 грн./га та 14 % відповідно. Додаткове застосування на даному варіанті регулятору росту Марс EL сприяло подальшому збільшенню зазначених показників на 623 грн./га та 23 %.

Передпосівна обробка насіння ячменя сорту Аспект НВЧ опромінюванням збільшувала енергію проростання та лабораторну схожість на 2-3 % і 1 % відповідно при режимі 0,9 кВт на 1 кг насіння і експозиції 30-50 сек. та режимі 1,8 кВт на 1 кг насіння і експозиції 15 сек (табл. 1.6).

Таблиця 1.6 – Енергія проростання та схожість насіння ячменя сорту Аспект після обробки НВЧ у різних режимах потужності та експозиції, 2011 р.

| № з/п                                 | Експозиція опромінення, сек. | Температура після обробки, °C |      | Енергія проростання, % |      |      |    |            | Схожість, %   |      |      |    |            |
|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------|------------------------|------|------|----|------------|---------------|------|------|----|------------|
|                                       |                              |                               |      | дата закладки          |      |      | Σ  | ± до конт. | дата закладки |      |      | Σ  | ± до конт. |
|                                       |                              | зерна                         | води | 15.0                   | 18.0 | 24.0 |    |            | 15.0          | 18.0 | 24.0 |    |            |
|                                       |                              |                               |      | 3                      | 3    | 3    |    |            | 3             | 3    | 3    |    |            |
| 1                                     | контроль                     | 17                            | 18   | 90                     | 90   | 87   | 89 |            | 92            | 92   | 89   | 91 |            |
| Режим опромінення: 0,9 кВт/кг насіння |                              |                               |      |                        |      |      |    |            |               |      |      |    |            |
| 2                                     | 5                            | 19                            | 21   | 90                     | 90   | 89   | 90 | 1          | 91            | 91   | 90   | 91 | 0          |

|    |    |           |    |    |    |    |           |    |    |    |    |           |    |
|----|----|-----------|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|-----------|----|
| 3  | 10 | <b>23</b> | 23 | 92 | 89 | 90 | <b>90</b> | 1  | 91 | 91 | 90 | <b>91</b> | 0  |
| 4  | 15 | <b>24</b> | 26 | 89 | 91 | 94 | <b>91</b> | 2  | 87 | 92 | 94 | <b>91</b> | 0  |
| 5  | 20 | <b>26</b> | 27 | 89 | 90 | 90 | <b>90</b> | 1  | 91 | 91 | 90 | <b>91</b> | 0  |
| 6  | 25 | <b>29</b> | 29 | 92 | 89 | 90 | <b>90</b> | 1  | 92 | 90 | 91 | <b>91</b> | 0  |
| 7  | 30 | <b>31</b> | 32 | 90 | 92 | 92 | <b>91</b> | 2  | 91 | 93 | 93 | <b>92</b> | 1  |
| 8  | 35 | <b>33</b> | 34 | 91 | 93 | 92 | <b>92</b> | 3  | 92 | 93 | 92 | <b>92</b> | 1  |
| 9  | 40 | <b>34</b> | 37 | 91 | 90 | 92 | <b>91</b> | 2  | 91 | 92 | 93 | <b>92</b> | 1  |
| 10 | 45 | <b>35</b> | 38 | 92 | 93 | 92 | <b>92</b> | 3  | 92 | 93 | 92 | <b>92</b> | 1  |
| 11 | 50 | <b>40</b> | 40 | 90 | 92 | 91 | <b>91</b> | 2  | 90 | 94 | 91 | <b>92</b> | 1  |
| 12 | 55 | <b>41</b> | 42 | 90 | 89 | 90 | <b>90</b> | 1  | 90 | 90 | 90 | <b>90</b> | -1 |
| 13 | 60 | <b>42</b> | 44 | 87 | 90 | 90 | <b>89</b> | 0  | 89 | 90 | 91 | <b>90</b> | -1 |
| 14 | 65 | <b>44</b> | 46 | 94 | 90 | 91 | <b>92</b> | 3  | 93 | 91 | 92 | <b>92</b> | 1  |
| 15 | 70 | <b>45</b> | 48 | 92 | 89 | 90 | <b>90</b> | 1  | 93 | 91 | 92 | <b>92</b> | 1  |
| 16 | 75 | <b>48</b> | 50 | 90 | 91 | 92 | <b>91</b> | 2  | 92 | 92 | 92 | <b>92</b> | 1  |
| 17 | 80 | <b>49</b> | 53 | 88 | 92 | 92 | <b>91</b> | 2  | 89 | 93 | 92 | <b>91</b> | 0  |
| 18 | 85 | <b>54</b> | 54 | 88 | 86 | 88 | <b>87</b> | -2 | 89 | 91 | 90 | <b>90</b> | -1 |
| 19 | 90 | <b>55</b> | 56 | 87 | 86 | 91 | <b>88</b> | -1 | 89 | 92 | 92 | <b>91</b> | 0  |
| 20 | 95 | <b>56</b> | 57 | 90 | 84 | 82 | <b>85</b> | -4 | 92 | 91 | 84 | <b>89</b> | -2 |

Режим опромінення: **1,8 кВт/кг насіння**

|    |    |           |   |    |    |    |           |     |    |    |    |           |     |
|----|----|-----------|---|----|----|----|-----------|-----|----|----|----|-----------|-----|
| 21 | 5  | <b>24</b> | — | 88 | 91 | 90 | <b>90</b> | 1   | 90 | 94 | 90 | <b>91</b> | 0   |
| 22 | 10 | <b>31</b> | — | 92 | 91 | 89 | <b>91</b> | 2   | 92 | 92 | 89 | <b>91</b> | 0   |
| 23 | 15 | <b>39</b> | — | 92 | 92 | 90 | <b>91</b> | 2   | 93 | 91 | 91 | <b>92</b> | 1   |
| 24 | 20 | <b>46</b> | — | 89 | 92 | 88 | <b>90</b> | 1   | 92 | 92 | 88 | <b>91</b> | 0   |
| 25 | 25 | <b>54</b> | — | 92 | 92 | 86 | <b>90</b> | 1   | 92 | 94 | 87 | <b>91</b> | 0   |
| 26 | 30 | <b>59</b> | — | 90 | 89 | 91 | <b>90</b> | 1   | 91 | 92 | 92 | <b>92</b> | 1   |
| 27 | 35 | <b>64</b> | — | 88 | 86 | 90 | <b>88</b> | -1  | 92 | 90 | 90 | <b>91</b> | 0   |
| 28 | 40 | <b>70</b> | — | 77 | 72 | 88 | <b>79</b> | -10 | 84 | 84 | 89 | <b>86</b> | -5  |
| 29 | 45 | <b>76</b> | — | 62 | 53 | 89 | <b>68</b> | -21 | 79 | 79 | 90 | <b>83</b> | -8  |
| 30 | 50 | <b>82</b> | — | 35 | 22 | 88 | <b>48</b> | -41 | 54 | 55 | 89 | <b>66</b> | -25 |

Відмічено зниження поширеності та розвитку корневих гнилей на 0,4-1,5 % та 0,3-1,3 % при застосуванні НВЧ опромінення, як окремо, так і у поєднанні з регулятором росту Радостим, біопрепаратом Альбіт та половинної дози протруйника насіння Вітавакс 200 ФФ (рис. 1.4).

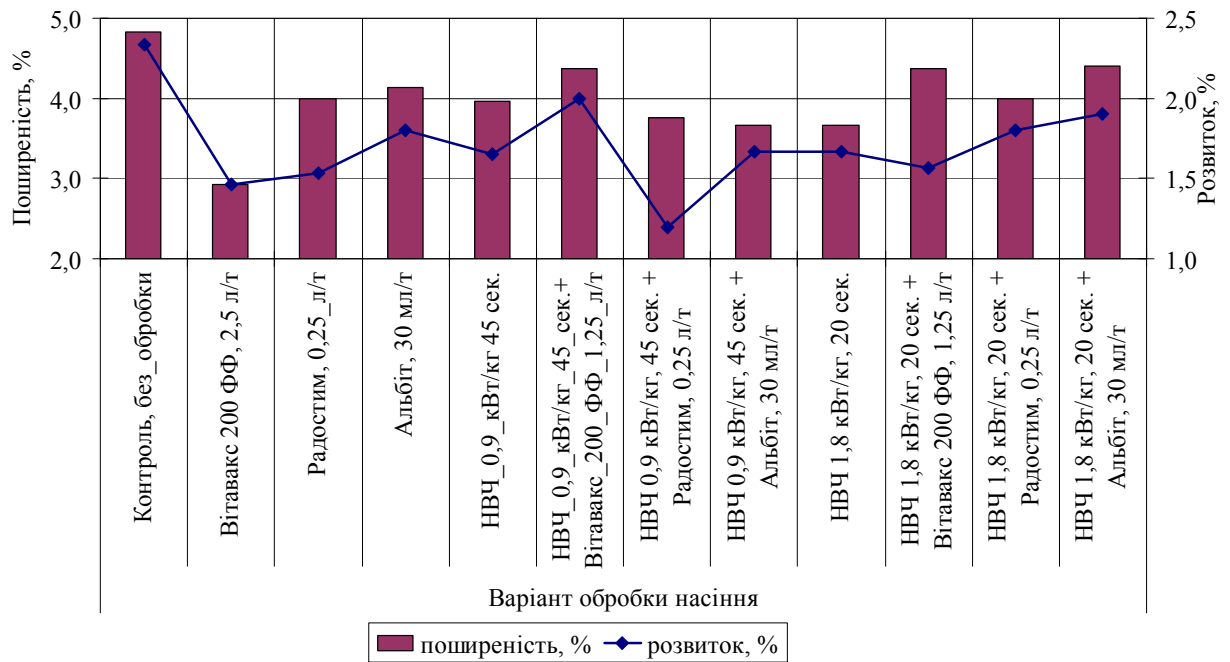


Рисунок 1.4 – Поширеність та розвиток збудників корневих гнилей на рослинах ячменю сорту Аспект у фазі повної стиглості залежно від варіанту обробки насіння, 2011 р.

Застосування передпосівного опромінювання МХП НВЧ насіння ячменю сорту Астет сприяло збільшенню урожайності на 0,16-0,19 т/га (або 5-6%), залежно від режиму опромінення. Додаткове застосування регулятора росту рослин Радостим та біопрепарату Альбіт до подальшого збільшення урожаю не приводило, надбавка 0,13-0,16 т/га (або 4-6%). На ячмені сорту Виклик при використанні режиму з потужністю 0,9 кВт/кг насіння та експозицією 45 секунд отримано надбавку на рівні 0,28 т/га (або 10%) (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Урожайність ячменю ярого залежно від застосування МХП НВЧ та рістрегулюючих препаратів, 2011 р., т/га

| №<br>п/п    | Варіант обробки насіння                             | Урожа-<br>йність,<br>т/га | +/- до<br>контрол<br>ю | Надбавка,<br>% |
|-------------|-----------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------|
| сорт Аспект |                                                     |                           |                        |                |
| 1           | Контроль, без обробки                               | 2,95                      |                        |                |
| 2           | Вітавакс 200 ФФ, 2,5 л/т                            | 3,08                      | 0,13                   | 4              |
| 3           | Радостим, 0,25 л/т                                  | 2,97                      | 0,02                   | 1              |
| 4           | Альбіт, 30 мл/т                                     | 2,92                      | -0,03                  | -1             |
| 5           | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек.                             | 3,11                      | 0,16                   | 5              |
| 6           | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек. + Вітавакс 200 ФФ, 1,25 л/т | 3,14                      | 0,19                   | 6              |
| 7           | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек. + Радостим, 0,25 л/т        | 2,99                      | 0,04                   | 1              |
| 8           | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек. + Альбіт, 30 мл/т           | 3,08                      | 0,13                   | 4              |
| 9           | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек.                             | 3,14                      | 0,19                   | 6              |
| 10          | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек. + Вітавакс 200 ФФ, 1,25 л/т | 3,09                      | 0,14                   | 5              |
| 11          | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек. + Радостим, 0,25 л/т        | 2,93                      | -0,02                  | -1             |
| 12          | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек. + Альбіт, 30 мл/т           | 3,11                      | 0,16                   | 6              |
| сорт Виклик |                                                     |                           |                        |                |
| 13          | Контроль, без обробки                               | 2,70                      |                        |                |
| 14          | Вітавакс 200 ФФ, 2,5 л/т                            | 2,86                      | 0,16                   | 6              |
| 15          | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек.                             | 2,98                      | 0,28                   | 10             |
| 16          | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек.                             | 2,67                      | -0,03                  | -1             |

Цікавим наслідком застосування опромінення НВЧ та озонування насіння ячменю сорту Аспект є **зниження вмісту білка в отриманому врожаї зерні, що є важливим фактором у пивоварінні.** Так, у варіантах НВЧ опромінення

насіння з послідуною обробкою насіння біопрепаратом Альбіт отримано найменший вміст білка в зерні – 12,8-13,0 %, при 14,2 % на контролі (табл.1.8).

Таблиця 1.8 – Вміст білку та крохмалю в насінні ячменю сорту Аспект залежно від опромінювання мікрохвильовим (МХ) полем надзвичайно високих частот (НВЧ), озонування та різних препаратів, 2011 р.

| № з/п | Варіанти                                            | Білок,<br>% | Крохмаль,<br>% |
|-------|-----------------------------------------------------|-------------|----------------|
| 1     | Контроль, без обробки                               | 14,2        | 59,8           |
| 2     | Вітавакс 200 ФФ, 2,5 л/т                            | 13,5        | 58,9           |
| 3     | Радостим, 0,25 л/т                                  | 13,4        | 59,9           |
| 4     | Регоплант, 0,25 л/т                                 | 13,4        | 59,2           |
| 5     | Альбіт, 30 мл/т                                     | 13,8        | 60,0           |
| 6     | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек.                             | 13,3        | 60,5           |
| 7     | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек. + Вітавакс 200 ФФ, 1,25 л/т | 13,2        | 60,3           |
| 8     | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек. + Радостим, 0,25 л/т        | 13,6        | 59,9           |
| 9     | НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек. + Альбіт, 30 мл/т           | <b>13,0</b> | 60,0           |
| 10    | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек.                             | 13,9        | 60,2           |
| 11    | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек. + Вітавакс 200 ФФ, 1,25 л/т | 13,4        | 60,1           |
| 12    | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек. + Радостим, 0,25 л/т        | 13,5        | 59,4           |
| 13    | НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек. + Альбіт, 30 мл/т           | <b>12,8</b> | <b>56,1</b>    |

На ячмені ярому найбільш економічно вигідним виявилось застосування мікрохвильового опромінення МХП НВЧ у режимі 1,8 кВт/кг насіння і експозиції 15 сек. Так, порівняно з контролем, собівартість на зазначеному варіанті зменшилась на 27-35 грн./т, а чистий прибуток та рентабельність збільшились відповідно на 276-292 грн/га та 9-12 % (табл. 1.9).

Таблиця 1.9 – Економічна ефективність передпосівної обробки насіння ячменю ярого сорту Аспект МХП НВЧ, регуляторами росту, біопрепаратами та протруйниками, 2011 р.

| Варіанти передпосівної обробки насіння              | Урожай-ність, т/га | Витрати на обробку насіння, грн./га | Затрати, грн./га | Собівартість, грн./т | Чистий прибуток, грн./га | Рентабельність, % |
|-----------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------|-------------------|
| Контроль, без обробки                               | 2,95               | —                                   | 2179             | 739                  | 2836                     | 130               |
| Вітавакс 200 ФФ, 2,5 л/т                            | 3,08               | 78                                  | 2257             | 733                  | 2979                     | 132               |
| НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек.                             | 3,11               | 31                                  | 2210             | 711                  | 3077                     | 139               |
| НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек. + Вітавакс 200 ФФ, 1,25 л/т | 3,14               | 70                                  | 2249             | 716                  | 3089                     | 137               |
| НВЧ 0,9 кВт/кг, 45 сек. + Альбіт, 30 мл/т           | 3,08               | 41                                  | 2220             | 721                  | 3016                     | 136               |
| НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек.                             | 3,14               | 31                                  | 2210             | 704                  | <b>3128</b>              | 142               |
| НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек. + Вітавакс 200 ФФ, 1,25 л/т | 3,09               | 70                                  | 2249             | 728                  | 3004                     | 134               |
| НВЧ 1,8 кВт/кг, 20 сек. + Альбіт, 30 мл/т           | 3,11               | 41                                  | 2220             | 714                  | 3067                     | 138               |

## Дослідження ефективності резонансної магнітоакустичної обробки води

*Мета досліджень.* Експериментальна перевірка реалізації можливості резонансної магнітоакустичної обробки.

Для проведення експериментальних досліджень був виготовлений зразок експериментального макету резонансного магнітоакустичного реактора (РМАО).

При проведенні експериментів вода, що нагрівалась ТЕНом, піддавалась обробці РМАО і фіксувалися зміни її параметрів. Для цього проводилось контрольне вимірювання – без резонансної обробки та при наявності резонансної обробки. Фіксувалися такі параметри: температура, спожита електроенергія та час обробки.

Результати експериментальних досліджень представлені графіками на рис. 1.5 і 1.6.

наведені на Рис.2.1.

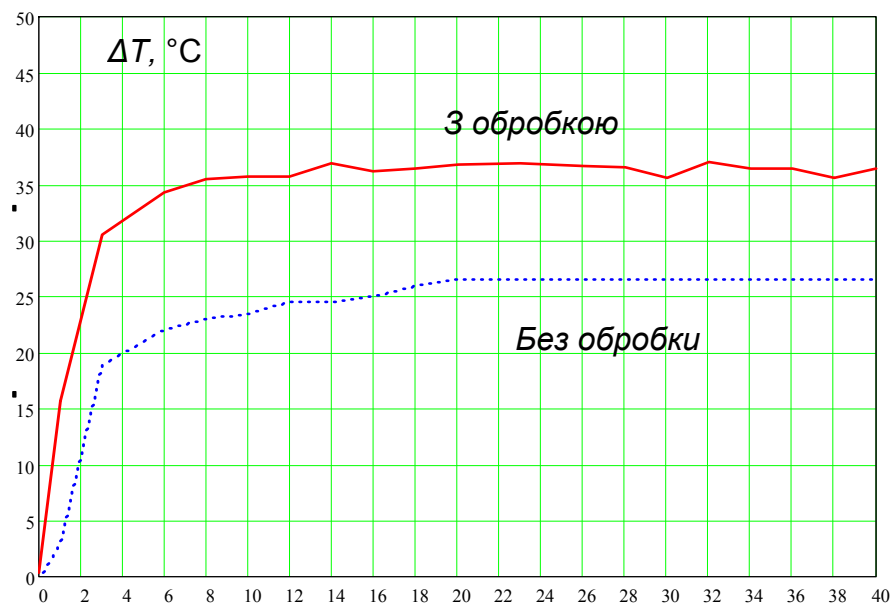


Рисунок 1.5— Зростання температури води від часу обробки РМАО при її нагріванні

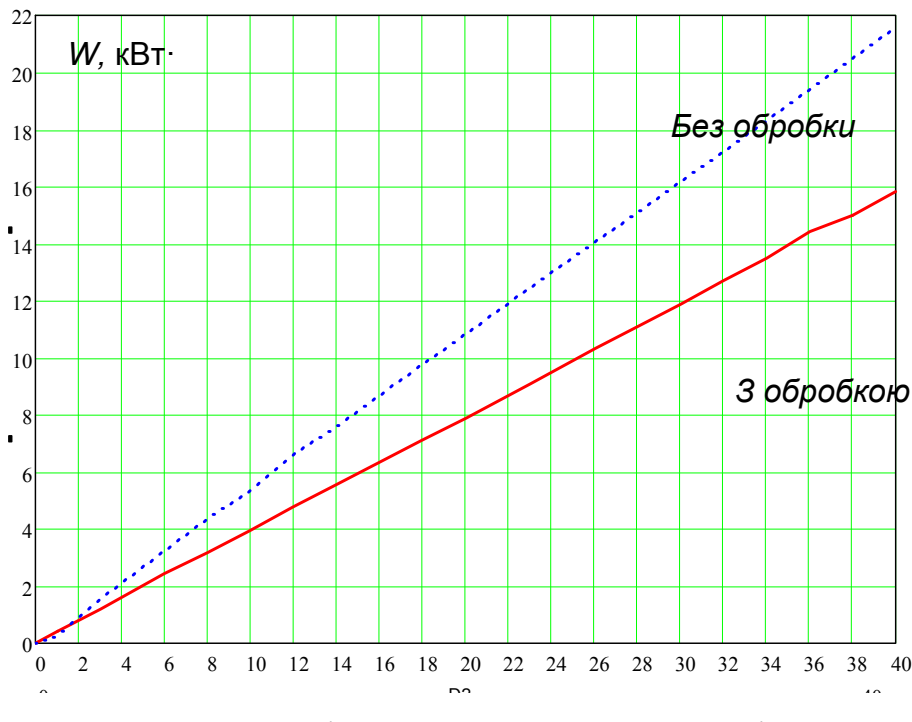


Рисунок 1.6— Залежність енергоспоживання від часу нагрівання води при обробці РМАО та без обробки

Як видно з наведених графіків резонансна магніто-акустична обробка зменшує енерговитрати до 30% для підігрівання води на задану температуру.

Можна припустити, що в результаті резонансної магнітоакустичної обробки води відбуваються зміни її структури, теплопровідності й теплоємності. Справедливість такого припущення підтверджується, наприклад, відомою залежністю коефіцієнту теплопровідності рідини  $\lambda$  від її атомно-молекулярної будови, сполуки і т.д.

$$\lambda = c d \nu l,$$

де параметри рідини:  $d$ -щільність;  $c$ -питома теплоємність;  $\nu$ -швидкість звуку;  $l$ -середня відстань між молекулами.

Дослідження комбінованих впливів полів різної фізичної природи на речовини

**Теоретичні та експериментальні дослідження комбінованих впливів електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону, магнітного постійного та змінного полів на речовини у твердій фазі**

У твердому агрегатному стані можуть перебувати різні матеріали й речовини, у тому числі мінеральні (оксиди, солі), металеві (різні метали й сплави), органічні, біологічні.

Об'єктом таких досліджень на даному етапі є мінеральні речовини й органічні сполуки. Такий вибір обумовлений цілеспрямованим використанням електромагнітної енергії НВЧ діапазону для рішення конкретних технологічних завдань прикладної спрямованості.

Першу групу досліджень становлять органічні речовини, що переходять у твердий стан при зниженні температури. До таких речовин ставиться крижана оцтова кислота й важкі вуглеводні - бітум і кам'яновугільна смола. При транспортуванні цих речовин із зимовий час виникає більша проблема з їхнім розвантаженням. Для здійснення розвантаження зазначені речовини необхідно перевести в грузько-текучий або рідкий стан. У цей час поставлене завдання вирішується шляхом нагрівання транспортної ємності перегрітою парою в спеціальних ангарах.

Теоретичні передумови по використанню електромагнітної енергії НВЧ для зміни фазового стану твердих вуглеводнів показують, що необхідно селективний похід, що враховує їх радіофізичної й хімічні-фізико-хімічної властивості.

Основною особливістю бітуму й кам'яно-вугільної смоли є наявність води в полімолекулярному стані й розповсюдженій по всім об'ємі у вигляді тонких плівок. Сполука вуглеводнів бітуму й кам'яновугільної смоли характеризується досить широким спектром циклічних, ароматичних вуглеводнів. Діелектрична проникність цих вуглеводнів перебуває в межах

від 2 до 5, у той час як діелектрична проникність води - 80, при тій же температурі.

Скористаємося класичним рівнянням [37 ]

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi}{3} \cdot a = P_m, \quad (1.18)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність,  $M$  – молекулярна маса,  $\rho$  – щільність,  $N$  – число Авогадро,  $a = a_e + a_a$  – деформаційна поляризованість молекули, тобто сума електронної  $a_e$  й атомної  $a_a$  поляризованості,  $P_m$  – молекулярна поляризація.

Наочно видно, що поляризація молекул води в плівках під дією електромагнітної енергії НВЧ буде відбуватися істотно інтенсивніше, чим поляризація молекул вуглеводню. Отже, основна частина електромагнітної енергії НВЧ буде трансформуватися в плівкових структурах, приводячи до утворення перегрітої пари, що, віддаючи частину енергії молекулам вуглеводнів, буде утворювати мікрокапіляри й переміщатися в області з мінімальною потужністю ЕМЕ НВЧ.

Виходячи з викладених теоретичних уявлень, можна запропонувати такі практичні рекомендації:

- для розігріву бітуму або кам'яновугільної смоли необхідно забезпечити подачу такої кількості електромагнітної енергії НВЧ, щоб водяна перегріта пара, що утвориться, могла передати необхідну кількість енергії твердій фазі органічній сполуці й перевести їх у в'язко текучий стан;

- вплив ЕМЕ НВЧ необхідно здійснювати так, щоб бітум, що перейшов у в'язко текучий стан, переміщався у бік джерела випромінювання й безупинно одержував додаткову енергію.

Принципово нові результати зі зміни фазового стану твердих органічних сполук отримані для розморожування крижаної оцтової кислоти. Відомо, що крижана оцтова кислота переходить у твердий стан уже при температурі + 16 °С і має діелектричну проникність  $\varepsilon = 7$  при температурі + 17 °С [37].

Оцтова кислота відноситься до полярних діелектриків і для неї найбільш характерною є орієнтаційна поляризація. Орієнтаційна поляризація обумовлена зміною розподілу орієнтації диполів при накладенні зовнішнього електричного поля. Існує залежність макроскопічних параметрів речовини від молекулярних. Поле, що діє на молекулу в молекулярній моделі, називається внутрішнім (локальним) полем Лоренца й визначається вираженням

$$E_{\text{л}} = E + \frac{4}{3}P, \quad (1.19)$$

де  $E$  - середнє макроскопічне поле,  $P$  - електричний момент, індукований в одиниці об'єму.

Наявність різниці фаз між струмом і прикладеним електричним полем приводить до того, що розсіювання енергії відбувається у вигляді тепла, а довжина хвилі, що відповідає максимуму поглинання, визначається вираженням

$$\lambda_m = \frac{4\pi c}{\omega_m}, \quad (1.20)$$

де  $c$  - швидкість світла.

У рідинах, що складаються з дипольних молекул, процес діелектричної релаксації являє собою сполучення обертальних коливань молекул біля деяких тимчасових положень рівноваги й подальших швидких стрибкоподібних переорієнтацій, що приводять до переходу молекули в нове положення рівноваги. Процес переходу молекул з одного положення в інше вимагає витрати вільної енергії активації  $\Delta E$  для подолання енергетичного бар'єра, що відокремлює ці положення рівноваги.  $\Delta E$  пов'язана з теплотою активації дипольної релаксації  $\Delta H$ , температурою  $T$ , ентропією активації дипольної релаксації  $\Delta S$  і визначається співвідношенням

$$\Delta E = \Delta H - T \cdot \Delta S. \quad (1.21)$$

Час діелектричної релаксації  $\tau$  визначається вираженням виду

$$\tau = \frac{hN}{RT} \cdot \exp\left[\frac{\Delta H - T\Delta S}{RT}\right], \quad (1.22)$$

де  $h$  - постійна Планка,  $N$  - число Авогадро,  $R$  - газова постійна.

З врахуванням (1.21) і температури  $T_0$ , при якій зникає вільний об'єм, останній вираз приводиться до виду

$$\tau = \frac{hN}{RT} \cdot \exp\left[\frac{\Delta E}{R(T - T_0)}\right] \quad (1.23)$$

При розрахунках значення  $T_0$  приймалися в межах 0,25...0...0,35 від температури кипіння, що дозволило обчислити необхідні енерговитрати для розморожування кристалічної оцтової кислоти.

Установлено, що для переводу в рідкий стан 1 кг крижаної кристалічної оцтової кислоти, що перебуває при температурі 14 °С необхідно затратити 0,1 кВт протягом ~7 хвилин електричної енергії, без обліку втрат. З огляду на, що транспортування крижаної оцтової кислоти може здійснюватися при температурі до мінус 35 °З, обчислені енергетичні коефіцієнти для інтервалу температур від мінус 35 °С до +16 °С. Отримані результати дозволили розробити методику й створити експериментальну установку для розігріву закристалізованих речовин. Новизна проведених досліджень і технічний ефект підтверджені патентом [38].

Розроблена технологія розігріву загустілих або скристалізованих продуктів в металевих ємностях таких, як залізничні цистерни. Відомі технології та пристрої для їх реалізації, призначені для цього, мають невелику ефективність із-за неможливості поміщення вузла уводу НВЧ енергії в середовище загустілих або скристалізованих продуктів через затверділий верхній шар продукту. Вузли уводу НВЧ енергії таких пристроїв знаходяться зовні продукту, нагрів продукту при цьому здійснюється у відносно тонкому поверхневому шару. Із-за низької теплопровідності загустілих або скристалізованих продуктів таких, як нафтопродукти та оцтова кислота, розігрів усього об'єму продукту здійснюється повільно, а поверхневий шар перегрівається.

Технічною задачею, яка вирішена у розроблений технології та пристрої, що її реалізує, було підвищення ефективності нагріву загустілих або

скристалізованих продуктів (наприклад, мазуту, бітуму, оцтової кислоти) в металевих ємностях з невеликими розмірами люка за допомогою створення електромагнітного поля з завданням розподілом в ємності, енергія якого поглинається усім об'ємом продукту, шляхом введення випромінювача електромагнітної енергії всередину продукту через вузьку горловину ємності і затверділий поверхневий шар продукту та збудження в ємності електромагнітного поля з завданням розподілом, що забезпечує розігрів продукту в усім об'ємі при енергозберігаючому екологічно чистому технологічному процесі.

У розроблені технології та пристрої для формування електромагнітного поля в середовищі, що обробляється, використовують вібраторну антену, вібратори якої спочатку складають в положення, при якому антена проходить через люк ємності, нагрівають зсередини електронагрівачами до температури, що перевищує температуру плавлення кристалічної складової продукту, а потім занурюють в продукт та розгортають в положення, при якому електронагрівачі відключають і подають на антену електромагнітний сигнал, наприклад, НВЧ, при цьому розподіл електромагнітної енергії в ємності, що випромінюється антеною та поглинається продуктом, є завданням, коли об'єм продукту в ємності при зливанні стає настільки малим, що не забезпечує поглинання електромагнітної енергії, яку випромінює антена, подачу електромагнітного сигналу на антену припиняють, вібратори знову нагрівають електронагрівачами і занурюють в залишки продукту для їх розігріву до стану текучості та повного зливу.

Пристрій, що реалізує розроблену технологію, діє таким чином.

На рис. 1.7 приведена структурна схема пристрою в положенні вібраторів антени при зануренні в продукт. На рис. 1.8 приведена структурна схема пристрою в положенні вібраторів при випромінюванні антени, що занурена в продукт.

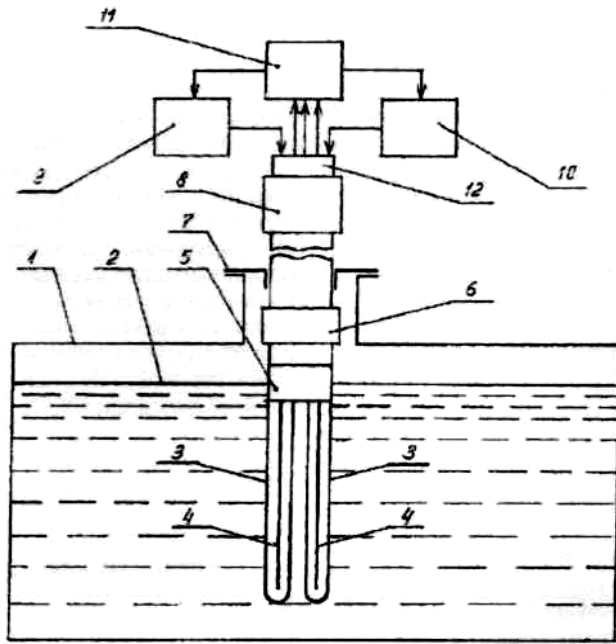


Рисунок 1.7

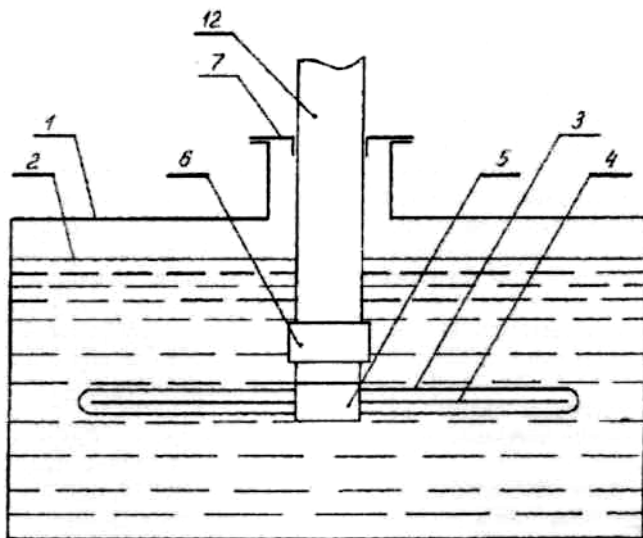


Рисунок 1.8

Антену з вібраторами 3 в складеному стані нагрітими електронагрівачами 4 до температури, визначеної для даного продукту, про що сигналізують термодатчики в блок управління 11, занурюють в загустілий продукт 2, який знаходиться в металевій ємності 1 з люком невеликого розміру, до положення, запрограмованого в блоці управління 11 для наявного об'єму ємності 1 і продукту 2, про що сигналізує датчик механізму переміщення 8. Потім вібратори 3 антени розгортають в потрібне

положення, про що сигналізує датчик механізму розгортання 5, і по його сигналу електронагрівачі 4 відключають від джерела електроенергії, а антену підключають до генератора НВЧ коливань 10, при цьому випромінювання антени створює в продукті 2 електромагнітне поле, яке є завданням, адаптованим для даного об'єму ємності 1 та об'єму продукту 2, що змінюється при витіканні продукту 2 через отвір для зливу. Коли об'єм продукту 2 в ємності 1 стає настільки малим, що не забезпечує поглинання електромагнітної енергії, яку випромінює антена, і розпогодження вхідного опору антени з хвилевим опором передавальної лінії досягає критичного значення, за сигналом датчика антенного узгоджувача блок управління 11 відключає генератор НВЧ коливань 10 від антени, подає сигнал механізму переміщення 8 на занурення вібраторів 3 в задишки продукту 2 та підключає електронагрівачі 4 до джерела електроенергії 9 для розігріву залишків продукту 2 до стану текучості та повного зливу.

Окремим завданням є теоретичні та експериментальні дослідження, пов'язані з вивченням впливів ЕМЕ НВЧ на неорганічні кристалічні речовини. Дослідження у цьому напрямку спричинені застосуванням неорганічних речовин в якості наповнювачів для пластмас. До таких наповнювачів відносяться оксид кальцію, оксид алюмінію, оксид титану, сульфат барію та інше. Наповнювачі повинні мати мінімальну вологість. Одночасно варто враховувати, що оксид кремнію (силікагель) і цілий ряд цеолітів використовуються як оборотні адсорбенти води, завдяки чому знаходять широке застосування як стабілізатори вологості при зберіганні побутових і технічних виробів.

У першому й у другому випадках застосування ЕМЕ НВЧ може виявитися досить перспективним для видалення води з об'єму зазначених речовин і матеріалів. Однак, зі зменшенням кількості води зменшуються їхні поглинаючі властивості. Отже, застосування тільки НВЧ не забезпечить мінімальної кількості води. Поставлене завдання може бути вирішене з використанням комбінованого впливу ЕМЕ НВЧ і випромінювання ІК

діапазону. Розглянуті варіанти досягнення мінімальної кількості вологи в порошкоподібних і кускових зразках дозволили сформулювати практичні рекомендації на підставі теоретичного аналізу.

Так, для сушіння порошкоподібних матеріалів може бути використана система, що містить НВЧ генератор і рупорну антену, спрямовану на шар порошкоподібного матеріалу, під яким перебуває поглинач ЕМЕ НВЧ. Робота даної системи зводиться до того, що на першій стадії процесу ЕМЕ НВЧ генератора трансформується у вологому порошок і приводить до її випару. У міру зменшення кількості води в порошок і зменшення його поглинаючої здатності надлишок НВЧ енергії трансформується в тепло в поглиначі і передається розташованому на ньому шару порошку. Регулюючи швидкість подачі порошку і рівень потужності НВЧ генератора, вдається домогтися кінцевої вологості порошку про 0,1%.

Процес зневоднювання силікагелю і цеолітів може бути реалізований по безперервній і періодичній схемах. Розходження в досягнутих результатах зводиться до того, що в безперервному процесі частина цеоліту випаровується, але одночасно досягається мінімальний залишковий зміст води. При періодичному процесі кінцева вологість силікагелю і цеоліту залишається на рівні 10...12%.

### **Теоретичні й експериментальні дослідження впливу гідродинамічної кавітації на рідкі органічні речовини і їхньої суміші з вуглеводневими матеріалами**

Одержання стабільної однорідної композиції із трьох і більше компонентів за умови, що один з них мимовільно прагне виділитися у вільний стан зі штучно створеної системи, представляє досить складне теоретичне й практичне завдання. З рішенням подібних завдань доводиться зіштовхуватися при створенні нових альтернативних биотопалив (АБП). Як компоненти для таких палив служать відходи очисних споруд міст і ферм, поживні відходи сільськогосподарських виробництв, вода або стічні води й важкі вуглеводні, що становлять основну частину горючої маси АБП.

Як показали проведені нами дослідження, співвідношення між вихідними компонентами перебуває в таких межах: твердої органічної фази – 15...20...20%, стічних вод або води – 25...30...30%, важких вуглеводнів – 50...60...60% [39].

Для рівномірного розподілу в об'ємі АБП твердої гідрофільної фази, води й важких вуглеводнів використовують різного роду диспергатори-емульгатори.

Фізико-хімічні перетворення, реалізовані в диспергаторах зводяться до наступних основних процесів: здрібнювання твердої гідрофільної фази і її диспергування, емульгування води в системі, що складається з дисперсної фази й важких вуглеводнів. Одержання стабільного АБП реалізується в процесі здрібнювання твердої органічної фази до розмірів не більше 250 напівтемних з одночасним емульгуванням води у важких вуглеводнях.

Суть процесу емульгування води або стічних вод у важких вуглеводнях зводиться до створення умов, при яких краплі водної фази мають мінімальні розміри й рівномірно розподілені в об'ємі важких вуглеводнів. Для забезпечення високої стабільності АБП необхідне виконання декількох умов, у тому числі, щоб щільність важких вуглеводнів була максимально близька до щільності води або стічних вод, а також, щоб у важких вуглеводнях утримувалися компоненти з полярними молекулами.

Виготовлення АБП із розглянутих вище компонентів має принципово важлива відмінність від чистих емульсій, що полягає в тім, що дисперсна фаза має гідрофільні властивості й на ній буде адсорбуватися вода. Наявність дисперсної фази стабілізує емульсію, однак необхідно враховувати, що частки дисперсної фази можуть мати різну форму - від сферичної до стержнеподібної. Співвідношення між сферичною частиною й стержнеподібними частинами дисперсної фази впливає на стабільність системи.

Дисперсно-емульсійна система, що містить підвищену концентрацію стержнеподібних часток, виявляється менш стійкою, ніж подібна система

тільки зі сферичними частками дисперсної фази. Причина такої особливості полягає в тому, що стержнеподібні елементи гідрофільної дисперсної фази одержують дипольний момент, що сприяє утворенню агрегатів (згустків) стержнеподібних елементів.

З огляду на викладений вище теоретичні передумови виготовлення АБП на основі органічного матеріалу очисних споруджень і мазуту марки М-100, розроблений спосіб готування альтернативного палива [40].

У цьому способі приготування альтернативного палива, що включає змішування вихідних компонентів, у якості яких використовують рідкі вуглеводні, воду або водне середовище й дрібнодисперсну тверду гідрофільну фазу органічних речовин, а змішування здійснюють у гідродинамічному диспергаторі при одночасній подачі вихідних компонентів з утворенням твердої дисперсної фази з розмірами часток 0,5-250 мкм і адсорбованої на їхній поверхні й в обсязі води, причому, для забезпечення необхідного ступеня диспергування твердої фази здійснюють режим циклічної обробки, причому, відповідно до пропонованого винаходу, у процесі циклічної обробки альтернативне паливо піддають вакуумній обробці.

Однак, при низьких температурах вихідних компонентів (нижче 5...10°C), низкій вологості твердої гідрофільної фази органічних речовин (тобто при їхній великій в'язкості) прокачування цих компонентів через гідродинамічний диспергатор утруднено. Поэтому был разработан модернизированный способ приготовления альтернативного топлива и одновременно устройство для его реализации [41].

У цьому способі приготування альтернативного палива процес диспергування здійснюють у двох послідовно з'єднаних гідродинамічних диспергаторах, причому зазор між робочими поверхнями в першому в напрямку руху альтернативного палива диспергаторі вибирають більше, ніж зазор між робочими поверхнями в другому в напрямку руху альтернативного палива диспергаторі, а частоту переміщення робочих поверхонь друг щодо

друга вибирають у першому диспергаторі менше, ніж у другому диспергаторі, крім того, для забезпечення необхідного ступеня диспергування твердої фази режим циклічної обробки здійснюють в другому диспергаторі, у процесі якої паливо піддають вакуумній обробці.

На рис. 1.9 зображена блок-схема пристрою для реалізації запропонованого способу. На рис. 1.10 зображений пристрій для реалізації запропонованого способу.

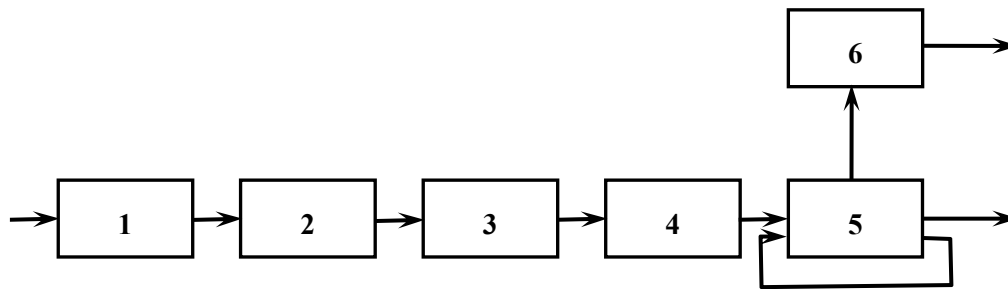


Рисунок 1.9 – Блок-схема пристрою



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд пристрою

У табл. 1.10 наведений приклад параметрів пристрою практичної реалізації винаходу, а в табл. 1.11 наведений приклад реалізації винаходу в технології приготування альтернативного біопалива для котельних і пічних установок.

Таблиця 1.10

| Найменування                          | Одиниця виміру | Величина        |                  |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|
|                                       |                | Диспергатор 1   | Диспергатор 2    |
| Частота обертання ротора диспергатора | Об/хв.         | Від 600 до 1200 | Від 1200 до 3000 |
| Потужність приводного електродвигуна  | кВт            | До 20           | До 45            |
| Зазор між робочими поверхнями         | мм             | n               | n/2              |

Таблиця 1.11

| Найменування                                  | Одиниця виміру | Величина      |               |
|-----------------------------------------------|----------------|---------------|---------------|
|                                               |                | Диспергатор 1 | Диспергатор 2 |
| Частота обертання робочого колеса             | Об/хв.         | 1200          | 3000          |
| Потужність приводного електродвигуна          | кВт            | 20            | 45            |
| Частота акустичного збудження                 | кГц            | 1,2           | 3,0           |
| Зазор між робочими поверхнями                 | мм             | N             | n/2           |
| Кількість води в альтернативному біопаливі    | %              | 45            | 40            |
| Дисперсність води в альтернативному біопаливі | мкм            | До 3          | 1-2           |
| Дисперсність твердої фази                     | мкм            | 1,5-500       | 0,5-250       |

|                                                                     |        |            |            |
|---------------------------------------------------------------------|--------|------------|------------|
| Температура на вході гідродинамічного диспергатора                  | °C     | 5-20       | 50-65      |
| Температура на виході гідродинамічного диспергатора                 | °C     | 50-65      | 65-110     |
| Седиментаційна стабільність при зберіганні АБП при температурі 20°C | місяць | Не менше 6 | Не менше 9 |

Пристрій діє таким чином. Вихідні компоненти з вихідного патрубка пристрою прийому вихідних компонентів 1 за допомогою насоса 2 подають у перший гідродинамічний диспергатор 3 через патрубок входу суміші вихідних компонентів. У цьому диспергаторі 3 зазор між його робочими поверхнями встановлюють більше, ніж зазор у послідовно з'єднаному з ним другому гідродинамічному диспергаторі 4, а частоту переміщення робочих поверхонь друг щодо друга в першому гідродинамічному диспергаторі 3 установлюють менше, ніж частоту переміщення робочих поверхонь у другому диспергаторі 4 у такому співвідношенні, щоб виконувалася умова рівності продуктивностей гідродинамічних диспергаторів 3 і 4. Композиція, яку отримують в першому диспергаторі 3, має підвищену температуру й знижену в'язкість у порівнянні з температурою й в'язкістю вихідних компонентів, але має розміри часток твердої дисперсної фази більше 250 мкм. Цю композицію через патрубок виходу диспергатора 3 подають на вхідний патрубок диспергатора 4. У цьому диспергаторі 4 виконують остаточну обробку з утворенням твердої дисперсної фази з розмірами часток 0,5-250 мкм і адсорбованої на їхній поверхні й в об'ємі води. Через патрубок виходу диспергатора 4 композицію через патрубок прийому подають у накопичувач альтернативного біопалива 5, з якого через патрубок виходу

рідку фракцію АБТ подають споживачеві, через патрубок виходу парову фазу подають на вакуумний насос 6, через патрубок виходу зворотного зв'язку рідку фракцію подають по магістралі зворотного зв'язку на вхід гідродинамічного диспергатора 4. Видалення парової фази приводить до збільшення теплотворної здатності АБТ і підвищенню його стабільності при зберіганні. Для забезпечення необхідного ступеня диспергування твердої фази здійснюють режим циклічної обробки шляхом подачі АБТ із накопичувача 5 на вхід другого диспергатора 4.

Відмітною рисою запропонованого пристрою є можливість забезпечення його більш високої ефективності при готуванні альтернативного біопалива відповідно за технічними умовами [42] при низьких температурах вихідних компонентів.

Необхідно відзначити, що альтернативне біопаливо (АБП) і способи його одержання призначені для промислового застосування в опалювальних агрегатах середньої потужності, що потребувало великого об'єму досліджень, направлених на вивчення процесу горіння й визначення умов подачі цього палива.

Результати досліджень відображені в роботі «Технологічні фактори процесу спалювання альтернативного - композиційного палива» [43]. У роботі розглянуті умови горіння АБП в об'ємі топки й наочно показані визначальні фактори, що впливають на повноту його згоряння.

На стадії розробки умов застосування АБП в якості палива для теплоагрегатів виникла серйозна проблема, яка полягала в тому, що відомі конструкції форсунок для подачі рідкого палива в топку не могли забезпечити стабільну подачу його через різнорозмірну тверду фазу. Проведений інженерно-технологічний аналіз відомих конструкцій форсунок дозволив розробити конструкцію форсунки, що забезпечує безперервну подачу палива з розмірами дисперсної фази від 5 до 250 мкм. Запропонована конструкція пневматичної форсунки захищена патентом [44].

Зараз істотно підсилилися вимоги до автомобільного й тракторного палива по вмісту сірки в паливі. Найближчим часом на зміну паливу ЄВРО-4 прийде паливо ЄВРО-5 з мінімальним змістом сірки. Нами запропонований новий метод зменшення змісту сірки в рідких вуглеводнях [45].

Як показав огляд літературних джерел рідкі вуглеводні відрізняються низьким значенням діелектричної проникності [46], а рідкі вуглеводні, що містять сірку, мають діелектричну проникність у межах від 3 до 17 [37]. Отже, молекули рідких вуглеводнів під дією електромагнітної енергії НВЧ діапазону можуть бути переведені в збуджений стан. Для адсорбції атомів сірки з рідких вуглеводнів можуть бути запропоновані різні системи, що містять водорозчинні вуглеводні такі, карбоксиметилцелюлоза (КМЦ). Водяний розчин КМЦ піддається легкій модифікації іонами лугу, лужноземельних металів, а також міді, цинку, заліза.

Пошукові дослідження дозволили визначити співвідношення компонентів і умови впливу електромагнітної енергії НВЧ діапазону для реалізації процесу рідких вуглеводнів і адсорбції атомів сірки. Температура процес не перевищує 100 °С, забезпечується кипіння водяного розчину КМЦ із концентрацією від 29 до 40 г/л і модифікованого іонами міді.

Для практичної реалізації зменшення кількості сірки в рідких вуглеводнях розроблена установка модульного типу, що складає з ємності підготовки адсорбенту, ємності сполучення рідких вуглеводнів і адсорбенту, емульгатора (гідродинамічного диспергатора), узгодженого НВЧ резонатора, НВЧ генератора й розділової ємності. Для лабораторних досліджень був використаний НВЧ генератор потужністю 1 кВт, що працює на частоті 2,7 ГГц у безперервному режимі. Швидкість проходження емульсії рідких вуглеводнів і адсорбенту змінювалася від 1 до 10 л/хв. Продуктивність установки по дизельному паливу змінювалася від 30 до 300 л/година.

Основним досягненням проведених експериментів варто вважати зменшення кількості сірки в рідких вуглеводнях з 0,2% до 0,01% при продуктивності 300 л/година, а при продуктивності 150 л/година кількість

сірки не перевищувало 0,001%, що задовольняє повністю вимогам Євро 4 і наближається до вимог Євро 5.

Для одержання стійких емульсій у системах водяні розчини – рідкі вуглеводні розроблений гідродинамічний диспергатор – гомогенізатор[47]. Особливістю цього диспергатора - гомогенізатора є те, що робочі елементи його виконані у вигляді спіралей, розташованих у корпусі співвісно, але мають різну резонансну частоту вібрацій. Після заповнення диспергатора - гомогенізатора сумішшю водяного розчину й рідких вуглеводнів і при обертанні спіралі з необхідною швидкістю, в об'ємі диспергатора виникає ефект каватації, що приводить до ефективного емульгування водяного розчину в об'ємі рідких вуглеводнів.

Розроблення енергоефективних НВЧ технологій та магніто-акустичного реактора

### **Удосконалення існуючих та розроблення нових комбінованих енергоефективних НВЧ технологій сушіння сипких продуктів**

Найчастіше сушіння сипких продуктів за НВЧ технологією або при комбінації мікроволнової та конвективної технологій здійснюється в НВЧ пічах конвеєрного типу.

Відома тунельна конвеєрна НВЧ піч [48], в якій НВЧ енергія вводиться в зону взаємодії через пірамідальний рупор, який забезпечує збудження в робочій камері хвилі типу  $H_{01}$  (силові лінії електричного поля паралельні широкій стінці хвилеводу) та узгодження з підводящим енергію стандартним хвилеводом. Продукт вводиться в зону взаємодії на конвеєрі, площа якого розташована під кутом приблизно  $20^\circ$  до вісі робочої камери. Пристрої уводу продукту, що обробляється, в зону взаємодії і виводу його з неї виконані у вигляді позамежних хвилеводів. Конвеєрна стрічка виконана з поліетилену, армованого льняним полотном. Передбачена вентиляція робочої зони.

Така конструкція має невелику ефективність із-за ряду суттєвих недоліків.

Конвеєрна стрічка вводиться в порожнину робочої камери, що має форму прямокутного хвилеводу збільшеного перетину, через широкі щілини, які практично повністю перерізають верхню та нижню (широкі) стінки хвилеводу. Ці щілини являють собою значні неоднорідності в хвилеводі, що викликають відбиття від них та роблять неможливим режим бігучої хвилі. Непогодження хвилеводу в перетинах з щілинами викликає, по-перше, перевантаження в роботі джерела НВЧ енергії, по-друге, нерівномірний нагрів продукту. Нерівномірний нагрів продукту виникає також із-за того, що звернена до джерела НВЧ енергії сторона продукту на конвеєрній стрічці нагрівається сильніше тильної (зверненої до навантаження). Хоч конвеєрна стрічка перетинає поздовжню вісь хвилеводу під гострим кутом (а не упоперек), що збільшує протяжність зони нагріву

продукту, проте не уся НВЧ енергія, яка підводиться, поглинається продуктом, значна частина її витрачається у водяному навантаженні, що знижує ККД печі.

Крім того, висока щільність ще непоглиненої НВЧ енергії припадає на вхідну широку щілину (ширина її більше товщини конвеєрної стрічки з шаром продукту), що приводить до складності створення ефективного затвору за допомогою позамежного хвилеводу для випромінювання НВЧ енергії назовні.

Конвеєрна стрічка з продуктом пересікає електричне поле від мінімуму до мінімуму, лише незначна частина продукту на конвеєрній стрічці знаходиться в полі високої інтенсивності, що також знижує ефективність роботи печі.

Ця піч малоефективна для сушіння продуктів, які мають високу початкову вологість, бо для нагріву продукту використовує тільки НВЧ енергію, хоч теоретично і експериментально доведено, що кращі результати дає сушіння при комбінації конвективної та мікрохвильової технологій [49].

Комбінація конвективної та мікрохвильової технології для сушіння сипких продуктів застосована в НВЧ пічі [50], яка містить випромінювач електромагнітних хвиль, перетворювач хвиль, рупорний перехід, основний хвилевід, виконаний у вигляді прямокутного паралелепіпеда зі щілинами у вузьких стінках для проходження конвеєрної стрічки, що призначена для подачі казеїну-сирцю, з'єднаного з вхідним та вихідним прямокутними хвилеводами, через котрі протягнута конвеєрна стрічка, елемент, що навантажується, для поглинання залишкових електромагнітних хвиль, камеру піддування гарячим повітрям, що розташована під нижніми широкими стінками основного, вхідного та вихідного хвилеводів і з'єднана з ними круглими отворами, відстань між якими значно більше їх діаметра, камеру витягання водяної пари, що розташована над верхньою широкою стінкою основного, вхідного та вихідного хвилеводів і зв'язана з ними круглими отворами, відстань між якими значно більше їх діаметра.

Зазначена піч хоч і використовує для сушіння продукту вплив на нього комбінації електромагнітної енергії хвилі НВЧ діапазону та теплової енергії гарячого повітря, але має недоліки, які роблять її малопридатною для безперервного сушіння продукту на конвеєрі.

В цій печі використовується хвиля типу  $H_{m0}$  для квазірівномірного розподілу НВЧ енергії на більшій частині поперечного перетину основного хвилеводу. Силкові лінії електромагнітного поля такої хвилі розташовані перпендикулярно шару продукту і взаємодія електричного поля хвилі з продуктом буде значною, якщо товщина шару продукту буде порівняна з розміром вузької (вертикальної) стінки основного хвилеводу. Таку товщину шару продукту в прототипі забезпечити неможливо, бо в такому разі вхідний та вихідний хвилеводи будуть не позамежними, а випромінюючими. Для тонкого шару продукту хвиля типа  $H_{m0}$  при зазначеному збудженні малоефективна.

Конвеєрна стрічка з продуктом вводиться в порожнину основного хвилеводу через широкі щілини в вузьких стінках. Такі щілини є випромінюючими і являють собою значні неоднорідності в хвилеводі, що викликають відбиття, які небажані для роботи джерела НВЧ енергії, а електромагнітна енергія хвилі, що надходить на продукт, зменшується.

Зона взаємодії електромагнітної хвилі з продуктом, яка обмежена шириною конвеєрної стрічки і шириною основного хвилеводу, хоч і збільшується за рахунок посування стрічки навкіс до поздовжньої вісі основного хвилеводу, недостатня для повного поглинання продуктом НВЧ енергії, значна частина якої марно витрачається в елементі, що навантажується.

В печі гаряче повітря для нагріву продукту подається в зону сушіння так, що заповнює некорисно всю порожнину основного хвилеводу, обтікає продукт на конвеєрній стрічці з боків та видаляється разом з парою системою витягання. При цьому тепла енергія гарячого повітря для нагріву продукту використовується лише частково.

Для підвищення ефективності (енергозбереження) процесу сушіння овочів, фруктів, ягід та якості готової продукції шляхом максимального використання можливостей впливу на продукт електромагнітного поля НВЧ діапазону, конвективної передачі теплової енергії продукту нагрітим повітрям та видалення вологи, що випаровується, повітряним потоком, розроблена нова удосконалена технологія та побудова НВЧ печі.

НВЧ піч, що розроблена для сушіння овочів, фруктів, ягід, містить рупорний перехід, основний хвилевід, виконаний у вигляді прямокутного паралелепіпеда, з'єднаний з вхідним та вихідним прямокутними хвилеводами, крізь які протягнута конвеєрна стрічка, камеру піддування гарячим повітрям, камеру витягання водяної пари. Розмір вертикальних стінок основного хвилеводу є рівним розміру широкої стінки прямокутного хвилеводу, який забезпечує збудження хвилі тільки типу  $H_{10}$  на робочій частоті, а розмір горизонтальних стінок є в декілька разів більше (не більше 10) розміру вузької стінки прямокутного хвилеводу з хвилею типу  $H_{10}$ , торці основного хвилеводу закриті фланцями з встановленими в них вхідним та вихідним прямокутними хвилеводами, позамежними для хвилі типу  $H_{10}$  в основному хвилеводі на робочій частоті, рупорні переходи Е-типу встановлені у прямокутні отвори в вертикальних стінках основного хвилеводу з розмірами розкриву рупорного переходу, розмір вертикальної стінки якого рівний розміру вертикальної стінки основного хвилеводу, причому рупорні переходи встановлені попарно на протилежних вертикальних стінках основного хвилеводу так, щоб поздовжня вісь рупорного переходу була паралельна горизонтальним стінкам основного хвилеводу та нахилена під гострим кутом до його поздовжньої осі, сітчаста конвеєрна стрічка застосована з сітчастого матеріалу з малими діелектричними утратами та проходить з шаром продукту на ній всередині основного хвилеводу паралельно його поздовжній осі, камера піддуву гарячим повітрям виконана у вигляді паралелепіпеда з радіопрозорого матеріалу з системою отворів в верхній стінці та розташована всередині

основного хвильоводу так, що конвеєрна стрічка ковзає по верхній стінці камери піддування и продувається гарячим повітрям разом з продуктом крізь отвори. Гаряче повітря в камеру піддування подають по патрубку позамежного перетину для хвилі типу  $H_{10}$  через торцевий фланець основного хвильоводу. Крім того додатково піч має теплообмінник для передачі частини залишкової теплової енергії водяної пари з камери витягання повітря, яке надходить в камеру піддування.

На рис. 1.10 приведено аксонометричне зображення розробленої НВЧ печі, а на рис. 1.11 – зовнішній вигляд експериментального зразка, на рис. 1.12 експериментальний зразок в дії.

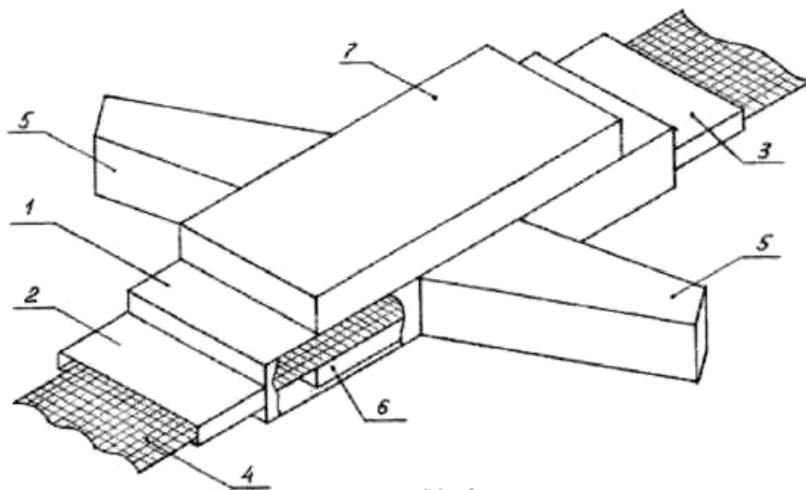


Рисунок 1.10 – Схематичне зображення НВЧ печі



Рисунок 1.10 – Схематичне зображення НВЧ печі



Рисунок 1.11 – Піч НВЧ в дії

НВЧ піч для сушіння овочів, фруктів, ягід містить основний хвилевід 1, виконаний у вигляді прямокутного паралелепіпеда, вхідний 2 та вихідний 3 прямокутні хвилеводи, крізь які протягнута конвеєрна стрічка 4 з продуктом (на фігурі не показаний), рупорні переходи 5, через які в основний хвилевід 1 вводять НВЧ енергію, камеру піддування гарячим повітрям 6, розташовану всередині основного хвилеводу 1 під конвеєрною стрічкою 4, камеру витягання водяної пари 7, теплообмінник (на фігурі не показаний).

Принцип дії НВЧ печі наступний. В основний хвилевід 1 прямокутного перетину, торці якого закриті фланцями, крізь встановлені в них вхідний 2 та вихідний 3 прямокутні хвилеводи, позамежні для хвилі типу  $H_{10}$ , яку збуджують в основному хвилеводі 1 (силові лінії електричного поля паралельні горизонтальним стінкам основного хвилеводу 1, інтенсивність розподілена за синусоїдальним законом) подають сітчасту конвеєрну стрічку 4 з продуктом, яка рухається паралельно поздовжній вісі основного хвилеводу 1. Електромагнітне поле в основному хвилеводі 1 збуджують генераторами (на фігурі не показані) через рупорні переходи 5, які встановлюють попарно на протилежних вертикальних стінках основного хвилеводу 1 поблизу його середини. Таке взаємне розташування конвеєрної стрічки 4 та рупорних переходів 5 дозволяє вибрати довжину основного хвилеводу 1, а, отже, довжину зони взаємодії електромагнітного поля з

продуктом такою , щоб забезпечити повне поглинання електромагнітної енергії, яку вводять в основний хвильовод 1 через рупорні переходи 5. З'єднання рупорного переходу 5 з основним хвильоводом 1 таке, що їх вісі перехрещуються під гострим кутом, дозволяє збільшити зону взаємодії електромагнітної хвилі з продуктом уздовж конвеєрної стрічки4, а опромінювання продукту НВЧ енергією через рупорні переходи 5 з двох сторін конвеєрної стрічки 4 дозволяє отримати рівномірний нагрів шару продукту в поперечному перетині.

Ефективне використання теплової енергії гарячого повітря для сушіння продукту у НВЧ печі полягає в продувці сітчастої конвеєрної стрічки 4 з продуктом крізь отвори в верхній стінці камери піддування 6. Сітчаста структура конвеєрної стрічки 4 для цього є принциповою. Проходження гарячого повітря під тиском крізь продукт приводить його в стан псевдозрідженого шару, коли тепла енергія повітря повніше передається структурі продукту і краще видаляється волога у вигляді пари. Пароповітряну суміш виводиться із зони сушіння через камеру витягання.

Для більш повного використання теплової енергії нагрітого повітря пароповітряна суміш з камери витягання подається у теплообмінник (рекуператор, на фігурі не показаний), в якому частина залишкової теплової енергії нагрітої пароповітряної суміші передається повітрю, яке далі нагрівається до необхідної температури перед подачею в камеру.

## Розроблення магнето-акустичного реактора для резонансної обробки рідких речовин

### • Розробка технологічної схеми магнітоакустичного реактора

Нова технологія полягає в комплексному резонансному впливі на робоче середовище постійним магнітним полем і змінними електромагнітними й акустичними полями в діапазонах звукових і ультразвукових частот. При цьому в робочому середовищі одночасно збуджуються протонний магнітоакустичний резонанс, електронний магнітоакустичний резонанс, магнітогідродинамічний резонанс, звукова й ультразвукова акустична кавітація.

Технологічна схема резонансного магнітоакустичного реактора наведена на рис. 1.12. Основними елементами реактора є: бак сепаратора-1; циліндричний магніт-2; вібровипромінювач звуковий-3; вібровипромінювач ультразвуковий - 4; антена рамкова-5; соленоїд-6; генератор звукових частот - 7; генератор радіочастот - 8.

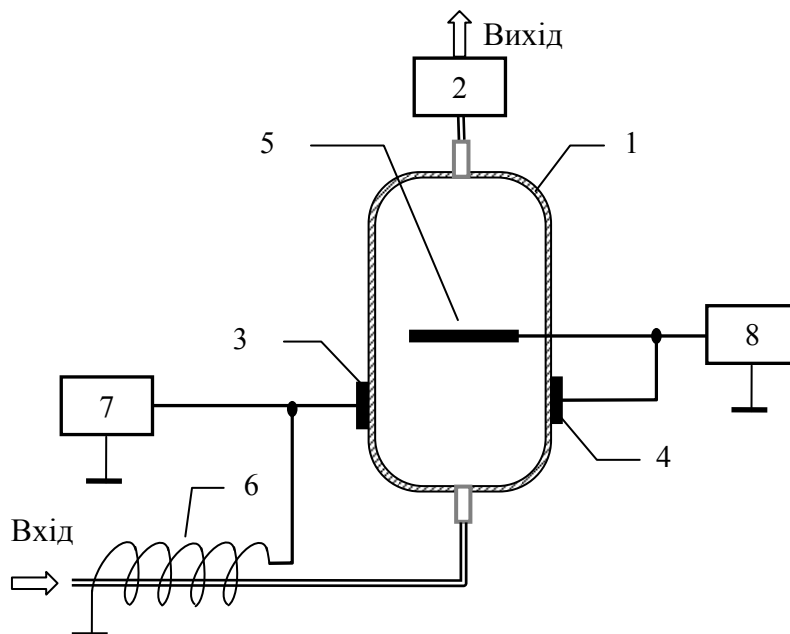


Рисунок 1.12 – Технологічна схема резонансного магнітоакустичного реактора

Конструктивно бак сепаратора 1 розміщений на металевій основі; вібровипромінювачі 3 і 4 акустично закріплені на зовнішній поверхні

корпусу баку сепаратора 1; рамкова антена 5 розміщена всередині баку сепаратора 1; соленоїд 6 розміщений на діамагнітному каркасі на вході в сепаратор 1; циліндричний магніт 2 закріплений нарізним сполученням на виході сепаратора 1; генератор звукових частот 7 і генератор радіочастот 8 жорстко закріплені на металевій основі бака сепаратора 1. Для забезпечення максимальної реакційної здатності реактора акустичні випромінювання вібровипромінювачів 3 і 4 фокусуються в активній зоні, що перебуває в центрі окружності рамкової антени 5.

Електроживлення генераторів 7 і 8 здійснюється від електромережі.

Принцип дії реактора полягає в наступному. Робоча рідина надходить через магнітний соленоїд 6 на вхід бака сепаратора 1. У магнітному соленоїді 6 на робоче середовище виявляється вплив змінним магнітним полем звукової частоти й збуджується протонний магнітоакустичний резонанс. Реактор завершує процеси гетеролітичної дисоціації води, а також деструкції її кластерів і СН зв'язків макромолекул з утворенням іонів  $H^+$ .

Потім робоча рідина надходить у бак сепаратора й попадає під вплив електромагнітних випромінювань рамкової антени 5. Ці випромінювання збуджують у робітничім середовищі електронний магнітоакустичний резонанс, що викликає процеси гомолітичної дисоціації води з утвором атомарного водню й деструкції СС зв'язків високомолекулярних вуглеводнів і макромолекул робочого середовища. При цьому утворюються низькомолекулярні вуглеводні й відбувається їхня стабілізація іонами й радикалами водню.

В міру наближення робочої рідини до активної зони реактора ці процеси підсилюються за рахунок акустичних випромінювань вібровипромінювачів звуку й ультразвуку 3 і 4.

В активній зоні на робочу рідину додатково впливає звукова й ультразвукова акустична кавітація й досягається максимальний комплексний резонансний вплив.

Надалі робоча рідину віддаляється від активної зони реактора, але продовжує перебуває під дією випромінювань рамкової антени 5, які підтримують процеси деструкції й стабілізації.

На виході з реактора робоча рідина додатково зазнає впливу постійного магнітного поля циліндричного магніту, що руйнує міцні іонні кластери твердої дисперсної фази за рахунок порушення МГД резонансу.

При розробці резонансного магнітоакустичного реактора головними є питання визначення робочих частот і вибору підходящих технічних розв'язків.

У запропонованому реакторі в якості поздовжнього постійного магнітного поля використовується природнє геомагнітне поле (ГМП). Порушення змінних полів здійснюється індукційними або акустичними перетворювачами, на які подаються електричні сигнали резонансної частоти. Частоти протонного й електронного магнітних резонансів визначаються напруженістю ГМП. Для природніх умов геомагнітного поля діапазон резонансних частот протонів розташований в області звукових частот, а електронів – в області ультразвукових.

Очевидно, що для виконання умов магнітного резонансу в рідких середовищах необхідно враховувати різні фактори, що викликають невизначеність напруженості ГМП і можливі методи їх усунення.

Облік і корекція факторів невизначеності напруженості ГМП здійснюється, наприклад, шляхом складання карт середньорічних змін на основі обсерваторської інформації й даних пунктів повторних спостережень. Однак для конкретних організацій ці карти, як правило, не доступні. Тому для усунення невизначеності доцільно використовувати спеціальні методи, що дозволяють виключити операцію виміру напруженості ГМП. До них ставляться, насамперед, методи послідовного й паралельного збудження, засновані на використанні широкосмугових електромагнітних і акустичних випромінювань із рівномірним спектром.

Сутність послідовного збудження полягає в тому, що можливі резонансні частоти досліджуваного зразка в певній смузі перебудови обслуговуються послідовно (по черзі). Метод послідовного збудження може бути реалізований, наприклад, на основі генератора, що перебудовується, електричних сигналів збудження індукційних або акустичних перетворювачів. У процесі перебудови генератора його частота, плавно змінюючись, періодично збігається з гіромагнітною частотою часток зразка, викликаючи магнітний резонанс.

Сутність паралельного збудження полягає в тому, що всі можливі резонансні частоти досліджуваного зразка в заданій смузі обслуговуються паралельно (одночасно). При цьому умова магнітного резонансу виконується автоматично. Для реалізації методу паралельного збудження можуть бути використані безперервні псевдовипадкові сигнали й широкосмугові шуми, а також хаотичні імпульсні послідовності, що мають рівномірний спектр у смузі можливих резонансних частот.

Крім того, може бути використане кавітаційне збудження магнітного резонансу.

У проблемі кавітації важливе місце займає виникнення акустичного магнітного резонансу. Якщо ступінь розвитку кавітації така, що у випадкові моменти часів виникає й лускається безліч бульбашок, то викликане ними акустичне випромінювання проявляється у вигляді шуму із суцільним спектром. За деякими даними, бульбашки малих розмірів створюють високочастотний шум, а низькочастотні складові зв'язані зі лусканням великих бульбашок. На практиці час лускання кавітаційних бульбашок може становити від одиниць мілісекунд до десятих часток мікросекунди, відповідно й ширина спектру кавітаційного шуму може становити від декількох кілогерц до декількох мегагерц..

Таким чином, кавітаційне збудження є різновидом паралельного методу усунення невизначеності ГМП. При правильному виборі частоти  $f_0$  кавітаційний шум може перекривати діапазон гіромагнітних частот як

протонів, так і електронів. При цьому умова акустичного магнітного резонансу виконується автоматично. Як було показано вище, правильність настроювання джерела кавітації по частоті може бути визначена, наприклад, по зміні водневого показника рідини.

При розробці резонансного магнітоакустического реактора використані паралельні шумовий і кавітаційний методи усунення невизначеності напруженості геомагнітного поля.

### **Розробка функціональної схеми контролю й управління магнітоакустичного реактора**

Електроживлення реактора здійснюється однофазною напругою 220В 50Гц від мережі живлення. Через окремий вимикач напруга живлення подається на паралельно включені генератор звукової частоти РІАС-2ГС і генератор радіочастоти РІАС-1ГК.

Генератор звукової частоти РІАС-2ГС ТУ В 33.2-33694400-001-2006 має два виходи, до яких підключаються п'єзоелектричний і електромеханічний виброизлучатели звуку.

Генератор забезпечує глибину регулювання рівня шумового сигналу в робочому діапазоні частот не менш 20дБ.

Час технічної готовності генератора – не більш 5 секунд.

Генератор радіо частоти РІАС-1ГК має два виходи, до яких підключаються п'єзоелектричний вібровипромінювач ультразвуку й рамкова антена.

Генератор забезпечує глибину регулювання рівня шумового сигналу в робочому діапазоні частот не менш 20дБ.

Час технічної готовності генератора – не більш 5 секунд.

Прилад має вбудовану систему автоматичного контролю й звукову індикацію цілісності антени й виброизлучателя.

Для забезпечення контролю температури й тиску в баку використовується термоманометр із клапаном 0-120°C, 0-4 Бар (TGR001).

Для захисту від надлишкового тиску в баку сепаратора використовується реле тиску  $\frac{1}{4}$  N 29мм 8(0,3) Бар (PRSW/MALE), яке видає сигнал керування в загальну систему керування турбулентно-кавітаційного модуля.

Функціональна схема контролю й управління резонансним магнітоакустичним реактором наведена на рис. \_\_.

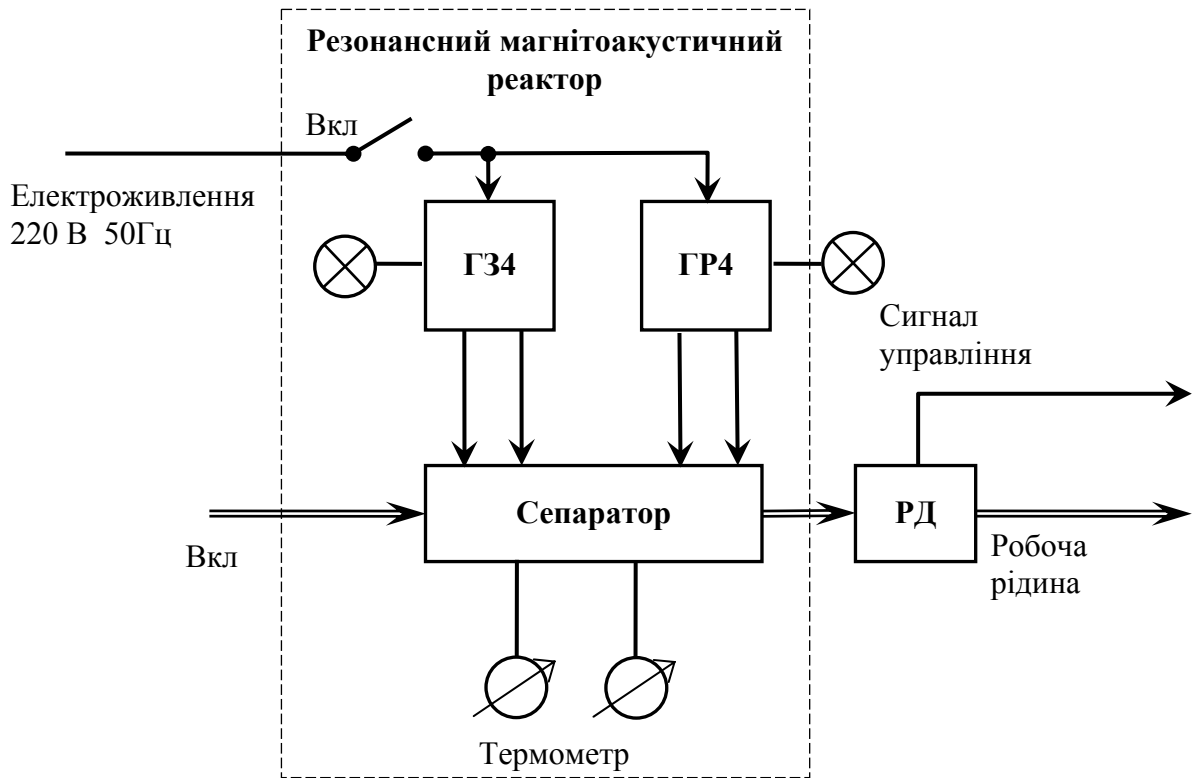


Рисунок 1.13 – Функціональна схема контролю й управління резонансним магнітоакустичним реактором

На рис. 1.14 зображений експериментальний макет резонансного магнітоакустичного реактора.

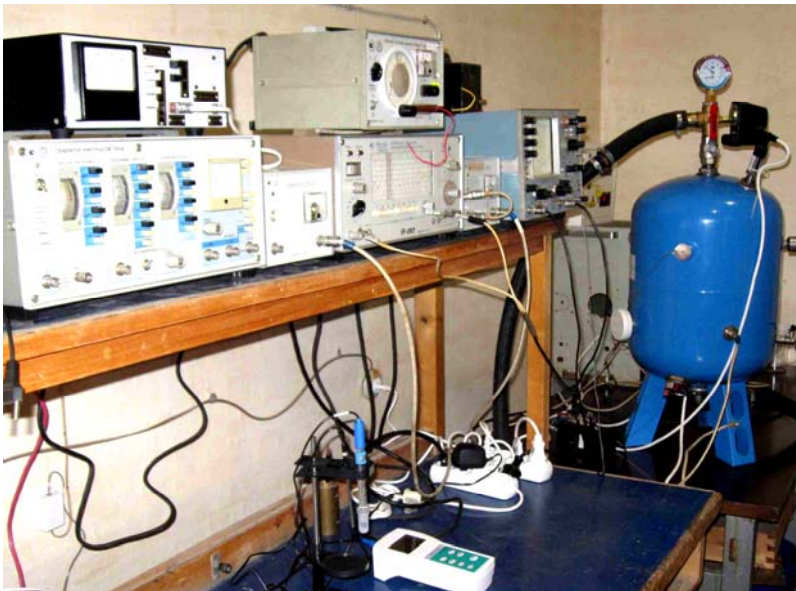


Рисунок 1.14 – Експериментальний макет резонансного магнітоакустичного реактора

## 1.5 Висновки

В ході виконання робіт по розділу НДР № 230-1 були проведені теоретичні та експериментальні дослідження впливів:

- електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону та магнітного постійного та змінного полів на речовини, що містять воду;

- впливів гідродинамічної кавітації на рідкі органічні речовини та їх суміші з вуглеводневими матеріалами;

- резонансного магнітоакустичного впливу на речовини, які містять воду та органічні речовини та їх суміші.

Одержані результати лягли в основу енергозберігаючих і екологічно чистих розробок:

- технології безреагентної передпосівної обробки насіння злакових культур;

- нової НВЧ технології та експериментального зразку дослідної установки;

- кавітаційного пристрою;

- макету магніто-акустичного реактора.

Результати можуть бути використані в харчової промисловості, сільському господарстві, альтернативній енергетиці для одержання альтернативного палива з біогенної сировини та інше.

## ВВЕДЕНИЕ

Метою даної НДР було дослідження фізичних явищ, процесів та технічних умов, які забезпечують використання оптичного волокна з особливими властивостями та покриттям у ролі активного середовища для лазерів нового покоління. Використання таких оптичних волокон потребує вирішувати питання оптичного нагнітання та формування частотних, спектральних, потужнісних та модуляційних характеристик випромінювання оптоволоконних лазерних джерел.

Реалізація мети проекту була здійснена через виконання наступних завдань:

- дослідження характеристик активного оптичного волокна та резонаторів оптоволоконних лазерів;
- дослідження умов ефективного оптичного нагнітання оптоволоконних лазерів;
- дослідження методів та способів формування у оптоволоконних лазерів інфрачервоного випромінювання спектру типу суперконтинууму
- дослідження модуляційних та потужнісних оптоволоконних лазерів та їх впливу на спектр випромінювання .

Современные технологии изготовления лазеров предусматривают изготовление самостоятельных технологических узлов: активная среда система накачки и резонатор.

В классических лазерах, применяемых в технологических процессах, существует рабочее тело, в котором в процессе накачки от источника внешней энергии создается инверсная населенность. В CO<sub>2</sub> лазерах такая среда как газовая смесь, а методы накачки – «электротехнические», на основе разного типа разрядов в газе, в YAG-лазерах – это специальные легированные кристаллы, а накачка создается облучением мощными лампами или светодиодами. В любом случае здесь присутствуют энергетически нагруженные компоненты и силовая разрядная электроника. Кроме того, тут присутствует оптика, резонаторы, зеркала, то есть то, что

нужно поддерживать в рабочем состоянии и настраивать (юстировать). Далее, генерируемое излучение нужно по системе зеркал доставлять к лазерной технологической головке и это требует специальных конструктивных усилий.

Существующие волоконные лазеры также содержат рабочее тело, в виде кварцевого оптоволокна, легированного редкоземельными металлами ( $Nd^{3+}$ ,  $Ho^{3+}$ ,  $Er^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$ ). В таблице 1 представлены спектральные диапазоны накачки и излучения для редкоземельных материалов, которыми легируют активные волокна.

Таблица 1 – Характеристики редкоземельных элементов

| Материал  | Длина волны излучения,<br>мкм | Длина волны накачки,<br>мкм |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------|
| $Nd^{3+}$ | 0,92-0,94; 1,05-1,1; 1,34     | 0,808                       |
| $Ho^{3+}$ | 1,9-2,1                       | 1,15                        |
| $Er^{3+}$ | 1,53-1,6                      | 0,98; 1,45-1,48             |
| $Tm^{3+}$ | 1,7-1,9                       | 0,79                        |
| $Yb^{3+}$ | 0,98-1,16                     | 0,915-0,976                 |

Волоконные лазеры могут иметь линейную конструкцию резонатора, в которой волоконные брэгговские зеркала привариваются к активному волокну и кольцевую конструкцию, в которой активное волокно формирует кольцевой резонатор. В обеих конструкциях используются все существующие активные волокна.

Ербиевые волоконные лазеры, работающие в непрерывном и импульсно-периодическом режиме с модуляцией добротности при непрерывной накачке полупроводниковыми лазерными диодами, завоевывают все большую популярность и в настоящее время находят широкое применение в самых различных отраслях науки и техники, таких как: оптическая связь, локация, медицина, обработка материалов и др.

Следует отметить, что получение генерации в импульсном режиме с микросекундной длительностью в обычных лазерах требует применения специальных систем отрицательной обратной связи или сложных алгоритмов включения добротности резонатора. С развитием техники управления длительностью ультракоротких оптических импульсов и осуществления генерации фемтосекундных импульсов возрос интерес к волоконным лазерам. Синхронизацию мод в волоконных лазерах можно осуществлять с помощью контроля и управления поляризацией излучения. Изучение поляризационной динамики излучения волоконного лазера, установление механизмов деполяризации излучения и их устранение имеют большое научное и практическое значение по нескольким причинам. Во-первых, поляризационные характеристики волоконных усилителей существенно влияют на качество работы волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), а во-вторых, они оказывают определяющее влияние на поляризационные характеристики волоконного лазера. Оптические передатчики с управляемой поляризацией позволяют увеличить дальность передачи информации в волоконно-оптических линиях связи, а лазеры, генерирующие одновременно две ортогональные поляризованные моды, повышают точность измерений и могут быть использованы для тестирования высокоскоростных фотоприемников.

В работе проведены исследования механизмов управления поляризацией излучения волоконного лазера, которые обеспечивают синхронизацию продольных мод. Используется широко применяемая оптическая схема кольцевого волоконного лазера с дискретными оптическими элементами, обеспечивающими управление поляризацией излучения.

Несмотря на внешнюю простоту конструкции кольцевого волоконного лазера, каждый раз при его изготовлении требуется проводить расчеты условий генерации и параметров излучения. В этой связи в работе был использован метод матриц Джонса для разработки технического алгоритма регулировки вращения поляризации излучения.

Учитывая, что дискретные поляризационные элементы управляются механически, в работе был исследован вопрос применения жидкокристаллических устройств, с помощью которых можно, используя электрический сигнал, управлять вращением поляризации.

Накачка волоконного лазера осуществляется полупроводниковыми лазерами. Излучение из волоконного лазера выводится по оптическому кабелю, который может иметь длину до сотен метров, поэтому никаких проблем интеграции лазера со средствами промышленной робототехники нет.

Преимущества технологических волоконных лазеров связаны с такими характеристиками как:

1. Полное отсутствие малоресурсных элементов, ресурс диодов накачки не менее 50000 часов;
2. Простота и компактность системы охлаждения;
3. Низковольтная конструкция системы накачки;
4. Нет воздушного оптического тракта передачи излучения к рабочей головке (это увеличивает надежность и долговечность системы), излучение передается по оптическому кабелю длиной от 1 до 200 м;
5. Высокий КПД – 22-25%;
6. Очень высокое качество излучения, параметр  $M^2$  не превышает величину 1,1;
7. Компактность конструкции лазера, Обеспечивающая его применение в составе технологического оборудования.

Волоконный кольцевой лазер представляют собой лазер, резонатор которого построен в самом волокне, активная среда также находится в волокне легированном редкоземельными металлами, для установления стабильного режима генерации используются дискретные элементы, не входящие в волоконную часть лазера.

Другими направлениями применения волоконных лазеров являются информационные технологии. К ним относятся оптические линии связи,

информационно-измерительные системы, оптические медицинские системы. Наиболее перспективными в рассматриваемых информационных технологиях являются лазеры с ультракороткими импульсами излучения.

Использование таких лазеров в измерениях позволяет осуществить измерение нано расстояний. Примером использования таких лазеров в составе лазерного пинцета, позволяет обеспечить механическое перемещение биологических клеток на микро расстояния.

Рассматривается электродинамическая модель системы накачки волоконного лазера в виде двух связанных через переходной слой диэлектрических волноводов. Для решения задачи на собственные режимы системы используется метод частичных областей.

Задачей настоящего проекта является разработка конструкции и волоконного кольцевого лазера, работающего в режиме синхронизации мод и предназначенного для применения в информационных технологиях

Моделирование системы накачки волоконного лазера проводится на основе упрощенной модели связанных диэлектрических волноводов. Используются плоскопараллельные волноводы, которые обеспечивают наиболее простой математический аппарат. Анализ цилиндрических диэлектрических волноводов проводятся аналогично с использованием функции Бесселя.

Базовой конструкцией для системы связанных плоских диэлектрических волноводов является одиночный диэлектрический слой, которых при выполнении определенных условий может обеспечивать передачу электромагнитных волн в волноводном режиме. Рассмотрим основные свойства такого слоя.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАКАЧКИ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Если диэлектрическая пленка (слой) окружена с обеих сторон средой с показателем преломления  $n_2$ , меньшим показателя преломления пленки  $n_1$ , то такая структура называется симметричным диэлектрическим слоем (или плоским волноводом). Как простейшая форма оптического волновода, плоский волновод может рассматриваться в качестве модели других более сложных направляющих структур. Кроме того, плоские волноводы сами по себе также непосредственно используются как оптические волноводы или как элементы интегральных оптических цепей.

Поле в плоском волноводе и около него снова может быть представлено направляемыми модами и модами излучения. В случае плоского волновода, ограниченного с обеих сторон одинаковыми средами, предельный угол  $\theta_c$  полного внутреннего отражения является одинаковым для обеих границ раздела пленки и определяется выражением:

$$\cos \theta_{2c} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.1)$$

а моды излучения образуются однородными плоскими волнами, распространяющимися внутри пленки в направлениях, соответствующих углам  $\theta_1 > \theta_{2c}$ .

Направляемые моды плоского волновода образуются однородными плоскими волнами внутри пленки, для которых имеет место полное внутреннее отражение от обеих границ пленки с одинаковым предельным углом  $\theta_{2c}$  на обеих границах и с одинаковой фазой полного внутреннего отражения.

В результате решения уравнения Гельмгольца для различных мод диэлектрического слоя получается два варианта поперечного распределения электромагнитного поля. На рис. 1.1 представлены два возможных варианта этого распределения – симметричная мода (рис. 1.1 а) и антисимметричная мода (рис. 1.1 б).

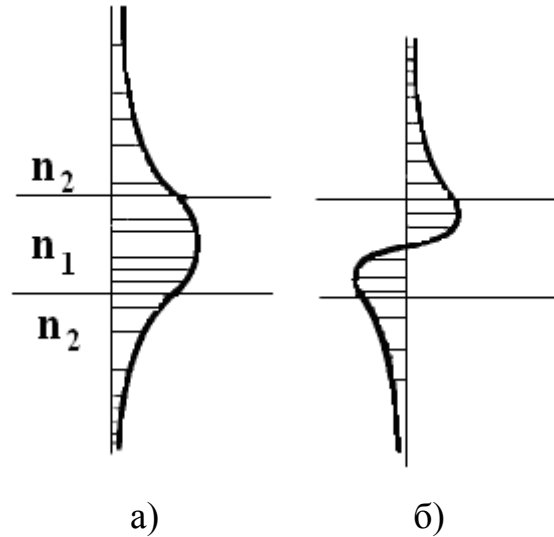


Рисунок 1.1 – Поперечное распределение составляющих электромагнитного поля

Моды с симметричным и антисимметричным распределением поля могут существовать только в слое, который имеет симметричную структуру относительно средней плоскости [1]. Следовательно, произвольное распределение поля, направляемое симметричным слоем, распадается на четные моды с симметричным распределением поля и на нечетные моды с антисимметричным распределением.

Обычно при исследовании диэлектрических волноводов предполагается, что перенос энергии осуществляется однородными плоскими волнами, которые испытывают полное внутреннее отражение от обеих границ диэлектрического слоя и распространяются по зигзагообразному пути внутри волновода [2]. Если удовлетворяется фазовое условие, при котором после двух последовательных отражений однородная плоская волна повторяется в фазе, она интерферирует сама с собой и

распространяется без затухания вдоль волновода. Такая волна формирует в пленке или слое направляемую распространяющуюся моду. Этот метод лучевой оптики для анализа мод начинается с рассмотрения однородных плоских волн, являющихся решениями уравнений Максвелла, затем удовлетворяются граничные условия путем рассмотрения отражения плоской волны от границ волноводной структуры и, в конечном счете, находится самосогласованное распределение поля моды в пленке или слое, подчиняющееся фазовому условию.

Такой несколько обобщенный метод лучевой оптики позволяет произвести полное рассмотрение всех направляемых мод и получить все основные характеристики распространения в них света. Кроме того, такой метод позволяет понять механизм распространения и образования мод с помощью явления полного внутреннего отражения.

Для более сложных направляющих структур применение метода лучевой оптики может оказаться затруднительным. Для волноводов с тремя и более параллельными границами вместо двух границ пленки было бы очень не практично проследивать лучи, соответствующие однородным плоским волнам, рассчитывать их отражение и находить фазовое условие для самосогласованных решений. В этом случае легче решать непосредственно уравнения Максвелла с граничными условиями, присущие каждой многослойной структуре.

Схема исследуемой структуры представлена на рис. 1.2. Поскольку данная система фактически содержит несколько волноводов, то для ее анализа целесообразно использовать метод частичных областей, хорошо апробированный при решении электродинамических задач.

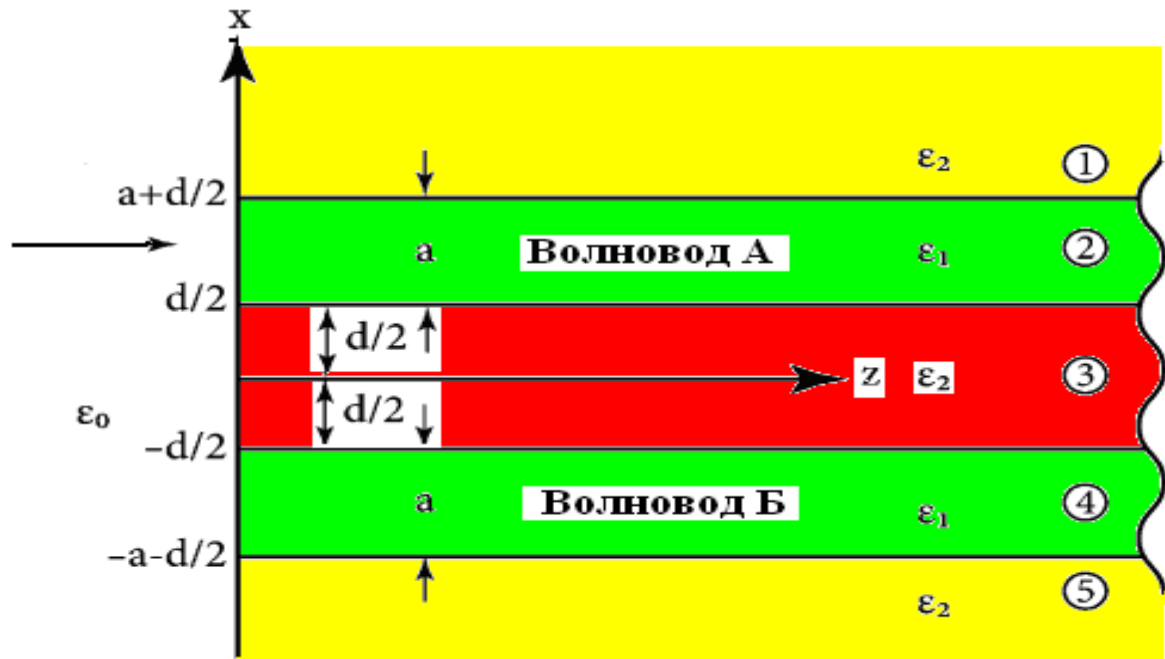


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение системы двух связанных диэлектрических волноводов

Связанные диэлектрические волноводы имеют ширину  $a$ . Переходной слой имеет толщину  $d$ . Как видно на схеме диэлектрические проницаемости исследуемой слоистой структуры чередуются и принимают два значения –  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , ( $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ). Из рисунка видно, что система является симметричной относительно продольной оси  $z$ . В этом случае решение электродинамической задачи значительно упрощается, поскольку можно выделить два отдельных режима – четный и нечетный (симметричный и антисимметричный). Следует отметить, что в общем случае такое разделение невозможно и задача становится значительно более громоздкой.

Постановка и решения задачи о распространении электромагнитной энергии в системе связанных волноводов производится стандартными методами на основе решения уравнения Гельмгольца:

$$\Delta \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0, \quad (1.2)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $k = \frac{\omega}{c}$  – волновое число.

Решение этого уравнения в общем случае являются две волны, направления, распространения которых противоположны. Следующим этапом решения задачи является «сшивание» решений уравнения Гельмгольца на границах диэлектрических волноводов. Для этого используются условия непрерывности тангенциальных составляющих электромагнитного поля на границах раздела сред [25]. В дальнейшем рассматривается  $H_y$  – поляризация.

В уравнениях 2.3 учитывается экспоненциальное спадание поля за пределами связанных волноводов, а также запредельный характер переходного слоя.

В этом случае можно записать следующие выражения компоненты напряженности магнитного поля в частичных областях исследуемой системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{yn}^{(1)}(x) = H_n \exp(-q_n(x - a - \frac{d}{2})), \\ (a + \frac{d}{2} \leq x \leq \infty), \\ H_{yn}^{(2)}(x) = F_n \sin p_n(x - \frac{d}{2}) + G_n \cos p_n(x - \frac{d}{2}), \\ (\frac{d}{2} \leq x \leq a + \frac{d}{2}), \\ H_{yn}^{(3)}(x) = D_n \operatorname{sh} q_n x + E_n \operatorname{ch} q_n x, \\ (-\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2}), \\ H_{yn}^{(4)}(x) = B_n \sin p_n(x + \frac{d}{2}) + C_n \cos p_n(x + \frac{d}{2}), \\ (-a - \frac{d}{2} \leq x \leq -\frac{d}{2}), \\ H_{yn}^{(5)}(x) = A_n \exp(q_n(x + a + \frac{d}{2})), \\ (-\infty \leq x \leq -a - \frac{d}{2}). \end{array} \right. \quad (1.3)$$

$$\text{где } p_n^2 = k_1^2 - \beta_n^2, \quad q_n^2 = \beta_n^2 - k_2^2,$$

$k_1$  и  $k_2$  – волновые числа связанных волноводов,  $\beta$  – постоянная распространения.

Для нахождения напряженностей электрического поля воспользуемся уравнением Максвелла:

$$\text{rot } \vec{E} = -i\omega\mu\mu_0 \vec{H}, \quad \text{rot } \vec{H} = i\omega\varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}. \quad (1.4)$$

Отсюда можно получить выражение для продольной компоненты электрического поля:

$$E_z = \frac{1}{i\omega\varepsilon\varepsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial x}. \quad (1.5)$$

Из уравнений (2.3) и (2.5) получаем следующие выражения для напряженности электрического поля в частичных областях:

$$\left\{ \begin{array}{l}
E_z^{(1)} = \frac{1}{i\omega\varepsilon_2\varepsilon_0} \cdot H_n \exp(-q_n(x-a-\frac{d}{2})) \cdot (-q_n), \\
(a + \frac{d}{2} \leq x \leq \infty), \\
E_z^{(2)} = \frac{1}{i\omega\varepsilon_1\varepsilon_0} \cdot F_n \cos p_n(x-\frac{d}{2}) \cdot p_n - G_n \sin p_n(x-\frac{d}{2}) \cdot p_n, \\
(\frac{d}{2} \leq x \leq a + \frac{d}{2}), \\
E_z^{(3)} = \frac{1}{i\omega\varepsilon_2\varepsilon_0} \cdot D_n \operatorname{ch} q_n x \cdot q_n + E_n \operatorname{sh} q_n x \cdot q_n, \\
(-\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2}), \\
E_z^{(4)} = \frac{1}{i\omega\varepsilon_1\varepsilon_0} \cdot B_n \cos p_n(x+\frac{d}{2}) \cdot p_n - C_n \sin p_n(x+\frac{d}{2}) \cdot p_n, \\
(-a - \frac{d}{2} \leq x \leq -\frac{d}{2}), \\
E_z^{(5)} = \frac{1}{i\omega\varepsilon_2\varepsilon_0} \cdot A_n \exp q_n(x+a+\frac{d}{2}) \cdot q_n, \\
(-\infty \leq x \leq -a - \frac{d}{2}).
\end{array} \right. \quad (1.6)$$

Поскольку в данном случае поля волны содержит продольную составляющую только электрического поля, то решение задачи проводится для  $E$  – волны. В общем случае при сшивании полей на границе раздела необходимо решать систему из восьми уравнений. Однако в рассматриваемом симметричном случае порядок системы можно сократить вдвое за счет разделения на четные и нечетные режимы. В этом случае можно записать следующие соотношения между неизвестными коэффициентами. Для нечетных мод  $H_n = -A_n$ ,  $G_n = -C_n$ ,  $F_n = B_n$ ,

$E_n = 0$ , для четных мод  $H_n = A_n$ ,  $G_n = C_n$ ,  $F_n = -B_n$  и  $D_n = 0$ .

Поэтому в дальнейшем все преобразования производятся отдельно для этих двух режимов.

Для формирования системы алгебраических уравнений воспользуемся граничными условиями для тангенциальных компонент напряженностей электрического и магнитного поля. В результате применения граничных условий для магнитного поля получаем следующие уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_n \sin p_n a + G_n \cos p_n a = H_n, \\ (x = a + \frac{d}{2}), \\ D_n \operatorname{sh} q_n \frac{d}{2} + E_n \operatorname{ch} q_n \frac{d}{2} = G_n, \\ (x = \frac{d}{2}), \\ D_n \operatorname{sh} q_n (-\frac{d}{2}) + E_n \operatorname{ch} q_n (-\frac{d}{2}) = C_n, \\ (x = -\frac{d}{2}), \\ B_n \sin p_n (-a) + C_n \cos p_n (-a) = A_n, \\ (x = -a - \frac{d}{2}). \end{array} \right. \quad (1.7)$$

Аналогичным образом получаем уравнения для напряженностей электрического поля:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{F_n \cdot p_n \cdot \cos p_n a - G_n \cdot p_n \cdot \sin p_n a}{i\omega \varepsilon_1 \varepsilon_0} = -\frac{H_n q_n}{i\omega \varepsilon_2 \varepsilon_0}, \\
(x = a + \frac{d}{2}), \\
\frac{D_n \cdot q_n \cdot \operatorname{ch} q_n \frac{d}{2} + E_n \cdot q_n \cdot \operatorname{sh} q_n \frac{d}{2}}{i\omega \varepsilon_2 \varepsilon_0} = \frac{F_n p_n}{i\omega \varepsilon_1 \varepsilon_0}, \\
(x = \frac{d}{2}), \\
\frac{D_n \cdot q_n \cdot \operatorname{ch} q_n (-\frac{d}{2}) + E_n \cdot q_n \cdot \operatorname{sh} q_n (-\frac{d}{2})}{i\omega \varepsilon_2 \varepsilon_0} = \frac{B_n p_n}{i\omega \varepsilon_1 \varepsilon_0}, \\
(x = -\frac{d}{2}), \\
\frac{B_n \cdot p_n \cdot \cos p_n (-a) - C_n \cdot p_n \cdot \sin p_n (-a)}{i\omega \varepsilon_1 \varepsilon_0} = \frac{A_n q_n}{i\omega \varepsilon_2 \varepsilon_0}, \\
(x = -a - \frac{d}{2}).
\end{array} \right. \quad (1.8)$$

В итоге получается две системы линейных алгебраических уравнений, соответствующей четному и нечетному режимам работы системы связанных волноводов. Каждая из систем может решаться отдельно, поскольку содержит свой набор неизвестных амплитуд.

Четные моды:

$$\left\{ \begin{array}{l} -A_n - \sin p_n a \cdot B_n + \cos p_n a \cdot C_n + a_{14} E_n = 0, \\ a_{21} A_n + a_{22} B_n - C_n + chq_n \frac{d}{2} \cdot E_n = 0, \\ \frac{q_n}{i\omega\epsilon_2\epsilon_0} A_n - \frac{p_n \cdot \cos p_n a}{i\omega\epsilon_1\epsilon_0} B_n - \frac{p_n \cdot \sin p_n a}{i\omega\epsilon_1\epsilon_0} C_n + a_{34} E_n = 0, \\ a_{41} A_n + \frac{p_n}{i\omega\epsilon_1\epsilon_0} B_n + a_{43} C_n + \frac{q_n \cdot shq_n \frac{d}{2}}{i\omega\epsilon_2\epsilon_0} E_n = 0, \end{array} \right. \quad (1.9)$$

где  $a_{14}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{34}$ ,  $a_{41}$ ,  $a_{43}$  – элементы матрицы  $4 \times 4$ , которые равны нулю.

Нечетные моды:

$$\left\{ \begin{array}{l} -H_n + \sin p_n a \cdot F_n + \cos p_n a \cdot G_n + a_{14} D_n = 0, \\ a_{21} H_n + a_{22} F_n - G_n + shq_n \frac{d}{2} \cdot D_n = 0, \\ \frac{q_n}{i\omega\epsilon_2\epsilon_0} H_n + \frac{p_n \cdot \cos p_n a}{i\omega\epsilon_1\epsilon_0} F_n - \frac{p_n \cdot \sin p_n a}{i\omega\epsilon_1\epsilon_0} G_n + a_{34} D_n = 0, \\ a_{41} H_n - \frac{p_n}{i\omega\epsilon_1\epsilon_0} F_n + a_{43} G_n + \frac{q_n \cdot chq_n \frac{d}{2}}{i\omega\epsilon_2\epsilon_0} D_n = 0. \end{array} \right. \quad (1.10)$$

Для того чтобы данные системы однородных уравнений имели нетривиальные решения, необходимо чтобы их определители были равны нулю. Это условие позволяет получить два характеристических уравнения для определения волновых чисел волн, распространяющихся в исследуемой многослойной структуре.

Для четных мод полученное дисперсионное уравнение будет иметь вид:

$$\operatorname{tg} p_n a - \frac{2rp_n q_n}{r^2 p_n^2 - q_n^2 + (r^2 p_n^2 + q_n^2) \exp(-q_n d)} = 0. \quad (1.11)$$

Для нечетных мод:

$$\operatorname{tg} p_n a - \frac{2rp_n q_n}{r^2 p_n^2 - q_n^2 - (r^2 p_n^2 + q_n^2) \exp(-q_n d)} = 0, \quad (1.12)$$

$$\text{где } r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1},$$

$\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость волноводов.

Решение этих уравнений позволяет построить так называемые дисперсионные диаграммы, по которым можно судить о наличии или отсутствии волноводных режимов для различных значений независимых параметров системы: толщины волноводов и материальных параметров сред, из которых они изготовлены.

Поскольку уравнения (1.11) и (1.12) являются трансцендентными, то в общем случае они не имеют аналитического решения. Его можно получить только для определенных предельных переходов и упрощающих предположений. Поэтому данные уравнения решались численно. Был выбран графический метод решения, который обеспечивает достаточную точность и позволяет наглядно представлять результаты решения для одномодовых и многомодовых режимов.

На рис. 1.2 и 1.3 представлены зависимости левой части дисперсионного уравнения от безразмерных постоянных распространения, нормированных на волновое число в свободном пространстве.

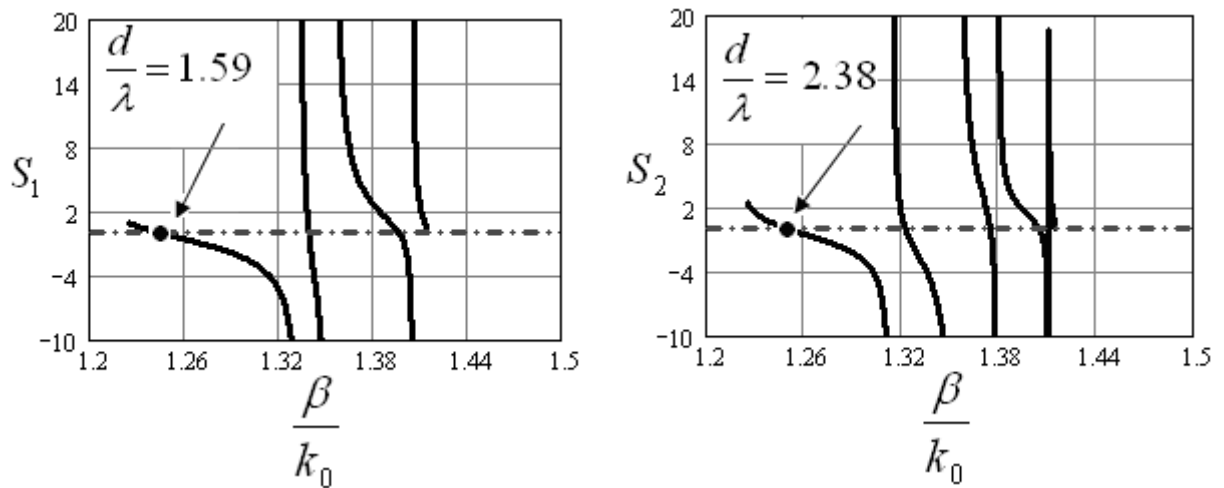


Рисунок 1.3 – Зависимость левой части дисперсионного уравнения от постоянной распространения в случае четных мод

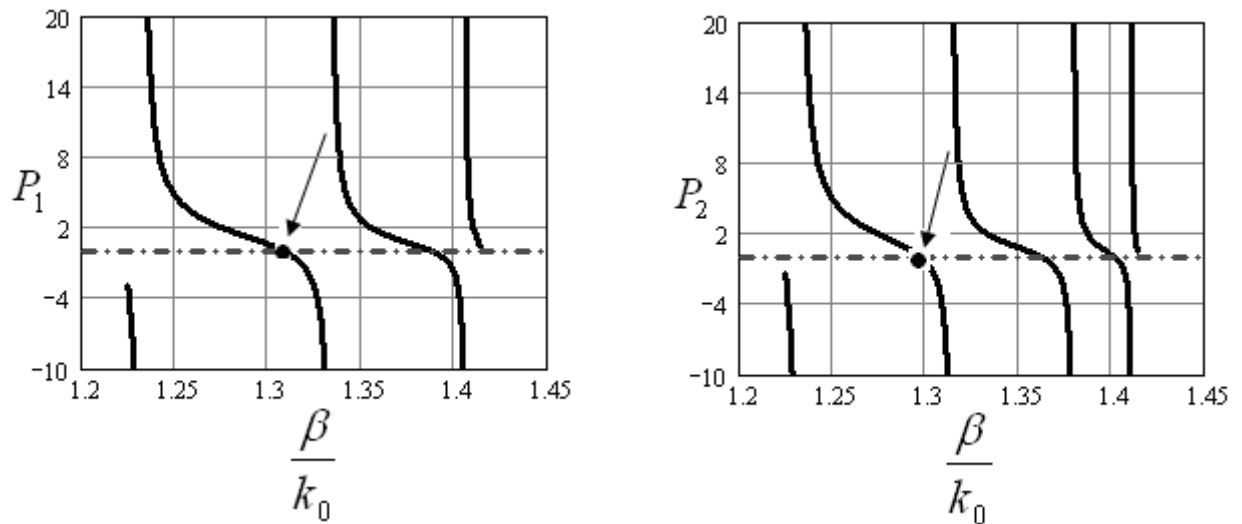


Рисунок 1.4 – Зависимость левой части дисперсионного уравнения от постоянной распространения в случае нечетных мод

На данных графиках левая часть дисперсионного уравнения для симметричных и антисимметричных мод обозначена так:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ . Здесь представлены графики для четных и нечетных мод при различных значениях толщины переходного слоя  $d$ . Штриховой прямой показана нулевая ось. Следовательно, корни дисперсионного уравнения находятся в

точках пересечения этой оси с кривыми, которые определяют левую часть дисперсионного уравнения. Стрелками на рисунках показана одна из таких точек. Ее абсцисса дает нам искомое решение, которое затем заносится в таблицу для формирования итоговой дисперсионной диаграммы.

Таблицы 1.1 – 3.3 содержат решение дисперсионного уравнения для четных мод и различных значений нормированной толщины переходного слоя.

Таблица 1.1 – Результаты получения корней дисперсионного уравнения для четных мод при диэлектрической проницаемости сердцевины –  $\varepsilon_1 = 2$  и при значении  $k_0 d = 0.001$ .

|    | $k_0 a$ | 1     | 2     | 3     | 4     |
|----|---------|-------|-------|-------|-------|
| 0  | 0.1     | 1.225 | 0     | 0     | 0     |
| 1  | 0.5     | 1.236 | 0     | 0     | 0     |
| 2  | 1       | 1.26  | 0     | 0     | 0     |
| 3  | 2       | 1.306 | 0     | 0     | 0     |
| 4  | 3       | 1.337 | 0     | 0     | 0     |
| 5  | 4       | 1.356 | 0     | 0     | 0     |
| 6  | 5       | 1.369 | 1.234 | 0     | 0     |
| 7  | 6       | 1.378 | 1.263 | 0     | 0     |
| 8  | 7       | 1.385 | 1.289 | 0     | 0     |
| 9  | 8       | 1.39  | 1.31  | 0     | 0     |
| 10 | 9       | 1.393 | 1.326 | 0     | 0     |
| 11 | 10      | 1.396 | 1.339 | 1.244 | 0     |
| 12 | 11      | 1.399 | 1.349 | 1.264 | 0     |
| 13 | 12      | 1.401 | 1.358 | 1.283 | 0     |
| 14 | 13      | 1.402 | 1.364 | 1.298 | 0     |
| 15 | 14      | 1.404 | 1.37  | 1.311 | 1.233 |
| 16 | 15      | 1.405 | 1.375 | 1.322 | 1.249 |

Здесь видно, что существует диапазон значений нормированной постоянной распространения, в котором реализуется одномодовый режим. Для ряда практических приложений такой режим представляет большой интерес.

Таблица 1.2 – Результаты получения корней дисперсионного уравнения для четных мод при значении  $k_0 d = 1$ .

|    | $k_0 \alpha$ | 1     | 2     | 3     | 4     |
|----|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 0  | 0.1          | 1.225 | 0     | 0     | 0     |
| 1  | 0.5          | 1.238 | 0     | 0     | 0     |
| 2  | 1            | 1.27  | 0     | 0     | 0     |
| 3  | 2            | 1.33  | 0     | 0     | 0     |
| 4  | 3            | 1.363 | 0     | 0     | 0     |
| 5  | 4            | 1.381 | 0     | 0     | 0     |
| 6  | 5            | 1.391 | 1.235 | 0     | 0     |
| 7  | 6            | 1.397 | 1.268 | 0     | 0     |
| 8  | 7            | 1.401 | 1.298 | 0     | 0     |
| 9  | 8            | 1.404 | 1.32  | 0     | 0     |
| 10 | 9            | 1.406 | 1.337 | 0     | 0     |
| 11 | 10           | 1.407 | 1.35  | 1.245 | 0     |
| 12 | 11           | 1.408 | 1.36  | 1.268 | 0     |
| 13 | 12           | 1.409 | 1.368 | 1.288 | 0     |
| 14 | 13           | 1.41  | 1.374 | 1.304 | 0     |
| 15 | 14           | 1.41  | 1.379 | 1.318 | 1.233 |
| 16 | 15           | 1.411 | 1.384 | 1.329 | 1.251 |

Таблица 1.3 – Корни дисперсионного уравнения для четных мод при значении  $k_0 d = 10$ .

|    | $k_0 a$ | 1     | 2     | 3     | 4     |
|----|---------|-------|-------|-------|-------|
| 0  | 0.1     | 1.225 | 0     | 0     | 0     |
| 1  | 0.5     | 1.231 | 0     | 0     | 0     |
| 2  | 1       | 1.241 | 0     | 0     | 0     |
| 3  | 2       | 1.272 | 0     | 0     | 0     |
| 4  | 3       | 1.304 | 0     | 0     | 0     |
| 5  | 4       | 1.33  | 0     | 0     | 0     |
| 6  | 5       | 1.349 | 1.23  | 0     | 0     |
| 7  | 6       | 1.363 | 1.249 | 0     | 0     |
| 8  | 7       | 1.373 | 1.27  | 0     | 0     |
| 9  | 8       | 1.381 | 1.29  | 0     | 0     |
| 10 | 9       | 1.386 | 1.308 | 1.225 | 0     |
| 11 | 10      | 1.391 | 1.323 | 1.237 | 0     |
| 12 | 11      | 1.394 | 1.335 | 1.253 | 0     |
| 13 | 12      | 1.397 | 1.346 | 1.269 | 0     |
| 14 | 13      | 1.399 | 1.354 | 1.284 | 0     |
| 15 | 14      | 1.401 | 1.361 | 1.3   | 1.23  |
| 16 | 15      | 1.402 | 1.367 | 1.31  | 1.243 |

На рис. 1.4 представлена дисперсионная диаграмма четных мод для различных значений нормированной толщины переходного слоя. По оси абсцисс отложена нормированная толщина волноводов.

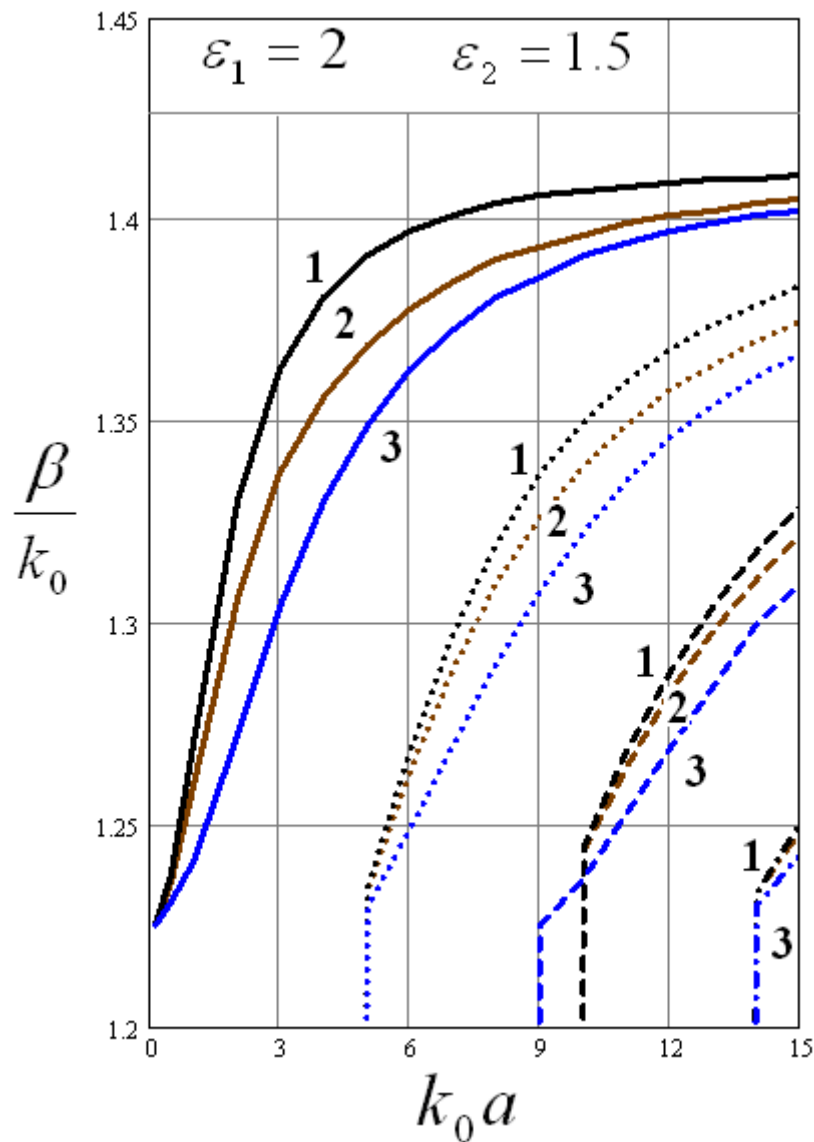


Рисунок 1.4 – Дисперсионные характеристики четных мод для различных значений нормированной толщины переходного слоя

Кривые 1 соответствуют значению  $k_0 d = 0.001$ ; кривые 2 –  $k_0 d = 1$ ; кривые 3 –  $k_0 d = 10$ . Из графиков видно, что четная основная мода не имеет отсечки по параметру  $k_0 a$ , то есть она существует практически для любых значений толщины волновода. Очевидно, что данный вывод можно сделать безотносительно к толщине переходного слоя. На дисперсионной диаграмме можно выделить области значений параметров  $k_0 a$ , в которых реализуется одномодовый, двухмодовый и т.д. режимы.

На рис. 1.5 изображена дисперсионная диаграмма для нечетных мод. Обозначения здесь приняты такие же, как и на рис. 2.3.

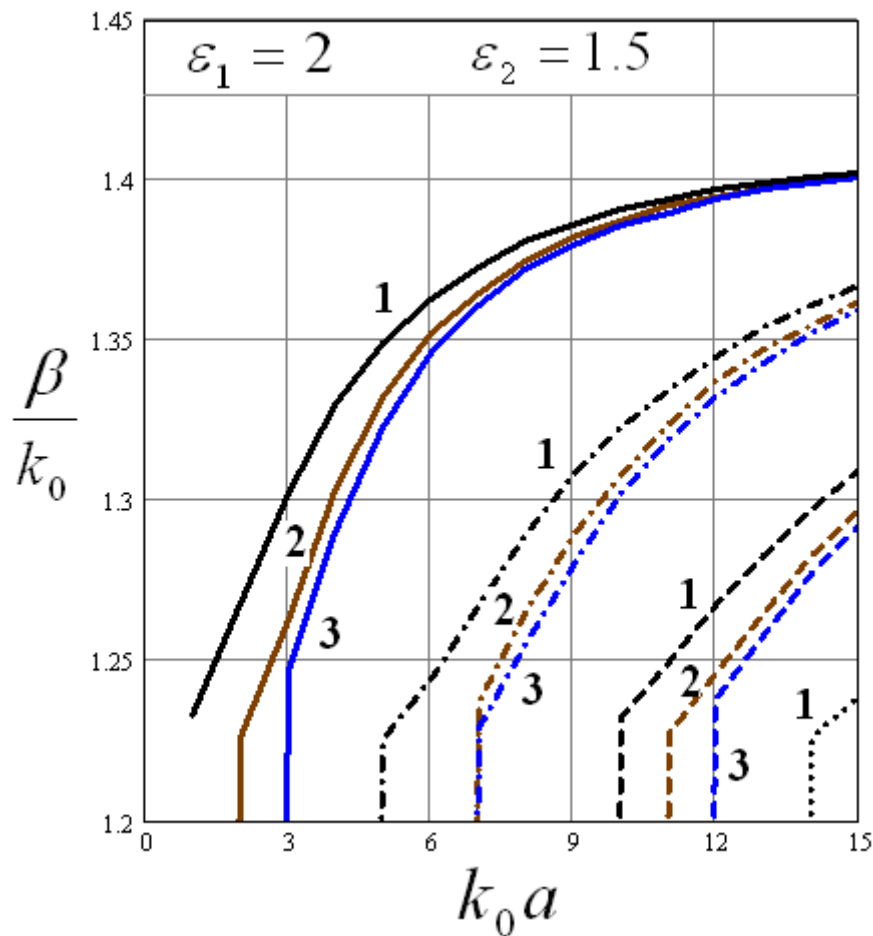


Рисунок 1.5 – Дисперсионные характеристики нечетных мод для различных значений нормированной толщины переходного слоя

В этом случае на оси симметрии системы амплитуда поля равна нулю. В данном случае реализуется отсечка дисперсионных кривых по параметрам  $k_0 a$  для всех значений переходного слоя. Это означает, что для возбуждения нечетных мод в системе связанных волноводов необходимо обеспечить определенное значение толщины этих волноводов. Из сравнения графиков на рис. 1.4 и 1.5 видно, что безразмерная постоянная распространения для четных мод оказывается больше, чем для нечетных при прочих равных

условиях. То есть данным двум режимам соответствуют различные фазовые скорости.

На рис. 1.6 представлена дисперсионная диаграмма для четных мод и увеличенного значения диэлектрической проницаемости волновода ( $\varepsilon_1 = 4$ ).

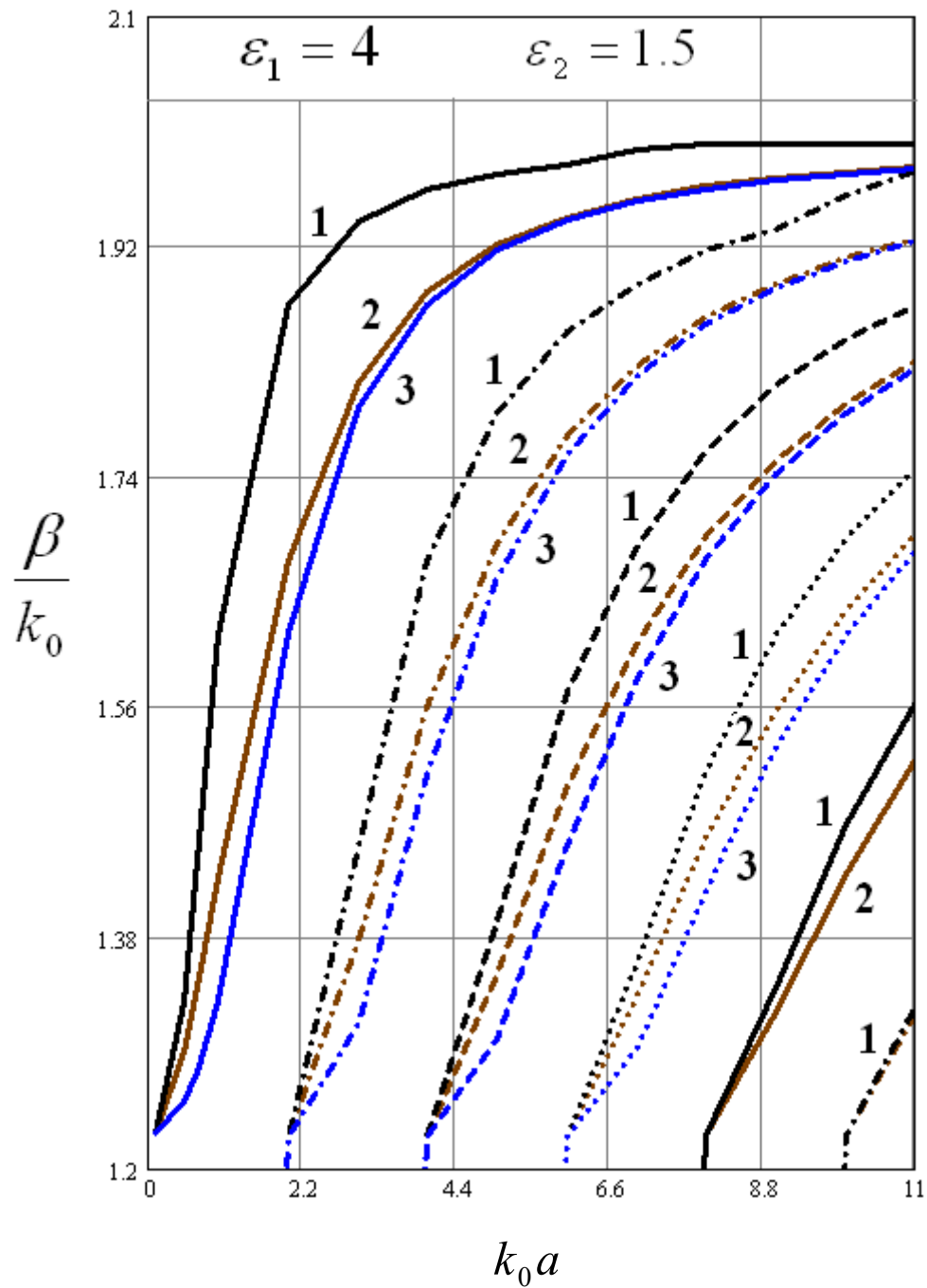


Рисунок 1.6 – Дисперсионные характеристики четных мод при различных значениях  $k_0 d$

Известно, что свойства диэлектрических волноводов во многом определяются диэлектрической проницаемостью материалов, из которых они изготовлены, поэтому в данной работе построенная теоретическая модель использовалась для исследования влияния диэлектрической проницаемости на дисперсионные свойства системы связанных волноводов.

Из рис. 1.6 очевидно, что увеличение диэлектрической проницаемости приводит к значительному повышению нормированной постоянной распространения и сужению области одномодового режима. Количество возбуждаемых мод в заданном диапазоне изменения нормированной толщины волновода также увеличивается. Полученные результаты находятся в соответствии с известными закономерностями распространения электромагнитных волн в диэлектрических средах. Увеличение диэлектрической проницаемости сопровождается уменьшением фазовой скорости и длины волны излучения.

На рис. 1.7 представлен график дисперсионных характеристик для нечетных мод при ином значении диэлектрической проницаемости волновода ( $\varepsilon_1 = 4$ ). Из графиков видно, что увеличение диэлектрической проницаемости приводит к увеличению количества мод при различных значениях  $k_0 d$ .

В данном случае реализуется отсечка дисперсионных кривых по параметрам  $k_0 a$  для всех значений переходного слоя. И поэтому необходимо обеспечить определенное значение толщины волноводов для возбуждения нечетных мод в системе связанных этих волноводов. Также виден большой контраст между показателями преломления связанных волноводов и окружающей оболочки. Видно, что здесь происходит существенное сгущение модового спектра и сужение одномодовой области по сравнению с рис.1.3 и 1.4.

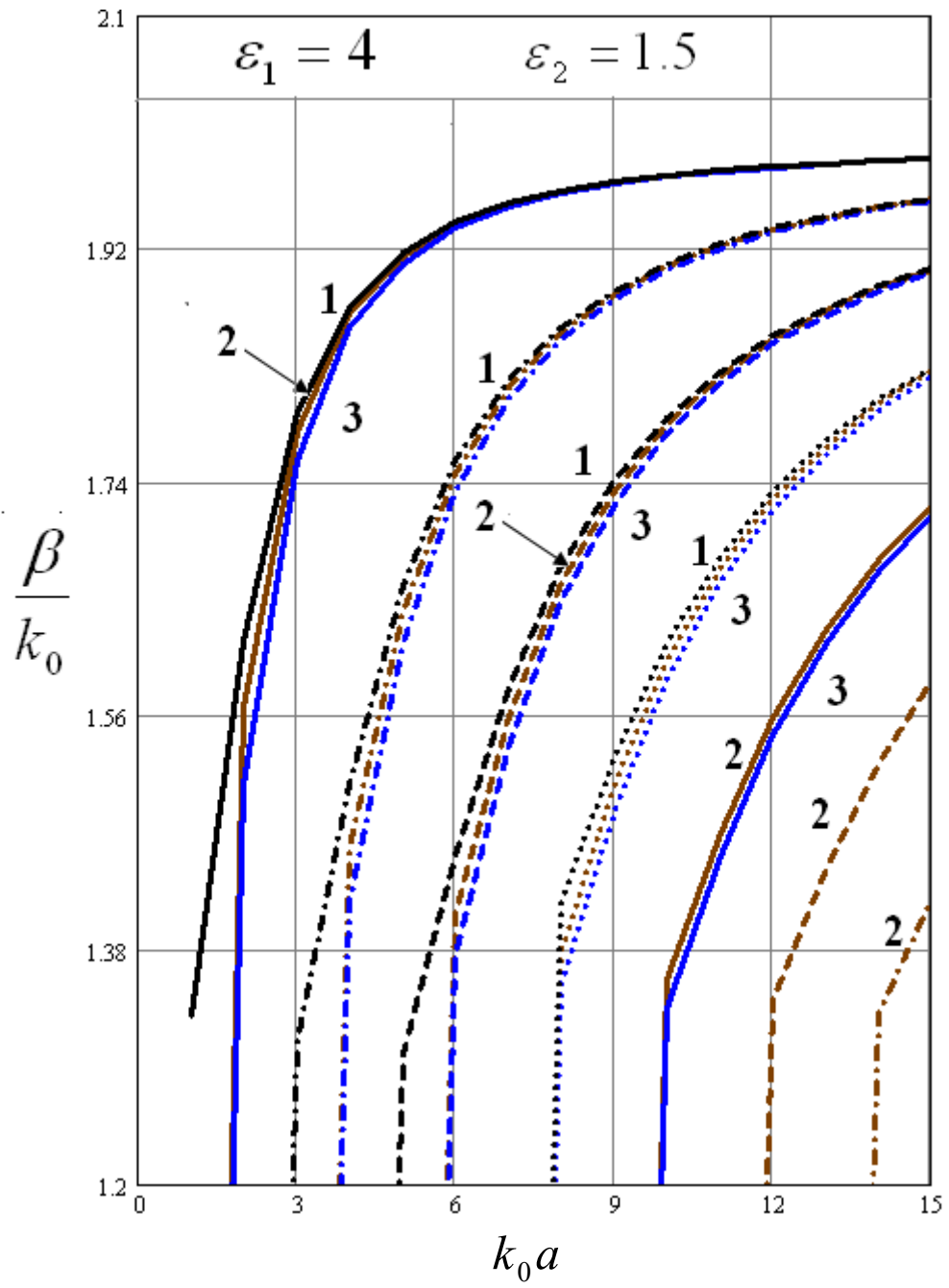


Рисунок 1.7 – Дисперсионные характеристики нечетных мод при различных значениях  $k_0 d$

## 2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Волоконный лазер — лазер, резонатор которого построен на базе оптического волокна, внутри которого генерируется излучение на длине волны. При полностью волоконной реализации такой лазер называется цельноволоконным, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера он называется волоконно-дискретным или гибридным.

Волоконные лазеры создаются на основе активного оптического волокна - кварцевого волокна, легированного редкоземельными элементами (иттербием, эрбием, неодимом, тулием, гольмием и др.). Накачка таких лазеров осуществляется с помощью полупроводниковых лазеров, длина волны излучения которых совмещается с центром линии поглощения активного материала.

Также как и в случае твердотельных лазерных источников, наибольшее распространение в качестве активных легирующих добавок получили лантаноиды, или редкоземельные элементы.

### 2.1 ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Для производства волоконных световодов используется ряд технологических процессов:

- MCVD (модифицированное химическое осаждение из газовой фазы);
- OVD (внешнее осаждение из газовой фазы);
- VAD (аксиальное осаждение из газовой фазы);

- Осаждение с использованием плазмы PCVD и SPCVD.

Для введения активной примеси в этих процессах наибольшее распространение нашли метод пропитки, когда непроплавленный пористый материал сердцевины пропитывается раствором соли активной добавки, и легирование из летучих соединений. [3]

Следует отметить, что максимальная концентрация активных ионов в сетке кварцевого стекла невелика и ограничивается их растворимостью, а также возникновением кооперативных эффектов. Это приводит к тому, что длина активной среды волоконного лазера может достигать нескольких десятков метров. Поэтому естественным требованием к активным волоконным световодам является наличие достаточно низких нерезонансных оптических потерь. Приемлемое значение потерь составляет до 10 дБ/км, в этом случае их влияние на эффективность лазера составляет не более нескольких процентов. На рис 2.1 представлена зависимость оптических потерь от длины волны в активном световоде, легированном ионами  $\text{Yb}^{3+}$  с концентрацией  $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Сердцевина данного образца была также легирована  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что позволяет как увеличить предел растворимости редкоземельных ионов в кварцевом стекле, так и уменьшить вероятности их кластеризации, приводящей к кооперативной ап-конверсии. [4]

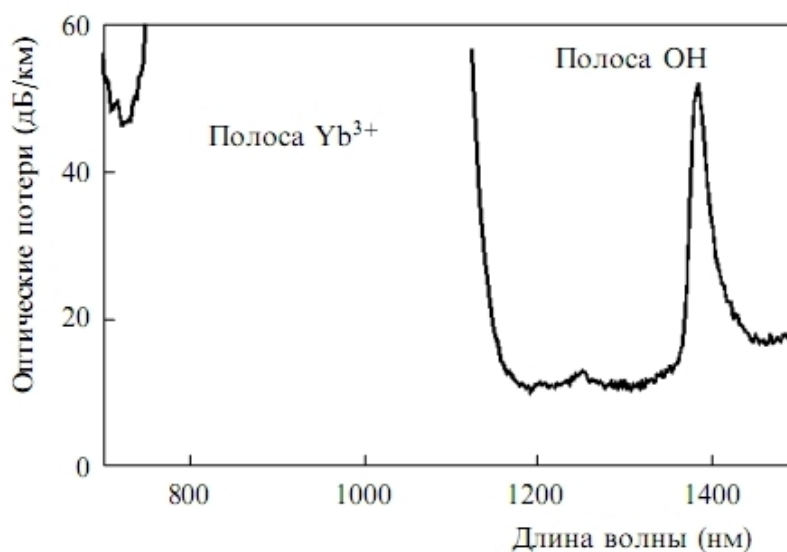


Рисунок 2.1 – Зависимость оптических потерь от длины активном световоде, легированном ионами  $\text{Yb}^{3+}$  с концентрацией  $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

*Лазеры на основе световодов, легированных ионами  $\text{Nd}^{3+}$ .* Этот лазер, излучающий в области 1,06 мкм, был первым лазером, который использовал накачку в оболочку. Это определялось тем, что первые мощные полупроводниковые системы накачки имели невысокую яркость, и для ввода излучения накачки необходимо было использовать активные световоды с размером внутренней оболочки в несколько сотен микрометров. В результате инверсия населенности была также небольшой, и генерация оказывалась возможной лишь в системах, работающих по четырехуровневой схеме, где отсутствует перепоглощение сигнала.

*Лазеры на основе световодов, легированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ .* Эффективное использование накачки в оболочку световодов, легированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , затруднено тем, что генерация в области 1,8 - 2 мкм происходит по трехуровневой схеме. Однако ситуация облегчается наличием мощной полосы поглощения с центром на 787 нм, обусловленной переходом  $^3\text{H}_4$ - $^3\text{F}_4$ . Кроме того, полосы поглощения и люминисценции, обусловленные переходом  $^3\text{H}_4$ - $^3\text{H}_6$ , в кварцевом стекле, легированном ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , существенно разнесены. Так, если центр полосы поглощения приходится в область 1600 нм, то центр линии люминисценции – в область 1800 нм. При этом ширина линии люминисценции составляет около 300 нм. Все это позволяет получить достаточную степень инверсии, при которой перепоглощение сигнала является несущественным в спектральной области  $\lambda > 1,8$  мкм.

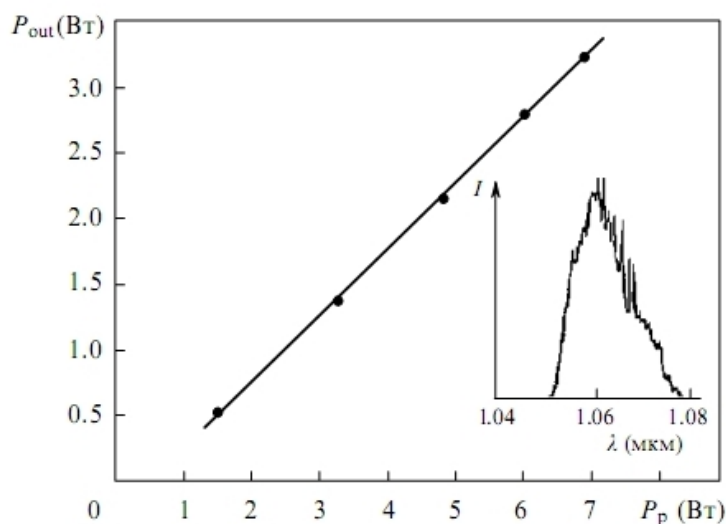


Рисунок 2.2 – Зависимость выходной мощности неодимового волоконного лазера от мощности накачки. На вставке – спектр генерации лазера

Лазеры на основе световодов, легированных ионами  $Yb^{3+}$ . Энергетическая схема уровней ионов иттербия представлена на рис. 2.3. Отсутствие других энергетических уровней вплоть до УФ диапазона означает, что в данной системе должно отсутствовать поглощение из возбужденного состояния. Это позволяет существенно увеличить концентрацию активной примеси по сравнению с такими распространенными легирующими добавками, как неодим и эрбий. Использование световодов с высокой концентрацией активной примеси в свою очередь позволяет уменьшить длину активной среды лазера, а значит, и влияние дополнительных оптических потерь.

Иттербиевые лазеры в настоящее время являются наиболее распространенным типом волоконных лазеров с накачкой в оболочку.

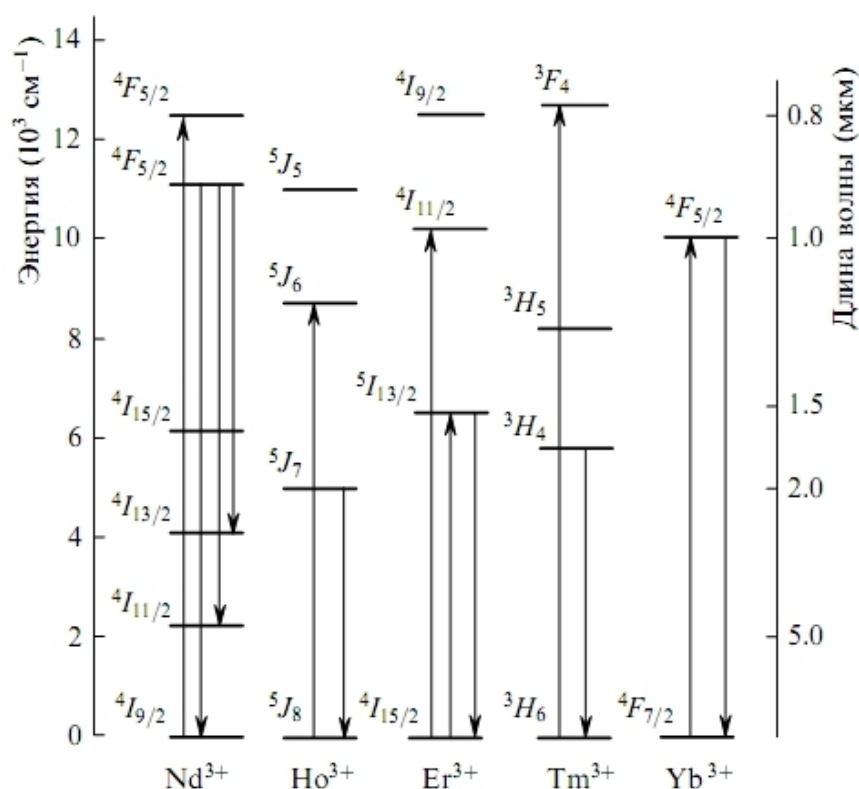


Рисунок 2.3 – Схема энергетических уровней ионов редкоземельных элементов

Лазеры на основе световодов, легированных ионами  $Er^{3+}$ . Ионы  $Er^{3+}$  в кварцевом стекле имеют полосу люминисценции с центром на 1,53 мкм, что позволяет реализовать волоконные лазеры и усилители для спектрального диапазона 1,53-1,6 мкм. Соответствующий спектр люминисценции ионов  $Er^{3+}$  в алюмогерманосиликатном стекле представлен на рис. 2.4. Источники излучения на основе волоконных световодов, легированных ионами эрбия, работают по трехуровневой схеме, что подразумевает необходимость достижения высокой степени инверсии населенности.

Для получения лазерной генерации в диапазоне 1,53-1,6 мкм чаще всего используют волоконные световоды, легированные одновременно ионами  $Yb^{3+}$  и  $Er^{3+}$ . В таких световодах эффективное поглощение накачки на длине

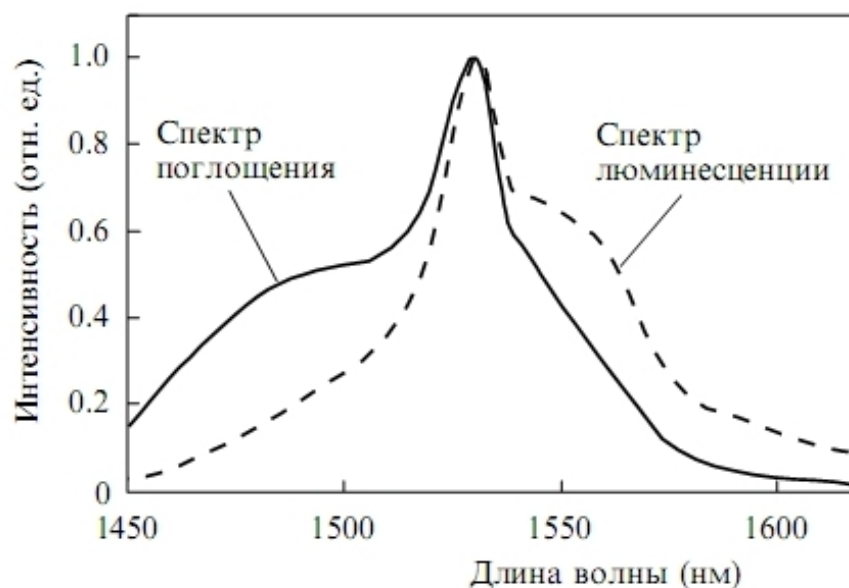


Рисунок 2.4 – Спектры поглощения и люминесценции ионов эрбия в алюмогерманосиликатном кварцевом стекле

волны 976 нм обеспечивается ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , которые передают энергию возбуждения ионам  $\text{Er}^{3+}$ . Такая передача оказывается возможной благодаря близости энергетических уровней  $^2\text{F}_{5/2}$  ионов иттербия и  $^4\text{I}_{11/2}$  – ионов эрбия. Одной из проблем реализации такого световода является выбор и воспроизведение правильного химического состава сердцевины. Так, для того чтобы снизить вероятность обратной передачи энергии, необходимо уменьшить время жизни ионов  $\text{Er}^{3+}$  на возбужденном уровне  $^4\text{I}_{11/2}$ , что достигается использованием фосфоросиликатного стекла для материала сердцевины. Кроме того, важным является выбор соотношения концентраций активных ионов.[2]

## активное эрбиевое волокно

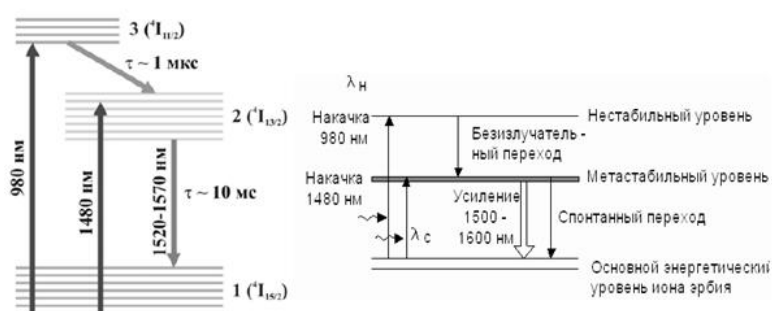
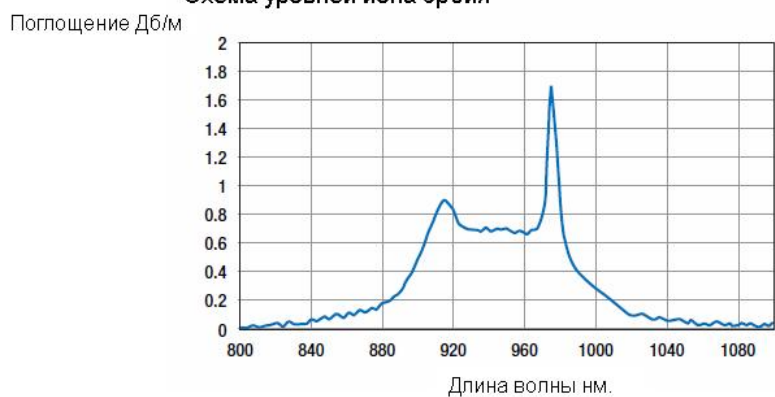


Схема уровней иона эрбия



Спектр длин волн поглощения эрбиевым волокном

Рис. 2.5 Усилительные свойства эрбиевого лазера

Лазеры на основе световодов, легированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ . Ионы имеют переход  $^5\text{I}_7 - ^5\text{I}_8$ , который может использоваться для получения лазерной генерации в области 2 мкм. Поскольку гольмиевые волоконные лазеры работают по трехуровневой схеме, то для получения инверсии населенности необходимо эффективное поглощение накачки. Обычно такие лазеры накачиваются полупроводниковыми лазерами.

### 3. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

К настоящему времени разработано несколько конструкций лазеров, работающих в режиме генерации последовательных фемтосекундных импульсов. Первоначально были созданы твердотельные лазеры с оптической накачкой, в которых синхронизация осуществлялась за счет эффекта Керра в активной среде. Затем были разработаны полупроводниковые насыщающие поглотители (SESAM), которые позволили создавать фемтосекундные лазеры на базе полупроводниковых и волоконных лазеров. Одним из наиболее эффективных методов синхронизации мод в волоконных лазерах оказался метод контроля и управления поляризацией мод генерации. Для управления поляризацией используется комплект оптических поляризационных элементов, который обеспечивает условия сохранения поляризации каждой моды в замкнутом контуре кольцевого лазера.

Схема, представленная на рис. 3.1, является основной схемой в данном дипломном проекте, которую мы будем использовать для изучения динамики поляризации эрбиевого волоконного лазера.

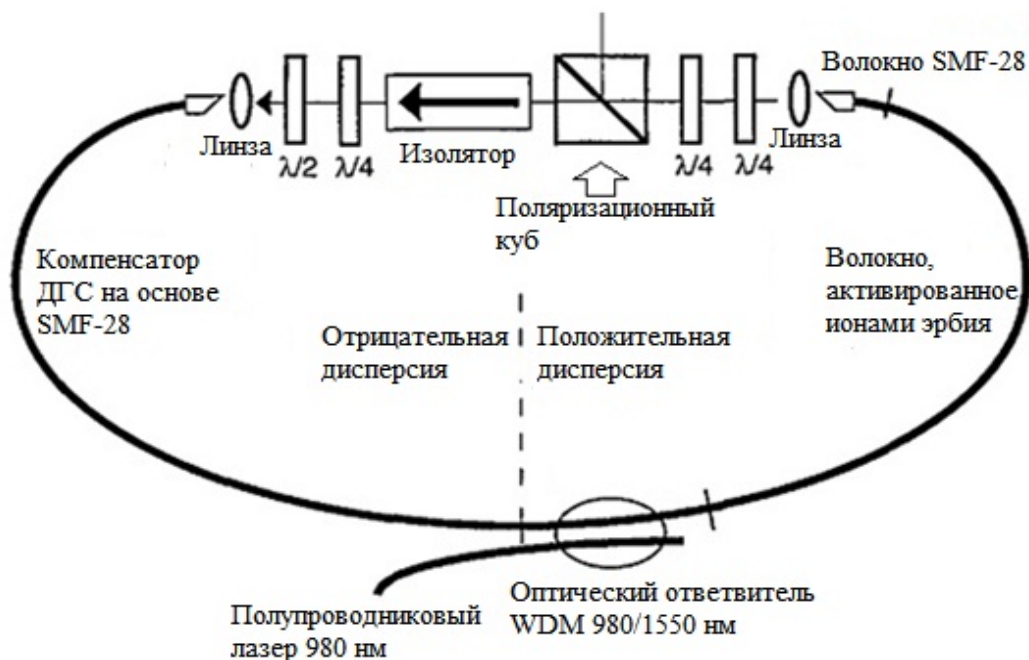


Рисунок 3.1 – Схема кольцевого волоконного лазера

Активная среда состоит из отрезка одномодового волокна, легированного ионами эрбия. Для накачки волоконного лазера используется излучение лазерного диода на длине волны 980 нм, которое вводилось в активное волокно через WDM-ответвитель 980/1550. Для получения генерации импульса с требуемыми показателями дисперсии групповых скоростей (ДГС) в резонатор добавляется отрезок одномодового волокна SMF-28.[5]

В качестве поляризатора используется поляризационно-зависимый фарадеевский изолятор, который также обеспечивает однонаправленный режим работы кольцевого лазера. Перед изолятором ставится поляризационный делительный куб, который разводит излучение с s- и p-поляризацией. Для настройки режима самосинхронизации мод с одной стороны располагаются две четвертьволновые пластинки и пластины  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$  с другой стороны.

Проход пучка лазерного излучения происходит следующим образом (рис. 3.2). Излучение от лазерного диода накачивает активное волокно через WDM-ответвитель 980/1550. Проходя через волокно с положительной дисперсией, импульс уширяется, затем при проходе через волокно с отрицательной дисперсией снова сужается и регулируется затем с помощью изолятора и волновых пластинок по бокам. [2]

Схема двунаправленного кольцевого лазера представлена на рис. 3.3. На схеме обозначены: 1 –  $90^0$ -ный фарадеевский вращатель; 2 – 980 нм полупроводниковый лазер накачки; 3 – кольцевой волоконно-оптический фильтр; 4,5 – 1550/980 нм спектрально-селективные волоконные ответвители; 6,7 – оптические изоляторы; 8 – фотоприемник; 9,10,14 – поляризационные элементы; 11 – усиливающая среда; 12,13 – волоконно-оптические ответвители.

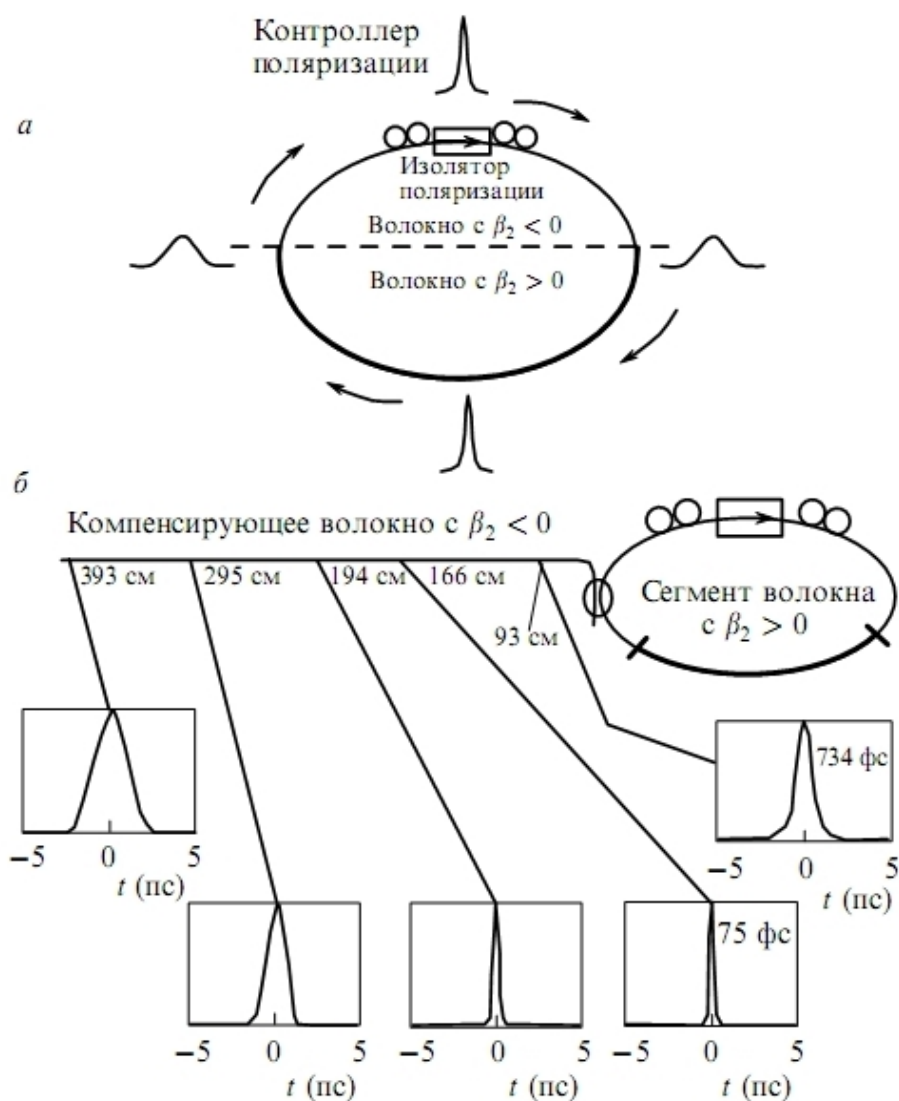


Рисунок 3.2 – Схема волоконного лазера, работающего в режиме уширения импульса (а), и компенсация чирпа на выходе лазера с помощью отрезка волоконного световода с отрицательной ДГС (б).[2]

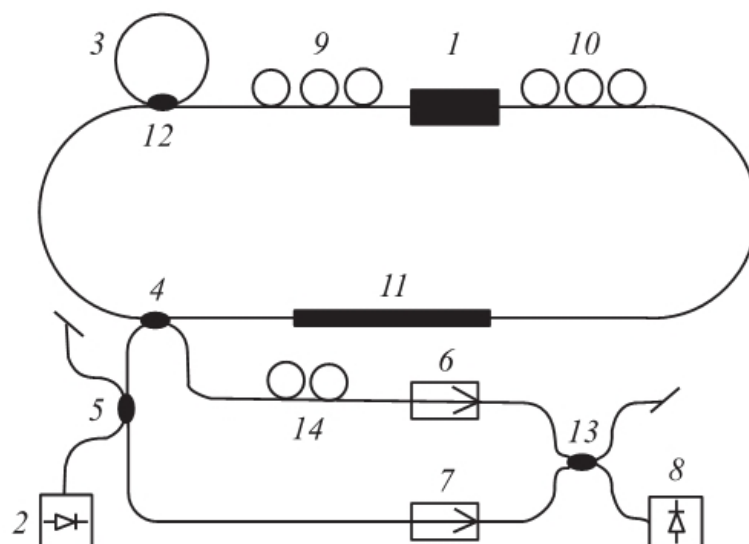


Рисунок 3.3 – Er-волоконный кольцевой двунаправленный лазер

На рис. 3.4 представлена схема волоконного лазера с насыщающимся поглотителем.

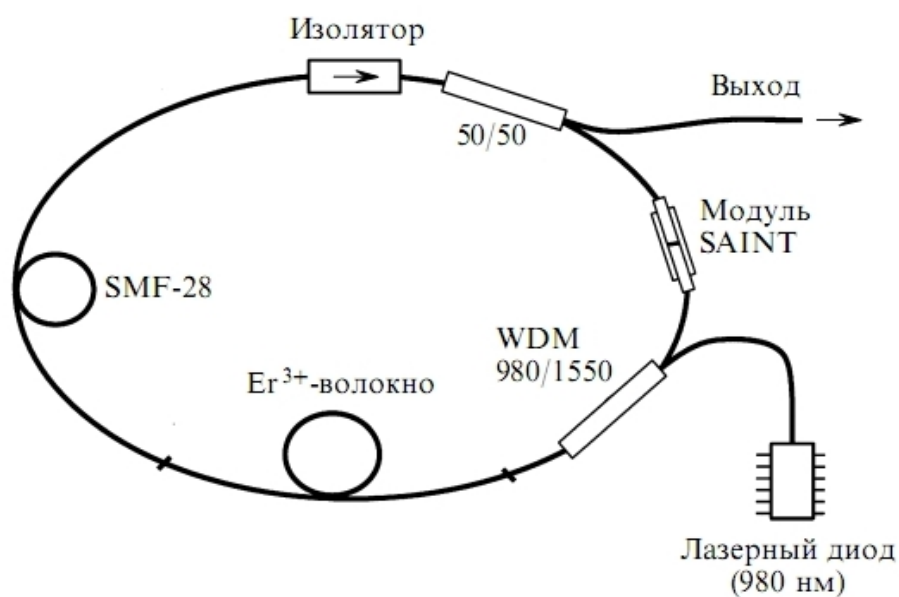


Рисунок 3.4 – Схема лазера с кольцевой схемой резонатора

Активной средой в данной схеме являлось  $\text{Er}^{3+}$  волокно длиной 1,25м, которое накачивалось через ответвитель (WDM) излучением диодного лазера на длине волны 980 нм в направлении распространения лазерного излучения

по кольцу. Для обеспечения однонаправленного режима генерации и минимизации поляризационно-модовой дисперсии в схему помещался двухкаскадный поляризационно-независимый изолятор с поляризационно-модовой дисперсией менее 100 фс. Излучение, выходящее из активного световода, проходило через второй ответвитель, в котором оно делилось в отношении 50/50. Для получения отрицательной дисперсии групповых скоростей, нужной для формирования импульсов в форме солитонов, в резонатор вводилось волокно SMF-28 длиной 8,5 м. Отдельные части кольцевой схемы располагались таким образом, чтобы поддержать за счет снижения мощности на насыщающемся поглотителе распространение импульса в резонаторе в виде солитона с повышенной энергией.[6]

#### 4. КОЛЬЦЕВОЙ ЛАЗЕР НА ЭРБИЕВОМ ВОЛОКНЕ, РАБОТАЮЩИЙ В РЕЖИМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД

Синхронизация мод при помощи вспомогательного импульса, полученная посредством нелинейного вращения поляризации, успешно использована для достижения устойчивой самосинхронизации мод в волоконных лазерах, легированных ионами редкоземельных элементов [1-3].

Структура макета состоит из однонаправленного кольцевого резонатора, включающего поляризатор, помещенный между двумя контроллерами поляризации. Основной принцип, отвечающий за синхронизацию мод, заключается в следующем.

Состояние поляризации импульса развивается нелинейно по двулучепреломляющему волокну вследствие сочетания эффектов фазовой самомодуляции и кроссмодуляции [6], вызванных двумя ортогональными компонентами поляризации, которые являются следствием оптического эффекта Керра. Контроллер поляризации устанавливается на выходе волокна таким образом, чтобы поляризационный изолятор пропускал центральную интенсивную часть импульса, но блокировал низко-интенсивные крылья

импульса. В зависимости от ориентации контроллеров поляризации может быть достигнута стабильная и пассивная синхронизация мод. Этот метод генерации ультракоротких импульсов может быть использован как для положительной, так и отрицательной дисперсии групповой скорости и был зарегистрирован с использованием огромного разнообразия редкоземельных элементов таких как эрбий, неодим, иттербий. Было предложено несколько теоретических приближений к этой задаче. Целью данного раздела является теоретическое рассмотрение условий исследования свойств синхронизации мод в эрбиевом волоконном лазере, работающем на длине волны 1,55 мкм. Синхронизация мод достигается путем нелинейного вращения поляризации в однонаправленном кольцевом резонаторе, содержащем поляризатор, помещенный между двух полуволновых пластин. В связи с опубликованной ранее работой [7], изменение знака хроматической дисперсии имеет сильные структурные последствия. На самом деле, в настоящем случае, точные локализованные решения основного уравнения могут быть практически стабильными. Были определены условия стабильности [8]. Вследствие этого можно прогнозировать не только режим работы лазера, но и характеристики импульса, что в случае положительной ДГС было невозможно.

За основу волоконного лазера генерирующего излучение в диапазоне взято активное вещество представляющее собой кварцевое стекло активированное ионами эрбия

Поскольку в кольцевом волоконном лазере не требуется зеркал, то расстояние между продольными модами генерации определяется оптической длиной кольца и определяется в соответствии с выражением

$$\Delta\omega = \omega_i - \omega_{i-1} = \frac{c}{2l}. \quad (4.1)$$

Условие (2.1) обеспечивает реализацию синхронизации мод, которая соответствует условию:

$$n \frac{\lambda_i}{2} = L. \quad (4.2)$$

В условиях генерации большого количества продольных мод, а именно ширина полосы усиления активной среды  $\Delta\Omega$  намного больше межмодового интервала  $\Delta\omega$ , время синхронизации продольных мод не реализуется. Отсутствие синхронизации приводит к случайному изменению мощности во времени на выходе лазера.

Известно [1], что если использовать физические эффекты, которые интенсивно воздействуют на пространственно временное расширение мощности в продольных модах, то необходимо обеспечить временную синхронизацию мод в резонаторе.

Поскольку временная точка синхронизации мод в резонаторе лазера перемещается с фазовой скоростью, то в выходном излучении наблюдается последовательность импульсов с постоянными интервалами  $C/2L$ .

В волоконных лазерах был разработан метод, основанный на управлении поляризацией продольных мод с целью достижения в определенные моменты времени синхронизацию мод.

Использование этого метода возможно в условиях использования поляризационных оптических элементов, которые устанавливаются на пути кольцевого распространения излучения в волоконном лазере.

Метод использования пассивной синхронизации мод при помощи эрбиевого волокна очень актуальный, так как на его основе можно построить компактную, стабильную, недорогую систему, для применения в различных сферах, таких как оптическая связь, локация, дальнометрия, медицина, обработка материалов.

Выходное излучение данной системы на длине волны 1,5 мкм при возможной пиковой энергии импульса до десятков киловатт, а его длительность меньше 100 фс. Один из способов увеличения энергии импульса это использование более длинного резонатора. Это снижает частоту следования импульсов, которые фиксированы по средней мощности, но зато увеличивается энергия импульса. Однако длинный волоконный резонатор создает проблемы, связанные с нелинейными эффектами.

В мощных лазерных системах для избегания больших пиковых интенсивностей импульса, импульс растягивают при помощи дисперсии и сжимают позже. Подобная идея может быть применена в волоконных лазерах при конструировании резонатора с разделением на положительную и отрицательную дисперсию. Импульс циркулирует в резонаторе, попеременно растягивается и сжимается, сокращая внутрирезонаторную пиковую мощность. Большие дисперсионные изменения ширины импульса за один проход наблюдаются в системе с неодимовым волокном. Поскольку дисперсия кварцевого стекла на длине волны 1,06 мкм позитивная, эти системы не содержат солитонных эффектов, которые принципиально ограничивают длительности импульса и энергии в эрбиевых систем.

Рассмотрен [1] способ извлечения большей мощности из системы в режиме добавления импульсов (РДИ). Обычно вывод энергии из волокна производится при помощи ответвителя, который снимает небольшую часть энергии резонатора, около 10%-20%. Эффективность ограничивается внутренними потерями (на оптических элементах, соединениях). РДИ системы основаны на нелинейных интерферометрах. Интерферометр имеет два порта: один составляет часть резонатора, а второй отводит мощность от лазера в целях сокращения импульса путем удаления крыльев. С помощью РДИ порта ответвления, который используется как система для вывода растянутых импульсов энергии, мы исключаем обычный ответвитель, что приводит к уменьшению потерей внутри резонатора и повышение общей эффективности лазера.

Структура кольцевого лазера на рисунке 4.1.

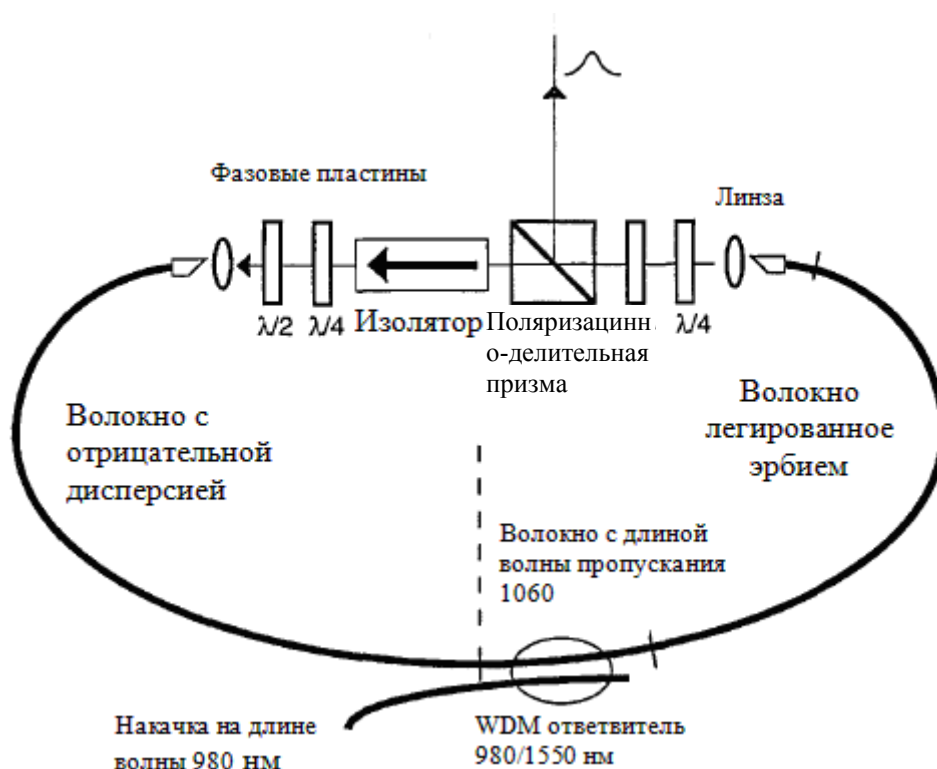


Рисунок 4.1 - Схема Кольцевого лазера.

Это однонаправленный поляризационный РДИ волоконный кольцевой лазер [1]. Изолятор используется в схеме, чтобы лазер работал в одном направлении. Призма Глана работает как поляризационный делитель пучка (ПДП), давая линейно поляризованный импульс на выходе. Волновые пластинки ( $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ ) были поставлены до и после изолятора для контроля поляризации. Волновые пластинки обеспечивают более высокую точность и воспроизводимость системы, чем волоконные контроллеры поляризации.

После настройки фазовых пластинок для режима синхронизации мод, было обнаружено, что волокно должно быть зафиксировано в данном положении иначе малейшее его перемещение или изгиб изменит поляризацию, что приведет к потере режима синхронизации мод [2].

Волоконный резонатор сконструирован из волокна SMF28 (с отрицательной дисперсией) длиной 1,2 метра, затем использовался мультиплексор (WDM), ответвитель используется для подачи излучения накачки от полупроводникового диода, а также используется 1 метр волокна

легированного эрбием. Это дает нам возможность сделать частоту импульсов 48,2 МГц. Существует 3 дисперсионных сегмента для длины волны 1,5 мкм, по оценкам  $-0,023$ ,  $-0,007$ , и  $0,075 \pm 0,005$  пкс<sup>2</sup>/м, соответственно, а чистая дисперсия резонатора была оценена как  $0,016 \pm 0,005$  пкс<sup>2</sup>/м [1]. Для того, чтобы импульс в системе не расширялся по времени, необходимо компенсировать положительную дисперсию активного эрбийевого волокна отрицательной дисперсией волокна типа SMF28. В данной системе используется 1 метр активного эрбиевого волокна, это означает для компенсации положительной дисперсии необходимо использовать 1,2 метра волокна SMF28. Дисперсии объемных компонентов, по оценкам, будет незначительной.

Волокно, легированное эрбием, имеет потери при накачке 80 дБ/м на 980 мкм диаметром сердцевины 2,5 мкм.[2]

Накачка системы происходит на длине волны 980нм при помощи полупроводникового лазера мощностью до 300 мВт. Выходная мощность примерно на 70-80% меньше мощности накачки.

Лазер может работать в прямом (как показано на рисунке 4.1) либо обратном направлении за счет выбора порядка объемных компонентов. Для режима обратного направления, наблюдается надежный самозапускающийся режим синхронизации мод, при входной мощности накачки 380 мВт выходная мощность 23 мВт. Пульсации мощности могут достигать 180 мВт при падении мощности накачки и 10,5 мВт.

После запуска системы фазовые пластины были настроены так чтобы получить оптимальную форму импульса и спектра.

Были оценены потери в ПДП, при помощи временного добавления волоконного ответвителя в установку [3]. Примерно 50% процентов мощности циркулирующей в резонаторе выходило через порт ответвления, в импульсном режиме, независимо от настроек фазовых пластинок.

Рисунок 4.2. показывает автокорреляцию (внешний контур) и спектр (вставка) выходного импульса мощностью 20 мВт, что соответствует энергии импульса  $> 0,4$  нДж.

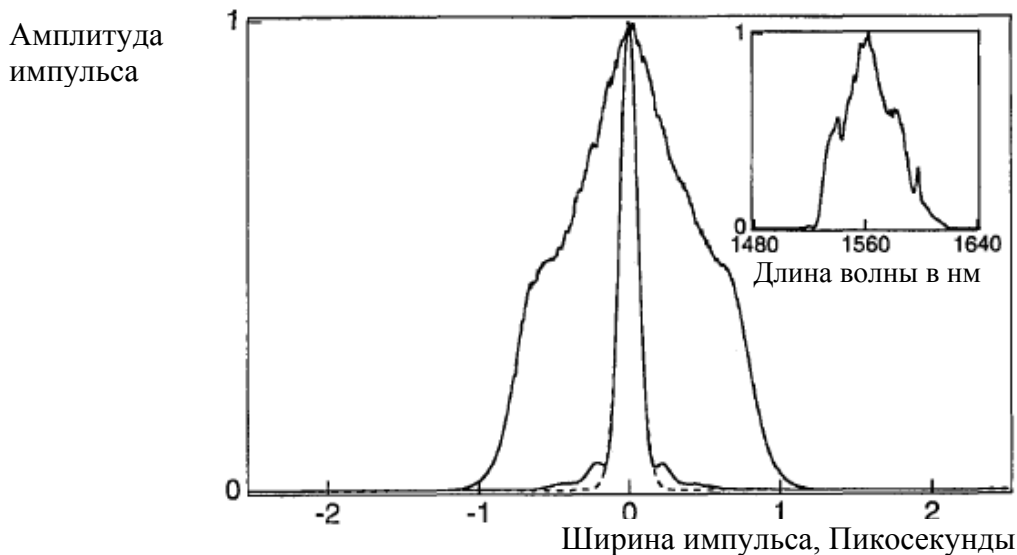


Рисунок 4.2 - Результат работы схемы в обратном направлении: автокорреляция отрицательно сдвинутого импульса (внешний контур) и импульс после внешней компенсации частотного сдвига (внутренний контур). Вставка спектр автокоррелированных импульсов.

Чтобы убедиться в том, что система работает в режиме одиночных импульсов используется высоко скоростной фотоприемник (время отклика меньше 100 пико секунд). При больших задержках соотношение мощности фоновых шумов к пиковому импульсу было определено как  $< 10^{-5}$ , что подразумевает, что большая часть энергии содержится в импульсе а не в шумах. Обрато направленные импульсы имеют отрицательное смещение частоты.

Для режима работы в обратном направлении, при высоких энергиях выходной импульс имеет несколько пиков и сложные шумовые структуры, которые чувствительны к регулировке волновых пластинок. Это явление

связано с солитонным эффектом, который сильнее, когда лазер работает в обратном направлении, чем в прямом направлении.

В режиме работы системы в прямом направлении импульсы самозапуска при мощности накачки 380 мВт, которая падает до 23,5 мВт. Это связано с уменьшением воздействия солитонного эффекта, который помогает формироваться импульсу. Максимальная выходная мощность 38 мВт наблюдается при мощности накачки 480 мВт. На рисунке 1.3. показана автокорреляция (внешний контур) и спектр (вставка) выходных импульсов. Средняя мощность 38 мВт соответствует 0,78 нДж энергии одного импульса.

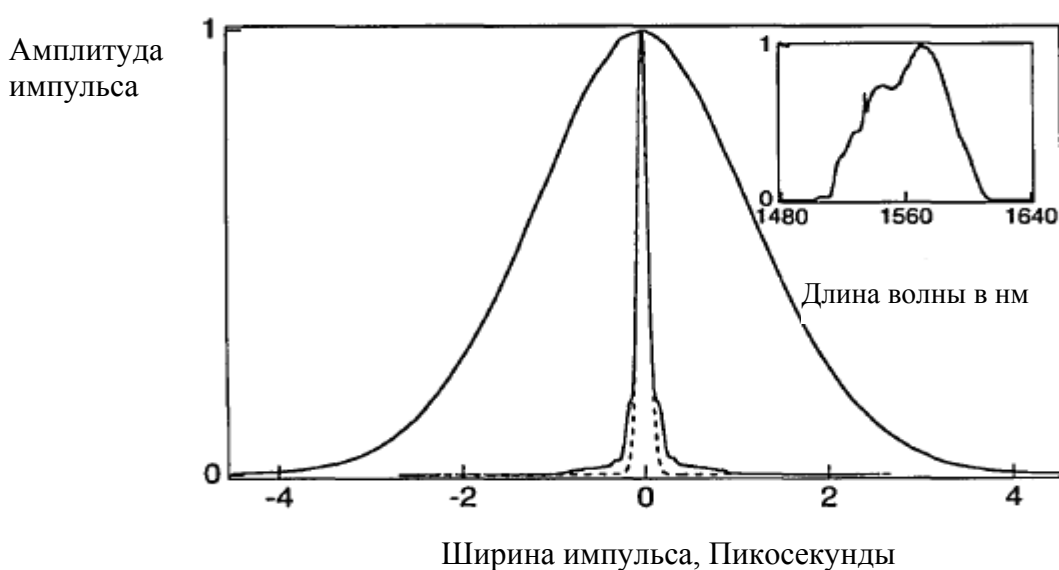


Рисунок 1.3 - Результат работы схемы в прямом направлении:

автокорреляция позитивно смещенного импульса (внешний контур) и импульс после компенсации внешними элементами частотного сдвига, вставка спектр автокоррелированных импульсов

Для прямого режима выходные импульсы имеют большое позитивное смещение по частоте. Для компенсации смещение по частоте в волокне SMF28 используются дисперсионные линии задержки. Чтобы избежать нелинейных эффектов в линии задержки используется 1 мВт (менее 3%) выходной мощности лазера, чтобы продемонстрировать компенсацию смещения.

При укорачивании волокна до соответствующей длины (120 см)[4], сокращается длительность импульса до 83 фс (внутренний автокорреляционный контур на рис.1.3) предполагая, что профиль амплитуды - секанса. Для спектральной ширины 60 нм, что соответствует временной способности пропускания системы 0,62. По оценкам примерно 20% энергии содержится не секанса подобных компонентах импульса. При более высоких энергиях запуска (26 мВт) и дальнейшей корректировки линии задержки (206 см) солитонные эффекты сжимают ширину импульса и делают его максимально коротким 69 нс.

Однако при самоиндуцированной фазовой модуляции появляется уширение спектра и автокорреляция имеет большие крылья, в которых содержится около 40% мощности.

Также существуют некоторые другие методы для сужения импульса по частоте, в них используется длинные стержни из стекла, высоко дисперсионную призму (наподобие кремневых призм), дифракционные решетки. Использование этих методов позволило бы избежать нелинейных эффектов, возникающих при больших мощностях в линии задержки волокна, и получить более сжатые импульсы более высокого качества.

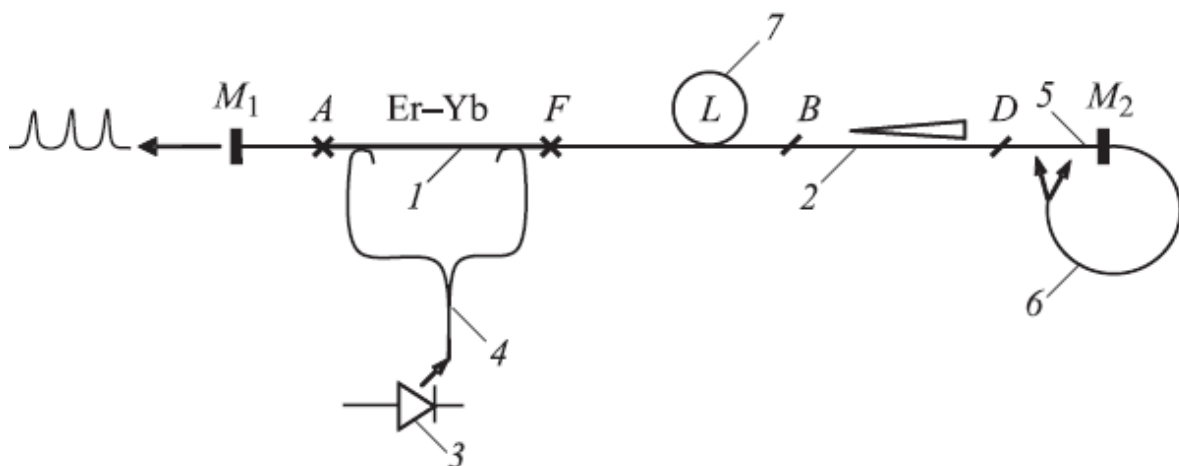
В данной системе используются объемные компоненты для управления изолятором и контроля поляризации, что позволяет не трогать волокно для реализации данных задач. Затем волокна можно закрепить в твердом материале, что позволит обеспечить долгосрочную стабильность и воспроизводимость характеристик системы.

Пассивная модуляция добротности резонатора является одним из эффективных методов управления параметрами излучения волоконных лазеров, широко применяемых в волоконно-оптических системах [5]. Такой режим может осуществляться разными способами, при этом особое внимание уделяется схемам в цельноволокном исполнении, которые наряду с конструктивно-технологическими преимуществами, обеспечивающими

высокую эксплуатационную надежность лазеров, могут обладать также расширенными функциональными возможностями.

Принцип работы волоконного модулятора добротности основан на высокой чувствительности коэффициента прохождения для основной моды  $LP_{01}$  ступенчатого многомодового световода к деформациям изгиба.

Рассматриваемая схема является развитием ранее исследованных систем EDFL-микрорезонатор, отличающаяся тем, что полностью базируется на волоконно-оптических элементах и в условиях резонанса, когда собственная частота упругих колебаний световода  $f$  близка к частоте релаксационных колебаний EDFL  $f_{rel} \approx f$ , в волоконном лазере возникают устойчивые автомодуляционные колебания с частотой  $F$ , определяемой главным образом собственной частотой упругих колебаний световода ( $F \approx f$ ). Возможность управления частотой упругих колебаний  $f$  и ее зависимость от внешних условий и воздействий открывают перспективы применения рассматриваемых лазеров в волоконно-оптических информационно-измерительных системах с частотным кодированием информации. Схема волоконного лазера приведена на рис. 4.4



1 — активный световод; 2 — модовый расширитель; 3 — полупроводниковый лазер накачки; 4 — волоконный разветвитель; 5 — колебательное звено; 6 — вспомогательный световод; 7 — дополнительный отрезок световода SMF-28.

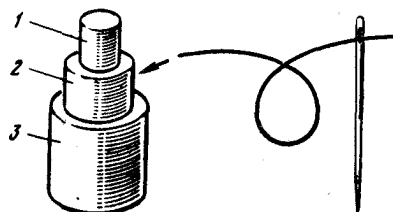
Рисунок 4.4 - Схема волоконного лазера с пассивным модулятором добротности

Основными элементами резонатора EDFL являются активный световод (AF) с двойной оболочкой, легированный эрбием и иттербием ( $Er^{3+}$  -  $Yb^{3+}$ ) модовый расширитель в виде конусного световода (ВД); диэлектрические интерференционные полупрозрачные отражатели M1,2, сформированные на торцевых поверхностях световодов, с коэффициентами отражения  $R1 \approx 92\%$ ,  $R2 \approx 50\%$  на линии генерации лазера  $\lambda_s = 1576$  nm. Накачка активного световода осуществляется встречными пучками излучения полупроводникового лазера  $\lambda_p = 976$  nm, направляемыми в АС с помощью разветвителей. Модовый расширитель в схеме EDFL служит для селективного возбуждения основной моды участка ступенчатого многомодового световода (DM2), с диаметром моды  $d_m$ , и оптимального согласования этой моды с модой стандартного одномодового световода SMF-28 с диаметром моды  $d_s$ . Оптимизация заключается в обеспечении достаточно малых потерь (например, не более 0.5 dB) при согласовании указанных мод, имеющих существенно разные диаметры ( $d_s \neq d_m$ ), и в минимизации коэффициентов связи моды одномодового световода с другими направляемыми модами многомодового световода, которые могут возбуждаться в результате деформации. Коэффициенты связи мод на стыках разных световодов сложным образом зависят от геометрических размеров и профилей показателя преломления и могут быть рассчитаны с помощью численных методов.

Основным элементом оптического кабеля является оптическое волокно (световод), выполненное в виде тонкого стеклянного волокна цилиндрической формы, по которому передаются световые сигналы с длинами волны  $0,85 \dots 1,6$  мкм, что соответствует диапазону частот  $(2,3 \dots 1,2) \cdot 10^{14}$  Гц [5].

Световод имеет двухслойную конструкцию и состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления ( $n_1$  и  $n_2$ ). Сердцевина служит для передачи электромагнитной энергии. Назначение оболочки — создание лучших условий отражения на границе “сердцевина — оболочка” и защита от помех из окружающего пространства[9].

Сердцевина волокна, как правило, состоит из кварца, а оболочка может быть кварцевая или полимерная. Первое волокно называется кварц—кварц, а второе кварц—полимер (кремнеор-ганический компаунд). Исходя из физико-оптических характеристик предпочтение отдается первому. Кварцевое стекло обладает следующими свойствами: показатель преломления 1,46, коэффициент теплопроводности 1,4 Вт/мк, плотность 2203 кг/м<sup>3</sup>.

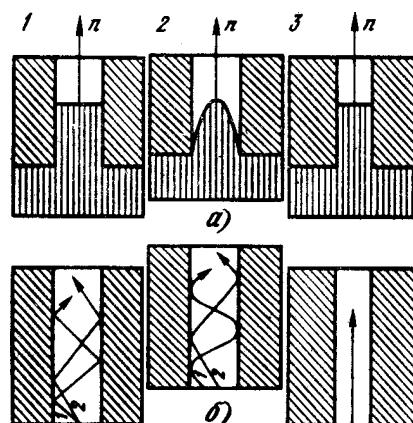


1 — сердцевина ; 2 — оболочка ; 3 — защитное покрытие

Рисунок 5.1 - Сечение оптического волокна:

Снаружи световода располагается защитное покрытие для предохранения его от механических воздействий и нанесения расцветки. Защитное покрытие обычно изготавливается двухслойным: вначале кремнеорганический компаунд (СИЭЛ), а затем—эпоксидакрилат, фторопласт, нейлон, полиэтилен или лак. Общий диаметр волокна 500...800 мкм (рис. 5.2).

В существующих конструкциях ОК применяются световоды трех типов: ступенчатые с диаметром сердцевины 50 мкм, градиентные со сложным (параболическим) профилем показателя преломления сердцевины и одномодовые с тонкой сердцевиной 6...8 мкм (рис. 5.2).



а — профиль показателя преломления; б — прохождение луча; 1 — ступенчатые; 2 — градиентные; 3 — одномодовые

Рисунок 5.2 - Оптические волокна

По частотно-пропускной способности и дальности передачи лучшими являются одномодовые световоды, а худшими среди многомодовых — ступенчатые.

В настоящее время серийно выпускаемые оптические волокна активированные иттербием (1,04-1,1 мкм) и активированные эрбием (1,53-1,61 мкм). В работе был выбран второй диапазон поскольку он хорошо совпадает с зоной безопасного для человеческого глаза излучением и волоконный лазер был создан в этом диапазоне.

Среди представленных фирмой «Thorlabs» активных волокон существует семь типов, отличающихся как оптическими характеристиками так и областью применения. Для целей волоконных лазеров был выбран тип Er 80/125.

Эрбиевое волокно должно быть выполнено таким образом, чтобы максимальную эффективность поглощения накачки с длиной волны 980 нм и максимальное усиление на длине волны 1550

В качестве исходного материала для изготовления ОВ используется кварцевое стекло ( $SiO_2$ ), чистое или с примесями химических элементов и их соединений, небольшие пропорции которых способствуют изменению оптических свойств плавленого кварца должным образом. Наибольшее распространение в качестве активных легирующих добавок волоконных световодов (ВС) получили ионы лантаноидов, или редкоземельных элементов в качестве активной примеси. Применимость активного иона для легирования волоконных световодов на основе кварцевого стекла определяется следующими факторами: во-первых, активный ион должен иметь излучательный переход в ближней ИК области спектра, где кварцевое стекло наиболее прозрачно. Во-вторых, в кварцевом стекле энергия фононов составляет  $400 - 1100 \text{ см}^{-1}$ , поэтому наличие энергетических уровней с малым энергетическим зазором внутри оптического перехода приводит к безизлучательной релаксации, препятствуя появлению люминесценции.

Поэтому в качестве активной примеси волоконных световодов на основе кварцевого стекла наибольшее распространение нашел ряд элементов, приведенных в табл. 5.1.

Там же содержатся данные о ширине спектра люминесценции этих активных ионов [10].

Следует отметить, что в волоконных световодах на основе стекол другого состава, в частности флюоридных и халькогенидных, возможно получение лазерной генерации с использованием и других активных ионов, например празеодима. Схемы энергетических уровней элементов, приведенных в таблице 1.1, и используемые оптические переходы представлены на рис. 5.3.

Одним из ключевых факторов влияющих на выбор длины волны (980 нм) накачки активного вещества в волоконном лазере является максимальная эффективность усиления[11].

В Таблице 5.2 приведены значения эффективностей использования накачки, определяемой максимальным значением отношения коэффициента усиления к мощности накачки, для нескольких полос

Таблица 5.2 Эффективность использования накачки в эрбиевом усилителе

| Длина волны накачки, нм | Максимальная эффективность накачки дБ/мВт |
|-------------------------|-------------------------------------------|
| 1                       | 2                                         |
| 980                     | 11                                        |
| 1480                    | 6.3                                       |
| 664                     | 3.8                                       |
| 532                     | 2.0                                       |
| 827                     | 1.3                                       |

На рисунке 5.5 показано, что самая эффективная накачка эрбиевого оптоволокна производится именно на длине волны 980 нм.

Возможность усиления света в волокнах, легированных ионами эрбия, обусловлена схемой уровней этого элемента. На рис.2.4 представлены переходы между уровнями 2-1 ( $^4I_{13/2}$ - $^4I_{15/2}$ )[12]. Каждый из этих уровней, расщеплен на ряд подуровней из-за взаимодействия ионов эрбия с внутрикристаллическим полем кварцевого стекла. Основной уровень  $^4I_{15/2}$  расщепляется на 8 штатковских подуровней. Первый возбужденный уровень  $^4I_{13/2}$  расщепляется на 7 штатковских подуровней. Между ними могут происходить 56 оптических переходов, которые формируют полосы сложной формы с максимумом на длине волны 1,54 мкм, как в спектре ния, так и в спектре люминесценции.

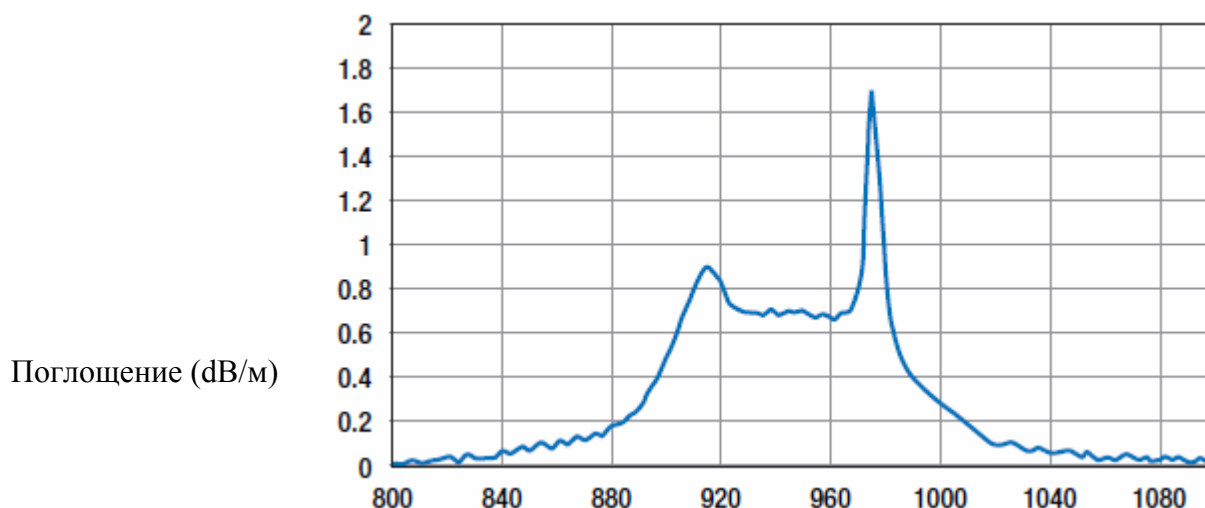


Рисунок 5.5 - Спектр длин волн поглощения эрбиевым волокном

За счет поглощения фотонов накачки ионы эрбия переходят из основного состояния (уровень 1) в верхнее возбужденное состояние (уровень 3), которое является короткоживущим (время жизни 1 мкс), затем за счет процессов релаксации переходят, безизлучательно, в долгоживущее состояние (метастабильное состояние уровня 2). Спектр усиления эрбиевого волокна удачным образом совпал с областью минимальных оптических потерь в кварце. Для создания инверсии населенностей в эрбиевом волокне необходимо перевести примерно половину ионов эрбия на метастабильный уровень 2. Мощность накачки эрбиевого волокна, при которой населенности уровней 1 и 2 становятся сравнимыми, называется пороговой мощностью. В зависимости от структуры оптического волокна, концентрации ионов легирующей примеси, длины волны излучения накачки, величина пороговой мощности изменяется от долей до единиц милливатт. Оптимальная длина волокна зависит от частоты усиливаемого или генерируемого излучения. Чем меньше частота излучения, тем большая длина используемого волокна соответствует максимальному усилению[13].

Для 2/3 производства активных волоконных световодов используется используется ряд технологических процессов:

- MCVD (модифицированное химическое осаждение из газовой фазы);
- OVD (внешнее осаждение из газовой фазы);
- VAD (аксиальное осаждение из газовой фазы);
- Осаждение с использованием плазмы PCVD и SPCVD.

Для введения активной примеси в этих процессах наибольшее распространение нашли метод пропитки, когда непроплавленный пористый материал сердцевины пропитывается раствором соли активной добавки, и легирование из летучих соединений.

Следует отметить, что максимальная концентрация активных ионов в сетке кварцевого стекла невелика и ограничивается их растворимостью, а также возникновением кооперативных эффектов. Это приводит к тому, что длина активной среды волоконного лазера может достигать нескольких десятков метров. Поэтому естественным требованием к активным волоконным световодам является наличие достаточно низких нерезонансных оптических потерь. Приемлемое значение потерь составляет от 5 до 20 дБ/км, в этом случае их влияние на эффективность лазера составляет не более нескольких процентов.

Для нашей системы было выбрано 1 метр эрбиевого оптоволокна типа ER80-8/125, катушка с данным волокном изображена на рисунке 2.7.



Рисунок 5.6 - катушка с эрбиевым волокном

Ниже приведены основные параметры волокна ER80-8/125:

- Диаметр сердцевины оптоволокна 40 мкм;
- Диаметр оптоволокна  $250 \text{ мкм} \pm 10$ ;
- Поглощение на длине волны 980 нм – 3,5-13,0 (Дб/м);
- Длина волны выходного излучения  $1550 \pm 0,3 \text{ нм}$ ;
- Числовая апертура  $0.21-0.24 \text{ нм} \pm 0.01$ ;
- Положительная дисперсия ps/nm -80-100.

Другой неотъемлемой частью волоконного лазера работающего в импульсном режиме является волокна компенсирующие положительную дисперсию активного волокна. Эти волокна имеют большую отрицательную дисперсию.

Параметры типичного волокна для компенсации дисперсии:

- Рабочая длина волны нм – 1520-1580 нм;
- Диаметр сердцевины мкм – 2-4;
- Диаметр волокна мкм –  $125 \text{ мкм} \pm 1$ ;
- Диаметр покрытия мкм -  $245 \pm 5$ ;
- Затухание Дб/км – 0,2-0,5;
- Отрицательная дисперсия ps/nm -70-100.

Полупроводниковый лазер — твердотельный лазер (рис. 5.7), в котором в качестве рабочего вещества используется полупроводник [14]. В таком лазере, в отличие от лазеров других типов (в том числе и других твердотельных), используются излучательные переходы не между изолированными уровнями энергии атомов, молекул и ионов, а между разрешенными энергетическими зонами кристалла. В полупроводниковом лазере накачка осуществляется непосредственно электрическим током.

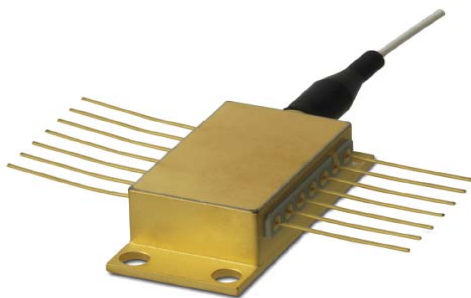


Рисунок 5.7 - Фотография полупроводникового лазера, который используется для накачки

Для накачки кольцевого лазера используется полупроводниковый лазер LC95A76URLR с длиной волны 980 нм и мощностью 300 мВт. Используемый лазер является одномодовым с очень узкой шириной спектра и низкими шумами. Лазер с узкополосной решеткой позволяет получать большую выходную мощность, которая устойчивая во времени и при колебаниях температуры. Узкополосная решетка находится в поляризованном волоконном наконечнике лазера. Электрическая схема лазера показана на рисунке 5.8.

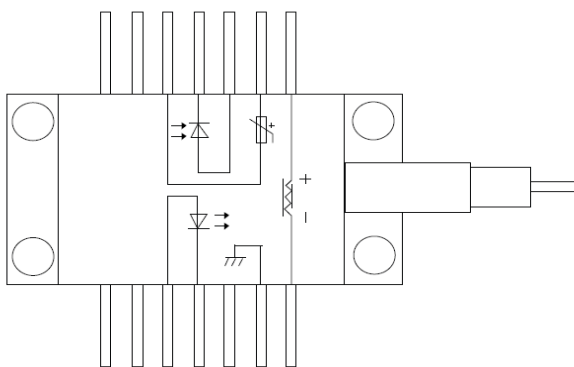


Рисунок 5.8 - Электрическая схема полупроводникового лазера

В конструктивном исполнении используемого лазера есть терморезистор для определения температуры кристалла и элемент Пельтье, который регулирует температуру полупроводникового кристалла для подбора длины волны лазера. Так как при производстве полупроводникового лазера выходная длина волны у отдельного экземпляра может варьироваться, что может привести к не совпадению с длиной волны поглощения оптического волокна легированного эрбием. Также для оценки

уровня мощности излучения лазера в корпусе лазера есть фотодиод с линейной характеристикой. Немаловажно при использовании лазера иметь в корпусе заземление т.к. полупроводниковая структура излучателя может выйти из строя из-за электростатических наводок.

Ниже на рисунке 5.9 представлен чертеж полупроводникового лазера.

Таблица 5.3 Технические параметры полупроводникового лазера  
накачки LC95A76URLR

| Параметр                       | Условие  | Мини<br>мально | Максим<br>ально | Единицы<br>измерения |
|--------------------------------|----------|----------------|-----------------|----------------------|
| Центральная длина волны лазера | При 25 С | 974            | 980             | нм                   |
| Рабочая температура            |          | -20            | +75             | С                    |
| Прямой ток лазера              |          |                | 1000            | ма                   |
| Обратное напряжение лазера     |          |                | 2               | В                    |
| Погрешность длины волны        | При 25 С |                | +0,5            | нм                   |
| Сопротивление терморезистора   | При 25 С | 9,5            | 10              | кОм                  |

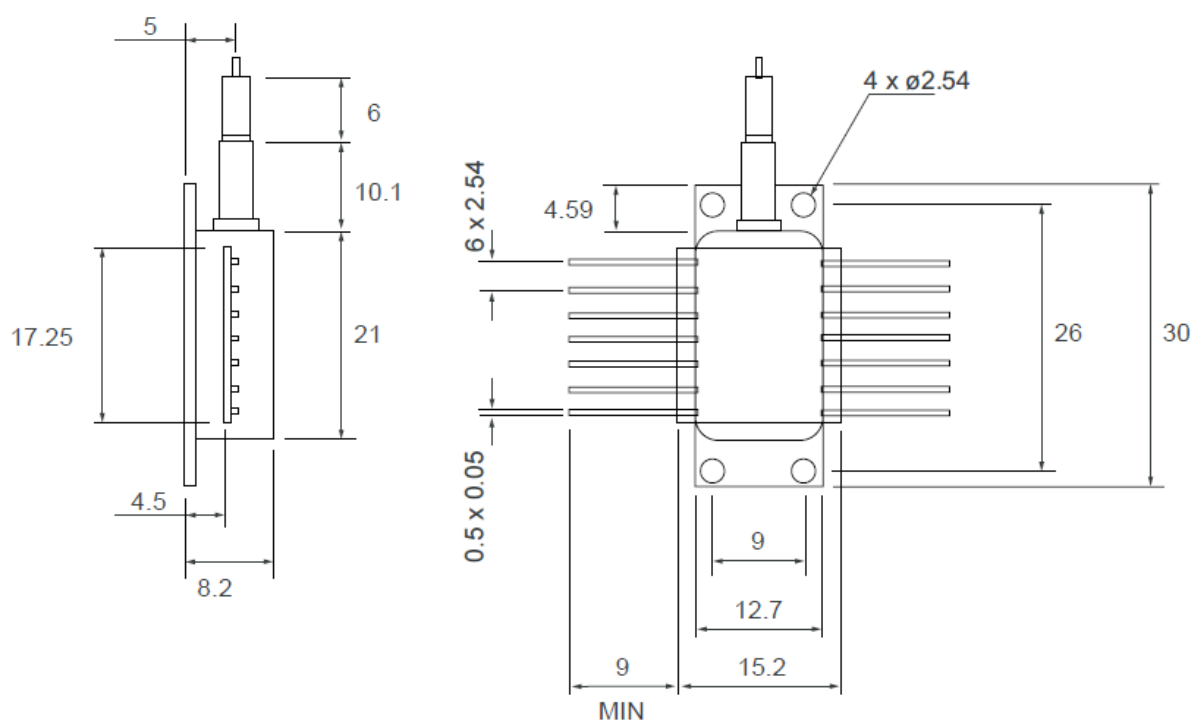


Рисунок 5.9-Габаритный чертеж лазера

Другими особенностями полупроводниковых лазеров являются высокий КПД, малая инерционность, простота конструкции, а также узкая ширина спектра выходной длины волны, которая практически совпадает по ширине с длиной волны эрбия что делает систему более эффективной.

Для нашей системы для накачки эрбиевого волокна был выбран полупроводниковый лазер типа LC95A76URLR на длине волны 976 и мощностью 300 мВт.

Аббревиатура WDM (Wavelength-division multiplexing спектральный уплотнитель каналов) эта технология, позволяющая одновременно передавать несколько информационных каналов по одному оптическому волокну на разных несущих частотах[7]. Ответвитель показан на рисунке 5.10.



Рисунок.5.10 - Фотография WDM ответвителя

В нашей системе используется ответвитель с длинами волн  $980 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$  /  $1550 \text{ нм} \pm 15 \text{ нм}$ , так  $980 \text{ нм}$  это длина волны полупроводникового лазера накачки а  $1550 \text{ нм}$  это линия излучения эрбиевого волокна.

Нарушение закона преломления света необыкновенным лучом связано с тем, что скорость распространения света (а значит и показатель преломления) волн с такой поляризацией, как у необыкновенного луча, зависит от направления. Для обыкновенной волны скорость распространения одинакова во всех направлениях.

Можно подобрать условия, при которых обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются по одной траектории, но с разными скоростями. Тогда наблюдается эффект изменения поляризации (рис. 2.11). Например, линейно поляризованный свет, падающий на пластинку можно представить в виде двух составляющих (обыкновенной и необыкновенной волн), двигающихся с разными скоростями. Из-за разности скоростей этих

двух составляющих, на выходе из кристалла между ними будет некоторая разность фаз, и в зависимости от этой разности свет на выходе будет иметь разные поляризации.

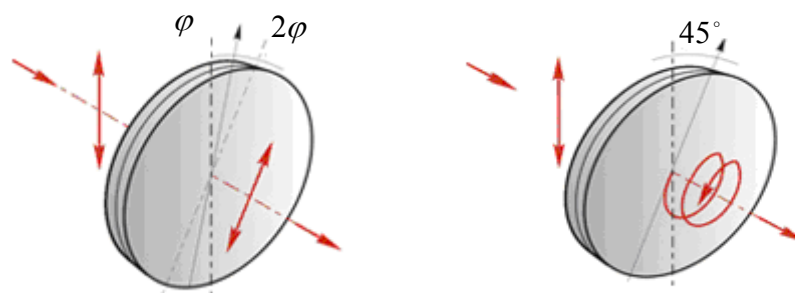


Рисунок 2.11 - Слева полуволновая, справа четверть волновая поляризационные пластины

Световая волна, проходящая внутри кристаллической пластины с анизотропными свойствами, например пластины из кварца, имеет обычно разные фазовые скорости для обыкновенного и необыкновенного луча. Если считать, что оптические оси кристалла параллельны плоскости пластины, длина волны света  $\lambda$ , толщина пластины  $d$ , то фазовая разность между обыкновенным и необыкновенным лучом, набегаящая в результате прохождения через пластину.

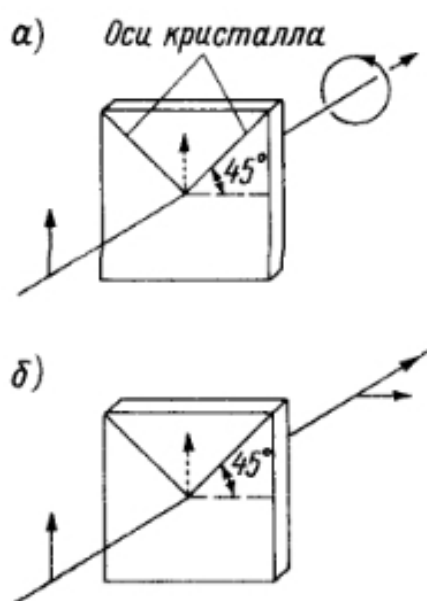


Рисунок 3.4 – Принцип действия четвертьволновой (а) и полуволновой (б) пластины

Как показано на рис. 3.4а, падающий на четвертьволновую пластину свет имеет линейную поляризацию с углом  $45^0$  относительно двух оптических осей кристалла; после же фазовой пластины фаза обыкновенной составляющей выходного луча сдвигается относительно фазы необыкновенной составляющей на  $90^0$ , в результате возникает вращение вектора напряженности электрического поля вправо. Другими словами, свет приобретает правостороннюю круговую поляризацию. Точно так же происходит обратное преобразование. Если же при прочих равных условиях воспользоваться полуволновой пластиной, то как показано на рис. 3.4б, выходной луч остается линейно поляризованным, но развернутым относительно падающего на пластину луча на  $90^0$ . Кроме того, полуволновая пластина преобразует свет с правосторонней круговой поляризацией в свет с левосторонней круговой поляризацией и наоборот, тогда как четвертьволновая пластина превращает свет с круговой поляризацией в свет с линейной поляризацией.

Пластины должны иметь толщину, строго соответствующую заданной длине волны, и использоваться при той длине волны, на которую они рассчитаны. [11]

Фазовые пластины (ФП) изготавливаются из двух компонентов [7]: пластина из кристаллического фтористого магния  $MgF_2$  и кристаллического кварца  $SiO_2$ . За счет того, что эти одноосные положительные кристаллы имеют различный спектральный ход дисперсии двулучепреломления, можно рассчитать необходимые толщины компонентов сборки, которые при определенной взаимной ориентации кристаллических осей дадут составную фазовую пластину, волновая разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей (ВРХ) в которой в определенной спектральной области будет изменяться слабо. Фотография использованной при конструировании поляризационной пластины изображена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 - фотография поляризационной пластины  
 $\lambda/4$  WPMQ05M-266

Если толщина пластинки такова, что на выходе из неё один луч на четверть волны (четверть периода) отстаёт от другого, то поляризация превратится в круговую (такая пластинка называется четвертьволновой), если один луч от другого отстанет на пол волны, то свет останется линейно поляризованным, но плоскость поляризации повернётся на некоторый угол, значение которого зависит от угла между плоскостью поляризации падающего луча и плоскостью главного сечения (такая пластинка называется полуволновой).

Для при сборке лазера были использованы 3 поляризационные пластины  $\lambda/4$  WPMQ05M-266 и одна пластина  $\lambda/2$  WPMH05M-670, даны призмы имеют следующие характеристики:

- Материал: кристаллический кварц;
- Диаметр 12,7 мм  $\pm$  0,1 мм (внутренний) 25,4 мм (внешний);
- Точность:  $\lambda/200$ ;
- Отклонение пучка (макс.): 10 угловых секунд;
- Максимальный Диаметр пучка 10мм;
- Рассеиваемая мощность 2 Вт/см<sup>2</sup>.

Оптический сигнал, распространяясь по волокну, отражается от различных неоднородностей, в особенности от мест сухого стыка, образуемых оптическими соединителями. В результате такого отражения часть энергии возвращается обратно. Если в качестве источников излучения используются лазерные диоды, то отраженный сигнал, попадая в резонатор лазера, способен индуцировано усиливаться, приводя к паразитному сигналу. Особенно это не желательно, когда источник излучения генерирует цифровой широкополосный сигнал ( $>100$  МГц), или аналоговый широкополосный сигнал (в смешанных волоконно-коаксиальных сетях кабельного телевидения до 1 ГГц). В сложных широкополосных сетях, когда имеется множество подключений коннекторов и другие оптические устройства (разветвители, WDM устройства, оптические усилители), такая обратная связь усиливается и приводит к росту уровня шума источника излучения. Наиболее кардинальный способ подавления обратного потока основан на использовании оптических изоляторов (рис.2.13).

Оптический изолятор обеспечивает пропускание света в одном направлении почти без потерь, а в другом (обратном) направлении с большим затуханием. Оптические изоляторы сегодня являются ключевым элементом многих лазерных систем, оптических усилителей, а также используются в качестве отдельного элемента оптической линии связи. Оптические изоляторы - это устройства, имеющие большой коэффициент пропускания оптического излучения в прямом направлении и весьма малый – в обратном. В простейшем случае оптический изолятор можно создать путем объединения поляризатора и четвертьволновой пластинки с плоскостями поляризации, развернутыми на  $45^0$  относительно осей поляризатора, но, как правило, развязка оптических сигналов в таком устройстве недостаточна.

Что касается оптических изоляторов с развязкой 50 дБ и более, то в них обычно используется магнитооптический эффект – эффект Фарадея. Изолятор состоит из поляризатора, элемента вращения Фарадея, магнита для создания магнитного поля, анализатора (рис.5.2).[7]

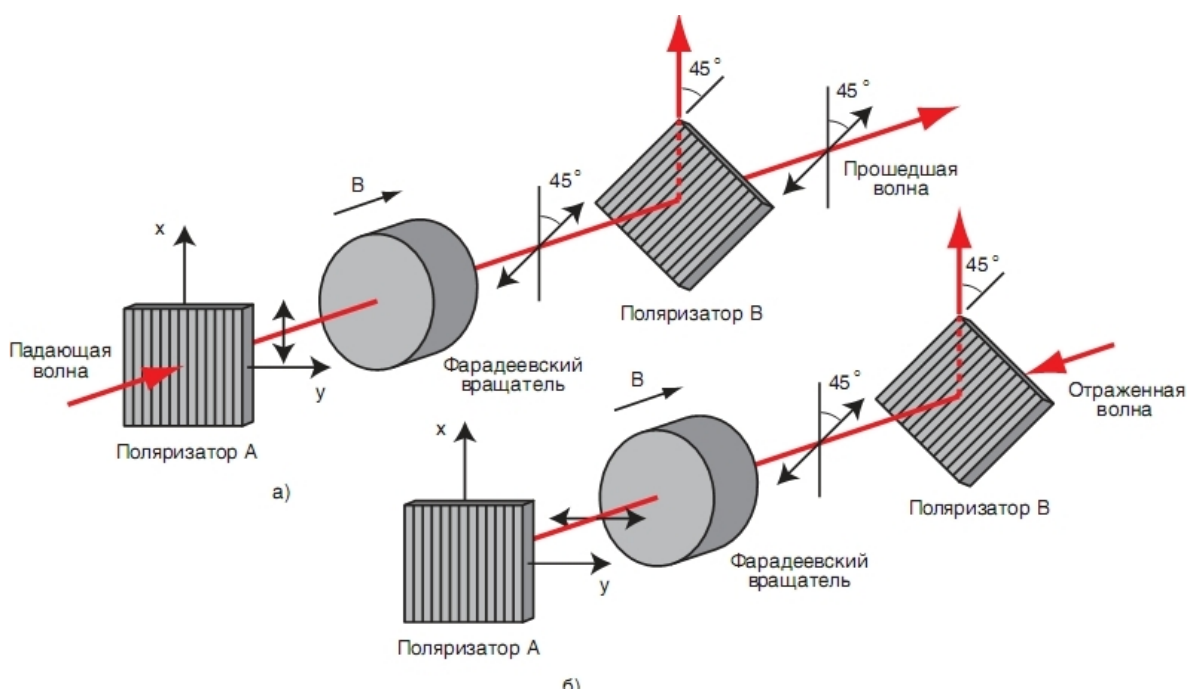


Рисунок 5.2 – Оптический изолятор на основе эффекта Фарадея

Элемент вращения Фарадея поворачивает плоскость поляризации входящего линейно поляризованного луча на угол

$$Q = FLN \quad (5.1)$$

где  $F$  – постоянная Верде;

$L$  – длина элемента;

$N$  – составляющая магнитного поля вдоль оси элемента;

Обычно делают угол поворота  $45^\circ$ , тогда свет в обратном направлении не проходит. Желательно, чтоб материал элемента Фарадея обладал большой постоянной Верде и был достаточно прозрачен. [8]

Теперь о принципе работы изолятора. Как видно на рис. 5.2, луч света, входящий в прямом направлении, поступает на элемент вращения Фарадея как линейно поляризованный свет с углом поляризации, определяемым поляризатором. После элемента вращения плоскость поляризации луча поворачивается на угол  $45^\circ$ . Таким образом, если на выходе поставить

анализатор с плоскостью поляризации под углом  $45^0$ , то все устройство окажется полностью прозрачным для светового луча. Однако при прохождении луча в обратном направлении он снова поворачивается на угол  $45^0$ , т.е. суммарный угол поворота  $90^0$ , поэтому луч не проходит через поляризатор (в данном случае работающий как анализатор). Стало быть, это устройство в целом работает как изолятор.

На практике чаще всего используются оптические изоляторы коротковолнового (0,8 мкм) и длинноволнового (1,3 и 1,5 мкм) диапазона. В качестве материала для элемента Фарадея коротковолнового изолятора удобно использовать парамагнитное стекло с добавками тербия ( $Tb^{3+}$ ), но поскольку постоянная Верде у него сравнительно мала, нужный угол вращения плоскости поляризации получается удлинением оптического пути (четырёхкратным отражением). В качестве материала для элемента Фарадея длинноволнового изолятора используется монокристалл YIG железоиттриевого граната – с большой постоянной Верде, прозрачный на длине волны выше 1,2 мкм. В обоих случаях прямые потери не превышают 1 дБ, а развязка получается около 30 дБ. [9]



Рисунок 2.13 - Фотография изолятора

Изоляторы Фарадея используются для защиты лазера от различных бликов с поверхности других элементов оптической схемы а также от рассеянного излучения. Мощность излучения, попадающего назад

ослабляется на несколько порядков ( $10^4$ - $10^6$ ). Также существует ряд приборов, таких как стандарты частоты, прецизионные задающие генераторы, которые чувствительны к оптической обратной связи. В этих случаях Изоляторы Фарадея помогают избавиться от таких нежелательных эффектов, как оптическая нестабильность и затягивание частоты.

Особо следует отметить случай использования Изоляторов Фарадея в системах усиления чирпированных импульсов. Отсутствие подобного рода прибора может привести к выходу из строя как самого задающего генератора, так и его оптической накачки.

В основе работы оптического изолятора лежит эффект Фарадея – вращение плоскости поляризации света оптически неактивными веществами под действием продольного магнитного поля.

Угол поворота плоскости поляризации равен  $\theta = VB_Z d$ , где  $V$  – постоянная Верде (Verdet) – удельное магнитное вращение, зависящая от природы вещества, температуры и длины волны света,  $B_Z$  – продольная составляющая индукции магнитного поля,  $d$  – длина пути света в веществе – размер ячейки Фарадея. Направление вращения зависит только от природы вещества и направления магнитного поля. Знак вращения отсчитывается для наблюдателя, смотрящего вдоль магнитного поля. Магнитное вращение плоскости поляризации обусловлено возникновением асимметрии оптических свойств вещества под действием магнитного поля.

Зависимость вращения плоскости поляризации от длины волны света называется вращательной дисперсией[4].

Оптический изолятор состоит из трех элементов: поляризатора 1 (входного поляризатора), ячейки Фарадея и анализатора (выходного поляризатора). Параметры ячейки Фарадея выбираются так, чтобы плоскость поляризации света, проходящего через нее, разворачивалась на  $45^\circ$ . Под таким же углом устанавливаются оси поляризаторов. Входной полезный сигнал, проходя через поляризатор 1, оставляет свою вертикальную составляющую без изменения, устраняя горизонтальную

составляющую. Далее вертикально поляризованный свет проходит через ячейку Фарадея, разворачивает плоскость поляризации на  $45^\circ$  и беспрепятственно проходит через анализатор.

При распространении света в обратном направлении (рис. 5.14) он также поляризуется в плоскости анализатора, затем, проходя через ячейку Фарадея, становится горизонтально поляризованным. Таким образом, оси поляризации света и поляризатора составляют угол  $90^\circ$ , поэтому поляризатор 1 не пропускает обратное излучение.

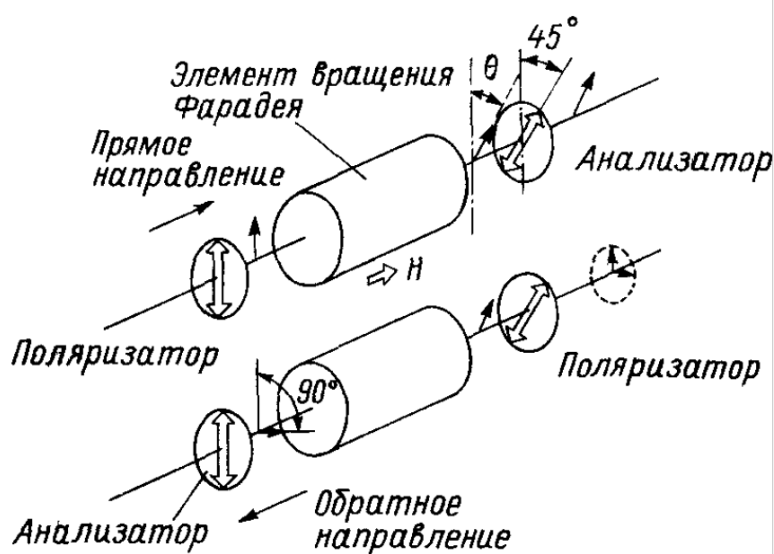


Рисунок 5.14 - Схема оптического изолятора

Основными требованиями, предъявляемыми к оптическому изолятору, являются малые вносимые потери в прямом направлении ( $\sim 1-2$  дБ) и высокая изоляция (потери при распространении обратного сигнала) в обратном направлении ( $>30$  дБ). Кроме того, должны обеспечиваться прозрачность во всем диапазоне рабочих длин волн, стабильность параметров при изменении температуры. В диапазоне длин волн  $1,3-1,55$  мкм магнитооптическим материалом, используемом в ячейке Фарадея, является  $Y_3 Fe_3 O_{12}$ . На длине волны  $0,85$  мкм используется парамагнитное стекло.

Оптические изоляторы часто интегрируются в лазерный передающий модуль. Высокая эффективность такого решения связана с тем, что выходной

оптический сигнал от лазерного светодиода имеет эллиптическую поляризацию. Оптический изолятор устанавливается так, чтобы плоскость поляризации анализатора 1 совпадала с плоскостью поляризации максимальной составляющей выходного сигнала от лазерного светодиода.

Оптические изоляторы также являются неотъемлемой частью оптических усилителей на примесном волокне. В этом случае устанавливается пара оптических изоляторов – один на входе, другой на выходе оптического усилителя. Поскольку оптические усилители, как правило, осуществляют усиление мультиплексного оптического сигнала, то необходимо, чтобы оптические изоляторы имели высокие характеристики во всем диапазоне длин волн, представленных в оптическом сигнале. Для этой цели используются специальные широкозонные оптические изоляторы.

Для сборки нашей конструкции был выбран изолятор типа Ю-2.5-1550-VLP с длиной волны изоляции 1550 нм ниже приведены его основные характеристики:

- Центральная длина волны 1550 нм;
- Передача энергии 95%;
- Изоляция 38 - 42 dB;
- Диапазон настройки 1510-1590 нм;
- Рабочий диапазон 1500-16000;
- Максимальный размер пятна луча 3,6 луча;
- Максимальная непрерывная мощность излучения 1,2 Вт;
- Максимальная плотность энергии  $25 \text{ Вт/см}^2$ .

Поляризационные призмы - один из классов оптических призм, простейшие поляризационные приборы, предназначенные для получения линейно поляризованного оптического излучения или для определения характера и степени его поляризации. Обычно П. п. являются двупреломляющими поляризаторами, т. е. поляризованный свет получается с использованием двойного лучепреломления. П. п. состоят из двух или

более трёхгранных призм, на границе раздела между которыми резко различаются условия прохождения для компонент светового луча, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Такая ситуация реализуется, напр., при прохождении света через наклонную границу раздела двух сред, одна из которых сильно анизотропна.

Поляризационный делительный куб является лучшим выбором в тех случаях, когда дисперсия лазерного излучения должна быть сведена к минимуму. Он применяется для разделения излучения со случайной поляризацией на лучи с Р- и S-поляризацией. S-поляризованный луч отражается на угол  $90^\circ$  по отношению к падающему пучку, в то время как луч с Р-поляризацией проходит через перегородку практически без потерь. Куб представляет собой две прямоугольные призмы, разделенные диэлектрической перегородкой (рис. 3.5).

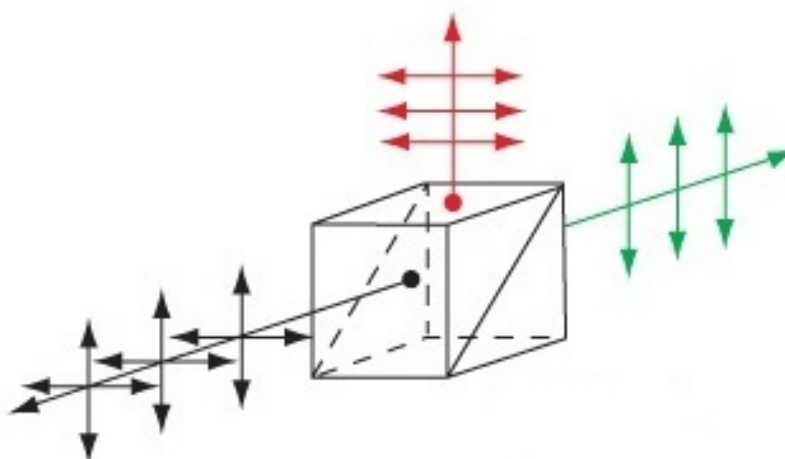


Рисунок 5.5 – Поляризационный куб

Диэлектрическая перегородка служит для пропускания луча с одним типом поляризации и отражения другого. Схема прохождения луча сквозь поляризационный куб представлена на рис. 3.6.

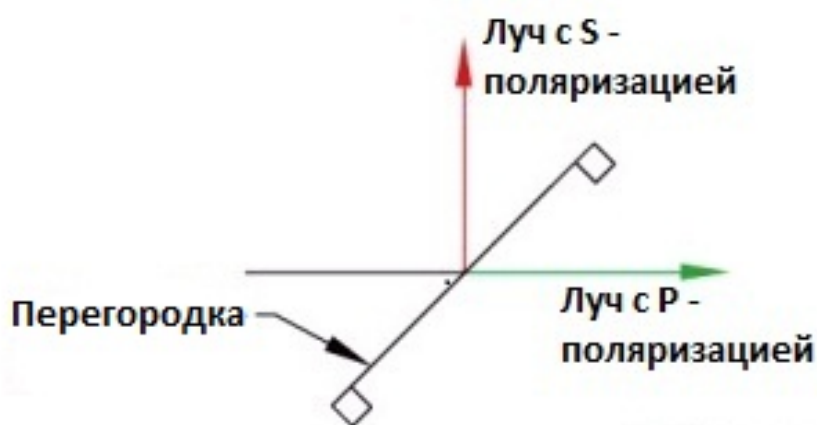


Рисунок 5.6 – Схема прохождения лазерного излучения через поляризационный куб

Иногда на торцы поляризационного куба наносят просветляющие покрытия чтобы уменьшить отражения от стенок куба.

В данной магистерской работе я использовал узкополосный поляризационный куб для длины волны 1550 нм, изготовленной из материала стекло К8, который пропускает 95 процентов излучения с Р – поляризацией и отражает 98 процентов излучения с S – поляризацией.

Призма Глана-Тэйлора (рис. 5.15) производит линейно поляризованный свет из неполяризованного входного пучка. Она состоит из двух призм, сделанных из кальцита.

Лазерная призма Глана, как и призма Глана, состоит из двух шпатовых призм, разделенных воздушным промежутком. Отличие состоит в том, что лазерная призма имеет выходные окна для отвода отраженного (обыкновенного) луча, применяется шпат сорта "Уникальный" или "Экстра", на рабочих поверхностях призмы делается глубокая шлифовка-полировка (ГШП). Предназначена для работы с лазерным излучением

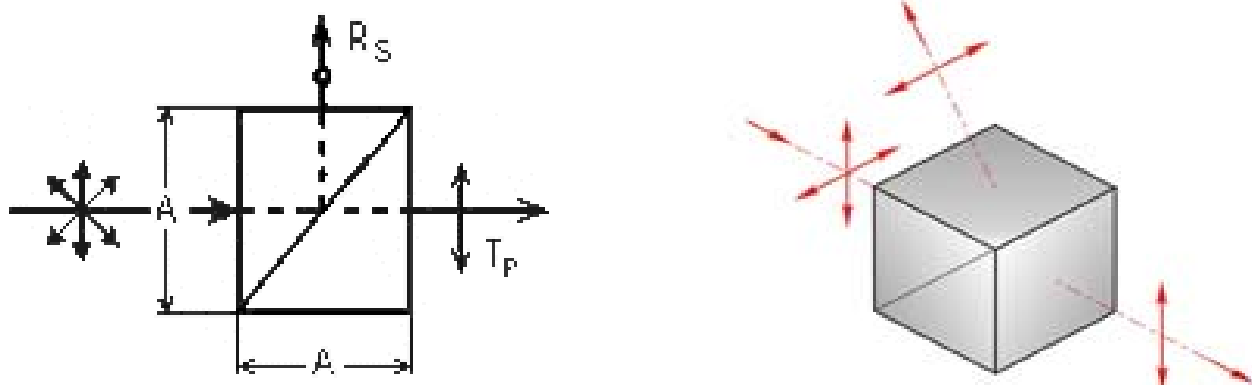


Рисунок 5.15 - Поляризационная призма Глана. А В - воздушный промежуток.

Точки на обеих трёхгранных призмах указывают, что их оптические оси перпендикулярны плоскости рисунка

Последнее, позволяет использовать призмы во всей области прозрачности двулучепреломляющего материала, из которого призма изготовлена. На рисунке 2.16 изображена используемая в системе призма.



Рисунок 5.16 - Лазерная призма Глана

Если рабочей является р-компонента излучения, в данном случае необыкновенный луч, - то это позволяет существенно уменьшить потери из-за френелевских отражений от гипотенузных граней за счет близости угла падения к углу Брюстера. Поэтому призмы Глана изготавливаются из отрицательных двулучепреломляющих кристаллов -  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{BaB}_2\text{O}_4$ ,  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{LiNbO}_3$ . Рабочим является необыкновенный луч (е-луч), обыкновенный луч (о-луч) испытывает полное внутреннее отражение на гипотенузной грани

первой половины призмы и поглощается на черненых боковых поверхностях. Лазерный вариант призмы имеет полированные окна для отвода отраженного луча [13]. При конструировании системы была выбрана призма Глана типа G115-A. Которая имеет следующие параметры:

- Диапазон пропускания 350 нм - 2,3 мкм (без покрытия);
- Рассеиваемая мощность 2Вт/см<sup>2</sup> ;
- Искажений волнового фронта  $\leq \lambda / 4$  светового диаметра;
- Состоит из двух призм кальцитовых призм с воздушной прослойкой.

При сборке и настройке данной системы целесообразно использовать фотоприемник для слежения за частотой генерации, формой импульса и его энергией.

Фотоприемник включается в оптическую схему при помощи волоконного WDM ответвителя, небольшая часть излучения ответвляется от основной оптической схемы и поступает на приемник, после чего электрический вывод фотоприемника подключается к осциллографу, где производится качественный анализ излучения лазера.

Для данной задачи был выбран фотоприемник типа DET01CFC, который показан на рисунке 5.17



Рисунок 5.17 Фотография фотоприемника DET01CFC

DET01CFC это высокоскоростной InGaAs фотоприемник который используется с соединениями типа FC/PC, чтобы соединять оптические

кабели в НДК оптических системах. Частота работы 2ГГц рабочий спектральный диапазон 800-1700нм (рисунок 2.18).

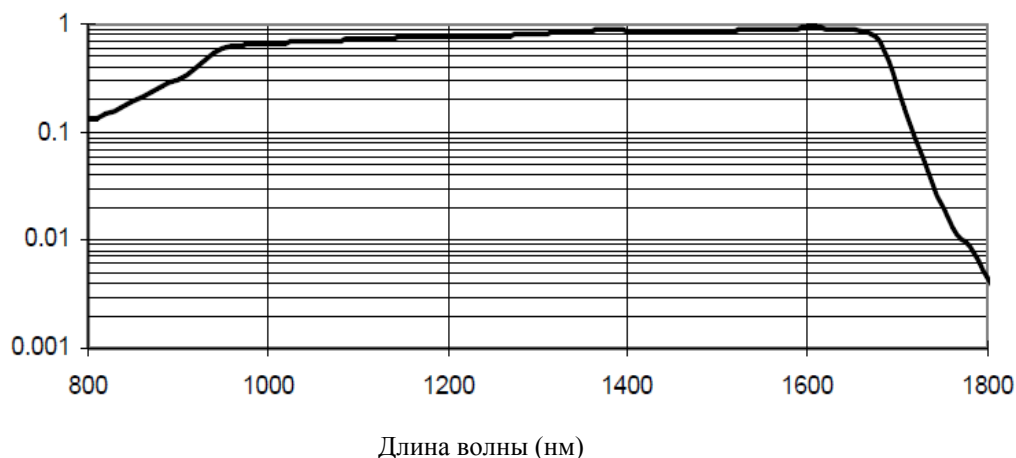
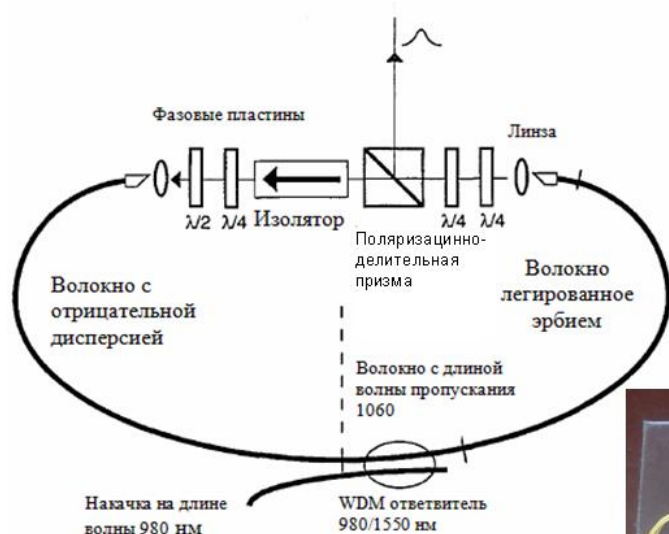


Рисунок 5.18 Спектральная чувствительность приемника

Фотоприемник питается от 12-ти вольтной батарейки, для того чтобы источник питания вносил минимальные шума в выходной электрический сигнал.

Выходной сигнал SMA прямопропорционально зависит от фототока и функция мощности падающего света ( $P$ ) и длины волны ( $\lambda$ ). Спектральная чувствительность  $[R(\lambda)]$  может быть получена из рисунка 2.18 для определения суммы ожидаемого фототока.

## Оптическая схема и фотография макета



### Состав волоконного лазера:

- Полупроводниковый лазер - LC95A76URLR ;
- Активное волокно - ER80-8/125 ;
- Компенсационное волокно – SMF 28;
- Поляризационные пластины WPMQ05M-266, WPMH05M-670;
- Поляризационный куб - GI15-A ;
- Оптический изолятор - IO-2.5-1550-VLP;
- Фотоприемник - DET01CFC .

## 6. МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Излучение из волокна имеет ярко выраженную эллиптическую поляризацию за счет эффекта двулучепреломления в кварцевой жиле волокна.

Используемый оптический блок предназначен для решения двух задач. Первая – разделение излучения на две части: та, которая остается в резонаторе и та, которая выходит за пределы лазера и используется как полезный сигнал. Вторая часть обеспечивает ввод излучения в волокно с такой поляризацией, которая после преобразования в оптическом волокне выйдет из первого волокна с исходной поляризацией.

Оптический блок обеспечивает поддержку только той поляризации излучения, которая воспроизводится при полном прохождении контура кольцевого лазера.

В дипломе были проанализированы методы описания поляризованного света, проходящего сквозь оптические элементы лазерной установки. Среди них:

- сфера Пуанкаре;
- вектор Стокса;
- вектор Джонса;
- метод Мюллера;
- квантовомеханическое представление

Для решения задачи прохождения поляризованного излучения был использован математический аппарат матриц Джонса, так как с их помощью можно исследовать многоэлементные системы, что позволяет сильно упростить рассмотрение прохождения пучка лазерного излучения через последовательность поляризаторов и фазовых пластинок.

Вектор Джонса, введенный Джонсом в 1941 г., описывает поляризованный луч с максимальной алгебраической краткостью и

чрезвычайно удобен при решении тех задач, в которых важно учитывать фазовые соотношения между пучками.

Вектор Джонса представляет собой столбец из двух элементов (рис. 6.1), который описывает форму поляризации пучка и амплитуду компонент в некоторой точке луча.

Если свет распространяется вдоль оси Z, то вектор имеет общую форму:

$$\begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x e^{i(\epsilon_x + \omega t)} \\ A_y e^{i(\epsilon_y + \omega t)} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

где  $E_x$  и  $E_y$  – скалярные компоненты электрического вектора в определенный момент вдоль осей X и Y,  $A_x$  – максимальная величина  $E_x$ , а  $A_y$  – максимальная величина  $E_y$ ; параметр  $\epsilon_x$  – временная фаза компоненты  $E_x$  в момент времени  $t=0$  в заданной точке;  $\epsilon_y$  – временная фаза компоненты  $E_y$ . Вообще говоря, каждый элемент столбца является комплексной величиной.

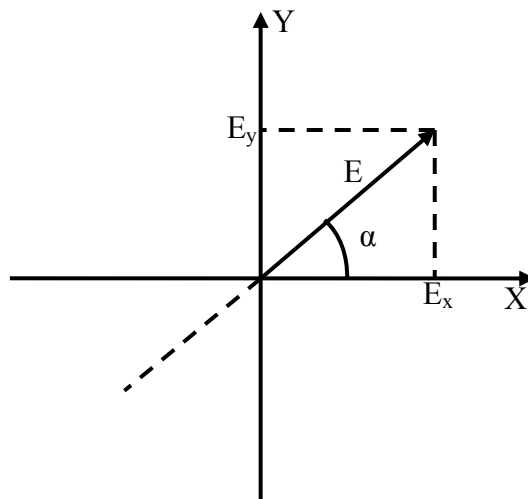


Рисунок 6.1 – Вектор Джонса

Можно привести вектор к следующей эквивалентной форме:

$$e^{i(\epsilon_y + \omega t)} \begin{bmatrix} A_x e^{i\epsilon_x} \\ A_y e^{i\epsilon_y} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Так как абсолютная величина любого члена вида  $e^{i\omega t}$  равна единице, то абсолютное значение множителя  $e^{i\omega t}$  тоже равно единице. Следовательно, этот коэффициент вполне можно опустить при решении тех задач, в которых не существенен характер изменений во времени. В большинстве задач такого типа вектор Джонса часто записывается в следующей форме, называемой полным вектором Джонса:

$$\begin{bmatrix} A_x e^{i\omega t} \\ A_y e^{i\omega t} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Очевидно, что если изменения во времени существенны, то параметр  $e^{i\omega t}$  можно снова ввести на любой стадии расчета.

В некоторых случаях полный вектор может быть упрощен еще больше. Например, если у нас есть горизонтально поляризованный свет, то  $A_y=0$ , и вектор записывается как:

$$\begin{bmatrix} A_x e^{i\omega t} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Для света, линейно поляризованного под углом  $45^\circ$ , значения  $A_x$  и  $A_y$  равны, величины  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  тоже равны, и вектор примет вид:

$$\begin{bmatrix} A_x e^{i\omega t} \\ A_x e^{i\omega t} \end{bmatrix} = A_x e^{i\omega t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Для правоциркулярного поляризованного света  $A_x=A_y$  и  $\gamma=\epsilon_y-\epsilon_x=\pi/2$ , следовательно, вектор запишется как:

$$[A_x e^{i(\varepsilon_x)} + A_y e^{i(\varepsilon_y + 1/2\pi)}]$$

(6.6)

Интенсивность пучка пропорциональна сумме квадратов амплитуд отдельных элементов. Если единицы интенсивности и амплитуды выбраны так, что коэффициент пропорциональности равен единице, то соотношение будет таким:

$$I = A_x^2 + A_y^2$$

(6.7)

Всякий полный вектор можно преобразовать к стандартной нормированной форме, умножая его на некоторый скаляр (обычно комплексный), в результате чего интенсивность приводится к единице, а вектор – к простейшей форме.

На рис. 6.2 приведены стандартный нормированный и полный векторы Джонса для некоторых форм поляризации.

| Проекционная картина | Форма поляризации    |               |                               |                 | Вектор Джонса                                              |                                                                  |
|----------------------|----------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                      | $\alpha$ , град      | $\frac{b}{a}$ | $\frac{A_y}{A_x}$             | $\gamma$ , град | стандартный нормированный                                  | полный                                                           |
| —                    | 0                    | 0             | 0                             | —               | $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$                     | $\begin{bmatrix} A_x e^{ie_x} \\ 0 \end{bmatrix}$                |
|                      | 90                   | 0             | $\infty$                      | —               | $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$                     | $\begin{bmatrix} 0 \\ A_y e^{ie_y} \end{bmatrix}$                |
| /                    | 45                   | 0             | 1                             | 0               | $\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$  | $\begin{bmatrix} A_x e^{ie_x} \\ A_y e^{ie_x} \end{bmatrix}$     |
| \                    | -45                  | 0             | 1                             | $\pm 180$       | $\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} A_x e^{ie_x} \\ -A_y e^{ie_x} \end{bmatrix}$    |
| Общий случай         | Линейная поляризация | 0             | Некоторое положительное число | 0 или $\pm 180$ | $\begin{bmatrix} \cos R \\ \pm \sin R \end{bmatrix}$       | $\begin{bmatrix} A_x e^{ie_x} \\ \pm A_y e^{ie_x} \end{bmatrix}$ |

Рисунок 6.2 – Векторы Джонса для различных форм поляризации

Когда же вектор не соответствует ни одному из этих простых случаев, то применяется следующая процедура из трех этапов:

1. Приведение к форме полного вектора Джонса:  $\begin{bmatrix} A_x e^{ie_x} \\ A_y e^{ie_y} \end{bmatrix}$ ;
2. Вычисление углов  $R$  (угол между компонентами вектора поляризации) и  $Y$  (разность фаз).

$$R = \left| \arctg \left( \frac{A_y}{A_x} \right) \right| \quad (6.8)$$

$$Y = (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \quad (6.9)$$

3. Третий этап заключается в применении следующих правил: если  $\sin Y > 0$ , то мы имеем эллипс с правым вращением, если  $\sin Y < 0$ , то эллипс с левым вращением.

Азимут  $\alpha$  главной оси определяется выражением:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg[\operatorname{tg} 2R \operatorname{tg} 2\gamma] \quad (6.10)$$

Эллиптичность:

$$\frac{b}{a} = \operatorname{tg} \beta \quad (6.11)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin(\sin 2R \sin 2\gamma) \quad (6.12)$$

Используя вектор Джонса, легче вычислить результат сложения двух когерентных пучков полностью поляризованного света. Для этого записывают два полных вектора, соответствующих заданным формам поляризации, интенсивности и фазам. Затем эти векторы складывают. Наиболее важное применение рассматриваемый вектор находит в расчетах по методу Джонса – самому краткому алгебраическому методу расчета характеристик, которыми будет обладать полностью поляризованный луч после прохождения через ряд идеальных фазовых пластинок и поляризаторов.

Если вектор Джонса составляется для описания поляризованного пучка света, выходящего из лазера, то матрица Джонса описывает характер прохождения излучения сквозь различные оптические устройства, такие как призмы, фазовые пластинки, изоляторы. Преимущества метода Джонса по сравнению с методом Мюллера состоят в том, что, во-первых, в нем используются матрицы меньшего размера (2\*2 вместо 4\*4) и, во-вторых, метод применим для решения таких задач, в которых необходимо учитывать фазовые соотношения. В методе Джонса многие элементы матриц являются комплексными. Однако метод Джонса совершенно неприменим к деполяризирующим устройствам, что в принципе подходит для математических расчетов в моей дипломной работе.

При использовании метода Джонса необходимо записать вектор Джонса для входящего света, затем выписать соответствующие матрицы Джонса для поляризаторов и фазовых пластинок, через которые проходит свет, и, перемножая эти выражения, получить вектор Джонса для выходящего света.

Матрицы Джонса для большинства важных поляризаторов и фазовых пластинок уже выведены, найти их в справочнике по оптике не составляет труда.

Чтобы определить матрицу Джонса, исходят из обычного математического выражения, описывающего монохроматический (поляризованный) пучок волн и математическим путем определяют те изменения, которые возникают при введении на пути света данного поляризатора или фазовой пластинки. Матрицы, приведенные на рисунке, имеют простейшую форму и называются стандартными матрицами. Они очень удобны для исследования интенсивности и формы поляризации выходящего пучка. Однако они не дают никакой информации об изменении абсолютной фазы. Чтобы определить абсолютную фазу выходящего пучка, необходимо пользоваться полной матрицей. Например, полная матрица идеального однородного линейного поляризатора, ориентированного так, что ось пропускания горизонтальна, имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} e^{-i2\pi nd/\lambda_z} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = e^{-i2\pi nd/\lambda_z} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

где  $n$  – соответствующий показатель преломления,  $d$  – толщина и  $\lambda_z$  – длина волны в вакууме.

Чтобы найти результат действия последовательности оптических устройств на полностью поляризованный пучок, справа следует записать вектор Джонса входящего пучка, затем справа налево — матрицы проходимых светом устройств, так что матрица самого последнего

устройства оказывается расположенной слева. Результат умножения зависит от того, в какой последовательности записаны матрицы.

## 7 ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Конструкция оптической схемы, в которую входят фазовые пластинки и поляризаторы позволяет достаточно точно ее настроить и получить лазерное излучение с нужным направлением ориентации вектора поляризации. Однако по мере прохождения пучка по кругу оптического волокна, он испытывает некоторые отклонения от заданных настроек, что довольно сложно исправить путем механической перенастройки углов поворота оптических элементов. Эту проблему могут устранить жидкие кристаллы, изменение оптических свойств которого регулируется с помощью приложенного к кристаллу внешнего поля. Замена хотя бы одного поляризатора в схеме жидким кристаллом позволит существенно упростить механизм регулировки степени поляризации излучения волоконного лазера во время его работы.

В данной магистерской работе было принято решение по замене второй справа четвертьволновой фазовой пластинки жидким кристаллом для упрощения регулировки поляризации проходящего сквозь него лазерного излучения. Метод матриц Джонса, который был использован при анализе оптических элементов, не подходит для описания оптических свойств ЖК, так как метод Джонса оперирует только оптическими величинами, такими как фаза, интенсивность и зависимость угла поворота плоскости поляризации от азимутального угла и разности фаз оптического элемента. В ЖК показатель преломления зависит от величины приложенного к нему электрического поля. Поэтому для описания оптических свойств жидкого кристалла я использовал метод, основанный на теории Озеена-Франка.

### 7.1 ТИПЫ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Жидкие кристаллы (ЖК) – особое термодинамическое состояние вещества, промежуточное между кристаллическим твердым телом и аморфной жидкостью и характеризующееся определенным порядком в

расположении молекул. В этом состоянии имеет место анизотропия механических, электрических, магнитных и оптических свойств.

Выделяют три типа жидких кристаллов – нематические, холестерические и смектические. ЖК, входящие в каждую из групп, различаются физическими, прежде всего оптическими свойствами. Это различие следует из их структуры.

У нематических ЖК (НЖК) под микроскопом можно обнаружить наличие микроструктуры в виде нитей (“нема” – по-гречески “нить”), концы которых либо свободны, либо связаны стенками емкости, в которой находится изучаемое вещество.

Основные черты нематической мезофазы, графически представленные на рис. 5.1, следующие:



Рисунок 7.1 – Расположение молекул в нематической мезофазе

1. Отсутствует дальний порядок в расположении центров тяжести молекул, что проявляется в полной свободе перемещений центров тяжести отдельных молекул в пространстве.

2. Существует дальний порядок в ориентации молекул, что отражается на всех макроскопических тензорных свойствах. Молекулы

НЖК имеют тенденцию устанавливаться параллельно некоторой общей оси. Направление их преимущественной ориентации принято

характеризовать единичным вектором  $\mathbf{n}$ . Этот вектор называется директором. Во всех известных случаях имеется полная симметрия вращения молекул относительно оси  $\mathbf{n}$ .

3. Направление вектора  $\mathbf{n}$  в пространстве произвольно; на практике оно определяется слабыми силами (например, ориентирующим влиянием стенок сосуда). Эта ситуация характерна для систем с нарушенной симметрией вращения.

4. Состояния директоров  $\mathbf{n}$  и  $(-\mathbf{n})$  неразличимы. Например, если отдельная молекула имеет постоянный дипольный момент, то число диполей, направленных “вверх”, равно числу диполей, направленных “вниз”.

5. Нематическая фаза встречается только среди веществ, у которых правая и левая формы неразличимы. Каждая молекула, входящая в состав вещества, должна быть тождественна своему зеркальному изображению (ахиральность).

Холестерическая мезофаза отличается от НЖК тем, что она состоит из оптически активных молекул (рис.5.2). Как следствие, структура имеет винтовую ось симметрии, расположенную нормально к направлению предпочтительной ориентации молекул. Это обусловлено тем, что каждая молекула холестерика наряду с плоской конфигурацией имеет боковую метильную СН<sub>3</sub>-группу, расположенную над или под плоскостью.

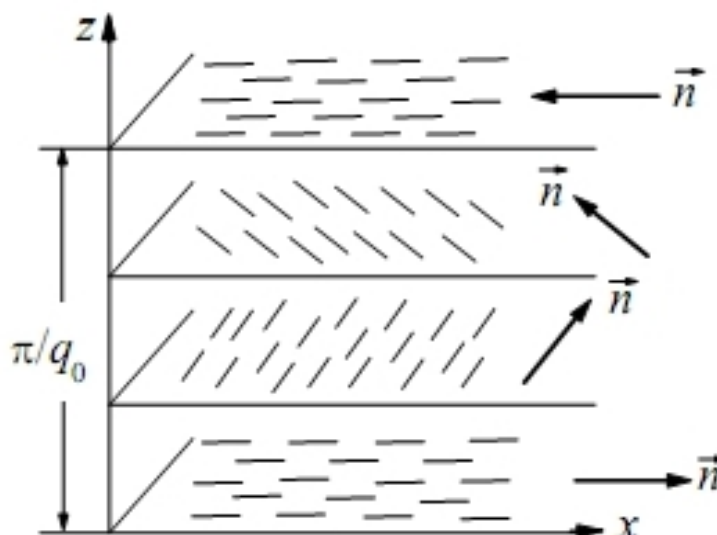


Рисунок 7.2 – Расположение молекул в холестерической мезофазе

При такой конфигурации атомов в молекулах следует, что направление ориентации длинных осей молекул в каждом слое отклонено примерно на  $15^\circ$  по сравнению с предыдущим слоем. Эти отклонения суммируются по всей толщине вещества, что и приводит к образованию спиральной молекулярной структуры.

Спиральная структура холестериков лежит в основе использования их для медицинских целей, когда требуется изменение окраски. Температура пациентов регистрируется специальными ЖК-датчиками, изменяющими свою окраску за счет свойств холестериков.

Смектические ЖК (“смегма” – по-гречески “мыло”) по структуре более близки к твердой фазе, и в них наблюдается дополнительно к ориентационной упаковке слоистая упаковка.

Характерным примером смектического ЖК является оболочка мыльного пузыря. В нем внешняя и внутренняя поверхности пузырьков, между которыми находится вода, представляют собой смектические слои. Взаимное притяжение молекул мыла в поверхностных слоях создает

необходимое для устойчивости пузыря поверхностное сцепление. Возможны различные типы упаковок молекул в слоях смектического ЖК, т. е. полиморфизм смектиков. В смектике А (рис. 5.3слева) длинные оси молекул ориентируются перпендикулярно смектическим слоям. Смектик А, так же, как и нематики, оптически одноосен, и  $n$  совпадает с оптической осью.

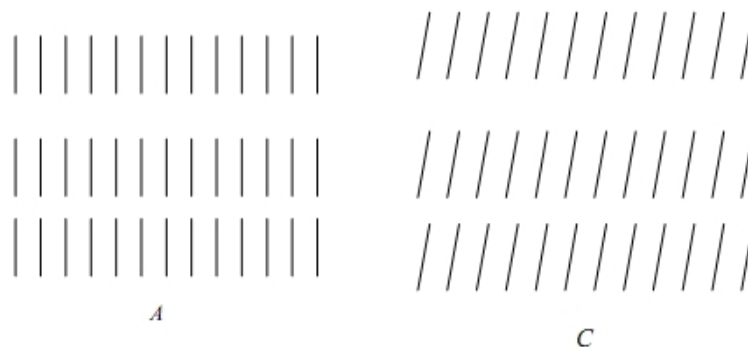


Рисунок 7.3 – Расположение молекул в смектиках А и С

Оптическая индикатриса у смектика А подобна индикатрисе нематика.

Наклонная смектическая фаза названа смектической С-фазой (рис. 5.3, справа). Она обладает оптической двуосностью. Ориентация директора  $n$  в смектическом слое С показана на рис. 5.4. Существуют два типа смектических жидких кристаллов с С-фазой разными углами наклона: первый – с большим углом  $\theta$ , который не зависит от температуры среды (С1-фаза), и второй – с малым углом  $\theta$ , сильно меняющимся с температурой (С2-фаза).

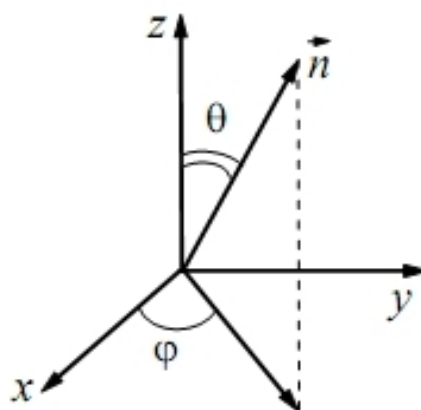


Рисунок 7.4 – Ориентация директора в смектике С

Для всех веществ с С2-фазой наблюдается фазовый переход к смектику А, в то время как для веществ с С1-фазой такого перехода нет. Кроме указанных, изучаются и смектики с сегнетоэлектрическими свойствами, где важны поляризационные свойства структуры, связанные с прецессией наклона директора ЖК в смектическом слое (так называемые смектики С).

Однако следует отметить, что контраст систем на основе смектиков ниже, чем систем на основе нематиков, кроме того, смектические жидкокристаллические смеси достаточно дороги, поскольку для их синтеза используется много добавочных компонентов. Ориентация смектиков является сложным процессом, что обусловлено необходимостью сохранения укладки молекул по слоям структуры без нарушения их упорядочения в приповерхностном слое, например за счет технологии натирания ориентирующего покрытия.

Выбор нематиков для большинства разработок с применением ЖК-структур, используемых в системах коррекции фазовых аберраций и в дисплейной технике, определяется следующими причинами.

1. Существует хорошо отработанная методика ориентации нематических ЖК, что позволяет успешно получать однородные ЖК-структуры большой площади. Используются методы планарной

(расположение молекул вдоль поверхности подложки,  $\theta = 0^\circ$ ), гомеотропной (расположение молекул перпендикулярно поверхности подложки,  $\theta = 90^\circ$ ) или косой (под определенным углом наклона директора,  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ) ориентаций молекул ЖК. Схематично укладка молекул ЖК при указанных способах ориентации показана на рис. 5.5.

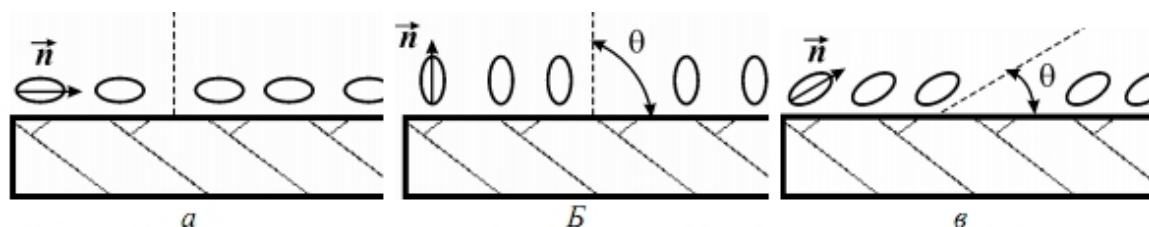


Рисунок 7.5 – Расположение молекул ЖК различных видов ориентации:

а – планарной; б – гомеотропной; в – наклонной (косой)

Ориентация молекул на поверхности характеризуется двумя параметрами – средним углом наклона молекул  $\theta$  к плоскости поверхности и энергией сцепления молекул с поверхностью  $W_s$ . Различают случаи жесткого сцепления, т. е. когда  $W_s \rightarrow \infty$ , и слабого сцепления, когда  $W_s$  имеет конечное значение; в типичных случаях оно составляет  $10^{-5}$  Дж·м<sup>-2</sup>.

Поскольку энергия сцепления ЖК с подложкой и условия ориентации значительно влияют на все физические свойства ЖК, вводится понятие плотности свободной поверхностной энергии  $F_s$ ; эта величина по своему физическому смыслу тождественна межфазному поверхностному натяжению. Одна из аппроксимаций свободной поверхностной энергии предложена Рапини:

$$F_s = \frac{1}{2} W_s \sin^2 \theta \quad (7.1)$$

Энергия сцепления, описываемая формулой (16), для нематиков в случае планарной ориентации может иметь разброс значений от  $10^{-4}$  до  $10^{-8}$  Дж·м<sup>-2</sup>. Используются такие ориентирующие покрытия, как оксиды церия

(CeO), кремния (SiO, SiO<sub>2</sub>), германия (GeO), поливиниловый спирт, полиимидные покрытия; натирание стеклянной поверхности хлопчатобумажной тканью также приводит к планарной ориентации молекул ЖК. В случае гомеотропной ориентации часто используются поверхностно-активные вещества, такие как лецитин, плавленый кварц.

Как бы хорошо не был сориентирован нематик, зачастую директор испытывает некоторое угловое смещение в плоскости подложки. Тогда, в общем случае, энергию сцепления  $W_s$  можно представить в виде суммы азимутального члена ( $W_\varphi$ ), описывающего сцепление при повороте директора в плоскости твердой поверхности (подложки), и полярного члена ( $W_\theta$ ), описывающего внеплоскостное сцепление. Азимутальная энергия превалирует при планарной ориентации, полярная – при гомеотропной.

2. Малостью флуктуаций директора НЖК в электрическом и магнитном полях определяется практическое отсутствие светорассеяния и связанное с ним нарушение когерентности света в тонких ориентированных слоях НЖК.

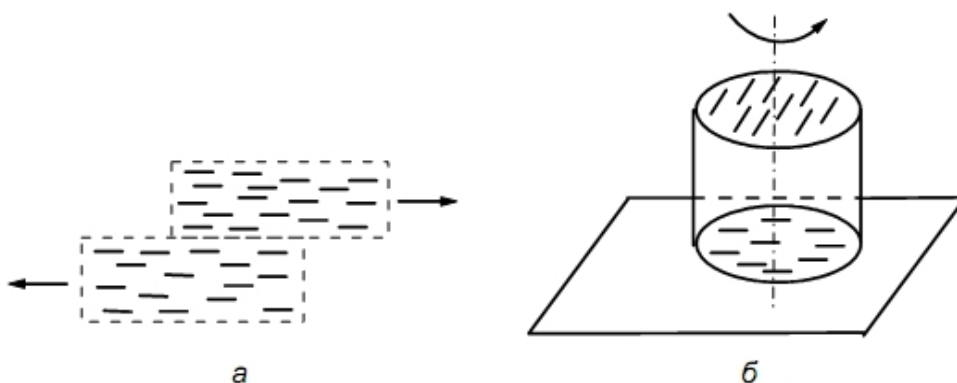
3. Многие из нематических ЖК устойчивы к электрохимическому разложению при действии постоянного напряжения, которое используется в работе высокочувствительных ПВМС.

4. НЖК хорошо изучены, промышленный выпуск их отлажен и обеспечивает поставку смесей с различными значениями оптической ( $\Delta n$ ) и диэлектрической ( $\Delta \epsilon$ ) анизотропий.

Часто используются НЖК на основе смесей цианобифенилов ( $\Delta \epsilon = +12$ ,  $\Delta n = 0.22$ ,  $\Delta t = 0 \dots 59^\circ \text{C}$ ).

При описании фотоупругих свойств жидких кристаллов последние рассматриваются как сплошная среда (континуум) без учета ее молекулярной структуры. Это обусловлено тем, что все экспериментальные наблюдаемые деформации среды имеют пространственный размер порядка микрометра, в то время как размеры молекул лежат в диапазоне его тысячных долей. Нематик является простейшей системой для рассмотрения фотоупругих и вязкоупругих свойств ЖК.

Основное отличие деформаций ЖК от деформаций твердого тела заключается в том, что в ЖК нет растяжения или сжатия слоев при изгибах и поступательном движении частиц при кручении. Это результат “проскальзывания” одних жидких слоев относительно других. Чисто сдвиговая деформация ЖК (рис. 5.6, а) почти не требует затрат энергии.



### Рисунок 7.6 – Иллюстрация отсутствия сдвиговых напряжений в жидком кристалле

Например, закручивание твердого цилиндра, закрепленного с одного конца (см. рис. 5.6, б), сопровождается сдвиговым напряжением; в ЖК проявляется поворот направления молекулярных осей в более высоком слое относительно более низких слоев без растяжения или сжатия. Упругости изотропной жидкости и твердых кристаллов связаны с изменением их плотности; в ЖК изменению плотности тоже отвечает соответствующий модуль, но упругость, связанная с локальным изменением ориентации директора, является их главной особенностью.

## 7.2 ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Важное практическое значение имеют электрооптические эффекты, вызываемые только диэлектрическими силами (ориентационные или полевые эффекты), и эффекты, в которых наряду с диэлектрическими силами, участвует проводимость ЖК. Последние эффекты связаны с проявлением электрогидродинамических неустойчивостей в ЖК.

Все современные теории электрооптических эффектов в ЖК используют модель ЖК в виде непрерывной упругой анизотропной среды. Согласно теории Озеена–Франка, электрическое поле вызывает такую деформацию ЖК, что результирующее распределение длинных осей молекул директора  $n(x,y,z)$  минимизирует свободную энергию объема ЖК, состоящую из упругой и диэлектрической компонент.

С учетом электрического воздействия на систему наиболее простой вид функционала  $G$  свободной энергии НЖК, для которого характерны дальний ориентационный порядок и полная свобода перемещения отдельных молекул, приведен в выражении (17):

$$G = \frac{1}{2} \int [K_{11} (\text{div } \mathbf{n})^2 + K_{22} (\text{rot } \mathbf{n})^2 + K_{33} (\mathbf{n} \cdot \text{rot } \mathbf{n})^2 - \frac{\Delta \epsilon}{4\pi} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})^2] dv \quad (7.2)$$

где интегрирование ведется по всему объему  $V$  жидкого кристалла. Напомним, что первый член в подынтегральном выражении описывает S-деформацию (модуль упругости  $K_{11}$ ), второй – В-деформацию (модуль упругости  $K_{22}$ ) и третий – Т-деформацию (модуль упругости  $K_{33}$ ). Четвертый член в выражении (7.2) описывает взаимодействие НЖК с электрическим полем  $E$ .

Диэлектрическая анизотропия дает, в принципе, возможность ориентировать нематик электрическим полем. В результате в ЖК с положительной диэлектрической анизотропией ( $\Delta \epsilon > 0$ ) директор стремится ориентироваться вдоль поля  $E$ , а при  $\Delta \epsilon < 0$  директор стремится установиться перпендикулярно полю. Упругие же силы стремятся вернуть ЖК в исходное состояние, определяемое граничными условиями на поверхности слоя.

В случае, когда исходное направление максимальной поляризуемости ЖК перпендикулярно полю, существует пороговое напряжение, при достижении которого начинается деформация:

В выражении (1.13)  $K_{ij}$  – соответствующий модуль упругости. Отметим, что ориентация молекул непосредственно на поверхности слоя ЖК остается практически постоянной независимо от напряжения  $V$  на слое. Это означает, что деформация максимальна в центре слоя ЖК, причем угол поворота молекул  $\theta$  может, действительно, достигать здесь значения  $90^\circ$ .

Большинство электрооптических эффектов в НЖК изучается в тонких ЖК-ячейках толщиной 2...10 мкм. Нематическая композиция



одинаково. Деформация начинается, когда напряжение на электродах превысит пороговое значение  $V_{\text{пор}}$ , и имеет вначале вид поперечного изгиба (модуль упругости  $K_{11}$ ). Отсюда эффект и получил свое название. В этом случае все отклонения директора происходят в одной плоскости, так что компоненты директора:  $n_x = \cos \theta(z)$ ,  $n_y = 0$ ,  $n_z = \sin \theta(z)$ . В исходном состоянии слой НЖК эквивалентен пластинке одноосного кристалла, причем оптическая ось лежит в плоскости слоя, т. е. двойное лучепреломление  $\Delta n$  максимально. В процессе деформации величина  $\Delta n$  уменьшается с ростом напряжения  $V$ , стремясь к нулю при полной переориентации молекул НЖК. Если жидкокристаллическую ячейку поместить между скрещенными поляризаторами, то интенсивность света, прошедшего через ячейку, описывается выражением:

$$I = I_0 \sin^2 2\varphi_0 \sin^2 \frac{\Delta\Phi}{2} \quad (7.3)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего света с учетом пропускания поляроидов;  $\varphi_0$  – угол между осью поляризатора и начальной ориентацией молекул на подложках;  $\Delta\Phi$  – фазовая задержка между обыкновенным и необыкновенным лучами. Очевидно, что глубина модуляции (контраст) максимальна, если  $\varphi_0 = 45^\circ$ . На рис. 7.8 представлены фазовая задержка  $\Delta\Phi$  и интенсивность прошедшего через НЖК света (в скрещенных поляроидах) в зависимости от напряжения  $V$  на ячейке.

Ясно, что двулучепреломление является основной оптической характеристикой, наблюдаемой в S-эффекте. Его значение  $\Delta n$  или разность фаз  $\Delta\Phi$  между обыкновенным и необыкновенным лучами однозначно связаны с распределением показателя преломления  $n(z)$  по толщине ячейки, причем для монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  имеем:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi\Delta n d}{\lambda} \quad (7.4)$$

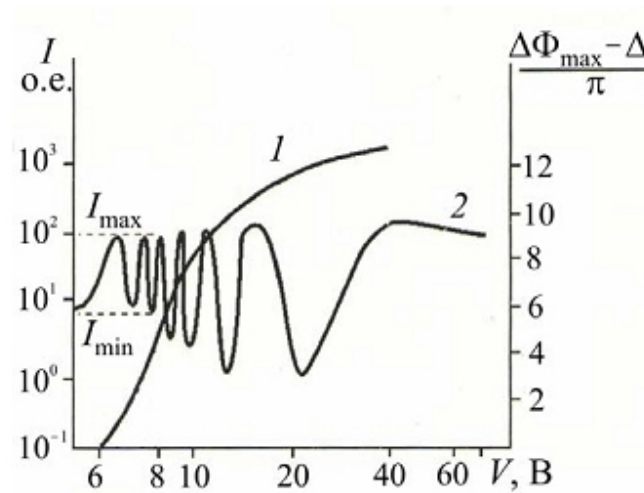


Рисунок 7.8 – Фазовая задержка  $\Delta\Phi$  (1) и интенсивность (2) прошедшего через НЖК света (в скрещенных поляроидах) в зависимости от напряжения  $V$  на ячейке

$$\Delta n = \frac{1}{d} \int [n(z) - n_e] dz \quad (7.4)$$

$$n(z) = n_o n_e (n_e^2 \cos^2 \theta(z) + n_o^2 \sin^2 \theta(z))^{0.5} \quad (7.5)$$

где , в выражениях (22) и (23) – главные значения показателя преломления или главные оси эллипсоида оптической индикатрисы.

Максимальное значение двулучепреломления дается формулой (24):

$$\Delta n = n_o - n_e \quad (7.6)$$

Значение  $\Delta n$  обычно составляет 0.15–0.3, поэтому зависимость  $I(V)$  при указанных толщинах слоя ЖК имеет большое число максимумов и минимумов (рис. 5.8). В работе [18] указывалось, что при фазовой задержке  $\Delta\Phi = 4\pi$  для всех исследованных ячеек на S-эффекте, наблюдается глубокий “минимум”, для которого отношение интенсивностей света  $I/I_0$  по отношению к максимуму при  $\Delta\Phi = 3\pi$  достигает 600:1. Осциллирующий характер зависимости  $I/I_0$  используется при экспериментальном определении толщины ЖК-ячейки и также важен в определении контрастного отношения.

Стоит отметить, что оптическая анизотропия (двулучепреломление  $\Delta n$ ) ЖК довольно велика. Ее значение может достичь 0.5, что существенно выше, чем таковое для твердых кристаллов. Для сравнения, самым большим двулучепреломлением среди твердых веществ обладают кристаллы нитрата натрия, значение двулучепреломления которых составляет 0.25.

Двулучепреломляющие свойства нематиков и смектиков описываются оптической индикатрисой – вытянутым эллипсоидом вращения - с большой полуосью, равной необыкновенному показателю преломления  $n_e$  и круговым сечением с радиусом, равным  $n_o$ . Оптическая индикатриса расположена вдоль директора. Для холестериков оптическая индикатриса представляет собой сплюснутый эллипсоид с главными осями:  $n_o$ , направленной вдоль директора, и  $n_e$ , направленной вдоль оси спирали; при этом  $n_e < n_o$ .

Чтобы рассмотреть переходные процессы включения и выключения деформационных эффектов, нужно решить уравнение движения директора, в котором в момент вязкого трения (левая часть в (25)) приравнен сумме диэлектрического и упругого моментов:

$$\eta \frac{d\theta}{dt} = \frac{\Delta\epsilon^2}{4\pi} \theta + K_1 \frac{d^2\theta}{dz^2} \quad (7.7)$$

где  $\eta$  — соответствующий коэффициент вязкости. Решая (7.7), получаем выражения для времен включения и выключения деформационных эффектов:

## ВЫВОДЫ

В рамках данной работы проведен обзор волоконного кольцевого фемтосекундного лазера на основе легированного эрбием оптоволокна с накачкой при помощи полупроводникового лазера, и его составляющих элементов. Данная система накачивается монохроматическим излучением полупроводникового лазера на длине волны 980 нм, что совпадает с линией поглощения ионов эрбия, это обуславливает эффективное возбуждение активной среды. Выходное излучение имеет длину волны 1550 нанометров (эта спектральная область более безопасная для глаз человека, что позволяет гораздо чаще применять в различных системах) а длительность импульса меньше 100 фемтосекунд, это позволяет увеличить разрешающую способность в ладарных, картографических и др. системах. Так как данный лазер является волоконным, это дает возможность сделать конструкцию более компактной, уменьшить в разы энергопотребление, уменьшить вес, и увеличить стабильность работы, а значит, дает возможность использовать данную систему в портативных установках.

В данной работе проведен обзор опубликованной литературы по волоконным лазерам и волоконным световодам. Были рассмотрены различные виды волоконных лазеров, изучено их строение и принцип работы. Были освещены аспекты строения кольцевых волоконный лазеров, их принцип работы, а также рассмотрены схемы реализации однонаправленных и двунаправленных кольцевых лазеров. Сделан обзор основных элементов волоконных лазеров, изучена их конструкция и принцип работы. Рассмотрены теоретические основы получения синхронизации мод путем изменения поляризации оптических элементов. Изучены механизмы самопроизвольного переключения поляризации эрбиевого волоконного лазера и разработана теоретическая модель для описания поляризационных характеристик волоконного лазера и усилителя. На основе теоретических данных была спроектирована схема кольцевого волоконного лазера с

синхронизацией мод по поляризации, рассчитаны параметры поляризации компонентов оптической системы с помощью матриц Джонса. Был произведен анализ полученных значений и выдвинуты предположения по изменению данной конструкции кольцевого волоконного лазера для повышения его характеристик.

### **3 ТЕХНОЛОГІЇ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОГРАФІЧНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**

#### **3.1 Аналіз сучасного стану дослідження надлишкових температурних полів**

Рівень промислового розвитку на сучасному етапі характеризується не тільки об'ємом виробництва і асортиментом продукції, але і показниками її якості. Технічного діагностування і контролю потребують транспортні засоби, енергетичне обладнання, вироби машинобудівної, хімічної, харчової і багатьох інших галузей.

Відсутність контролю або неякісне його проведення може привести до порушень умов експлуатації обладнання, передчасному закінченню його функціонування і пов'язаному з цим значними матеріальними збитками. У деяких випадках наслідки можуть бути дуже важкими: пожежі, вибухи, отруєння довкілля і загибель людей.

Вирішенням цієї проблеми є застосування фізичних методів неруйнівного контролю (НК). Неруйнівний контроль забезпечує якість функціонування, надійність і безпеку експлуатації великої кількості самих різноманітних технічних об'єктів.

Зараз неруйнівний контроль — одна з необхідних умов безпеки, якому в світі приділяється велика увага.

У процедуру неруйнівного контролю входить опис усіх основних параметрів і дій, які треба робити при використанні техніки НК для вирішування конкретної задачі у відповідності з встановленим стандартом, нормами або технічними умовами.

Процедура неруйнівного контролю може включати застосування більше одного методу.

До засобів НК відносять контрольню-вимірювальну апаратуру, яка отримує інформацію про зміну фізичного стану об'єкту контролю під впливом випромінювання що проникає у нього.

Контроль якості продукції полягає в перевірці відповідності показників її якості встановленим умовам (ДСТУ або інша нормативно-технічна документація). Критеріями якості являються фізичні, геометричні і функціональні показники. Методи НК в залежності від фізичної дії на об'єкт контролю охоплюють: акустичний, магнітний, оптичний, радіаційний, тепловий, електричний та ін. [1].

### 3.1.1 Сутність методів і апаратура дослідження надлишкових температурних полів

Тепловий метод НК заснований на реєстрації температурних полів, що створюються на поверхні об'єкту, що контролюється, внаслідок його функціонування (пасивний ТНК) або під впливом зовнішньої теплової дії (активний ТНК). Про наявність прихованих дефектів свідчить поява температурних аномалій

Температура важливий показник, який несе інформацію про структуру об'єкту, його однорідність, наявність у ньому тепловиділяючих (теплопоглинаючих) елементів [2].

Як правило, при ТНК вимірювання температури проводиться безконтактно – по тепловому випромінюванню поверхні об'єкту контролю (ОК).

Головним завданням ТНК є визначення кореляції між зареєстрованим температурним полем ОК (у вигляді теплового зображення – термограми) і параметрами внутрішньої структури об'єкту.

Безконтактний ТНК почав розвиватися з 60-х років ХХ сторіччя, коли з'явилися перші комерційні прилади для вимірювання температурних полів – тепловізори.

Великий внесок у розвиток теплового методу внесли Вавілов В.П. (Росія), Малдаг К. (Канада), Стороженко В.О. (Україна), Э. Грінцато, П. Бізон, С. Марінетті (Італія) та ін. [2-8].

Порівняно з іншими методами НК тепловий метод має такі переваги [3]:

- дистанційність;
- висока швидкість обробки інформації і висока продуктивність, яка гальмується тільки швидкістю нагрівання в активному режимі;
- високе лінійне розділення;
- можливість пасивного контролю при однобічному доступі до об'єкту;
- можливість контролю практично будь-яких матеріалів та їх сполучень, за умови, що їх теплофізичні властивості відрізняються;
- можливість поточного контролю і створення автоматизованих систем управління технологічними процесами.

У свій час в СРСР були розроблені стандарти [1,9,10], які регламентували класифікацію і термінологію теплових методів, які були покладені у основу вітчизняних ДСТУ.

Схема проведення активного теплового контролю ілюструється рис 1.1.

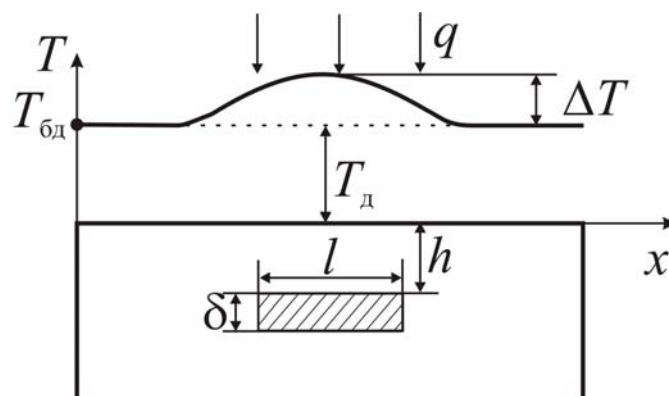


Рисунок 1.1 – Схема проведення активного ТК.

При наявності внутрішнього дефекту на поверхні об'єкту виникає аномалія температурного поля у вигляді температурного перепаду  $\Delta T$ :

$$\Delta T = T_{\partial} - T_{\partial\partial},$$

де  $T_{\partial}$  - значення температури поверхні над дефектом;

$T_{\partial\partial}$  - значення температури поверхні, де дефекти відсутні.

На відмінність від активного ТК об'єктами пасивного ТК (технічного діагностування) являються пристрої, у яких температурні поля є наслідком теплових процесів, що виникають при їх функціонуванні (наприклад, енергетичне обладнання, об'єкти металургії, машинобудування, нафтохімії та ін.). У такому випадку локалізація внутрішніх джерел тепла приводить до аномалій температурного поля [4]. Ілюстрацією може бути рис. 1.2, де наведена модель об'єкту контролю із внутрішніми джерелами тепла і термограма її поверхні. Термограма являє собою візуалізацію температурного поля шляхом відображення значень температури відповідним кольором.

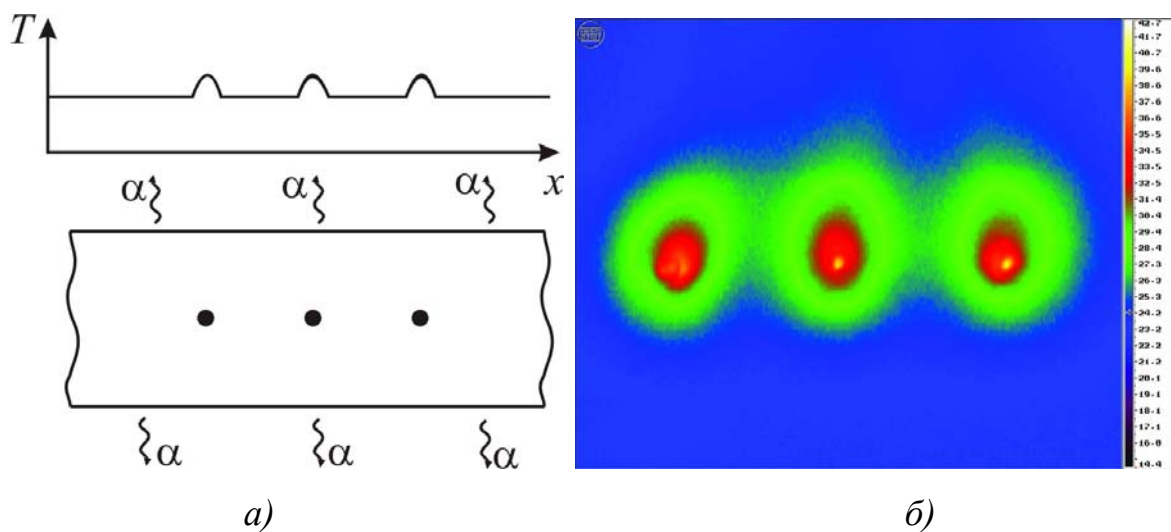


Рисунок 1.2 – Надлишкове температурне поле від внутрішніх джерел тепла при термографії: а) модель об'єкту у вигляді пластини з внутрішніми джерелами теплоти; б) термограма поверхні пластини..

З рис. 1.2 випливає, що термограма дозволяє встановити наявність схованих дефектів тепла в об'єкті, що контролюється, за локальними аномаліями температурного поля (на рис. 1.2,б - це плями червоного кольору).

У якості реєструючого пристрою використовується тепловий радіометр (пірометр) або тепловізор [12]. Найчастіше використовуються тепловізори, які дозволяють реєструвати температурне поле на великих поверхнях і тим самим підвищити продуктивність контролю. Параметри деяких сучасних тепловізорів наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри деяких сучасних тепловізорів [13-16]

| <i>Модель, фірма, країна</i>               | <i>Діапазон температур, що вимірюються</i>                                       | <i>Температурна чутливість</i> | <i>Спектральний діапазон, мкм</i> | <i>Формат кадру і бітність цифрового представлення</i> | <i>Частота зображення, Гц</i> | <i>Робоча температура, °C</i> | <i>Система запису термограм</i>                                          | <i>Маса, кг</i>         |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| <i>IRTIS-200, "IRTIS", Росія</i>           | <i>-20 ...350°C</i>                                                              | <i>0,05 °C</i>                 | <i>3 ...5<br/>8... 12</i>         | <i>256 x 256</i>                                       | <i>1/1,5</i>                  | <i>-<br/>10...+45</i>         | <i>На комп'ютері</i>                                                     | <i>1,8<br/>(камера)</i> |
| <i>ThermaCAM SC 500, FLIR Systems, США</i> | <i>Вимір. прилад для наук. дослідж. з підключенням до PC -20... +500 (+2000)</i> | <i>0,1 °C</i>                  | <i>7,5 ...13</i>                  | <i>320 x 240</i>                                       | <i>50 (60)</i>                | <i>-<br/>15...+50</i>         | <i>PCMCIA карта, 14 біт цифровий, 8-біт Вітмар Вихід PAL Запис звуку</i> | <i>2,6</i>              |
| <i>Fluke Ti30, Німеччина</i>               | <i>-10...250</i>                                                                 | <i>0,2 °C</i>                  | <i>8...12</i>                     | <i>160 x 120</i>                                       | <i>9</i>                      | <i>-<br/>10...+50</i>         | <i>PCMCIA карта на 100 зображен</i>                                      | <i>1.0</i>              |
| <i>ThermaCAM P65, FLIR Systems, США</i>    | <i>-40...500</i>                                                                 | <i>0,08 °C</i>                 | <i>7,5...13</i>                   | <i>320 x 240</i>                                       | <i>50 (60)</i>                | <i>-15...+50</i>              | <i>Флеш-пам'ять 256 Мб (до 1000 зобр.)</i>                               | <i>1,4</i>              |
| <i>ThermaCAM A320, FLIR Systems, США</i>   | <i>-20...120</i>                                                                 | <i>0,07 °C</i>                 | <i>7,5...15</i>                   | <i>320 x 240</i>                                       | <i>30</i>                     | <i>-15...+50</i>              | <i>Цифровий вихід, запис зобр.</i>                                       | <i>0,7</i>              |

|                                         |                                |                |               |                  |           |                  |                                                 |            |
|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------|---------------|------------------|-----------|------------------|-------------------------------------------------|------------|
| <i>K 6800<br/>SpectraScan,<br/>СИЛА</i> | <i>-40...150<br/>120...600</i> | <i>0,08 °C</i> | <i>8...14</i> | <i>320 x 240</i> | <i>50</i> | <i>-25...+50</i> | <i>Флеш-<br/>пам'ять<br/>128 Мб<br/>(до 500</i> | <i>1,5</i> |
|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------|---------------|------------------|-----------|------------------|-------------------------------------------------|------------|

## 1.2 Сучасний стан і проблеми активного теплового контролю

Загальна схема проведення АТК наведена на рис. 1.3 [6]. Процедура АТК включає слідує дії: Вздовж поверхні об'єкту контролю 3 рухається джерело теплового збудження (ДТЗ) 2 і синхронно з ним реєструючий пристрій (РП) 1. Під дією ДТЗ у об'єкті виникає надлишкове температурне поле, яке реєструється РП. При наявності прихованого дефекту 4 на поверхні об'єкту виникає локальна аномалія температурного поля, по якій його можна виявити

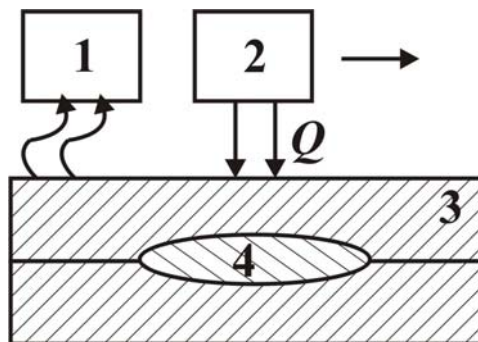


Рисунок 1.3 – Схема процедури проведення АТК:

1 – реєструючий пристрій (РП); 2 – джерело теплового збудження (ДТЗ);  
3 - об'єкт контролю; 4 - схований дефект.

В залежності від взаємного положення елементів схеми розрізняють методи АТК: 1) односторонні (ДТЗ і РП по одну сторону від об'єкту); 2) двохсторонні (ДТЗ і РП по обидві сторони від об'єкту); 3) комбіновані.

Існує інша схема проведення АТК, яка наведена на рис. 1.3. При реалізації такої схеми РП нерухоме і температурне поле, яке виникає під дією теплового імпульсу  $q$  реєструється багаторазово (у динаміці). У такому випадку результатом контролю є послідовність термограм, а сама процедура має назву динамічної (рис. 1.4) [3].

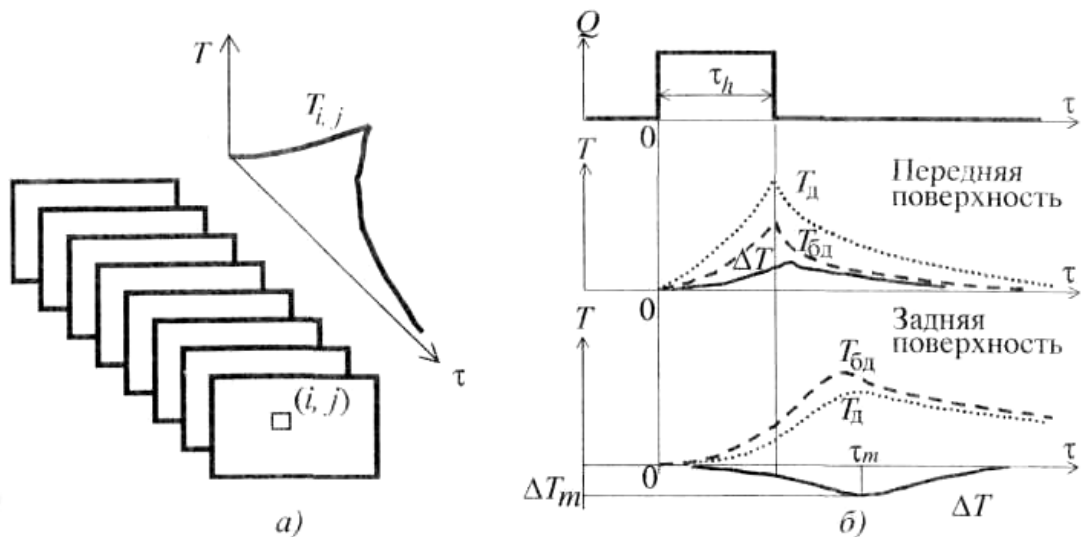


Рисунок 1.4 – Схема динамічної процедури АТК:

*a* - формування послідовності термограм функції  $T(i,j,\tau)$ ;

*б* - імпульс нагріву і формування температурного сигналу  $\Delta T$

Динамічне температурне поле на поверхні об'єкту контролю описується функцією  $T(x,y,\tau)$ . У першому наближенні можна прийняти, що у бездефектних зонах у будь-який момент часу температура має постійне значення, або змінюється відомим чином. У такому випадку вводять еталонне значення температури, яке збігається із значенням температури над бездефектною зоною.

$$T_{\delta\delta}(x_{\delta\delta}, y_{\delta\delta}, \tau) = T_{\delta\delta}(\tau).$$

У зоні дефекту регулярний характер температурного поля порушується і виникають локальні температурні сигнали (перепади):

$$\Delta T(x, y, \tau) = T_{\delta}(x, y, \tau) - T_{\delta\delta}(x_{\delta\delta}, y_{\delta\delta}, \tau).$$

При одностороннім АТК форма просторового профілю над малими слабопровідними дефектами наближається до гаусоїди [3].

Під час нагрівання  $\tau_h$  температура зростає від початкового (умовно-«нульового») рівня до максимального значення  $T_m(\tau_h)$ , після чого спадає. Різниця температур між дефектною і бездефектною зонами на поверхні об'єкту досягає максимального значення  $\Delta T_m$  у момент часу  $\tau_z$ .

У дефектній зоні внаслідок присутності дефекту на деякій глибині вид температурної функції змінюється, що потребує введення у розглядання процесу сигнал  $\Delta T(x_i, y_i)$ .

Все вище сказане складає спільні закономірності АТК, на підставі яких вирішується кожна конкретна виробнича задача.

Під виробничою задачею АТК розуміють організацію контролю даного виду продукції тепловим методом в умовах конкретного виробництва (експлуатації). Рішення цієї задачі включає розробку (вибір) методики і засобів контролю а також дії, спрямовані на введення операції контролю у виробничий процес [6].

Процес вирішення задачі АТК можна умовно розділити на три етапи: 1) розробка моделі об'єкту контролю і її аналіз; 2) розробка (вибір) методики контролю; 3) розробка спеціалізованих (вибір уніфікованих) засобів контролю. Внаслідок тісного зв'язку наведені етапи не являються строго послідовними.

Для вирішення задачі АТК необхідна наявність наступних даних: інформація до якої групи належать дефекти (порушення цілності, інородні внесення, анізотропні якості матеріалу, і т. і.); інформація на якій глибині можлива наявність дефектів, які можливі мінімальні розміри (нижче яких дана неоднорідність вже не вважається дефектом); теплофізичні характеристики (ТФХ) матеріалу ОК ( $\lambda, c, \rho$ ), розміри конструкції, ступінь неоднорідності коефіцієнту випромінювання ( $\Delta \varepsilon / \varepsilon$ ); допустима температура нагріву  $T_{don}$  ОК [2].

Оптимальним рішенням задачі АТК є вибір такого способу контролю, режиму його проведення, засобів контролю, при яких забезпечується максимальне відношення сигнал/шум для порогових дефектів. Можуть бути і інші критерії оптимізації, наприклад, продуктивність контролю або його достовірність [6].

Основою оптимізації є побудова і аналіз теплофізичної моделі об'єкту, яка передбачає вирішення прямої задачі теплопровідності у структурі з локальними неоднорідностями.

Така задача полягає у вирішенні рівняння Фур'є:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T,$$

де  $a$  - коефіцієнт температуропровідності речовини, при обраних кордонних умовах:

$$T(\tau) = T_{cp}(\tau),$$

$$-\lambda_c \left( \frac{\partial T_c}{\partial n} \right) = -\lambda \left( \frac{\partial A}{\partial n} \right).$$

Одновимірні і багаточарові задачі можуть бути вирішені різними методами: операційним, термічного чотирьохполюсника, функцій Грина. Для багатовимірних моделей найбільше придатні чисельні методи [3].

На основі аналізу відомих моделей [2,3,6,17-20] встановлено ряд закономірностей АТК. Встановлено, що на рівень сигналу від дефекту  $\Delta T$  впливають декілька груп факторів: геометричні параметри дефекту (глибина знаходження  $h$ , розкриття  $\delta$ , поперечний розмір  $l$ ); ТФХ дефекту (температуропровідність  $a_\delta$ , теплопровідність  $\lambda_\delta$ ); параметри режиму теплової дії (щільність потоку енергії  $q$ , час дії  $\tau_n$ , коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ ); параметри об'єкту контролю - товщина його стінки  $H$ , ТФХ ( $a$ ,  $\lambda$ ), гранично допустима температура нагріву  $T_{дон}$ .

Залежність температурного перепаду над дефектом від його геометричних параметрів показані на рис. 1.5. З рисунку 1.5а видно, що температурний перепад над дефектом практично прямо пропорційний його поперечному розміру. Рис. 1.5б показує, що температурний перепад сильно залежить від його товщини при малих значеннях  $\delta$ , при значних розкриттях дефектів проявляє ефект насичення. Рис. 1.5в відображає чутливість температурного перепаду над дефектом від глибини його

знаходження. На великих глибинах амплітуда перепаду значно зменшується [2,3].

Крім того, як видно з рис.1.6 [2], глибина залягання дефекту впливає не тільки на рівень температурного перепаду  $\Delta T$ , але і на час запізнювання  $\tau_z$ . Відомо, що із збільшенням глибини знаходження дефекту момент появи максимального температурного перепаду настає пізніше, а  $\Delta T$  має меншу амплітуду.

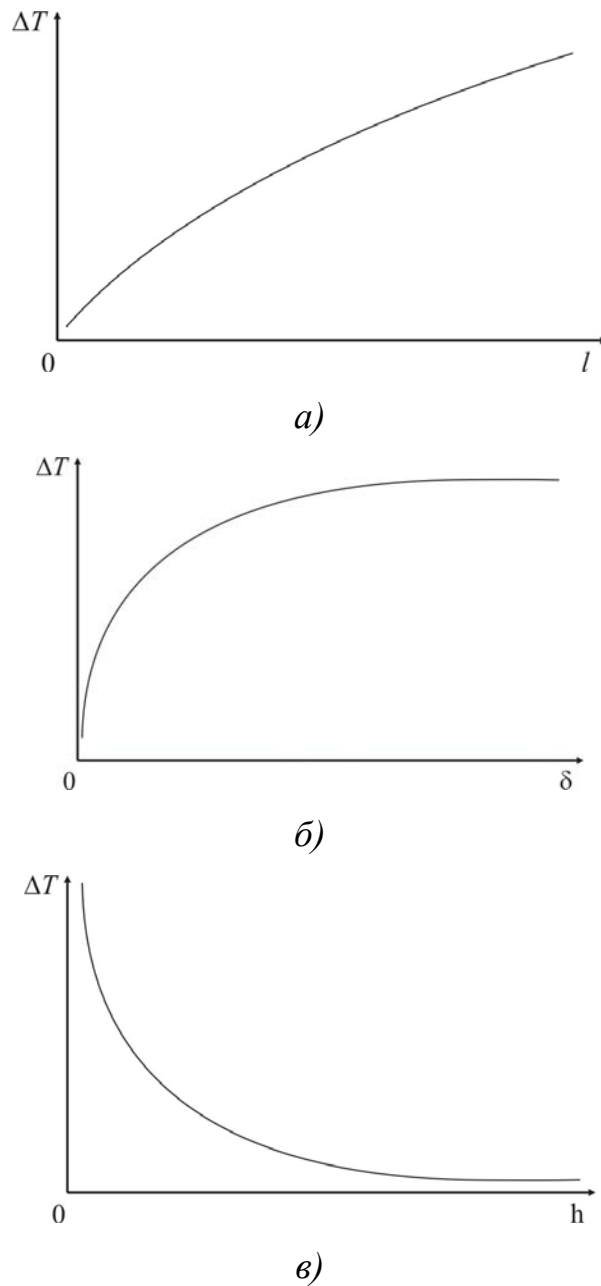


Рисунок 1.5 – Залежність температурного перепаду над дефектом від його геометричних параметрів: а) від поперечних розмірів дефекту; б) від товщини (розкриття) дефекту; в) від глибини знаходження дефекту.

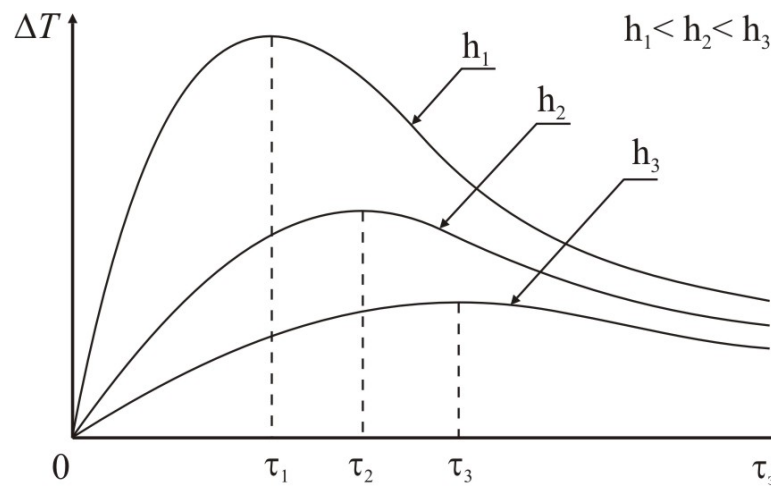


Рисунок 1.6 – Залежність температурного перепаду над дефектом і часом запізнювання від глибини знаходження дефекту.

Однак, незважаючи на достатньо глибоку проробку теорії АТК, ряд питань, важливих для використання АТК на практиці, залишаються без відповіді.

Зокрема:

1. Теплофізичні моделі, побудовані для об'єктів одного класу, по-перше, не завжди можуть бути використані для об'єктів іншого класу; по-друге, вони недоступні для користувачів (відсутні у переліку прикладних програм).

2. Існуючі теплофізичні моделі недостатньо адекватні реальному процесу АТК, так як не враховують обмеження по температурі нагріву ОК –  $T_{дон}$ , наявність завад і т.ін.

3. Критерій оптимізації АТК ( $\Delta T \rightarrow \max$ ), який використовується у теплофізичних моделях, не враховує ряду завад (неоднорідність поверхні по випромінювальній здібності  $\Delta \epsilon$ , нерівномірності нагріву).

Таким чином, для подальшого розвитку АТК і для поширювання галузей його використання потрібні нові (більше адекватні) моделі і новий підхід до оптимізації процесу АТК, заснований на максимізації відношення сигнал/завада.

### 1.3 Сучасний стан і проблеми термографії

Пасивний метод теплового контролю – термографія – широко використовується в світі, що можна проілюструвати таблицею А.2, яка наведена у Додатку А.

Достатньо розвинутою є нормативна база, яка регламентує використання термографії для неруйнівного контролю і діагностики [21-37].

Основними перевагами методу є дистанційність, продуктивність, швидкодія, безпека, екологічність, а головне – можливість проведення контролю без виводу обстежуваного об'єкту з експлуатації.

Апаратурою для проведення термографічних обстежень являються тепловізори (табл. 1.1). Тепловізори дозволяють отримувати двовимірні теплові зображення, які містять більше ніж 128х128 вимірювальних точок (пікселей) з кадровою частотою від 10 до 50 Гц.

Останнім часом (з розвитком FPA технологій) провідні фірми перейшли на випуск тепловізорів, де чутливим до ІЧ випромінювання являється FPA матриця, яка складається з 320х240 елементів, що еквівалентно прийнятому формату відеозапису. Вже налагоджений випуск тепловізорів з FPA матрицями до 1024х1024 елементів в кадрі [3].

Теплові зображення - кольорові термограми отримують шляхом псевдокольорового кодування температури. По бажанню оператора одній температурі можуть відповідати різні кольори. В тепловізорах використовують різні кольорові палітри: шкала «Радуга» (Rainbow), "Cіра" шкала (Gray), шкала (Iron). Треба відзначити, що у сучасних тепловізорів глибина оцифровування (від 12 до 16 біт) повністю перекриває динамічний діапазон вимірювань від, наприклад, від -20 до +2000 °С, тому в процесі роботи не треба регулювати рівень сигналу [3].

Головною проблемою термографії є встановлення зв'язку між зареєстрованими аномаліями температурного поля на поверхні об'єкту і параметрами його внутрішньої структури.

Загальних рекомендацій по вирішенню цієї задачі не існує, так як відсутня універсальна методика обробки термограм. Це пов'язано з тим, що кожний тип об'єктів має свої особливості - аномалії розподілу температури на поверхні (і на окремих її ділянках).

Наприклад, на рис. 1.7 наведено видиме зображення і термограма електричного розподільного щиту [16]. Аномалія температурного поля на термограмі відповідає замикачу, що згорів і вказує на його дефектність.. Крім того, очевидно, що аномалія температурного поля чинить вплив на розподіл температурних полів суміжних об'єктів.

На рис.1.8 наведені термограми циліндру поршневого двигуна літака [38]. Термограма рис. 1.8а відображає типове температурне поле циліндру із стандартною різницею температур між впускною і вихлопною порожниною циліндра. Нерівномірність температурного поля обумовлена функціонуванням і конфігурацією циліндра, але нагріті ділянки на поверхні циліндру на дефектність не вказують. На рис. 1.8б наведена термограма такого ж циліндру. Температурні поля обох циліндрів сходні по структурі, але другий циліндр являється більше нагрітим. При умові, що режими експлуатації ідентичні, аномалії температурного поля другого циліндру (у порівнянні з першою термограмою) можуть вказувати на відхилення у його функціонуванні.

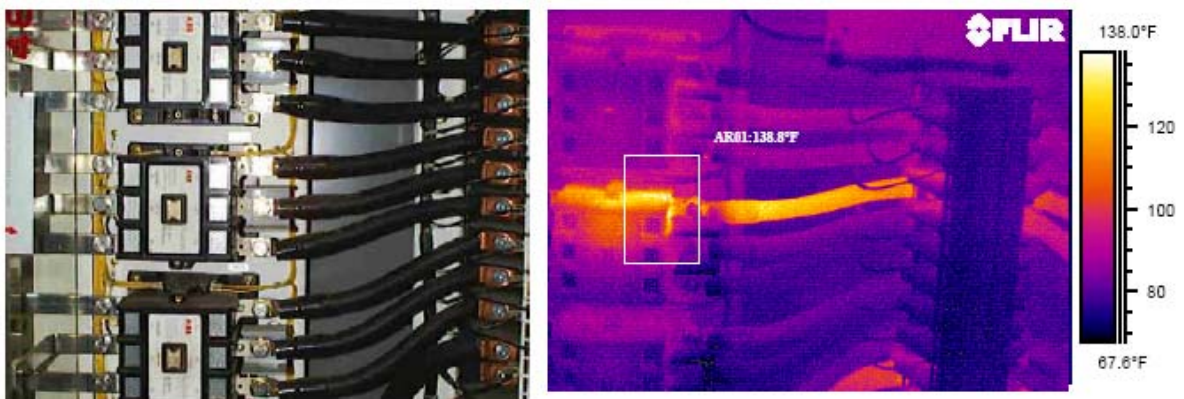
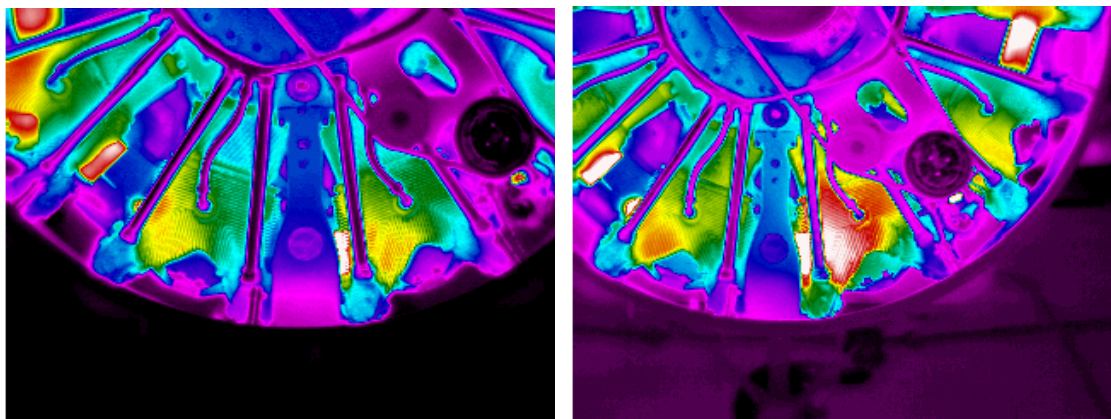


Рисунок 1.7 – Розподільчий щит (зліва) і його термограма (справа)



а)

б)

Рисунок 1.8 – Термограма циліндру поршневого двигуна літака.

У термографії об'єктом дослідження являються стаціонарні температурні поля, тому термограми розглядаються виключно як зображення без обліку механізму теплопередачі. Зображення обробляються як сукупність точок з визначеною амплітудою і морфологією (взаємним розташуванням).

Обробка зображень включає слідуєчі етапи [3]:

- оцифрування даних і їх стиснення;
- поліпшення, відновлення і реконструкцію;
- апроксимація, опис і розпізнавання;

Під покращенням розуміються процедури, які роблять зображення більше прийнятним для користувача. Наприклад, у ряді випадків істотного поліпшення візуальної інформативності термограм можна добитися за рахунок зміни динамічного діапазону і колірної палітри.

Для підвищення різкості термограм (здатності відтворювати малі деталі і межі переходу між зонами із різною температурою) часто використовують фільтри високих частот. Якщо зображення містить неприємний для зорового сприйняття високочастотний шум, характерні розміри якого менші розмірів шуканих дефектів, здійснюється згладжування термограм. Для цієї мети використовуються фільтри низьких частот і медіанні фільтри [5].

Для знижування специфічних завад до термограм застосовують прості арифметичні операції, такі як віднімання і ділення.

Проте при використуванні наведених вище методів треба враховувати, що апріорі будь-яка обробка зображення призводить до його викривлення. Доцільність і метод такої обробки визначається об'єктом контролю (структурою його температурного поля) і метою, яку ставить перед собою оператор. Крім того, стандартне програмне забезпечення сучасних тепловізорів відзначається великим набором функцій для візуалізації результатів контролю:

- накладання друг на друга видимого зображення і термограми;
- зшивання термограм між собою (при термографуванні великогабаритних об'єктів);
- відокремлювання окремих елементів на термограмі і визначення середніх, мінімальних і максимальних температур на їх поверхні;
- побудова двох- і тривимірних термопрофілей як усієї термограми, так і її окремих частин;
- аналізування термофільмів і побудова часових залежностей температури поверхні об'єкта контролю (його частин);
- перегляд гістограм зображень;
- коректування значень випромінювальної здатності ділянок поверхні об'єкта контролю;
- побудова ізотерм;
- формування звіту;
- запис отриманих термограм і термофільмів у формати, зручні для редагування і аналізу за допомогою інших докладань.

В Україні сфера використання термографії вкрай обмежена. Про це свідчить відсутність нормативної бази (винятком є лише нормативний документ [39], де згадується термографічний контроль), а між тим перелік потенційних об'єктів для термографії достатньо широкий (Додаток А).

Ураховуючи особливості України і світові тенденції в термографії першочерговими об'єктами термографічних обстежень можуть бути:

- газотранспортна система (велика частина якого знаходиться на межі вичерпання експлуатаційного ресурсу);
- обладнання теплових і атомних станцій;
- житлові будови і промислові споруди (контроль теплових втрат і впровадження енергозберігаючих технологій);
- нові матеріали і об'єкти авіакосмічної галузі.

Для впровадження термографії як методу контролю і діагностування вказаних об'єктів необхідно:

- провести експериментальні дослідження, які підтверджують придатність термографії, отримати інформацію о температурних режимах роботи обраних об'єктів;
- проаналізувати зв'язок температурних полів, характерних для кожного класу об'єктів з параметрами його внутрішньої структури (режимами функціонування його вузлів і систем);
- визначити специфічні інформативні ознаки і сформулювати правила для визначення придатності вузлів і систем, що контролюються;
- розробити основи методики проведення термографічних обстежень і обробки отриманої інформації.

## 2 РОЗВИТОК МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ

### 2.1 Розробка теплофізичних моделей неоднорідних структур

#### 2.1.1 Теплофізична модель

Головною умовою адекватного опису процесу контролю є вибір як фізичної, так і математичної моделі, що найбільш повно відображає особливості теплопередачі в дефекті в виробі, а також дозволяє аналізувати особливості процесу формування сигналу від дефекту  $\Delta T$  в залежності від параметрів режиму контролю та інших факторів.

Для вирішення поставленої задачі розроблена така теплофізична модель (рис. 2.1).

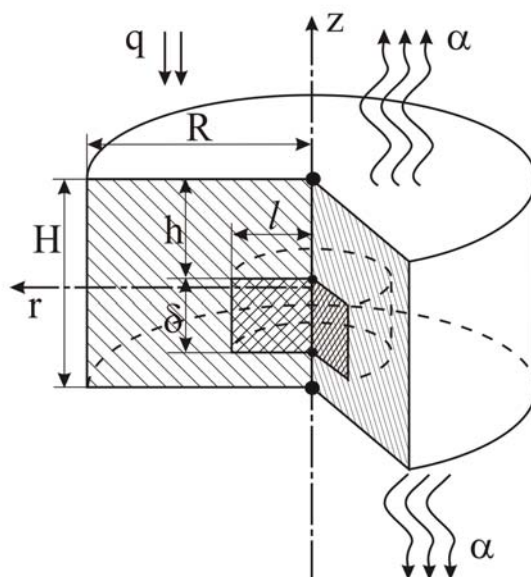


Рисунок 2.1 – Теплофізична модель об'єкта контролю з дефектом  
 $H$  - товщина пластини, м;  $R$  - радіус пластини, м;  $l$  - радіус дефекту, м;  $\delta$  - розкриття дефекту, м;  $h$  - глибина дефекту, м;  $q$  - густина потоку тепла, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\rho$  - густина речовини, кг/м<sup>3</sup>.

Об'єкт контролю представляється у вигляді безмежної пластини з неоднорідністю (дефектом), що представлена в циліндричній системі координат; при цьому вважається, що повздовжній радіус пластини значно більший за її товщину. Дефект являє собою область циліндричної форми, що відрізняється від основного матеріалу за ТФХ. На зовнішніх межах ОК діють граничні умови 2-го и 3-го роду [40], що відображають реальні умови проведення контролю: нагрівання об'єкта контролю зовнішнім тепловим потоком  $q$  и його охолодження за рахунок теплообміну з оточуючим середовищем ( $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі).

Відмінністю запропонованої моделі від існуючих є:

- використання змішаних граничних умов на поверхні, що нагрівається;
- урахування теплопровідності через дефект;

- обмеження температури нагрівання ОК гранично допустимим для матеріалу ОК значенням.

Математичний опис моделі базується на вирішенні диференційного рівняння нестационарної теплопровідності, яке в загальному випадку має вигляд [40]:

$$\operatorname{div}(\lambda(\vec{r}, T) \nabla T(\vec{r}, t)) + q(\vec{r}, t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}, \quad (2.1)$$

де  $T(r, t)$  – температура об'єкта контролю, що залежить від координат точки  $M$  та часу  $t$ ;

$\lambda(\vec{r}, T)$  – коефіцієнт теплопровідності (в загальному випадку може залежати від температури  $T$ );

$q(r, t)$  – функція внутрішніх джерел тепла [Вт/м<sup>2</sup>];

$c$  – питома теплоємність [Дж/кг·К];

$\rho$  – густина речовини [кг/м<sup>3</sup>].

Для реальних умов проведення АТК (теплової дефектоскопії) рівняння (2.1) можна спростити з урахуванням таких факторів: внутрішні джерела відсутні, а коефіцієнт теплопровідності не залежить від температури, бо прогрівання ОК не перевищує 100 °С. З урахуванням цього отримаємо:

$$\left( \lambda(\vec{r}) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left( \lambda(\vec{r}) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left( \lambda(\vec{r}) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) є однорідним лінійним диференціальним рівнянням другого порядку параболічного типу (бо  $\lambda(\vec{r}) \geq 0$ ).

Перетворимо диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності (2.2) в циліндричні координати. Для цього скористаємося відомими

перетвореннями координат [41]:

Пряме перетворення:

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \\ z = z \end{cases} \quad (2.3)$$

Зворотнє перетворення:

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \\ z = z \end{cases} \quad (2.4)$$

Після проведення перетворень рівняння (2.2) має вигляд:

$$\left( \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left( \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \left( \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2.5)$$

Саме це рівняння адекватним чином описує обрану модель (рис 2.1), за умови його вирішення при правильно обраних граничних умовах, тобто що відповідають реальній процедурі теплового контролю.

Вище вже зазначалось, що такими є граничні умови 2-го и 3-го роду на зовнішніх поверхнях ОК:

$$z = H \quad \lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \alpha (T(r, t) - T_{\text{середы}}) - q(r, t) \quad (2.6)$$

$$z = 0 \quad -\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = -\alpha (T(r, t) - T_{\text{середы}}) \quad (2.7)$$

де  $T(r, t)$  - температура об'єкту контролю;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності (в загальному випадку може залежати від температури), Вт/м·К;

$q(r, t)$  - густина потоку тепла, Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\rho$  - густина речовини, кг/м<sup>3</sup>.

Забезпечення врахування теплопровідності через дефект досягається використанням умови безперервності на межах дефектної області [40]:

$$-\lambda_1(\vec{r}, T, t) \left( \frac{\partial T_1(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) = -\lambda_2(\vec{r}, T, t) \left( \frac{\partial T_2(\vec{r}, t)}{\partial n} \right). \quad (2.8)$$

### 2.1.2 Аналіз моделі та оцінка її адекватності

У зв'язку з тим, що вирішення диференційного рівняння нестационарної теплопровідності (2.5) в аналітичному вигляді неможливе (без звуження загальності), було вирішено використовувати метод кінцевих різниць [42].

З двох відомих типів скінченнорізницевого схем (явні та неявні) було обрано неявний варіант, який хоч і потребує обробки більшої кількості даних, але при цьому має більш високу точність.

Характерна для цього варіанта просторова-часова сітка з кроком по часу  $\Delta t$  та координатами  $h$  и  $z$  представлена на рис. 2.2.

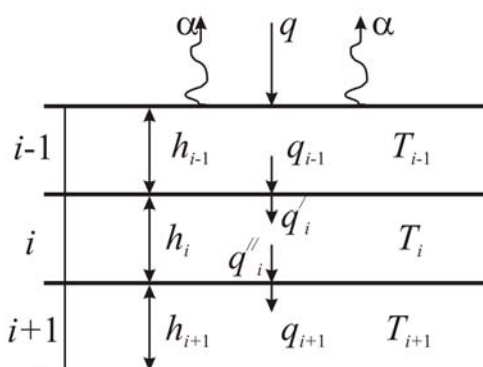


Рисунок 2.2 – Схема вузлової сітки

$h$  - координата по полярній осі;  $T_{i+1}^{t+\Delta t}$  - температура у вузлі  $i+1$  в момент часу

$t+\Delta t$ ;  $T_i^t$  - температура у вузлі  $i+1$  в момент часу  $t$

Відповідно до обраного методу рівняння (2.5) апроксимується в скінченнорізницеву схему:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{h_i} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i h_{i-1} + \lambda_{i-1} h_i} T_{i-1}^{t+\Delta t} - \left( 1 + \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{h_i} \left( \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} h_i + \lambda_i h_{i+1}} + \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i h_{i-1} + \lambda_{i-1} h_i} \right) \right) T_i^{t+\Delta t} + \\ + \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{h_i} \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} h_i + \lambda_i h_{i+1}} T_{i+1}^{t+\Delta t} = -T_i^t - \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} q_i, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $\lambda_i$  - коефіцієнт теплопровідності у вузлі сітки  $i$  ( $\lambda_{i+1}$  у вузлі  $i+1$ ,  $\lambda_{i-1}$  у вузлі  $i-1$ ),

$c_i$  - теплоємність ОК у вузлі  $i$  ( $c_{i+1}$  у вузлі  $i+1$ ,  $c_{i-1}$  у вузлі  $i-1$ ),

$\rho_i$  - густина ОК у вузлі  $i$  ( $\rho_{i+1}$  у вузлі  $i+1$ ,  $\rho_{i-1}$  у вузлі  $i-1$ ),

$h_i$  - величина кроку за координатою  $h$  у вузлі  $i$  ( $h_{i+1}$  у вузлі  $i+1$ ,  $h_{i-1}$  у вузлі  $i-1$ ), де крок може змінюватися як лінійно, так і логарифмічно,

$T_{i+1}^{t+\Delta t}$  - температура у вузлі  $i+1$  в момент часу  $t+\Delta t$ ,

$T_i^t$  - температура у вузлі  $i+1$  в момент часу  $t$ .

Оскільки модель є двохмірною, при вирішенні використовуються дві координати: радіальна  $r$  та повздожня  $z$ . Відповідно і чисельне вирішення диференційного рівняння теплопровідності буде проводитися за радіальною складовою та за координатою  $z$ . Через циліндричну симетрію як об'єкту контролю, так і дефекту (рис. 2.1), розрахунки за координатою  $\varphi$  (2.5) не проводяться, бо всі змінні параметри за координатою  $\varphi$  не змінюються.

Таким чином, завдання зводиться до чисельного вирішення диференційного рівняння в циліндричній системі координат с непостійними коефіцієнтами по радіусу.

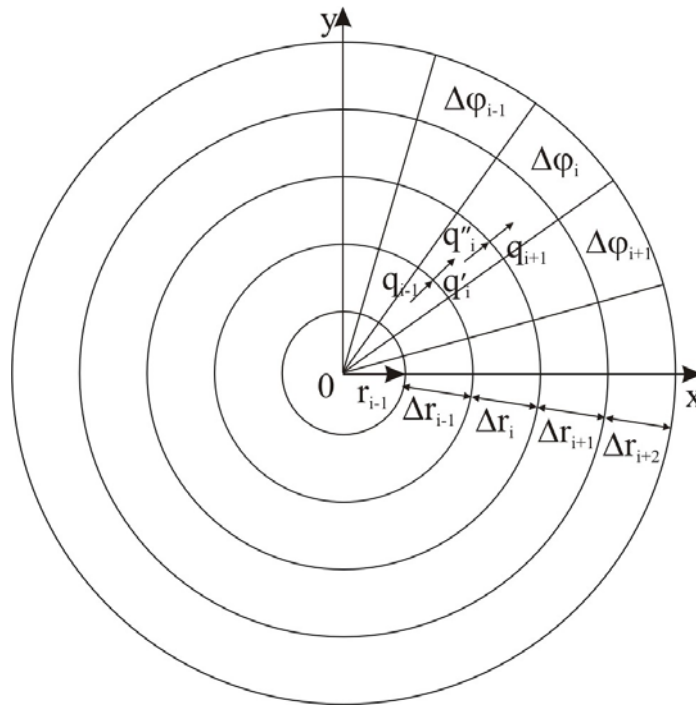


Рисунок 2.3 – Схема розповсюдження теплового потоку по радіусу

Розглядаючи розповсюдження теплового потоку по радіусу при вирішенні диференційного рівняння нестационарної теплопровідності необхідно врахувати зміну геометричних розмірів елементу, бо геометрія кожного елементу залежить від радіуса (рис. 2.3). Для цього запишемо рівняння теплопровідності через один  $i$  елемент в такому вигляді:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{V_i} (q_{вх} - q_{вых}), \quad (2.10)$$

де  $q_{вх} = S_{i-1} q_{i-1}$  – тепловий потік, що входить в елемент,

$q_{вых} = S_{i+1} q_{i+1}$  – тепловий потік, що виходить з елементу;

$S_i = r_i \Delta \varphi_j \Delta z_k$  – елемент площини;

$V_i = r_i \Delta \varphi_j \Delta z_k \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta \varphi_j \Delta z_k \Delta r_i^2$  – об'єм  $i$ -го елементу.

Перетворюючи (2.10) в скінченнорізницеву схему, отримаємо кінцевий вигляд чисельного вирішення диференційного рівняння теплопровідності (2.5) по радіусу:

$$\begin{aligned}
& - \frac{r_{i-1}}{r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i^2} \frac{2R_i R_{i-1}}{R_i + R_{i-1}} T_{i-1} G_i + \left( \frac{r_{i-1}}{r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i^2} \frac{2R_i R_{i-1}}{R_i + R_{i-1}} + \frac{r_{i+1}}{r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i^2} \frac{2R_{i+1} R_i}{R_{i+1} + R_i} \right) T_i G_i + \\
& + T_i^{t+\Delta t} - \frac{r_{i+1}}{r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i^2} \frac{2R_{i+1} R_i}{R_{i+1} + R_i} T_{i+1} G_i = T_i^t, \quad (2.11)
\end{aligned}$$

де введені позначення:

$$R_{i+1} = \frac{\lambda_{i+1}}{r_{i+1}}, \quad R_i = \frac{\lambda_i}{r_i}, \quad R_{i-1} = \frac{\lambda_{i-1}}{r_{i-1}}, \quad G_i = \frac{\Delta t}{c_i \rho_i}.$$

За координатою  $z$  рівняння (2.5) апроксимується в скінченнорізницеву схему вигляду:

$$\begin{aligned}
& - \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{z_i} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i z_{i-1} + \lambda_{i-1} z_i} T_{i-1}^{t+\Delta t} + \left( 1 + \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{z_i} \left( \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} z_i + \lambda_i z_{i+1}} + \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i z_{i-1} + \lambda_{i-1} z_i} \right) \right) T_i^{t+\Delta t} - \\
& - \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} q_i - \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{z_i} \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} z_i + \lambda_i z_{i+1}} T_{i+1}^{t+\Delta t} = T_i^t \quad (2.12)
\end{aligned}$$

Аналогічним чином в скінченнорізницеву схему перетворюються рівняння (2.6)–(2.7), що відображують граничні умови.

Гранична умова другого роду (2.6) набуває вигляду:

$$a_{N-1} T_{N-1}^{t+\Delta t} + (a_N - 1) T_N^{t+\Delta t} = -T_N^t - G_N q_N - b_N, \quad (2.13)$$

а гранична умова третього роду (2.7) набуває вигляду:

$$(a_0 - 1) T_0^{t+\Delta t} + a_1 T_1^{t+\Delta t} = -T_0^t - G_0 q_0 - b_0, \quad (2.14)$$

де введені позначення

$$\begin{aligned}
a_{N-1} &= \frac{r_{N-1}}{r_N \Delta r_N + \frac{1}{2} \Delta r_N^2} \frac{2G_N R_{N-1} R_N}{R_{N-1} + R_N}, \\
a_N &= -a_{N-1} - \frac{2G_N R_N r_N}{r_N \Delta r_N + \frac{1}{2} \Delta r_N^2}, \\
b_N &= \frac{2G_N R_N r_N}{r_N \Delta r_N + \frac{1}{2} \Delta r_N^2} T_N,
\end{aligned}$$

$$a_1 = \frac{r_1}{r_0 \Delta r_0 + \frac{1}{2} \Delta r_0^2} \frac{2G_0 R_1 R_0}{R_1 + R_0}, \quad (2.15)$$

$$a_0 = -a_1 - \frac{2G_0 R_0 r_0}{r_0 \Delta r_0 + \frac{1}{2} \Delta r_0^2},$$

$$b_0 = \frac{2G_0 R_0 r_0}{r_0 \Delta r_0 + \frac{1}{2} \Delta r_0^2} T_0.$$

Таким чином, отримані скінченнорізницеві схеми (2.11)–(2.12) основного диференційного рівняння (2.5) з граничними умовами (2.13) – (2.15), що в сукупності є двовимірною теплофізичною моделлю процесу активного теплового контролю.

### 2.1.3 Програмна реалізація метода

Для проведення розрахунків за скінченнорізницевою схемою (2.11)–(2.15) розроблена оригінальна програма, що названо «TermoPro\_2.0s».

Необхідність створення такої спеціалізованої програми для моделювання процесів АТК обумовлена відсутністю в універсальних програмних пакетах для розрахунку теплових полів можливості автоматичного варіювання параметрів моделі.

В основу програми покладено алгоритм, що відтворює реальну процедуру активного теплового контролю, що полягає в наступному.

Користувач задає параметри об'єкту ( $a_0$ ,  $\lambda_0$ ,  $H$ ,  $R$ ), параметри гаданого дефекту ( $a_d$ ,  $\lambda_d$ ,  $\delta$ ,  $l$ ,  $h$ ) и коефіцієнт теплообміну  $\alpha$ . Крім того, до числа вхідних даних входить гранично припустима для матеріалу заданого об'єкту температура нагрівання  $T_{\max}$ , що є вкрай важливим для запобігання його руйнування.

Метою розрахунку є визначення величини температурного перепаду  $\Delta T$  на поверхні ОК, що викликаний наявністю дефекту, а також часових параметрів режиму контролю, що впливають на величину  $\Delta T$ . Серед них:

час нагрівання  $\tau_n$  об'єкту до  $T_{\max}$  та час формування (час затримки)  $\tau_z$  максимального температурного перепаду  $\Delta T$ .

Таким чином, програма дозволяє не тільки розрахувати корисний сигнал від дефекту, тобто  $\Delta T$ , але й визначити оптимальний режим проведення контролю за відомим критерієм максимізації параметра  $\Delta T$ .

Крім того, варіюючи значення параметрів дефекту ( $a_\delta$ ,  $\lambda_\delta$ ,  $\delta$ ,  $l$ ,  $h$ ), можна проаналізувати вплив кожного з них на величину корисного сигналу, а, насамкінець, – оцінити чутливість теплового методу в цілому.

Алгоритм програми являє собою подіє-залежну систему, де кожна дія, що виконується, визначається поточним запитом користувача. Оператор, використовуючи систему ієрархічних меню, може повністю керувати розрахунковим процесом.

У програмі передбачено можливість моделювання процесів теплового контролю для різних об'єктів. Ця функція реалізована в підсистемі моделювання.

Реалізація алгоритмів АТК виконана в підсистемі обробки даних. На цьому етапі дані про температурне поле на поверхні об'єкту, що контролюється, проходять стадію обробки (розрахунок температурного поля для наступного моменту часу), результати якої передаються в підсистему виводу. При цьому передбачено вибір способу відображення результатів контролю.

Підсистема виводу (відображення) призначена для реалізації можливості виводу інформації на екран у вигляді графіків и чисельних значень шуканих параметрів. Результати роботи програми можуть бути також збережені у вигляді файлу чисельних значень і таблиць.

#### 2.1.4 Результати розрахунків та їх аналіз

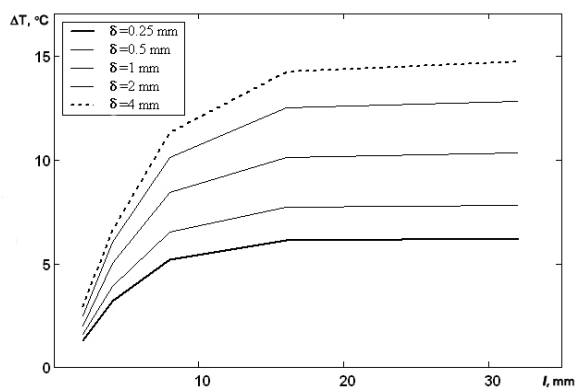
Для оцінки працездатності моделі було обрано ОК з матеріалів з різною теплопровідністю з дефектами у вигляді повітряних включень: розшарування, пустоти і т.ін.

Чисельний матеріал, що використовувався при розрахунках, наведений в таблиці 2.1.

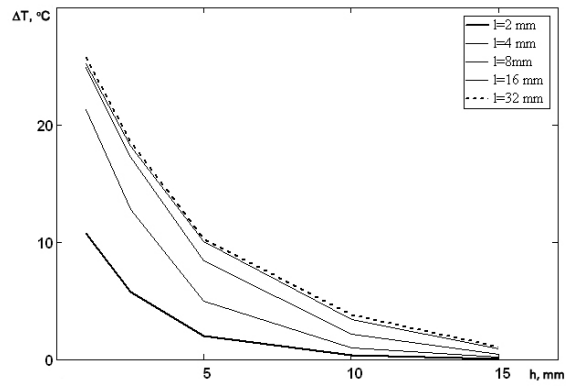
Таблиця 2.1 – Параметри ОК та дефекту  
для розрахунку процедури АТК

| Параметри                                                       | ОК                                        | Дефект               |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| Допустима температура нагрівання,<br>$T_{\max}$ , °C            | 100                                       | —                    |
| Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha$ , (Вт/(м <sup>2</sup> К))      | 10                                        | —                    |
| Коефіцієнт теплопровідності,<br>$\lambda$ , (Вт/(м К))          | 0,3–330                                   | 0,026                |
| Коефіцієнт температуропровідності,<br>$a$ , (м <sup>2</sup> /с) | $0,1 \cdot 10^{-6}$ – $100 \cdot 10^{-6}$ | $21,6 \cdot 10^{-6}$ |
| Товщина $H$ , мм                                                | 20                                        | —                    |
| Глибина залягання $h$ , мм                                      | —                                         | От 1 до 15           |
| Поперечний розмір $R$ ( $l$ ), мм                               | 100                                       | От 2 до 32           |
| Розкриття $\delta$ , мм                                         | —                                         | От 0,25 до 4         |

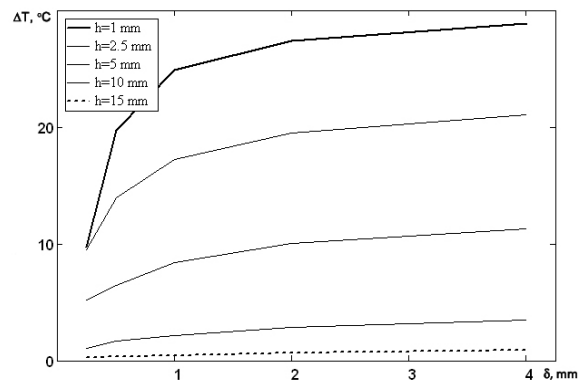
При моделюванні процедури АТК були досліджені залежності величини корисного сигналу (температурного перепаду  $\Delta T$ , що викликано дефектом) від параметрів дефекту  $h$ ,  $\delta$  и  $l$ . Результати розрахунків наведені на рис. 2.4-2.7 для матеріалів з різним значенням теплопровідності: теплоізоляторів, поганих, середніх и гарних провідників тепла.



а)



б)



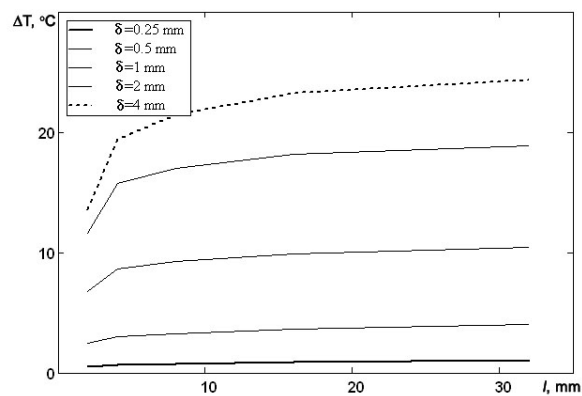
в)

Рисунок 2.4 – Залежності величини  $\Delta T$  над дефектом в теплоізоляторах

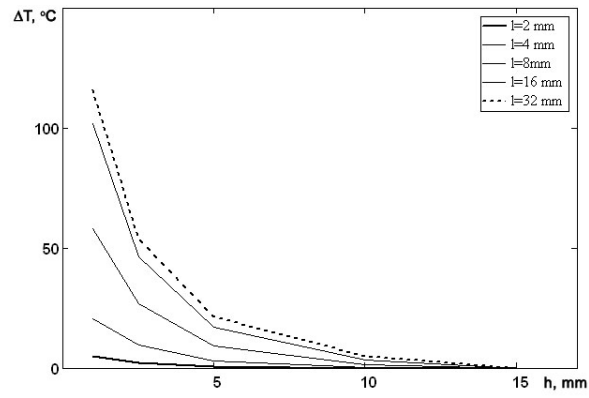
а) від поперечного розміру дефекту при глибині залягання  $h=5$  мм;

б) від глибини залягання дефекту при його розкритті  $\delta=1$  мм;

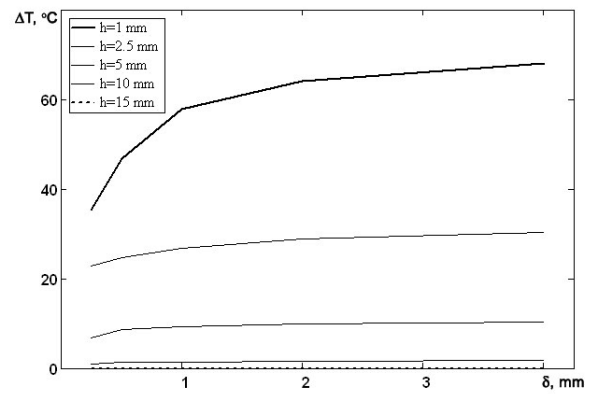
в) величини розкриття дефекту при радіусі дефекту  $l=8$  мм



а)



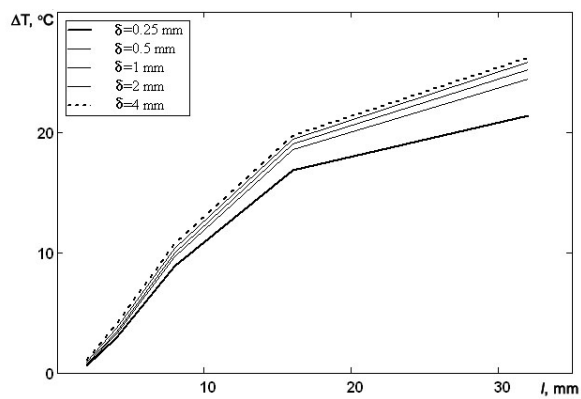
б)



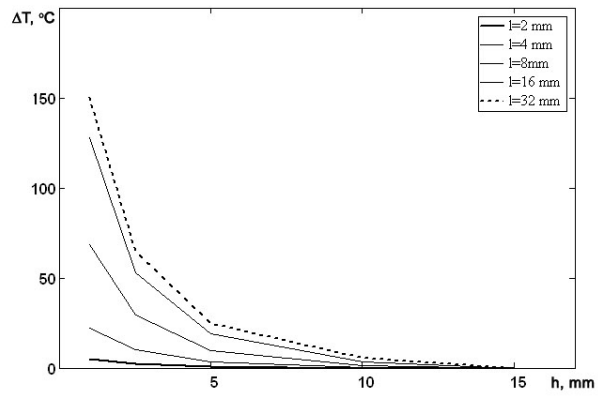
в)

Рисунок 2.5 – Залежності величини  $\Delta T$  над дефектом в поганих провідниках тепла

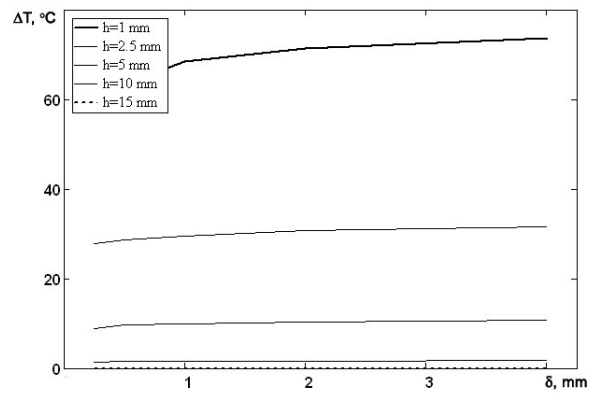
- а) від поперечного розміру дефекту при глибині залягання  $h=5$  мм;
- б) від глибини залягання дефекту при його розкритті  $\delta=1$  мм;
- в) величини розкриття дефекту при радіусі дефекту  $l=8$  мм



а)



б)



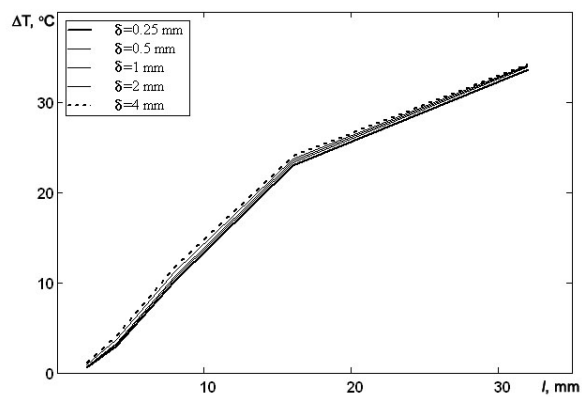
в)

Рисунок 2.6 – Залежності величини температурного перепаду над дефектом в провідниках тепла

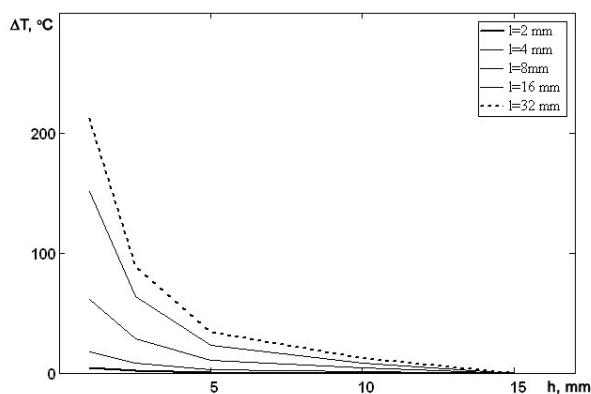
а) від поперечного розміру дефекту при глибині залягання  $h=5$  мм;

б) від глибини залягання дефекту при його розкритті  $\delta=1$  мм;

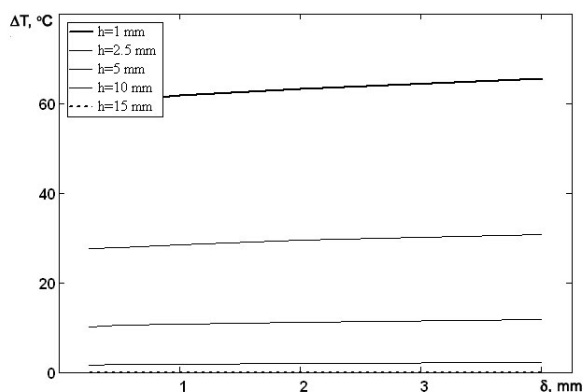
в) величини розкриття дефекту при радіусі дефекту  $l=8$  мм



а)



б)



в)

Рисунок 2.7 – Залежності величини температурного перепаду над дефектом в гарних провідниках тепла

- а) від поперечного розміру дефекту при глибині залягання  $h=5$  мм;
- б) від глибини залягання дефекту при його розкритті  $\delta=1$  мм;
- в) величини розкриття дефекту при радіусі дефекту  $l=8$  мм

Отримані залежності співпадають на якісному рівні з відомими закономірностями АТК, що підтверджує працездатність моделі. Отримані дані свідчать про те, що найбільший вплив на величину температурного перепаду має глибина залягання дефекту, а поперечний розмір дефекту та його розкриття значно впливають на  $\Delta T$  тільки при їх малих значеннях (до 10 и 1 мм відповідно).

## 2.2. Оптимізація процедур АТК в умовах наявності завад

Адекватна теплофізична модель процесу АТК дозволяє вирішити задачу аналізу впливу завад (які є наслідком неоднорідності випромінювальної здатності  $\varepsilon$  і нерівномірності нагрівання  $q$ ) на визначення дефектів і створити метод оптимізації процедури АТК.

Як відомо, флуктуації потоку інфрачервоного випромінювання пропорційні флуктуаціям коефіцієнту випромінювання [2,5], тому для вирішення цієї задачі використовувалось еквівалентне зміні випромінювальної здатності  $\Delta\varepsilon$  зміна потужності нагріву  $\Delta q$ .

Результати такого моделювання наведені на рис. 2.8 [43], де показано розвиток у часі температури поверхні для двох випадків: а) бездефектний зразок з відхиленням по  $\varepsilon$ ; б) зразок з дефектом.

Порівнювання представлених залежностей показує, що моменти часу, які відповідають максимальним значенням завади  $\Delta T_\varepsilon$  і корисного сигналу  $\Delta T_{\text{def}}$  не збігаються: сигнал від завади досягає максимуму одразу по закінченню нагрівання, а корисний сигнал – з деяким часом затримки  $\tau_3$ .

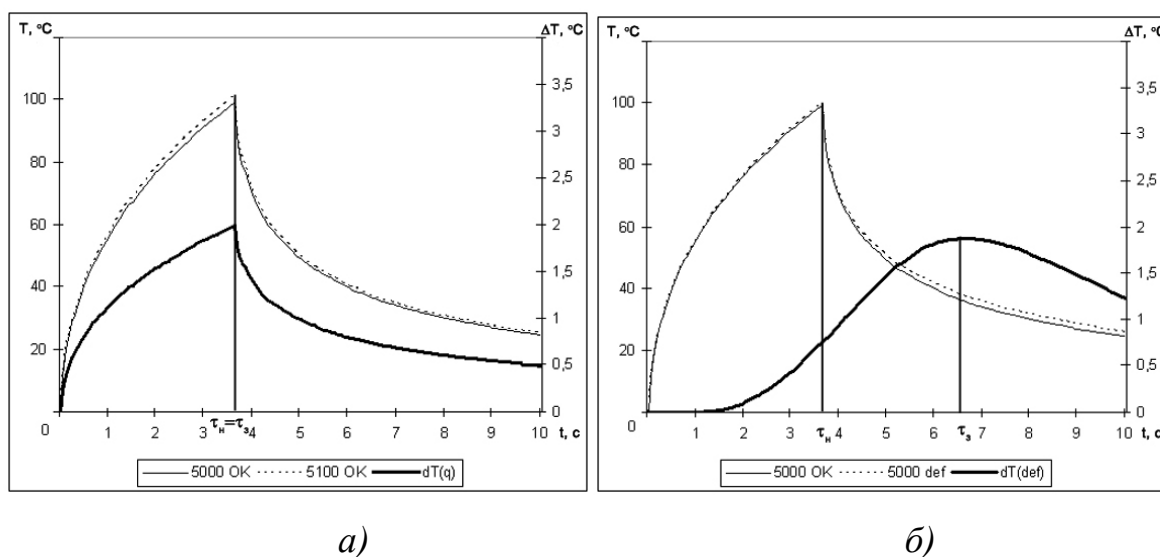


Рисунок 2.8 – Розвиток у часі температури поверхні:

а) бездефектного зразка з відхиленням по  $\varepsilon$ ; б) зразка з дефектом.

Цей факт відкриває можливість максимізувати співвідношення сигнал/завада ( $\Delta T_{\text{деф}}/\Delta T_{\varepsilon}$ ) шляхом вибору відповідного моменту реєстрації температурного поля на поверхні об'єкту.

Зокрема, згідно даним розрахунків, кривих, показаних на рис. 2.8, при виборі часу затримки  $\tau_3 = 3,65 \text{ с}$  співвідношення сигнал/завада дорівнює  $\Delta T_{\text{деф}}/\Delta T_{\varepsilon} = 0,4$ , а при  $\tau_3 = 6,65 \text{ с}$  це співвідношення складає  $\Delta T_{\text{деф}}/\Delta T_{\varepsilon} = 2,6$ , що у 6,5 раз більше. При цьому забезпечується виявлення дефектів, що відповідають корисному сигналу  $\Delta T = 2^\circ\text{C}$  на рівні завади, еквівалентної  $\Delta\varepsilon/\varepsilon = 2\%$ .

Подальшим кроком у дослідженні впливу завад, було проведення моделювання з метою визначення критерію чутливості методу. При порівнянні залежностей завади і корисного сигналу видно, що максимуми корисного сигналу і рівень поверхневої завади у деякий момент можуть збігатися (рис 2.9).

Як видно із рис 2.9, при наявності завади  $\Delta T_{q_1}$  визначити дефект, який знаходиться на глибині  $h_3$  з рівнем корисного сигналу  $\Delta T_{\text{деф}(h_3)}$  неможливо; аналогічно при  $\Delta T_{q_2}$  неможливо виявити дефекти на глибині  $h_3$  і  $h_2$ . Подібний розрахунок дозволяє визначити пороги використання теплового методу до контролю заданих об'єктів в обраному режимі.

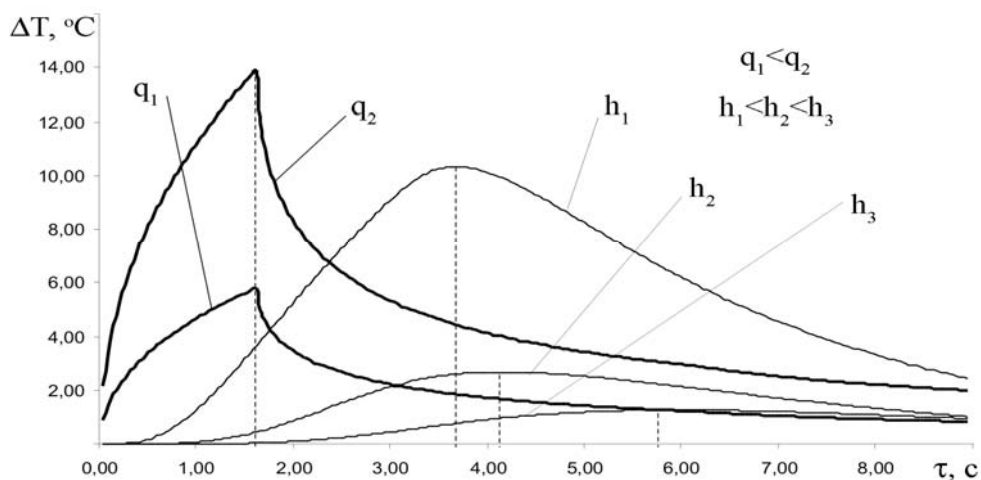
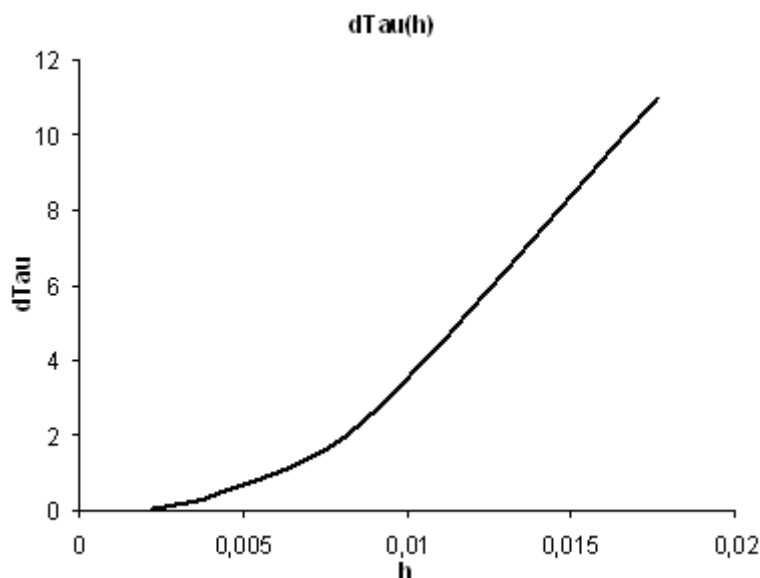


Рисунок 2.9 – Порівняння часової залежності шумів і корисного сигналу

Запізнення сигналу від дефекту залежить від глибини, на якій він знаходиться (рис. 2.10), і час запізнювання росте із ростом глибини, але рівень корисного сигналу при цьому падає.

Рисунок 2.10 – Залежність  $\tau_{з\_опт}$  від глибини знаходження дефекту.

Із залежностей (рис. 2.8-2.10) також видно, що критерій оптимізації режиму АТК, який ґрунтується на максимізації корисного сигналу ( $\Delta T_{оэф} \rightarrow \max$ ) не завжди оправданий, особливо при великому рівні поверхневих завад. Із аналізу залежностей 2.8-2.10 можна сказати, що оптимальним режимом контролю є момент, що відповідає максимальному співвідношенню сигнал/завада.

Розроблена модель дозволяє не тільки оптимізувати режим контролю за означеним критерієм, але й визначити поріг чутливості методу. Треба відзначити, що коли відома характерна для даного ОК флуктуація випромінювальної здатності  $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ , можна визначити мінімальний розмір  $l$  дефекту або максимальну глибину його знаходження  $h$  за значенням співвідношення сигнал/завада.

Оскільки чутливість та оптимальні режими теплового контролю для різних матеріалів ОК різні (залежать від ТФХ матеріалу), то для отримання більш повної інформації розрахунків відомі за теплофізичними довідниками [44] матеріали було розбито на групи за величиною питомої теплопровідності  $\lambda$  таким чином:

1. Ізолятори ( $0 < \lambda < 0,35$ )
2. Погані провідники тепла ( $0,35 < \lambda < 7$ )
3. Середні провідники тепла ( $7 < \lambda < 35$ )
4. Теплопровідні матеріали ( $\lambda > 35$ )

Для проведення розрахунків оптимальних режимів та чутливості за допомогою розробленої теплофізичної моделі використовувалися такі припущення та спрощення:

- тип дефекту – повітряне вкраплення (найбільш часто зустрічається на практиці у вигляді місць непоклею, розшарувань, тріщин и т.ін.);
- гранично припустима температура нагрівання -  $100^{\circ}\text{C}$  (при більш високій температурі в більшості матеріалів можуть відбуватись структурні зміни, а також при температурі вище  $100^{\circ}\text{C}$  виявляється залежність теплопровідності  $\lambda$  от температури матеріалу та модель стає нелінійною);
- розкриття (товщина дефекту) є постійною – 1 мм, що відповідає реальним дефектам, що зустрічаються на практиці;
- товщина пластини, що контролюється, – 1 см (товщина більшості ОК АТК є близькою до наведеного значення).

Пошук оптимального режиму проведення контролю проводився таким чином. Як цільова функція (критерій оптимізації) обрана функція розвитку з часом співвідношення сигнал/завада  $\frac{\Delta T_{\text{деф}}}{\Delta T_{\varepsilon}}(\tau)$ . Таким чином, маємо умовну оптимізацію функції однієї змінної ( $\tau \in (\tau_n; \tau_o)$ ) – обмеження за часом при односторонньому методі АТК,  $\tau_o$  – час остигання, момент, коли  $T_{\partial} = T_{\partial\partial}$ ).

Тоді як функція  $\frac{\Delta T_{def}}{\Delta T_{\varepsilon}}(\tau)$  розраховується за допомогою чисельних методів, то для пошуку її екстремуму розрахунок проводився також з використанням чисельних методів. Було обрано пасивний метод пошуку екстремуму, а саме метод рівномірного пошуку.

Результати розрахунків чутливості та оптимальних режимів активного теплового метода контролю об'єктів з різних матеріалів, а також чисельний матеріал, що підтверджує переваги запропонованого підходу до оптимізації наведені в таблицях 2.2 и 2.3.

### 2.3 Інформаційні ознаки і вирішуючі правила при діагностуванні газоперекачувального обладнання.

При термографічному обстеженні в якості інформаційних параметрів були використані температури характерних точок на поверхні вузлів обладнання (зони інтересу).

Температурне поле обладнання, що працює, є функцією багатьох факторів, в тому числі:

- 1) особливості його роботи;
- 2) функціональні елементи, що знаходяться в корпусі;

Таблиця 2.2 – Таблиця оптимальних режимів АТНК

| Клас матеріалу   | Завада $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ , % | $q_{opt}$ , кВт/м <sup>2</sup> | $\tau_{n opt}$ , с | $\tau_p''$ , с | $\Delta T_{\delta}$ , °C | $h_{пор}$ , мм |
|------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| $\lambda < 0,35$ | 10                                         | 24,3                           | 5                  | 870            | 0,5                      | 9              |
|                  | 20                                         |                                |                    | 240            | 1,36                     | 5,36           |
|                  | 30                                         |                                |                    | 187            | 2,37                     | 4,28           |
|                  | 40                                         |                                |                    | 157            | 3,41                     | 3,59           |
|                  | 50                                         |                                |                    | 132            | 5,9                      | 3,08           |

|                      |    |      |      |      |      |      |
|----------------------|----|------|------|------|------|------|
| $0,35 < \lambda < 7$ | 10 | 35   | 4,68 | 56   | 2,9  | 8,38 |
|                      | 20 |      |      | 34   | 5,7  | 5,57 |
|                      | 30 |      |      | 27   | 8,6  | 4,61 |
|                      | 40 |      |      | 23   | 11,4 | 4,02 |
|                      | 50 |      |      | 20   | 14,8 | 3,36 |
| $7 < \lambda < 35$   | 10 | 145  | 3,36 | 4,8  | 5,4  | 6,98 |
|                      | 20 |      |      | 4,57 | 11   | 5,65 |
|                      | 30 |      |      | 4,42 | 16,2 | 4,79 |
|                      | 40 |      |      | 4,34 | 21,7 | 4,17 |
|                      | 50 |      |      | 4,27 | 26,5 | 3,74 |
| $\lambda > 35$       | 10 | 2500 | 1,12 | 1,25 | 8,2  | 5,9  |
|                      | 20 |      |      | 1,2  | 16,9 | 4,35 |
|                      | 30 |      |      | 1,19 | 25,7 | 3,4  |
|                      | 40 |      |      | 1,17 | 35,9 | 2,87 |
|                      | 50 |      |      | 1,16 | 44   | 2,27 |

Таблиця 2.3 – Ілюстрація підвищення чутливості АТНК за рахунок використання критерію максимізації співвідношення сигнал/завада (для матеріалів 1 групи).

| $\Delta\varepsilon/\varepsilon, \%$ | Сигнал/завада |                | $h_{\text{нор}}, \text{ мм}$ |                |
|-------------------------------------|---------------|----------------|------------------------------|----------------|
|                                     | при $\tau'_p$ | при $\tau''_p$ | при $\tau'_p$                | при $\tau''_p$ |
| 20                                  | 1,05          | 1,15           | 5,17                         | 5,36           |
| 30                                  | 0,99          | 1,12           | 3,98                         | 4,28           |
| 40                                  | 1,11          | 1,29           | 3,37                         | 3,59           |
| 50                                  | 0,89          | 1,03           | 2,76                         | 3,08           |

- 3) стан поверхні;
- 4) наявність завад, зумовлених зовнішнім відбиттям світла;
- 5) приховані дефекти.

Таким чином, при аналізі термограм значення температури несуть у собі інформацію не тільки про наявність дефектів, і є потреба у виборі альтернативних інформаційних ознак. У якості інформаційних ознак було запропоновано використати середні значення температури зон інтересу і характеристики розподілу температури (гістограми) на поверхні корпусу обладнання у цих зонах [45].

Аналіз термограм запропоновано проводити не взагалі по усьому температурному зображенню обладнання, а по окремим елементам його конструкції, які мають характерні локальні температурні ознаки.

Було встановлено, що ідентичні вузли мають сходні характерні розподілення температурного поля, тоді як зовнішнє відбиття світла, що потрапляє в поле зору тепловізора носить випадковий характер. Завдяки цьому після виділення на загальній термограмі зон інтересів і представлення їх як окремих зображень, можна позбутися зовнішніх завад.

Крім того для комп'ютерної обробки термографічних зображень запропоновано використати «Сіру» палітру зображень, бо ця палітра є найбільш зручною при математичних операціях із зображеннями та є добре сумісною зі стандартними математичними пакетами.

Для обробки виділених областей загальної термограми доцільно використовувати відомі методи обробки зображень: методи оцінки їх подібності; методи математичної статистики, які оцінюють об'ємом статистичних вибірок. При цьому термограма визнається статистичною вибіркою з об'ємом, який дорівнює кількості пікселів в зображенні.

Першим типом вузлів газоперекачувального агрегату, на якому були апробовані вказані вище підходи, були всмоктуючі і нагнітальні клапани компресорних циліндрів газоперекачувальних агрегатів ГМК 10ГКН Обидва

види клапанів мають ідентичні температурні поля (в різних температурних діапазонах), тому вони були об'єднані в 1 тип.

При перетворенні термограми клапану в гістограму були використані такі міркування. Висоти стовбців гістограми є пропорційними кількості пікселів, що потрапили у відповідний інтервал значень інтенсивностей зображення (термограми) або відповідних температур. Площа гістограми, отримана таким чином, відповідає об'єму вибірки (розміру зображення). Для подальшого аналізу гістограми нормувалися відносно цієї величини. Після такого нормування площа гістограми дорівнювала 1.

Для прикладу на рис. 2.11 наведені гістограми лівих (чорний колір) і правих (сірий колір) всмоктувальних клапанів циліндрів №1 (рис 2.11а) і №3 (рис 2.11б.) агрегату №1. Згідно попередніх даних правий всмоктувальний клапан КЦ №3 агрегату №1 є дефектним [46].

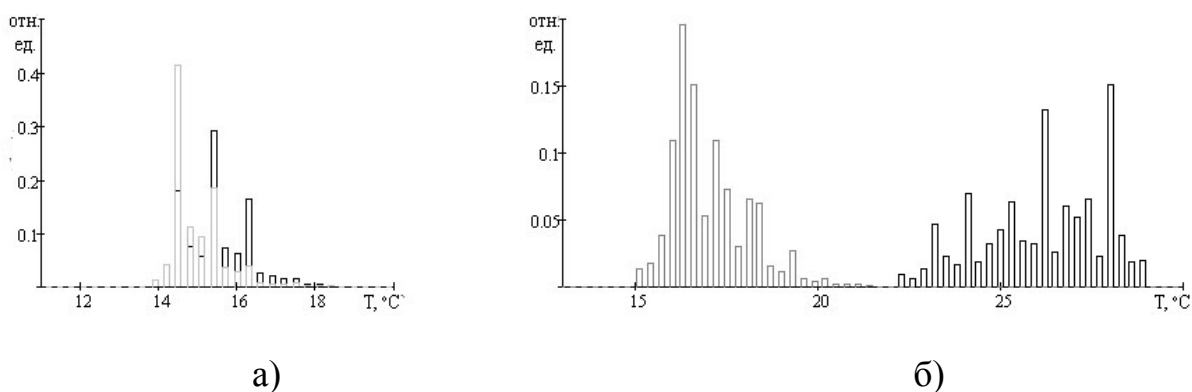


Рисунок 2.11 – Гістограми всмоктувальних клапанів

На рис. 2.12 для наочності наведені огинаючі гістограм (полігони частот), які відображають розподіл температури для десяти нагнітальних клапанів агрегату №1. На рисунку номер циліндра відповідає товщині ліній, праві клапани відмічені пунктирними лініями. Згідно із заздалегідь проведеною обробкою, обидва нагнітаючих клапани КЦ №4 припустимо є дефектними.

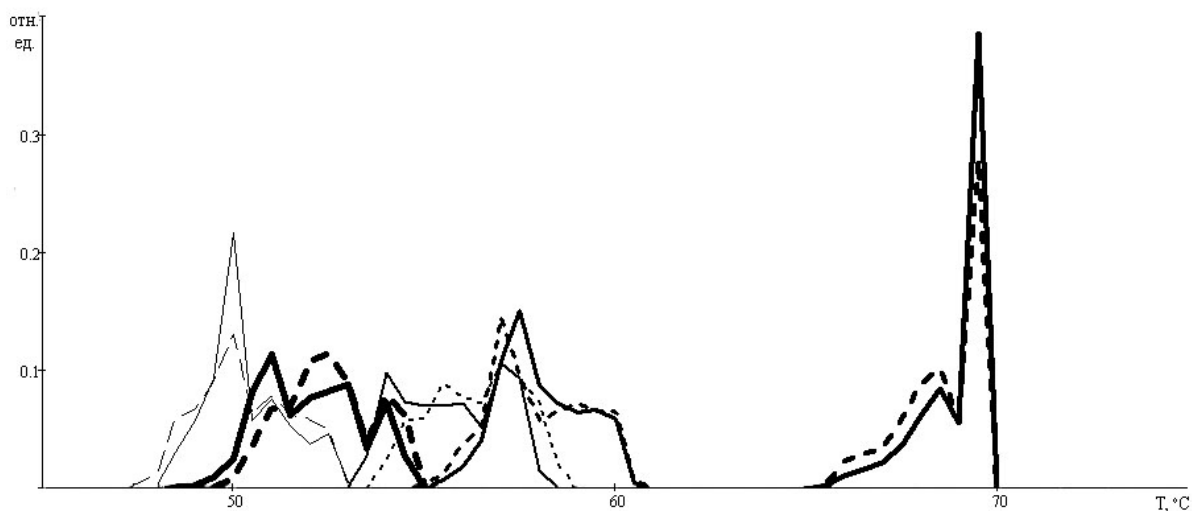


Рисунок 2.12 - Огинаючі для нагнітальних клапанів 5-ти КЦ агрегату №1.

Із рисунків 2.11 і 2.12 візуально помітно, що гістограми припустимо дефектних клапанів відрізняються за такими інформаційними ознаками: 1) за формою; 2) за розташуванням на шкалі температур; 3) за висотою піку (фонова складова).

Треба відзначити, що за фоновною складовою гістограма дефектного клапану відрізняється від бездефектного у одному випадку (рис. 2.11) наявністю кількох відмінних за температурою піків, а в другому випадку (рис. 2.12) – навпаки, наявністю одного ярко визначеного піку, таким чином, основна частина термограми знаходиться у вузькому діапазоні температур.

Для проведення розбраковки вузлів, що контролюються, та їх елементів за вказаними інформаційними ознаками необхідно розробити певні критерії розбраковки.

Критерієм дефектності, який урахує першу ознаку (відмінності термограм по формі), може бути кон'юнкція, яка часто використовується для порівняння зображень [47]:

$$D1 = \sum_{i=1}^N |H(i) - H_{ref}(i)|, \quad (2.15)$$

де  $H(i)$  -  $i$ -й елемент гістограми термограми, що аналізується;

$H_{ref}(i)$  -  $i$ -й елемент гістограми еталонної термограми;

$N$  - кількість елементів розкладання термограми.

Має сенс використовувати модифікацію цього критерію - розрахунок відстані між термограмою, що аналізується, та еталонною на підставі поелементного порівняння гістограм з урахуванням суміжних елементів [48]. Це дозволяє зменшити вплив слабких відмінностей. Для кожного елемента гістограми розраховується не одна, а три різниці:

$$D1a = \sum_{i=1}^N \min(|H(i) - H_{ref}(i-1)|, |H(i) - H_{ref}(i)|, |H(i) - H_{ref}(i+1)|) \quad (2.16)$$

Критерій відмінності за другою ознакою (відмінність термограм за вмістом фону) може бути описано співвідношенням: [49]

$$D2 = |\Pr(H) - \Pr(H_{ref})|, \quad (2.17)$$

де  $\Pr(H)$ ,  $\Pr(H_{ref})$  - значення максимального піку отриманої термограми зображення, що аналізується, та еталонного.

За третьою ознакою (положення гістограми на вісі температур) запропоновано використати відомий у математичній статистиці критерій Крамера-Уелча [50]. Критерій Крамера-Уелча розраховується за формулою:

$$D3 = \frac{\sqrt{nm}(\mu(X) - \mu(X_{ref}))}{\sqrt{n\sigma^2(X) + m\sigma^2(X_{ref})}} \quad (2.18)$$

де  $\mu(X)$ ,  $\mu(X_{ref})$  - математичні очікування зображення, що аналізується, та еталонного.

$\sigma(X)$ ,  $\sigma(X_{ref})$  - квадратичні відхилення зображення, що аналізується, та еталонного;

$n \times m$  - розміри зображень.

Для використання запропонованих критеріїв (2.16)-(2.18), необхідна наявність еталону (термограми бездефектного вузла), у порівнянні з яким буде проводитися розбравка. На практиці наявність такої термограми дуже ускладнена, тому еталони треба формувати за наявними експериментальними.

Можна виділити еталони двох видів [51]: 1) еталон по групі ідентичних вузлів (формується на підставі вимірювань діагностичних параметрів групи ідентичних вузлів); 2) еталон по ряду вимірювань параметрів одного вузла (формується на підставі послідовних вимірювань параметрів одного вузла). Крім того, еталоном може служити середнє арифметичне даних, що розглядаються, або наперед встановлене нормативне значення [52].

З урахуванням вказаних міркувань запропоновано використати усереднену термограму вузла, сформовану на базі експериментальних даних. При цьому для кожного агрегату треба розробити свій еталон. Це пов'язано з тим, що кожний агрегат працює в своєму режимі, зумовленому: тиском газу, температурою холодагентів та іншими штатними параметрами. Іншими словами: для кожного агрегату за усередненими термограмами (або їх ділянками) були сформовані еталонні термограми лівих і правих всмоктуючих клапанів, лівих і правих нагнітальних клапанів, шатунних підшипників і т.ін.

Були проведені розрахунки з використанням сформованих еталонів і критеріїв діагностування (Додаток Б) [53]. Розрахунки показали, що розподіли критеріїв  $D1a$  і  $D2$  наближені до нормального, і тому до них можна використати правило «двох сигма». Використання цього правила для визначення критерію  $D1a$  дозволило виявити аномалії 4 вузлів з вибірки у 104 вузла. Треба зауважити, що два з них по середньому значенню температури серед однотипних вузлів агрегату не виділялися. Критерій  $D2$  дозволив виділити аномалії для 4-х вузлів, причому ні один з них не входив у число дефектних вузлів за критерієм  $D1a$ , а один з них мав найнижчу температуру серед однотипних вузлів агрегату. Розподіл критерію  $D3$  є нормальним; використання правила «двох сигма» дозволило виявити аномалії 6 вузлів, однак 2 вузла з дефектних по критерію  $D1a$  у цю кількість не попали.

Таким чином, використання тільки одного критерію з наведених не забезпечує достовірності діагностування. Тому був сформований

інтегральний критерій  $I$ , що об'єднував усі три ( $D1a$ ,  $D2$ ,  $D3$ ). Підставою для формування об'єднаного критерію було те, що означені критерії оцінювали стан об'єкту діагностування за різними інформаційними ознаками і практично не корелювали між собою (розрахунок парних коефіцієнтів кореляції дав результати:  $k_{D1a,D2} = 0,4$ ;  $k_{D2,D3} = 0$ ;  $k_{D1a,D3} = 0,1$ ).

Таким чином, запропонований інтегральний критерій  $I$  має вигляд [54]:

$$I = (D1a^*)^2 + (D2^*)^2 + (D3^*)^2, \quad (2.19)$$

где  $D1a^*$ ,  $D2^*$ ,  $D3^*$  - стандартизовані критерії  $D1a$ ,  $D2$ ,  $D3$ . Під стандартизованим критерієм розуміється величина з нульовим математичним очікуванням і одиничною дисперсією [55]:

$$\begin{aligned} D1a^* &= \frac{D1a - \mu_{D1a}}{\sigma_{D1a}}, \\ D2^* &= \frac{D2 - \mu_{D2}}{\sigma_{D2}}, \\ D3^* &= \frac{D3 - \mu_{D3}}{\sigma_{D3}}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Оскільки розподіл критерію  $I$  (2.19) є згідно з [41] розподілом «хі-квадрат» з двома ступенями свободи, то для визначення його критичного значення за заданого значення довірчої ймовірності (похибки першого роду) можна використати довідкові таблиці [41,55]. Зокрема, для рівня похибок першого роду  $\alpha = 0,05$  з [41,55] знаходимо критичне значення  $I_{кр} = 5,99$ .

Таким чином з урахуванням (2.18), (2.19) для діагностування вузлів газоперекачувальних агрегатів правило прийняття рішення має вигляд:

$$I = \left( \frac{D1a - \mu_{D1a}}{\sigma_{D1a}} \right)^2 + \left( \frac{D2 - \mu_{D2}}{\sigma_{D2}} \right)^2 + \left( \frac{D3 - \mu_{D3}}{\sigma_{D3}} \right)^2 > 5,99 \quad (2.21)$$

При розрахунку інтегрального критерію і його складових був врахований факт, що при формуванні еталону треба вилучити недетерміновані викиди в статистичній вибірці. Вибірка містила оцифровані термограми 5 - 10 вузлів одного агрегату і в початковому вигляді не була достатньою для формування еталону [56].

Запропонований підхід аналогічний методу вилучення грубих похибок у малій вибірці [56] і полягає у наступному.

Розраховуються критерії появи грубих похибок:

$$\begin{aligned} B_1 &= (x_{\max} - \bar{x}) / \sigma \sqrt{(n-1)/n}, \\ B_2 &= (\bar{x} - x_{\min}) / \sigma \sqrt{(n-1)/n}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

де  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$ ,  $\bar{x}$  - найбільше, найменше і середнє значення із  $n$  вимірів (у даному випадку найбільше, найменше і середнє значення інтегрального критерію подібності для даного агрегату з із  $n$  ідентичних вузлів).

Далі розраховані критерії  $B_1$  и  $B_2$  порівнюються з  $B_{\max}$ , який береться із довідкових таблиць [56] (фрагмент котрих для  $\alpha = 0,05$  наведений у табл 2.4) в залежності від обраної довірчої імовірності і кількості ідентичних вузлів (усереднених термограм). Порівняння проводиться за такою схемою: якщо нерівність  $B_1 > B_{\max}$  є справедливою, то з сукупності усереднених термограм вилучається та, що відповідає максимальному значенню інтегрального критерію подібності (2.19), а якщо  $B_2 < B_{\max}$  – мінімальному.

Таблиця 2.4 – Критичні значення критерію грубих похибок для  $\alpha = 0,05$

| $n$            | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\beta_{\max}$ | 1,41 | 1,69 | 1,87 | 2,00 | 2,09 | 2,17 | 2,24 | 2,29 |

Результати діагностування по запропонованому інтегральному критерію з урахуванням особливостей процедури формування еталону наведені у Додатку Б. Проведені розрахунки дозволили виявити дефектність 10-ти клапанів компресорних циліндрів з 128 проконтрольованих, а також 2-х шатунних підшипників з 23 проконтрольованих. Таким чином, за результатами проведених розрахунків було отримано оцінку помилки першого роду  $\alpha$  при контролі компресорних циліндрів та шатунних підшипників. Отримане значення помилки відповідає заданій довірчій вірогідності.

Відсутність достатньої кількості достовірних даних про дефектність вузлів газоперекачувального обладнання, що контролюються, (для цього треба проводити нерегламентні ремонтні роботи) не дозволила оцінити за експериментальними результатами похибку другого роду ( $\beta$ ). Однак відомо, [57], що між  $\alpha$  і  $\beta$  є певний зв'язок: чим вище  $\alpha$ , тим нижче значення  $\beta$  і навпаки. Можна сказати, що в залежності від вимог виробництва (мінімізація похибки якого роду важливіша), значення критерію  $I$  може коректуватися.

## Висновки

1. Розроблена теплофізична модель ОК більш адекватно (в порівнянні з аналогами) відображає реальні умови проведення АТК і дозволяє оцінювати очікуване значення сигналу від дефекту з великою достовірністю, а також аналізувати закономірності методу. Розроблена модель за точністю отриманих результатів наближається до тривимірної моделі, а за затратами розрахункових ресурсів залишається на рівні двохмірної моделі.

2. Запропонована методика оптимізації процедури проведення АТК, заснована на критерії максимізації не самого корисного сигналу, співвідношенні сигнал/завада. Це дозволяє розширити межі використання методу на ОК, які мають нерівномірності випромінювальної здатності  $\varepsilon$ .

3. Розроблена комп'ютерна методика для розрахунку режиму проведення теплової дефектоскопії і оцінки очікуваного сигналу від дефекту для виробів із внутрішніми неоднорідностями. Методика дозволяє оцінити використання методу для нових класів об'єктів і підвищити чутливість контролю.

4. Запропонований статистичний підхід до оцінювання стану газоперекачувального обладнання. Підхід включає принципи формування еталону, критерії порівняння параметрів вузла, що контролюється, з еталонним, а також правило визначення дефектності вузла (критичне значення критерію). Запропонований підхід дозволяє не тільки урахувати

різницю середніх значень температури у зоні інтересу, але й характер температурного поля у цій зоні: вміст фону, розбіжність температур, форма гістограми розподілу температур.

### 3 ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОГРАФІЧНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ

#### 3.1. Теплова дефектоскопія елементів авіаційних двигунів із сотовим теплозахисним покриттям

В авіаційній галузі велика кількість об'єктів, які мають форму тіл обертання. Багато об'єктів циліндричної форми (ОЦФ) мають теплозахисні покриття [58]. Для металевого сотового теплозахисного покриття головним видом дефектів являється відшарування сотового шару, яке є наслідком низької якості припаювання. Виявлення такого виду дефектів іншими видами НК у поточному часі являється дуже ускладненим [59].

Для дослідження можливостей теплового методу були обрані об'єкти, які показані на рис. 3.1 Вони мали форму кілець з радіусами 265, 235 мм і висотою 15 и 12 мм відповідно.

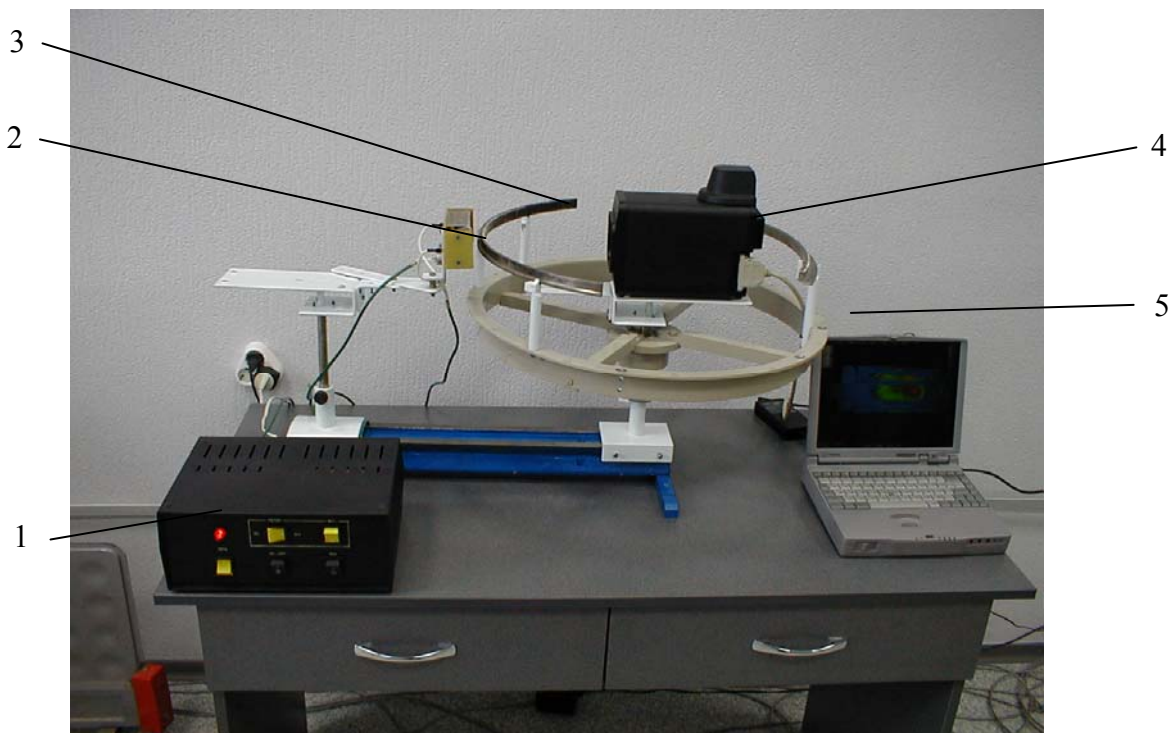
У якості джерела теплового збудження (ДТЗ) була використана полосова галогенна лампа J – 118.



Рис. 3.1 - Зовнішній вигляд циліндричних об'єктів контролю  
із сотовим теплозахисним покриттям

Для реалізації теплової дефектоскопії була розроблена тепловізійна методика і випробувальний стенд [59,60], показаний на рис 3.2.

Основним елементом випробувального стенду було поворотне колесо, на якому було встановлено фрагмент ОЦФ. Випробування проводилось по одно- і двохсторонній схемі. При односторонній схемі нагрів і реєстрація проводились з однієї сторони. При двохсторонній схемі нагрів проводився з зовнішньої сторони об'єкту, а тепловізор реєстрував температуру його внутрішньої сторони з сотами. Час імпульсу нагрівання складав 10 с.



**Рис. 3.2. - Випробувальний стенд для ОЦФ із сотовим покриттям.**

1 – блок управління; 2 – джерело теплового збудження; 3 – об'єкт контролю;  
4- тепловізор; 5 – поворотне колесо.

Так як теплове збудження ОЦФ проводилось полосовим ДТЗ, то радіус кривини дозволяв здійснювати рівномірний нагрів у секторі  $15 \times 64 \text{ мм}^2$ .

У процесі досліджень було виявлено наступне явище: Якщо контролювати сектора послідовно, у порядку збільшення номерів, то на

сусідніх секторах спостерігається тепловий слід від раніше нагрітих і проконтрольованих. Для запобігання цього явища, яке знижує точність АТК, у стенд був введений охолоджуючий фен, а контроль секторів проводився по схемі, наведеної у таблиці 3.1. Час контролю фрагменту складав 10 хвилин.

Таблиця 3.1 - Порядок встановлення секторів при тепловізійному контролі ОЦФ із сотовим теплозахисним покриттям

| № вимірювання | Нагрів (№ сектору) | Охолодження (№ сектору) |
|---------------|--------------------|-------------------------|
| 1             | 1                  | -                       |
| 2             | 14                 | 1                       |
| 3             | 2                  | 14                      |
| ·             | ·                  | ·                       |
| ·             | ·                  | ·                       |
| 23            | 12                 | 24                      |
| 24            | 25                 | 12                      |
| 25            | 13                 | 25                      |

На рис.3.3 наведені термограми дефектів на зразках ОЦФ із сотами, отриманих при різних способах контролю.

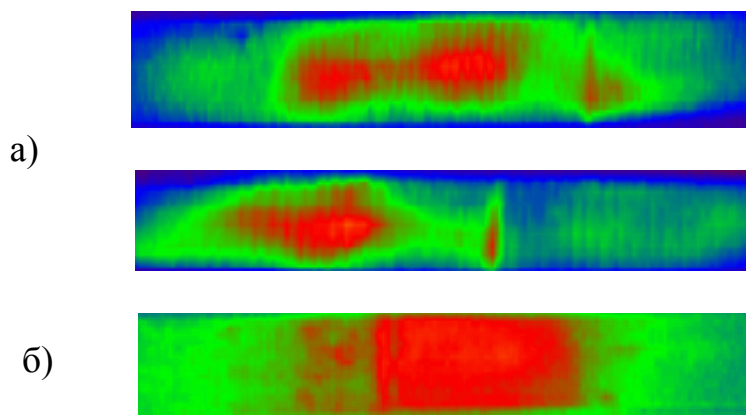


Рис. 3.3. - Термограми дефектів зразка з металевими сотами:  
а) односторонній контроль; б) двохсторонній контроль.

Розроблена методика дозволила знизити вплив ефекту накопичення теплоти при імпульсному нагріві контролюємої зони ОЦФ.

Проведені дослідження показали перспективність використання теплової дефектометрії для даного виду ОЦФ і можуть бути передумовою для створення промислової установки.

### 3.2 Застосування термографії для оцінювання вмісту рідкої фази у газопроводах

Як показують результати комплексних досліджень та експлуатаційні дані [61], коефіцієнт гідравлічної ефективності більшої частини магістральних газопроводів країни знаходиться у межах 70 – 90%, що свідчить про накопичення у внутрішній порожнині труб відкладень (забруднень). Забруднення – це складна багатоконпонентна суміш, яка складається з поверхневої та конденсованої води, вуглеводневого конденсату, емульсії, механічних домішок, мінеральних олій, органічних кислот, солей заліза, метанола та гліколів [62].

Для підвищення гідравлічної ефективності та надійності роботи газопроводів на підприємствах проводяться продувка та очищення внутрішньої порожнини газопроводів, що пов'язано зі значними матеріальними витратами. Одним із шляхів зменшення таких витрат могло б бути одержання попередньої інформації про рівень забруднення газопроводу.

Для вирішення цієї задачі була представлена гіпотеза про використання бесконтактного термографічного методу. Вона базується на тому що перекачувальний газ, проходячи крізь насосну станцію, має підвищену відносно навколишнього середовища температуру, тоді як конденсат має температуру, близьку до навколишнього середовища. Крім того, газ і конденсат мають різні теплофізичні характеристики (ТФХ), що повинно викликати нерівномірність температурного поля на поверхні газопроводу, при умовах наявності конденсату. У підсумку, при контролюванні градієнту температурного поля на зовнішній поверхні труби за допомогою термографії можна визначити рівень заповнення труби конденсатом.

Для перевірки даної гіпотези були проведені теоретичні і експериментальні дослідження.

Експериментальні дослідження полягали у термографічному обстеженні окремих ділянок газопроводу Червонодонецької ДКС (об'єднання Шебелінкагазздобич). Загальні умови обстеження:

- температура довкілля  $T_0 = 14^{\circ}\text{C}$ ;
- температура газу  $T_1 = 16^{\circ}\text{C}$

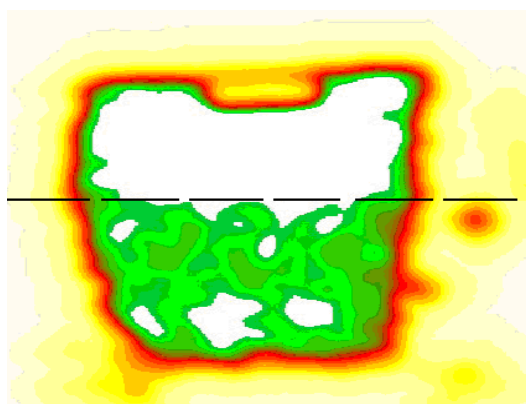
Було обстежено дві ділянки, які відрізнялися по висоті пролягання. Обробка отриманих термограм проводилася по однаковій методиці.

На рис. 3.4 наведено видиме зображення (а), термограма нижньої ділянки газопроводу (б) і результати її обробки (в)



а)

б)



(в)

Рис 3.4 - Видиме зображення ділянки трубопроводу (а), термограма (б) і результати її обробки (в). Пунктиром показана межа розділу газ - конденсат.

На рис. 3.4 (в), чітко видна межа розділу температурного поля між верхньою (газ) та нижньою (конденсат) частиною трубопроводу. Середня різниця температур складала  $0,6^{\circ}\text{C}$ . Положення розділу температурного поля можна інтерпретувати як рівень заповнення труби конденсатом, який заповнює до 60% об'єму труби.

Для аналізу результатів експерименту була розроблена теплофізична модель газопровода з конденсатом, яка схематично представлена на рис. 3.5.

Металевий циліндр з товщиною стінки  $h$  частково заповнений рідиною (конденсат) з температурою  $T_2$  і частково – газом з температурою  $T_1$ . Температура довкілля  $T_0$ , при цьому передбачається, що  $T_1 > T_2 > T_0$ .

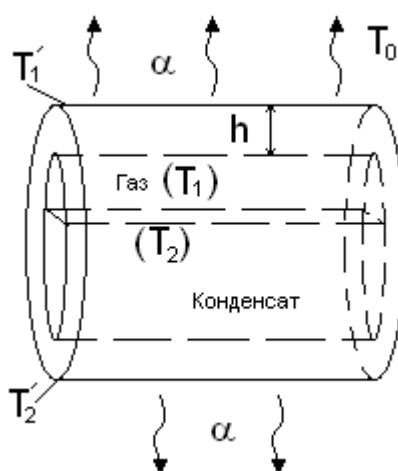


Рис.3.5 - Схематична модель трубопроводу.

Для математичного опису теплофізичної моделі використовувались граничні умови:

На межах розділів метал – газ, метал – рідина та метал – повітря (навколишнє середовище) граничні умови 3- го роду [40] з коефіцієнтами тепловіддачі  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  та  $\alpha$  відповідно;

Параметрами, які визначалися при аналізі моделі були: значення температур на поверхні труби:  $T'_1$  – у її верхній частині;  $T'_2$  – у її нижній частині.

Для проведення розрахунків використовувалось рівняння стаціонарної теплопередачі [40]

$$q = (T_0 - T_1) / R_T, \quad (3.1)$$

де  $q$  – тепловий потік крізь стінку труби,

$R_T$  – величина термічного опору стінки трубопроводу.

$$R_T = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}. \quad (3.2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби.

У випадку, коли зовнішній діаметр  $d_1$  труби набагато більше товщини стінки  $h$ , рівняння (3.2) перетворюється як:

$$R_T = \frac{\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha + \alpha \lambda}{\lambda \alpha_1 \alpha}. \quad (3.3)$$

Після підставлення (3.1) у (3.3), маємо

$$q = \frac{\lambda \alpha_1 \alpha (T_0 - T_1)}{\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha + \alpha \lambda} \quad (3.4)$$

З рівняння (3.4) можна знайти вираз для температури на поверхні труби у її верхній частині :

$$T'_1 = \frac{a \alpha_1 \alpha (T_0 - T_1)}{(\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha + \alpha \lambda)}, \quad (3.5)$$

де  $a$  – температуропровідність матеріалу труби.

Аналогічним способом можна одержати вираз для температури у нижній частині труби:

$$T'_2 = \frac{a \alpha_2 \alpha (T_0 - T_2)}{(\lambda \alpha_2 + h \alpha_2 \alpha + \alpha \lambda)}. \quad (3.6)$$

Для проведення розрахунків по формулам (3.5), (3.6) були використані довідникові значення теплопровідності [63] для матеріалу трубопроводу –

$\lambda_1 = 86,5 \text{ Bm/}_{MK}$ , газу –  $\lambda_3 = 34,2 \cdot 10^{-3} \text{ Bm/}_{MK}$  та конденсату –

$\lambda_2 = 34,2 \cdot 10^{-3} \text{ Bm/}_{MK}$

Значення температур  $T_0$  і  $T_1$  були задані згідно умовам проведення експерименту:  $T_0=14^{\circ}\text{C}$ ,  $T_1=16^{\circ}\text{C}$ . Оскільки температура конденсату  $T_2$  невідома, використовувалось допущення що  $T_2$  близька до температури навколишнього середовища (теплообмін між газом та конденсатом не брався до уваги), однак для перевірки цього допущення значення  $T_2$  варіювалося у межах  $T_1 > T_2 > T_0$ . Окрім цього, для оцінки впливу температури навколишнього середовища -  $T_0$ , його значення теж варіювалося.

Результати розрахунку температурного перепаду  $\Delta T = T_1 - T_2$  на поверхні труби при фіксованій температурі газу ( $T_1 = 16^{\circ}\text{C}$ ) наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Результати математичного моделювання.

| №<br>варіанту | Вхідні дані             |                         | Результат                    |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
|               | $T_0, ^{\circ}\text{C}$ | $T_2, ^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T, ^{\circ}\text{C}$ |
| 1             | 14                      | 14                      | 0,7                          |
| 2             | 14                      | 15                      | 0,5                          |
| 3             | 0                       | 0                       | 9,3                          |
| 4             | 0                       | 5                       | 7,5                          |
| 5             | -10                     | -10                     | 12,2                         |
| 6             | -10                     | 0                       | 8,7                          |

Як видно з таблиці 3.2 результат розрахунків по 1-му варіанту, який відповідав умовам проведення експерименту, наближений до експериментально отриманого значення  $\Delta T = 0,6^{\circ}\text{C}$ .

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що виявлена неравномірність температурного поля на поверхні труби дійсно визвана наявністю конденсату. Порівнювання наведених у таблиці 3.2 варіантів показує, що при зниженні температури навколишнього середовища  $T_0$  зростає температурний контраст  $\Delta T$ , який викликаний наявністю конденсату.

Одержані експериментальні та розрахункові дані підтверджують принципіальну можливість використання термографічного методу для контролю рівню конденсату у газопроводі.

Виникаючий завдяки наявності конденсату температурний перепад на поверхні труби залежить від різності температур навколишнього середовища та транспортуємого газу, що обумовлює більш високу чутливість методу при проведенні контролю у зимовий період.

Для одержання більш точної оцінки рівню конденсату у трубі термографічним методом необхідна доробка запропонованої теплофізичної моделі у напрямку урахування в ній теплообміну між рухомим потоком газу та конденсатом.

### 3.3 Термографічне обстеження трубопроводів і паропроводів ЗАЕС

Метою проведення обстеження було визначення придатності термографічного методу до вияву схованих дефектів типу зменшення товщини стінок труб.

Згідно з програмою проведення робіт були обстежені ділянки паро- і водопроводів енергоблоків № 3, № 5, які показані у табл. 3.3

Таблиця 3.3 – Об'єкти термографування енергоблоків № 3,5.

| №             | Об'єкт                                                                   | Параметри *    |                          |                           | Примітки         |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|------------------|
|               |                                                                          | Діаметр,<br>мм | Товщина<br>стілки,<br>мм | Температура<br>носія, Т°С |                  |
| Енергоблок №5 |                                                                          |                |                          |                           |                  |
| 1             | Паропровід другого відбору (сх.2.6Т). Ділянка між зварн. з'єднан. 463-66 | 630            | 12                       | 209°                      | У тепло-ізоляції |
| 2             | Трубопровід                                                              | 630            | 12                       | 40                        | Труба            |

|               |                                                                                                             |     |    |     |                         |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----|-----|-------------------------|
|               | основного конденса-<br>ту (напор КЭН Пст.)<br>(сх.3.5Т). Ділянка між<br>RM50S01 и RM50S02                   |     |    |     | фарбована               |
| 3             | Трубопровід<br>основного конденса-<br>ту (напор КЭН Пст.)<br>(сх.3.5Т).<br>Ділянка за RM50S02               |     |    |     |                         |
| 4             | Трубопровід<br>основного конденса-<br>ту (напор КЭН Пст.)<br>(сх.3.5Т).<br>Ділянка між<br>RM53S01 и RM53S02 | 273 | 16 | 40  | Труба<br>фарбована      |
| 5             | Трубопровід<br>основного конденса-<br>ту (напор КЭН Пст.)<br>(сх.3.5Т).<br>Відвод 47-48                     |     |    |     |                         |
| Енергоблок №3 |                                                                                                             |     |    |     |                         |
| 6             | Трубопровід<br>основного конденса-<br>ту (напор КЭН Пст.)<br>(сх.3.5Т).<br>Ділянка між<br>RM50S01 и RM50S02 | 630 | 12 | 40  | Труба<br>фарбована      |
| 7             | Трубопровід<br>основного конденса-<br>ту (напор КЭН Пст.)<br>(сх.3.5Т).<br>Ділянка між<br>RM53S01 и RM53S02 | 273 | 16 | 40  | Труба<br>фарбована      |
| 8             | Трубопровід<br>основного конденса-<br>ту (напор КЭН Пст.)<br>(сх.3.5Т).<br>Відвод 44-43                     |     |    |     |                         |
| 9             | Паропровод другого<br>відбору (сх.2.6Т.<br>Колошовна зона<br>зварного з'єднання                             | 630 | 17 | 209 | У<br>тепло-<br>ізоляції |

|       |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|
| 513-1 |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|

\*Примітка: по даним служб ЗАЕС

Обстежено групи об'єктів: 1) трубопроводи основного конденсату з температурою носія (води) 40 °С, поверхня труб була фарбованою; 2) паропроводи другого відбору з температурою носія (пари) 209 °С, труби були у теплоізоляції, яка включала шар скловолокна і металевий екран. Термографування проводилось у приміщенні з температурою 28...30°С і високим рівнем побічних засвічень. Обстеження заключалося у проведенні термографування поверхні об'єкта у різних ракурсах за допомогою тепловізора і запису видимого зображення на цифрову камеру. Термографування проводилося за допомогою стандартного тепловізора IRTIS-200, основні параметри приведені у табл.1.1.

### 3.3.1 Результати термографічного обстеження

Велика кількість отриманої термографічної і візуальної інформації не дозволяє привести її в повному обсязі у межах даного звіту. Тому в першій групі були обрані об'єкти, які мали найбільше виразні температурні поля, що дозволило зробити однозначний висновок щодо наявності прихованих дефектів (рис.3.6 – 3.10). У другій групі температурні поля об'єктів сильно залежали від стану металевих екранів, що значно ускладнювало їх аналіз.

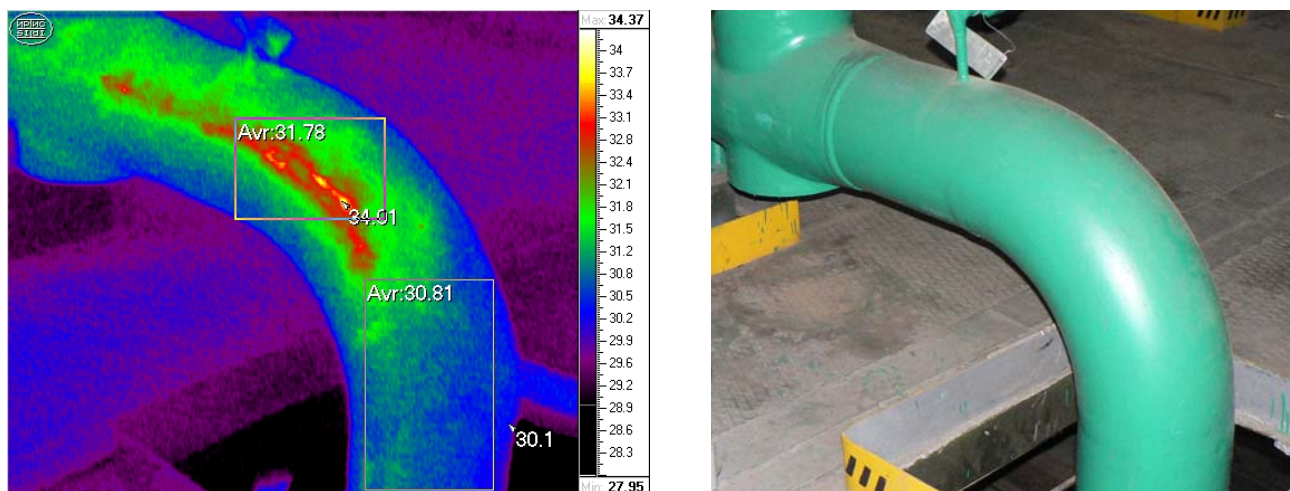
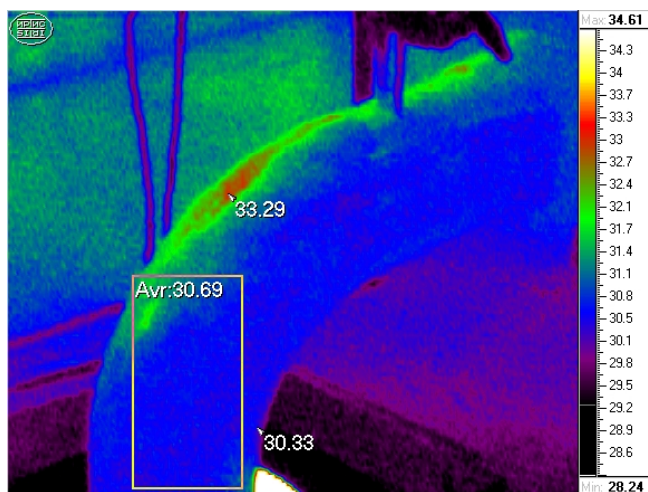


Рис. 3.6 – Лівий ракурс об'єкта 5:  
термограма (а), видиме зображення (б).

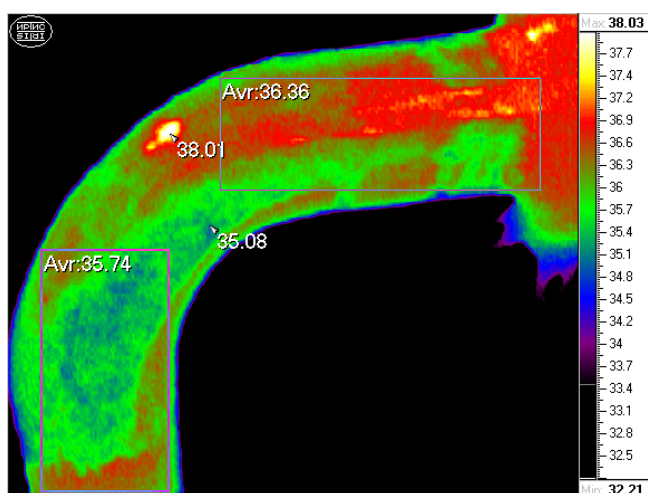


(a)



(б)

Рис. 3.7 – Правий ракурс об'єкта 5:  
термограма (а), видиме зображення (б).

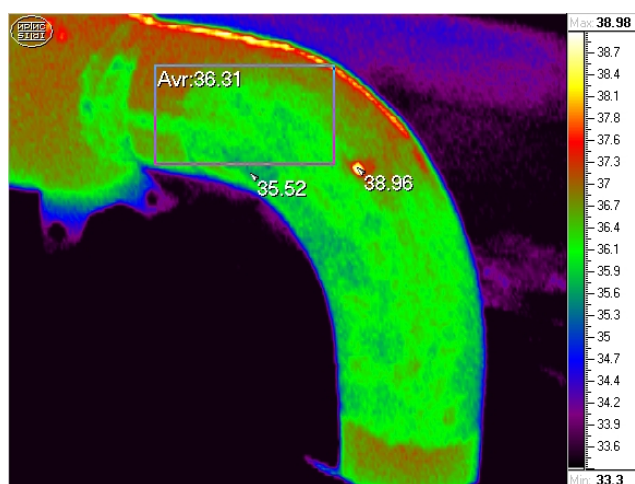


(a)



(б)

Рис. 3.8 – Правий ракурс об'єкта 7:  
термограма (а), видиме зображення (б).



(a)



(б)

Рис. 3.9 – Лівий ракурс об'єкта 7:  
термограма (а), видиме зображення (б).

Положення температурної аномалії із зміною ракурсу не змінюється, що свідчить про наявність дефекту.

Середня температура труби складає  $T_{cp} = 36,31^{\circ}\text{C}$ . Положення температурної аномалії із зміною ракурсу не змінюється, що свідчить о наявності дефекту.

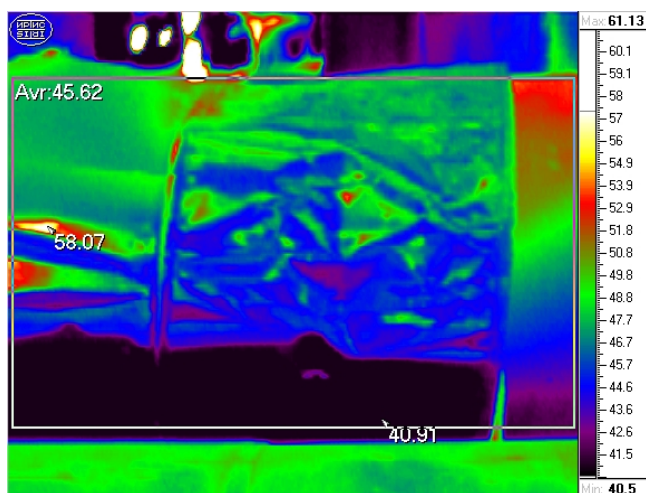


Рис. 3.10 – Фрагмент паропроводу у металевому екрані (об'єкт 9): термограма (а), видиме зображення (б).

Середня температура поверхні екрану складала  $T_{cp} = 45,62^{\circ}\text{C}$ . Велика неоднорідність теплового поля пояснюється нерівністю теплозахисного екрану (на видимому зображенні багато ум'ятин).

### 3.3.2 Методики обробки результатів обстеження і розрахунку чутливості термографічного методу до виявлення зменшення товщини стінок труб

Обробка отриманих термограм проводилась згідно з такою методикою: визначалась максимальна, середня і мінімальна температура на поверхні об'єкту ( $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ ,  $T_{cp}$ , відповідно)

- значення наносилися на термограму;

- проводився розрахунок теоретичних значень перепадів температури на поверхні труби, які пов'язані зі зменшенням товщини її стінки  $\Delta T_c$  (значення корисного сигналу);

- по термограмах визначалися експериментальні значення температурних перепадів на поверхні об'єкту, які порівнювалися з розрахунковими.

Для розрахунку чутливості термографічного методу до виявлення зменшення товщини стінок труб спочатку була побудована теплофізична модель. Підставами для формування ТФ моделі були:

- нагрів труби проводився усередині (граничні умови першого роду [40]), при температурі носія  $T_n$  і коефіцієнті тепловіддачі  $\alpha_1$ .

- зовні тепловіддача у довкілля відбувається при температурі середовища  $T_c$  і з коефіцієнті тепловіддачі  $\alpha_2$ ;

- коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби  $\lambda$ .

- параметром, який розраховується, є температура на поверхні труби  $T_h$ .

Зображення розробленої ТФ моделі труби приведено на рис. 3.11

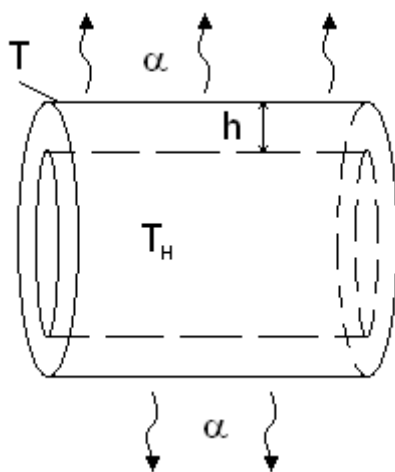


Рис. 3.11 – Теплофізична модель об'єкту (труби).

Математична модель для розрахунку  $T_h$  згідно з обраною фізичною моделлю була побудована на підставі подальших міркувань:

Тепловий потік скрізь стінку труби визначається за формулою (3.7)

$$q = (T_n - T_c) / R_T, \quad (3.7)$$

де  $R_T$  — значення термічного опору шару.

$$R_T = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (3.8)$$

У випадку однорідного матеріалу рівняння (3.8) приймає вигляд:

$$R_T = \frac{\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \lambda}{\lambda \alpha_1 \alpha_2}. \quad (3.9)$$

Після внесення  $R_T$  у рівняння (3.9), отримуємо:

$$q = \frac{\lambda \alpha_1 \alpha_2 (T_n - T_c)}{\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \lambda}. \quad (3.10)$$

З урахуванням наведених математичних виразів температура  $T_h$  на поверхні труби з товщиною стінки  $h$  можна визначити із рівняння теплового балансу [3]

$$T = \frac{\lambda \alpha_1 \alpha_2 (T_n - T_c)}{(\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \lambda) c \rho}, \quad (3.11)$$

де  $c$  — теплоємність матеріалу,  $\rho$  — щільність матеріалу.

Температурний перепад, який визваний зменшенням товщини труби (корисний сигнал) визначається за формулою:

$$\Delta T_c = T_{h1} - T_{h2} , \quad (3.12)$$

де  $T_{h1}$  и  $T_{h2}$  – температура на поверхні труби при товщині стінки  $\Delta h = h_1 - h_2$ .

Результати, отримані по формулі (3.12) наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунків корисного сигналу  $\Delta T_c$ , отримані при відмінних значеннях зменшення товщини труби  $\Delta h$ .

| Товщина труби $H, \text{мм}$            | 12  |      |      |      | 16   |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Температура носія $T_H, ^\circ\text{C}$ | 200 |      |      |      | 40   | 100  | 200  |      |      |      |
| $\Delta h, \text{мм}$                   | 2   | 4    | 6    | 8    | 8    | 8    | 2    | 4    | 6    | 8    |
| $\Delta T_c, ^\circ\text{C}$            | 2,3 | 3,28 | 4,11 | 6,92 | 0,56 | 1,12 | 0,34 | 0,61 | 1,22 | 2,83 |

Необхідно урахувати те, що при наявності теплової ізоляції на паропроводах розраховані значення корисних сигналів ( $\Delta T_c$ ) зменшуються у  $K$  разів, де  $K$  - коефіцієнт послаблення температурного поля ізоляцією. Згідно з експериментальними даними  $K \approx 4$ .

### 3.3.3 Аналіз результатів

По трубопроводам основного конденсату можна відмітити наступне:

Еквівалентні температурні перепади, які викликані побічним засвітленням і носять шумовий характер, складають приблизно  $2^\circ\text{C}$ , що перевищує показники, розраховані у табл.3.3. Це пов'язано з тим, що

фарбована поверхня труби має високий коефіцієнт відбиття. Однак при зміні ракурсу реєстрації положення деяких аномалій температурних полів не змінюється і не залежить від положення джерел побічного засвітлення. Це може служити ознакою, що зареєстрована температурна аномалія є прихованим дефектом. На обстежених об'єктах такий висновок підсилюється збігом результатів ультразвукового контролю. Таким чином термографічний метод дозволяє знаходити приховані дефекти і він має перспективу як засіб дистанційного діагностування трубопроводів основного конденсату.

По паропроводам:

Отримані результати підтверджують очевидне: визначення дефектів типу зменшення товщини стінки паропроводу скрізь великий шар теплової ізоляції неможливий.

Це наочно видно із порівняння температури носія ( $209^{\circ}\text{C}$  згідно з табл. (3.3) із температурою поверхні металевого захисного екрану (середня температура  $44^{\circ}\text{C}$ ), т.ч. тепла ізоляція ослаблює температурне поле на  $150\dots 160^{\circ}\text{C}$ , або приблизно в 4 рази.

Негативний вплив теплоізоляції поряд з ослабленням температурного поля проявляється також і за рахунок температурного шуму, який визивається наявністю побічних джерел світла і теплоти (джерел освітлення, інших паропроводів, які розташовані у безпосередньої близькості і т.п.).

З – за неоднорідності поверхні захисного екрану теплової ізоляції розбіжності по температурі досягають  $62^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, наявність теплової ізоляції створює подвійний негативний ефект:

- ослаблює температурне поле і вносить температурний шум;
- підсилює засвічення від побічних джерел світла і теплоти.

У підсумку шумовий параметр від обох факторів на поверхні труби  $\Delta T_{ш} = T_{\max} - T_{\text{ср}}$  і становить до  $23^{\circ}\text{C}$ .

Термографічний метод може бути використаний у випадку, коли знята вся теплоізоляція, а паропровід знаходиться у навантаженому стані. Навіть з

урахуванням трудомісткості операцій по демонтажу і монтажу теплової ізоляції застосування термографічного методу може дати значний економічний ефект, так як цей метод по своїм можливостям перевершує всі контактні методи.

### 3.4 Висновки

#### 1.4 Висновки

Проведений аналіз стану активного і пасивного (термографії) теплових методів показав, що:

- тепловий метод вирізняється серед інших спроможністю проведення дистанційного діагностування з високою продуктивністю і без виводу об'єкту із експлуатації.
- активний тепловий неруйнівний контроль використовується для теплової дефектоскопії об'єктів, які заходяться у термодинамічній рівновазі з середовищем; для вирішення задачі АТК і вибору оптимальних параметрів контролю використовують теплофізичні моделі процесу АТК заданого об'єкту;
- існуючі теплофізичні моделі не ураховують обмежень по максимальній температурі нагріву, завадах, зміні кордонних умов;
- загальноприйнятий критерій оптимізації процедури АТК – максимізація корисного сигналу також не ураховує завад (нерівномірність нагріву і випромінювальної здатності);
- пасивний метод теплового контролю – термографія, яка дозволяє контролювати об'єкти з внутрішніми джерелами теплоти, незважаючи на широке світове застосування, в Україні недостатньо розвинена; винятком являється термографування енергетичного обладнання;
- головна проблема термографії – встановлення зв'язку між аномаліями температурного поля на поверхні об'єкту і дефектами

внутрішньої структури – не має універсального рішення, бо кожний тип об'єктів має свої особливості і розподіл температури на поверхні;

Таким чином, для поширення застосування теплового методу і термографії треба розробити відповідні процедури контролю і методів обробки результатів. Для цього необхідно вирішити слідуючи задачі:

- розробити теплофізичну модель процесу активного теплового контролю об'єктів з внутрішніми неоднорідностями і на підставі її аналізу оптимізувати відношення сигнал/завада;
- отримати експериментальним шляхом набір статистичних даних термографічного обстеження обраних об'єктів для подальшої обробки;
- сформувати методи обробки результатів термографічних обстежень, що базувалися на специфічних для кожного об'єкту інформативних ознаках і правилах прийняття рішення;
- провести апробування розроблених методів на реальних об'єктах і сформувати рекомендації до їх впровадження.

Опробування термографічного методу показали перспективність його використання для дефектометрії ОЦФ із сотовим теплозахисним металевим покриттям. Для такого роду об'єктів тепловий метод не має рівних.

Одержані експериментальні та розрахункові дані підтверджують принципіальну можливість використання термографічного методу для оцінювання рівня конденсату у газопроводах. Якість оцінювання залежить від температури довкілля і підвищується при проведенні термографічних обстежень у зимовий період.

Тепловий метод має великі можливості для використання у ядерній енергетиці. Термографія дозволяє знаходити приховані дефекти і діагностувати трубопроводи основного конденсату. Обстеження показали збігання результатів з головним видом контролю для такого роду об'єктів – ультразвуковим. Для паропроводів термографічний метод може бути

використаний у випадку, коли знята вся теплоізоляція, а сам паропровод знаходиться у навантаженому стані.

## **4 РОЗРОБКА СПОСОБУ ОТРИМАННЯ, ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ЕНЕРГОНОСІЯ НА БАЗІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ**

### **4.1 Аналіз сучасного стану альтернативної енергетики в Україні**

Вітроенергетика – галузь відновлюваної енергетики, яка спеціалізується на використанні кінетичної енергії вітру.

Вітроенергетика (вітрова електроенергетика) – це спосіб отримання електричної енергії за допомогою вітру. Найефективніше вітрова установка використовується у місцях, де відсутнє централізоване енергопостачання, немає таких перешкод як висотні будинки, пагорби та існує достатній вітровий потенціал. Рекомендована середня швидкість вітру не менше 3,8 м/с.

Цей вид джерела енергії є непрямою формою сонячної енергії, і тому належить до відновлюваних джерел енергії. Використання енергії вітру є одним із найдавніших відомих способів використання енергії із навколишнього середовища, було відоме ще в давні часи.

Досліджений вітровий потенціал України, згідно даним Інституту поновлюваної енергетики України НАН України, дозволяє побудувати ефективні ВЕС загальною потужністю 16000 МВт, хоча на сьогоднішній день в Україні працює тільки 7 промислових ВЕС загальною потужністю 89 МВт. Уряд України надає підтримку цієї нової галузі, що розвивається, поновлюваної енергетики. Уже прийняті «Комплексна програма будівництва ветроелектростанцій в Україні до 2010 року», затверджена Постановою Кабінету Міністрів України №137 від 03.02.1997 і Закон України «Про внесення змін у деякі Закони України для стимулювання розвитку вітроенергетики». Стимулюють зацікавленість у розвитку техніки й технологій використанні енергії вітру також ряд законодавчих норм, зокрема, Закони України «Про енергозбереження» і «Про охорону

навколишнього природного середовища». В 2003 році був прийнятий Закон № 555-IV «Про альтернативні джерела енергії».

Вітряний генератор (вітрогенератор, вітротурбіна, вітроелектрична установка) - електромеханічний пристрій, завданням якого є трансформація кінетичної енергії спрямованих повітряних потоків в електричну енергію.

Не торкаючись технічних особливостей пристрою вітряних генераторів, а лише беручи до уваги порядок значення кількості вироблюваної електроенергії, вітряні генератори діляться на промислові та домашні. Якщо перші, будучи об'єднаними в єдину енергомережу, утворюють вітряні електростанції, які підтримують енергозабезпечення великих підприємств, житлових масивів або цілих регіонів, то другі, встановлюючи поодинокі, забезпечують подачу електроенергії в окремі будинки. На сьогоднішній день, не дивлячись на уявну екзотичність для нашої країни даного технічного пристрою, можна без будь-яких складнощів і за розумними цінами зробити установку вітряного генератора на своєму земляному ділянці, забезпечивши повну автономію, а значить безперебійність і незалежність від тарифів, енергозабезпечення свого житла. Дослідження в області енергоспоживання свідчать, що для забезпечення електроенергією середньої величини житлового будинку досить вітряного генератора потужністю близько 1 кВт при середній швидкості вітру порядку 7-10 м / с, що за шкалою Бофорта визначається як помірний або свіжий. У випадку низької "легковажності" місцевості, вітряної генератор може служити складовою частиною більш складної енергосистеми, що включає в себе інші джерела енергії. У будь-якому випадку з причини відсутності якого-небудь палива, вітрогенератор, на відміну від традиційних енергоджерел, є у вищій мірі економічно ефективним.

Принцип роботи полягає в наступному: повітряні потоки розкручують лопаті і розганяють ротор генератора, внаслідок чого виробляється змінний електричний струм (рис.1.1).

Контролер заряду перетворює змінний струм в постійний, яким і заряджається акумулятор.

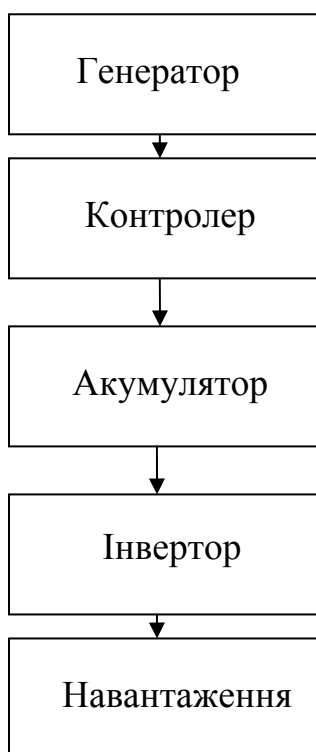


Рисунок 1.1 – Блок-схема основних компонентів вітроустановки

Акумулятор є одночасно накопичувачем електроенергії виробленої генератором і стабілізатором напруги, тобто його основне завдання - забезпечення безперебійного стабільного живлення енергомережі в умови безвітря або поривчастого вітру.

Інвертор – пристрій, який виконує завдання зворотну задачі контролера заряду, тобто перетворення постійного струму, який був попередньо накопичений в акумуляторі, струм змінний, що надходить на розподільну систему будинку, а з неї - до конкретного пристрою-споживачу електричної енергії.

Перед установкою вітряного генератора необхідно провести аналіз умов, в яких йому належить працювати (відкритість місцевості, піднесеність місцевості, середня швидкість вітру, характерна для регіону), і завдань, які будуть перед ним ставитися (кількість і тип пристроїв споживачів електроенергії, приблизна частота роботи пристроїв-споживачів і т.д.). Це максимально знизить вірогідність установки невідповідного пристрою і виключить можливість не обґрунтованих реальними потребами розтрат.

Самі ж вітряні генератори найбільш однозначно характеризуються сукупністю наступних своїх характеристик:

- швидкості зарядки акумулятора (вимірюється в кВт / год), що є показником того, наскільки потужним є генератор і як швидко пристрій починає працювати з моменту повної розрядки;
- часу безперервної роботи (вимірюється в годинах), що є показником того, наскільки довго (починаючи з моменту зупинки генератора при безвітрі або при слабкій його роботі в разі слабого вітру) електроенергія буде надходити на пристрої-споживачі;
- вихідний потужності інвертора (вимірюється в кВт), що дає уявлення про те, яка кількість пристроїв-споживачів (залежно від їх енергоспоживання) може бути підключено до енергосистеми.

Перспективним напрямком використання електричної енергії, отриманої з вітрогенераторів є отримання водню – екологічно чистого енергоносія, котрий може використовуватись у багатьох галузях.

Ефективне одержання водню з води - давня приваблива мрія цивілізації. Насущна й актуальна проблема енергетики складається також у газифікації твердих і рідких углеводородних палив, конкретніше в створенні й впровадженні енергозберігаючих технологій одержання горючих паливних газів з будь-яких вуглеводнів, включаючи кам'яні вугілля. Приваблива перспектива перетворення будь-яких рідких органічних відходів у дешевий паливний газ.

Відомі різні методи одержання водню при розкладання води: термічний, електролітичний, каталітичний, термохімічний, термогравитационный, електроимпульсний та інші. Істотні енерговитрати при одержанні паливного газу з води у відомих технологіях витрачаються на подолання межмолекулярних зв'язків води в її рідкому агрегатному стані. Біометоди газифікації органіки не мають універсальність, високою продуктивністю й критичні до багатьом параметрам.

#### 4.2 РОЗРОБКА ВЕРТИКАЛЬНОГО АЕРОГІДРОДИНАМІЧНОГО ДВИГУНА ДЛЯ СИСТЕМИ З ВИРОБНИЦТВА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ

У пропонованій системі з виробництва альтернативної енергії передбачається використання нового типу вертикального вітрогенератора, на який отриманий патент України [3] на корисну модель №51548 МПК 2009 F03D 3/00 від 26.07.2010. До його переваг відноситься комбіноване використання як сили лобового опору повітряному потоку, так і піднімальної сили. Це розширює діапазон експлуатаційних швидкостей повітряного середовища, а також збільшує довжину траєкторії руху лопати, де відбувається корисна робота. У порівнянні із пропелерними установками, що використовують тільки піднімальну силу, що виникає лише при значних швидкостях потоку, пропонований агрегат використовує силу лобового опору, що діє при менших значеннях потоку. Теоретично коефіцієнт використання енергії вітру в даній моделі становить 0,65 що вище кращих існуючих моделей, у яких ця величина становить 0,48. У порівнянні з аналогічними ортогональними агрегатами в пропонованому пристрої пропонується використання лопат здатних забезпечити оптимальну дію, як піднімальної сили, так і сили лобового опору. Також забезпечується максимально вигідне положення лопат щодо потоку на різних ділянках траєкторії їхнього руху.

Розроблений тип ортогонального вітроагрегата є основною складовою частиною установки по виробництву альтернативної енергії. Достоїнствами установки є проста в експлуатації й обслуговуванні. Її робота не заподіює збитку навколишньому середовищу. Модифікації установки здатні викликати інтерес у різних шарів споживачів тим, що вона здатна без постійних капіталовкладень забезпечити потреби різних технічних засобів і пристроїв в енергоносіях.

Аерогідродинамічний двигун, що містить вал обертання, встановлений перпендикулярно напрямку руху газового або рідинного потоку середовища з прикріпленими до нього радіальними опорами, на яких шарнірно закріплені за допомогою осей лопаті аеродинамічної форми, а також обмежуючі кут повороту лопатей навколо осей упори, який відрізняється тим, що лопаті мають асиметричний профіль таким чином, що одна їх поверхня виконана вгнутою, а друга - опуклою, при цьому упори розташовані на відстані від радіальних опор та між собою, достатній для забезпечення кута повороту лопатей в процесі руху їх вздовж та впоперек потоку середовища з виникненням тягнучого ефекту.

Корисна модель відноситься до аерогідродинамічних двигунів, які перетворюють енергію поступового руху газового або рідинного середовища, наприклад вітру або течії води, в обертальний рух вала приводу силових машин, таких як генератор електричного струму, гребний гвинт корабля, насос, підйомний механізм і т.п.

Зазначені аеродинамічні двигуни містять обертальний орган - ротор, що взаємодіє з набігаючим потоком середовища, і вісь обертання, зв'язану з валом приводу силової машини. Основним елементом цих двигунів є лопатки або лопаті, виконані у вигляді плоских або профільованих пластин, рівномірно і симетрично розташованих на роторі і жорстко або шарнірно з'єднаних з віссю обертання. Аерогідродинамічні двигуни є більш привабливими, так як дозволяють змінювати кут нахилу лопатів

відносно вектора набігаючого потоку середовища  $i$ , таким чином, виробляють більш високу потужність.

Найбільш близьким по суті і результату що досягається до технічного рішення, що пропонується є аерогідродинамічний двигун, що містить вал обертання, встановлений перпендикулярно напрямку руху газового або рідинного потоку середовища з прикріпленими до нього радіальними опорами, на яких шарнірно закріплені за допомогою осей лопаті аеродинамічної форми, а також обмежуючі кут повороту лопатей навколо осей упори (пат. RU №20144, B6; F03D 3/06, 1994).

У відомому двигуні лопаті мають симетричний профіль і виконані двояко опуклої форми, а упори розташовані на осі, що співпадає з віссю радіальної опори.

Повний кут обертання вала двигуна складається із двох умовних зон, одна із яких характеризується як зона корисної потужності  $E_1$ , де лопаті рухаються за потоком середовища, і друга зона  $E_2$ , в якій потужність двигуна витрачається на рух лопатей назустріч потоку середовища, де лопаті розташовуються вздовж потоку, що не сприяє створенню тягнучого ефекту в цій зоні. Загальна потужність  $E$ , що виробляється двигуном, дорівнює сумі між  $E_1$  і  $E_2$ .

Виконання профілю лопатів симетричної опуклої форми у відомому двигуні утворює умови для вільного стікання потоку середовища без затримки його на зовнішніх поверхнях лопатів. Концентрації потоку на опуклій поверхні лопатів не виникає, зменшується коефіцієнт лобового опору лопатів, втрачається енергія  $E_1$  набігаючого на них потоку, особливо в зоні  $E_2$  руху їх впоперек потоку, що негативно позначається на обертальній потужності двигуна. Крім того, розташування упорів на осі, що співпадає з віссю радіальної опори значно збільшує зону  $E_2$  у межах кута повороту вала двигуна  $70-180^\circ$ , в якій лопаті розміщуються вздовж потоку, де коефіцієнт лобового опору практично нульовий і взаємодія з

потокот середовища не забезпечує відбору корисної потужності. Це також негативно позначається на загальній величині виробляємої потужності двигуна.

Завдання даної корисної моделі полягає у створенні аерогідродинамічного двигуна, який забезпечує збільшення взаємодії лопатів з потоком набігаючого на них середовища як в зоні руху їх за потоком, так і впоперек потоку, і підвищує, таким чином, виробляему ним потужність.

Поставлене завдання вирішується тим, що в аерогідродинамічному двигуні, що містить вал обертання, встановлений перпендикулярно напрямку руху газового або рідинного потоку середовища з прикріпленими до нього радіальними опорами, на яких шарнірно закріплені за допомогою осей лопаті аеродинамічної форми, а також обмежуючі кут повороту лопатей навколо осей упори, згідно з корисною моделлю лопаті мають асиметричний профіль таким чином, що одна їх поверхня виконана вгнутою, а друга - опуклою, при цьому упори розташовані на відстані від радіальних опор та між собою, достатньої для забезпечення кута повороту лопатів в процесі руху їх вздовж та впоперек потоку середовища з виникненням тягнучого ефекту.

Виконання лопатів асиметричного профілю опукло вгнутої форми сприяє концентрації потоку середовища на їх вгнутій поверхні і утворенню зони високого тиску на цій поверхні, та завихренню потоку і утворенню зони низького тиску за опуклою поверхнею. Це підвищує, таким чином, корисну потужність в зоні  $E_1$  виробляему двигуном.

Розташування упорів на відстані між радіальних опор та між собою, достатньої для забезпечення повороту лопатів в зоні руху їх вздовж потоку (зона  $E_2$ ) збільшує зону  $E_1$  корисної потужності за рахунок збільшення кута атаки потоку середовища на лопаті і викликає, таким чином тягнучий ефект при їх русі впоперек потоку, що також корисно позначається на величині виробляємої двигуном енергії.

Аналогічних технічних рішень зі схожими ознаками при проведенні патентно-інформаційного пошуку не виявлено. Це свідчить про те, що технічне рішення, що пропонується, є новим і промислово придатним.

Корисна модель пояснюється кресленнями, де на Рисунок 2.1 зображений схематично аерогідродинамічний двигун, вигляд в плані; на рис 2.2 - схема змінення кута повороту лопаті; на Рисунок 2.3 - схема змінення положення лопаті за потоком в положення вздовж потоку; на рис 2.4 - схема взаємодії лопаті з потоком набігаючого на неї середовища.

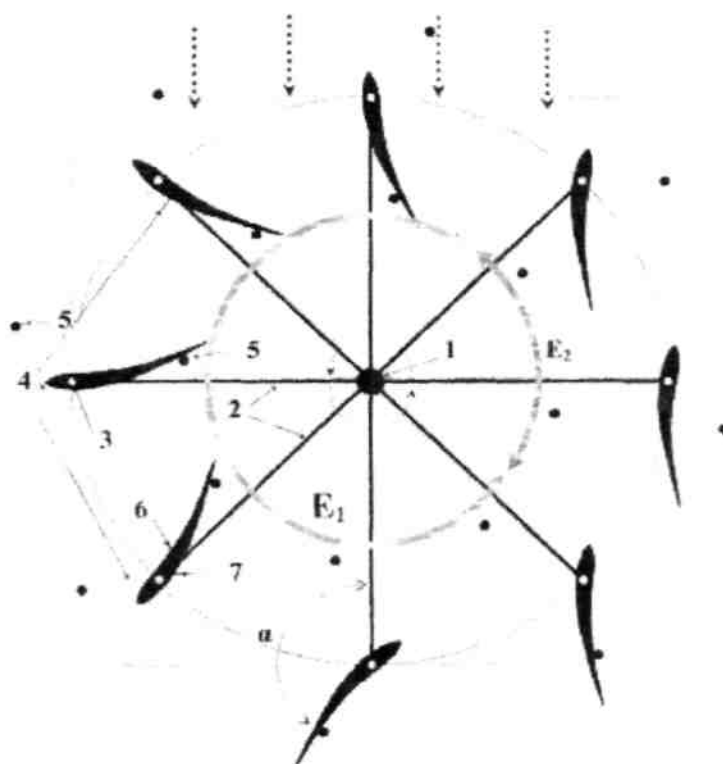


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення аерогідродинамічного двигуна

Аерогідродинамічний двигун містить вал обертання 1, встановлений перпендикулярно напрямку руху газового або рідинного потоку середовища - вітра або течії води, з прикріпленими до нього радіальними опорами 2, на яких шарнірно за допомогою осей 3 закріплені лопаті 4 аеродинамічної форми, а також обмежуючі кут  $\alpha$  повороту лопатів навколо зазначених осей упори 5. Лопаті мають асиметричний профіль так, що одна їх поверхня 6 виконана вгнутою, а друга поверхня 7 опуклою. Упори

5 розташовані на відстані  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  від радіальних опор 2 та між собою, достатньої для забезпечення кута а повороту лопатів в процесі руху їх вздовж потоку середовища з виникненням тягнучого ефекту. Вісь вала обертання 1 проходить крізь лопаті таким чином, що для руху середовища створює різницю сил, які розвертають її в положення найбільшого опору потоку середовища.

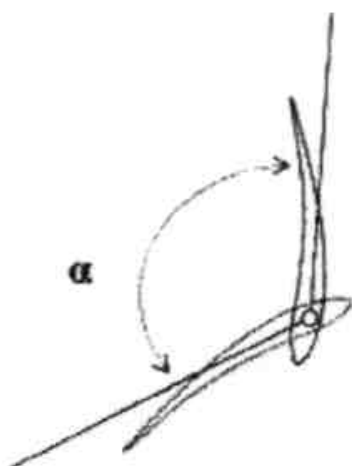


Рисунок 2.2 – схема змінення кута повороту лопаті хема змінення кута повороту лопаті

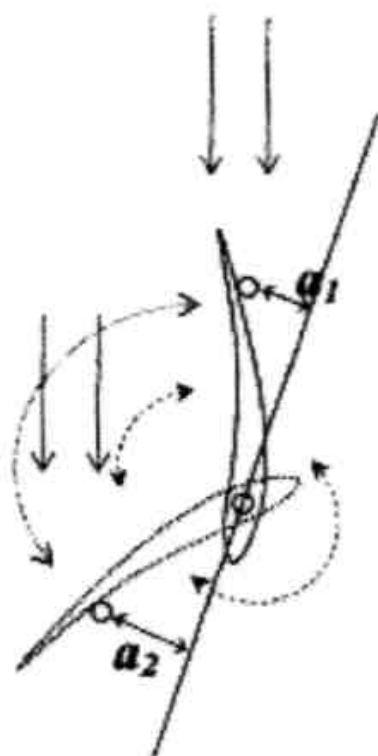


Рисунок 2.3 – Схема змінення положення лопаті за потоком в положення  
вздовж потоку

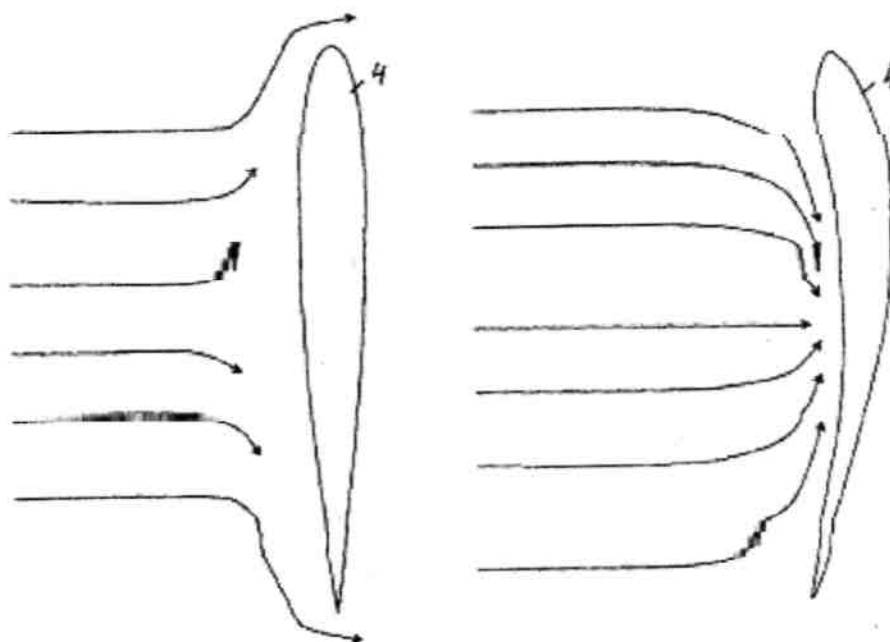


Рисунок 2.3 – Схема взаємодії лопаті з потоком набігаючого на неї середовища

Двигун працює наступним чином. При відсутності потоку середовища лопаті 4 розташовуються в будь-якому положенні відносно своїх осей 3, частина із них можуть спиратися на ті або інші упори 5, а друга частина їх розташовується в проміжному положенні між ними. При набіганні потоку на ротор, лопаті повертаються і намагаються зайняти положення найменшого супротиву потоку, тобто вздовж нього. Частина лопатів при цьому досягає і притискається до того або іншого упору 5. При цьому на вгнуту поверхню 6 лопатів діє тиск середовища, за рахунок чого тиск від лопаті передається на радіальну опору 2 і на вал 1, який починає обертатися. Вгнута поверхня 6 лопатів 4 забезпечує концентрацію середовища на ній, що значно підвищує тиск його на цю поверхню. Одночасно, з боку опуклої поверхні 7 цих лопатів, виникає зрив потоку з цієї поверхні, завихрення його з утворенням області низького тиску, що сприяє збільшенню корисної потужності в зоні  $E_1$  виробляємої двигуном. При переході лопатів із зони  $E_1$  в зону  $E_2$ , розташування упорів 5 на відстані між радіальних опор 2 і між собою, достатньою для забезпечення

кута повороту лопатів в процесі руху їх вздовж потоку середовища, лопаті, спираються на зазначені упори, не займаючи положення найменшого опору набігаючому потоку, що забезпечує, таким чином, відбір корисної потужності.

Кут зони  $E_2$  обертання лопатів, при якому лопаті розташовуються вздовж потоку при цьому значно зменшується до  $90^\circ$  і менше, а загальна потужність  $E$ , що виробляється двигуном, підвищується.

Дослідні роботи показують, що загальна потужність двигуна при цьому збільшується на 22-27 %.

Вітрогенератор вертикальний має наступні переваги:

- не залежить від напрямку вітру;
- має ККД крила максимально близький до ідеального (36,5%) завдяки сочетанню дизайну вітрила Савоніуса й профілю Жуковського, крила фіксуються більше фізіологічно. Оригінальна форма ротора в сукупності з оптимальним профілем лопат дають реальний ККД практично наближається до номіналу при будь-якому напрямку вітру. Дана конструкція «ловить» пориви вітру;
- не має потреби в обслуговуванні на відміну від горизонтальних генераторів. Оскільки синхронний повільний генератор із щілинним розташуванням редкоземельних магнітів не використовує у своїй роботі щіток, редукторів, на відміну від горизонтальних вітрогенераторів які необхідно обслуговувати кожні півроку;
- постачений тільки одним підшипником для упорної стійкості ветрокрыла;
- можливість розташування в безпосередній близькості до житлових приміщень, або на даху будинків, на відміну від горизонтальних, для яких необхідний захист відстанню через підвищену гучність, вібрації й випромінювання;
- шумове навантаження до 20 Дб, магнітне випромінювання й вібрація повністю відсутні;

- не має потреби в додаткових пристроях для запуску системи.

Електрогенератор з ротором на постійних магнітах може бути побудований по різних схемах, що відрізняється друг від друга спільним розташуванням обмоток і магнітів. Магніти з полярністю, що чергується, розташовуються на роторі генератора. Обмотки з напрямком, що чергується, намотування розташовуються на статорі генератора. Якщо ротор і статор являють собою співвісні диски, то такий тип генератора назвемо аксіальним або дисковим. Можливі різні модифікації дискового генератора, коли, наприклад, магніти на немагнітному диску розташовуються між двома дисками з обмотками або немагнітний диск із обмотками розташовується між двома дисками з магнітами.

При використанні вітрогенератора як єдиного джерела електрики необхідно добре продумати й прорахувати вибір потужності генератора, інвертора і ємність акумуляторів, взяти до уваги режим передбачуваного споживання, можливі пікові й середні навантаження, середню швидкість вітру. Потужність генератора вибирається у відповідності із середньою витратою електроенергії. Для вибору потужності генератора, використовують графіки залежності вироблюваної потужності від швидкості вітру. Розглянемо процес підбора потужності на прикладі з конкретними числами.

Допустимо, що середня або розрахункова потужність споживання становить 10800 кВт/год на місяць, режим споживання рівномірний у масштабі декількох днів, середня швидкість вітру 11 м/с і мало міняється в плинні року. Тоді середня витрата електроенергії в годину становить (10800 кВтгод/місяць):  $(24 \text{ год.} \times 30 \text{ діб}) = 15 \text{ кВт}$ . Тепер ми маємо всі дані для рішення проблеми. Звернемося спочатку до графіка залежності вироблюваної потужності від швидкості вітру для вітрового генератора номінальною потужністю 10 кВт (див. рисунок 2.4).

Із графіка, на Рисуноквидно, що при 11 м/с генератор виробляє 12,2 кВт, це менше ніж 15 кВт, і отже недостатньо для автономної роботи.

Тому розглянемо наступний по потужності двадцяти кіловатний вітровий генератор.

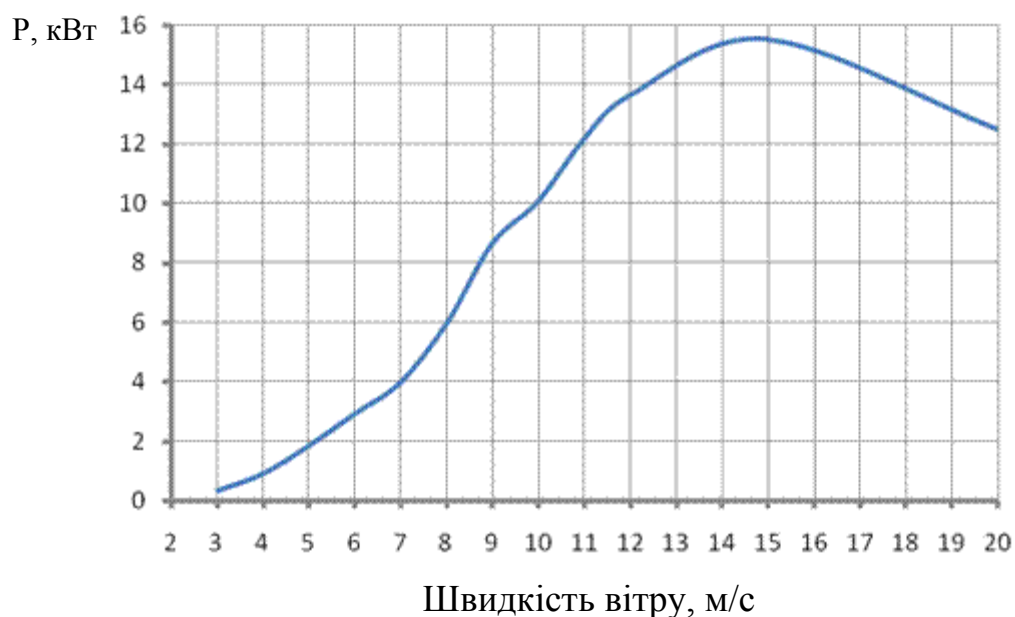


Рисунок 2.4 - Графік залежності потужності, що виробляється від швидкості вітру для вітрового генератора номінальною потужністю 10 кВт

Його характеристика потужності показана на рис.2.5. З її видно, що такий генератор виробляє 17 кВт при швидкості вітру 11 м/с, це на 2 кВт більше необхідній потужності, тому генератор даної потужності підходить для описаних умов.



Рисунок 2.5 - Графік залежності потужності, що виробляється від швидкості вітру для вітрового генератора номінальною потужністю 20 кВт

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики вітрогенератора з вертикальним ротором

|                                                                      |        |                    |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------------------|
| Модель                                                               |        | ВВ-1               |
| Мінімальна потужність                                                | кВт    | 0,75               |
| Номінальна потужність                                                | кВт    | 1                  |
| Максимальна потужність                                               | кВт    | 1,9                |
| Вихідна напруга на номінальних обертах                               | В      | 220                |
| Швидкість руху вітру для здвиження                                   | м/с    | 0,17               |
| Швидкість руху вітру для сталої роботи акумуляторної батареї         | м/с    | 2                  |
| Швидкість руху вітру для номінальної потужності                      | м/с    | 3                  |
| Генератор синхронний, безщіточний, безредукторний, прямого обертання |        |                    |
| Тип генератора                                                       |        | ЩРПМ               |
| Номінальна швидкість обертання генератора                            | об/хв. | 200                |
| Кількість полюсів генератора                                         | -      | 20                 |
| Діаметр генератора/ Висота генератора                                | мм     | 340/100            |
| Ротор                                                                | -      | Зовнішній          |
| Статор                                                               | -      | внутрішній         |
| Принцип роботи                                                       | -      | Магнітна левітація |
| Вага генератора                                                      | кг     | 32                 |
| Вітроколесо                                                          |        |                    |
| Діаметр вітроколеса                                                  | м      | 2                  |
| Висота крила                                                         | м      | 6                  |
| Штрина крила                                                         | мм     | 650                |

|                            |    |    |
|----------------------------|----|----|
| Кількість крил             | шт | 4  |
| Вага вітроколеса           | кг | 20 |
| Рекомендована висота мачти | м  | 16 |

Звичайно вітрогенератори поставляються в комплекті з усім необхідним для роботи устаткуванням, включаючи інвертор, що має ту ж номінальну потужність, що й генератор. У більшості випадків це виправдано, тому що накопичена енергія звичайно витрачається більш-менш рівномірно. Але якщо витрата енергії відбувається з більшими перервами в часі, а між витратою йде інтенсивне нагромадження в акумуляторах, або пікова потужність споживання порівнянна з потужністю інвертора, то необхідно змінити комплектацію компонентів.

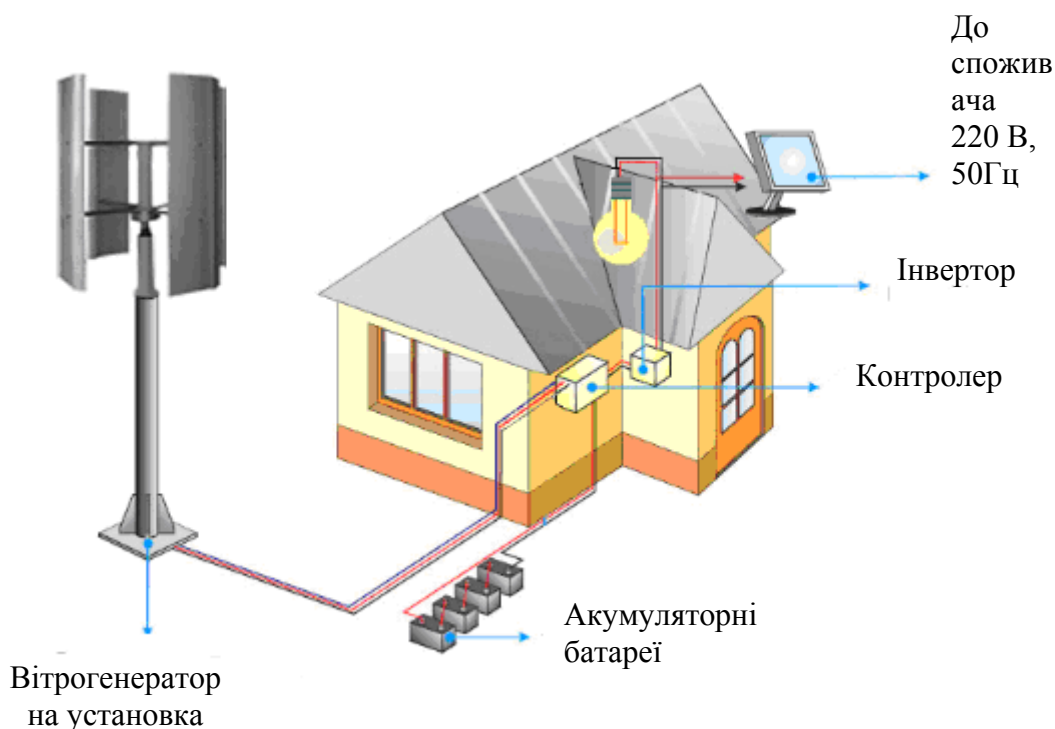


Рисунок 2.6 – Склад установки для отримання енергії для індивідуального споживача

### 3 РОЗРОБКА СПОСОБУ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ В СИСТЕМІ З ВИРОБНИЦТВА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ

Електрична енергія, що отримана від вітрогенератора може використовуватися споживачем або для отримання енергоносія – водню. Пристрій (рис.3.1) для реалізації запропонованого способу одержання горючого газу – водню з водяних розчинів складається з діелектричної ємності 1, з наливої в неї рідиною 2 (водо-топливної емульсії або звичайна вода), з тонкого-пористого капілярного матеріалу, наприклад, волокнистого гнота 3, зануреного в цю рідину й попередньо змоченого в ній, з верхнього випарника 4, у вигляді капілярної випарної поверхні зі змінною площею у вигляді непроникного екрана.

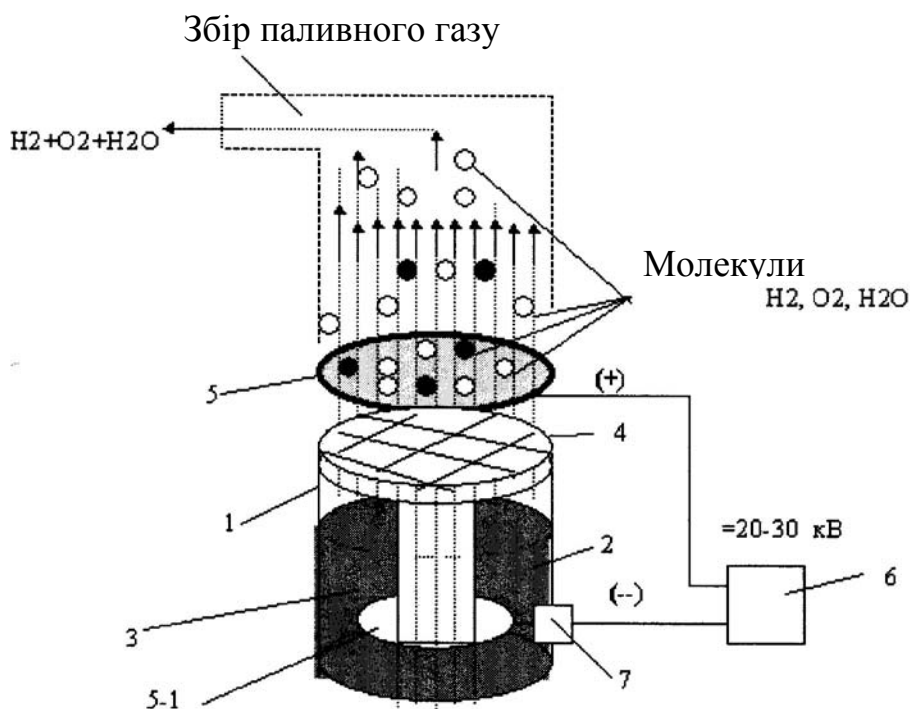


Рисунок 3.1 – Електрохімічна чарунка

До складу даного пристрою входять також високовольтні електроди 5, 5-1, електрически приєднані в різнойменним виводам високовольтного регульованого джерела знакопостоянного електричного поля 6, причому один з електродів 5 виконаний у вигляді дырчато-игольчатой пластини, і

розміщений рухливо над випарником 4, наприклад, паралельно йому на відстані, достатньому для запобігання електричного пробоя на змочений гніт 3, механічно з'єднаний з випарником 4. Інший високовольтний електрод (5-1), електрически підключений по входу, наприклад, до “+” виводу джерела поля 6, своїм виходом механічно й електрически приєднаний до нижнього кінця пористого матеріалу, гніта 3, майже на дні ємності 1. Для надійної електроізоляції електрод захищений від корпусу ємності 1 прохідним електроізолятором 5-2. Пристрій доповнений також збірним газовим колектором 7. По суті, пристрій, що містить блоки 3, 4, 5, 6, є комбінованим пристроєм електроосмотичного насоса й електростатичного випарника рідини 2 з ємності 1. Блок 6 дозволяє регулювати напруженість знакопостоянного (“+”, “-”) електричного поля від 0 до 20 кВ/див. Електрод 5 виконаний дірчастим або пористим для можливості пропущення через себе утвореної пари. У пристрої (рис.3.1) передбачена також технічна можливість зміни відстані й положення електрода 5 щодо поверхні випарника 4. У принципі для створення необхідної напруженості електричного поля замість електричного блоку 6 і електрода 5 можна використати керамічні моноелектрети. Перші досвіди “холодного випару” і електрокапілярної дисоціації рідин проводилися з використанням як рідини водо-топливних емульсій й фекалійних розчинів різних концентрацій. Паливні гази були досить різні по складі й теплоємності. Під дією електростатичних сил поздовжнього електричного поля дипольні поляризовані молекули рідини переміщуються по капілярах з ємності в напрямку до протилежного електричного потенціалу електрода 5 (електроосмос), зриваються цими електричними силами поля з поверхні випарника 4 і перетворюються спочатку у видимий туман, а потім диссоціюють в електричному полі при мінімальних енерговитратах джерела електричного поля (6). Часткова електрорадіоліз, термокінетическая й електрополева дисоціація випаруваних полем молекул рідини виникає шляхом зіткнення між собою й з молекулами

повітря й озону, електронами в зоні іонізації між випарником 4 і верхнім електродом 5. Як показують досвіди, ці відбуваються з утворенням горючого газу. Далі цей паливний газ надходить через газосборник 7, у накопичувач, наприклад, у камери згоряння двигуна автотранспорту. До складу цього горючого паливного газу входять молекули водню ( $H_2$ ), кисню, молекули води. Експериментально показано, що інтенсивність процесу випару й дисоціації молекул її пари й состав паливних газів істотно залежать від зміни параметрів водяних розчинів, установки й електричного поля. Калорійність паливного газу оцінювалася шляхом його спалювання для нагрівання контрольного обсягу води.

Досліди показували високу продуктивність даної капілярної технології холодного випару водяних розчинів і газоутворення. Так, за 10 минут при діаметрі капілярного джгута й робочого циліндра 10 див. капілярний електросмос випаровував досить великий обсяг водотопливной емульсії (1 літр) практично без витрат електроенергії. При концентрації паливного газу від 10 до 30 % обсягу випаруваного розчину. Досвіди показують, що в кожному з капілярів з наелектризованою рідиною під дією електричного поля працює практично бестоковий електростатичний і одночасно іонний насос, які й піднімають стовп поляризованої й частково іонізованої полем у капілярі мікронного по діаметрі стовпа рідини (води) від одного потенціалу електричного поля, поданого в саму рідину й нижній кінець капіляра до протилежного електричного потенціалу, розміщеному із зазором щодо протилежного кінця цього капіляра. У результаті, такий іонно- електростатичний, насос інтенсивно розриває межмолекулярные зв'язку води, активно з тиском рухає поляризовані молекули води і їхні радикали по капілярі й потім інжектирует ці молекули разом з порваними електрически зарядженими радикалами молекул води за межі капіляра до протилежного потенціалу електричного поля. Досліди показують, що часткова дисоціація (розрив) сольватированных молекул водно-органічних розчинів тим більше, чим вище напруженість електричного поля. У всіх

цих непрості й одночасно, що протікають процесах, капілярного електроосмоса рідини використовується саме потенційна енергія електричного поля. Одночасно на виході з капілярів, газоподібні молекули води й сольватів розриваються електростатичними силами електричного поля на  $H_2$  і  $O_2$ . Оскільки цей процес фазового переходу рідини води у водний туман (газ) і дисоціації молекул води протікає в експерименті взагалі без видимої витрати енергії (тепла й тривіальної електроенергії), те, імовірно, витрачається яким те образом саме потенційна енергія електричного поля. Таким чином, високовольтний капілярний електроосмос водної рідини забезпечує за допомогою використання потенційної енергії електричного поля дійсно інтенсивне й енергически невитратний випар і розщеплення молекул води на паливний газ ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ). Незважаючи на відносну простоту технічної реалізації самої технології, все-таки реальна фізика й енергетика процесів при реалізації цього ефекту досить складна.

Оскільки при капілярному електроосмотичному “холодному” випарі й дисоціації рідин, протікає одночасно й по черзі багато різних електрохімічних, електрофізических, електромеханічних і інших процесів, особливо при русі водяного розчину по капілярі інжекції молекул із краю капіляра в напрямку електричного поля.

Фізична сутність нового ефекту й нової технології складається в перетворенні потенційної енергії електричного поля в кінетичну енергію руху молекул рідини й структур по капілярі й поза ним. При цьому в процесі випару й дисоціації рідини практично не споживається електричний струм, тому що витрачається саме потенційна енергія електричного поля. Саме електричне поле в капілярному електроосмосе запускає й підтримує виникнення й одночасне протікання в рідині в процесі перетворення її фракцій і агрегатних станів пристрої відразу багатьох корисних ефектів перетворення молекулярних структур і молекул рідини в горючий газ. А саме: високовольтний капілярний електроосмос

забезпечує одночасно потужну поляризацію молекул води і її структур з одночасним частковим розривом межмолекулярних зв'язків води в наелектризованому капілярі, дроблення поляризованих молекул води й кластерів на заряджених радикалів у самому капілярі за допомогою потенційної енергії електричного поля.

Регулювання інтенсивності утворення водного тумана (інтенсивність холодного випару) досягаються зміною параметрів електричного поля спрямованого уздовж капілярного випарника й (або) зміною відстані між зовнішньою поверхнею капілярного матеріалу й прискорювальним електродом, за допомогою якого й створюється електричне поле в капілярах.

Регулювання продуктивності одержання водню з води здійснюють зміною (регулюванням) величини й форми електричного поля, площі й діаметра капілярів, зміною состава й властивостей води. Ці умови оптимальної дисоціації рідини різні залежно від виду рідини, від властивостей капілярів, від параметрів поля. і диктуються необхідною продуктивністю процесу дисоціації конкретної рідини. Досвіди показують, що найбільш ефективного одержання  $H_2$  з води досягається при розщеплення молекул отриманого електроосмосом водного тумана здійснювати другим електричним полем, раціональні параметри якого були підібрані переважно експериментальним шляхом (рис.2). Зокрема, з'ясувалася доцільність остаточного розщеплення молекул водного тумана робити саме імпульсним знакопостійним електричним полем з вектором поля перпендикулярно вектору першого поля, використовуваного в електроосмосе води. Вплив електричних полем на рідину в процесі її перетворення в туман і далі в процесі розщеплення молекул рідини може здійснюватися одночасно або по черзі. Завдяки цьому описаному механізмам при комбінованому електроосмосе й впливі двох електричних полів на рідину (воду) у капілярі вдається досягти максимальної продуктивності процесу одержання горючого газу й практично усунути

електричні й теплові витрати енергії при одержанні цього газу з води з будь-яких водо-топливних рідин. Дана технологія в принципі застосовна для одержання паливного газу з будь-якого рідкого палива або його водних емульсій. Отриманий паливний газ залежно від концентрації в ньому воднотопливного туману й  $H_2$  мав різну теплоємність. Вона оцінювалася шляхом його спалювання й нагрівання контрольного обсягу води. Найбільше ефективно даний газ горів в електричному полі.

Розглянемо ще деякі практичні аспекти реалізації пропонованої нової революційної електротехнології технології розкладання углеводородних розчинів води, її інші можливі ефективні варіанти для розвитку базової схеми реалізації нової технології, а також деякі додаткові пояснення, технологічні рекомендації корисні при її практичній реалізації.

Деякі інші апробовані варіанти електроосмотических паливних генераторів представлені в спрощеному виді на рис.2-3. Один із простих варіантів комбінованого способу одержання горючого газу з водо-топливної суміші або води може бути реалізований у пристрої (рис.3.2)

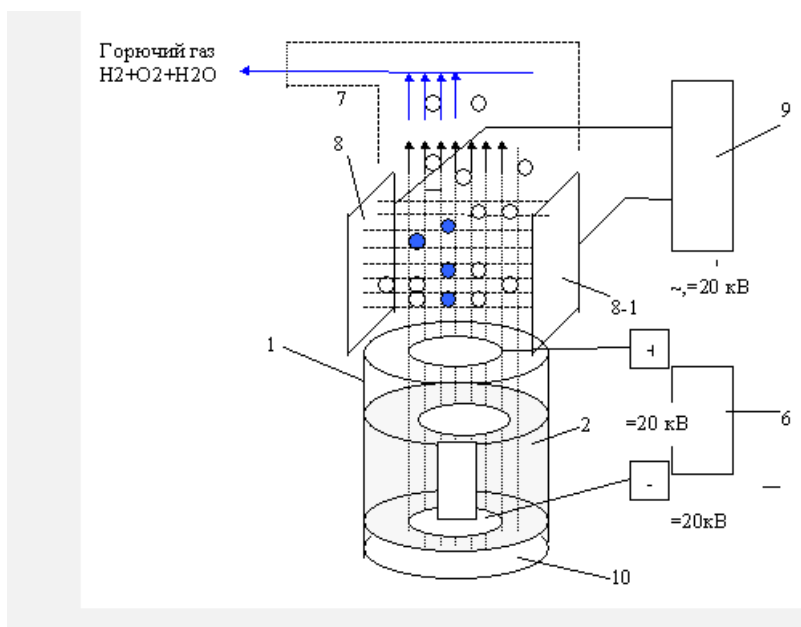


Рисунок 3.2 – Електроосмотичний генератор

Воно складається по суті з комбінації пристрою (рис.3.1) додатковим пристроєм, що містить плоскі поперечні електроди 8, 8-1, приєднані до другого джерела сильного електричного поля 9.

Паливний газифікатор постачений також термічним нагрівачем 10, розміщеним, наприклад, під днищем ємності 1. На автотранспорті це може бути випускний колектор гарячих вихлопних газів, бічні стінки корпуса самого двигуна. Блоки 3, 4, 5, 6 становлять у сукупності комбінований пристрій електроосмотичного насоса й електростатичного випарника рідини. Блок 6 дозволяє регулювати напруженість електричного поля від 1 кв/див до 30 кв/див. У пристрої (рис.3.2) передбачена також технічна можливість зміни відстані й положення пластинчастого сітчастого або пористого електрода 5 щодо випарника 4, а також відстані між плоскими електродами 8 і 8-1.

Для підвищення інтенсивності одержання паливного газу, рідину (воду) доцільно спочатку активізувати (попереднє нагрівання, попередній поділ її на кислотну й лужну фракції, електризація й поляризація та інше). Попередню електроактивацию води (і будь-якої водної емульсії) з поділом її на кислотну й лужну фракції здійснюють частковим електролізом за допомогою додаткових електродів, розміщених у спеціальній напівпроникних діафрагмах для їх наступного роздільного випару (рис.3.3).

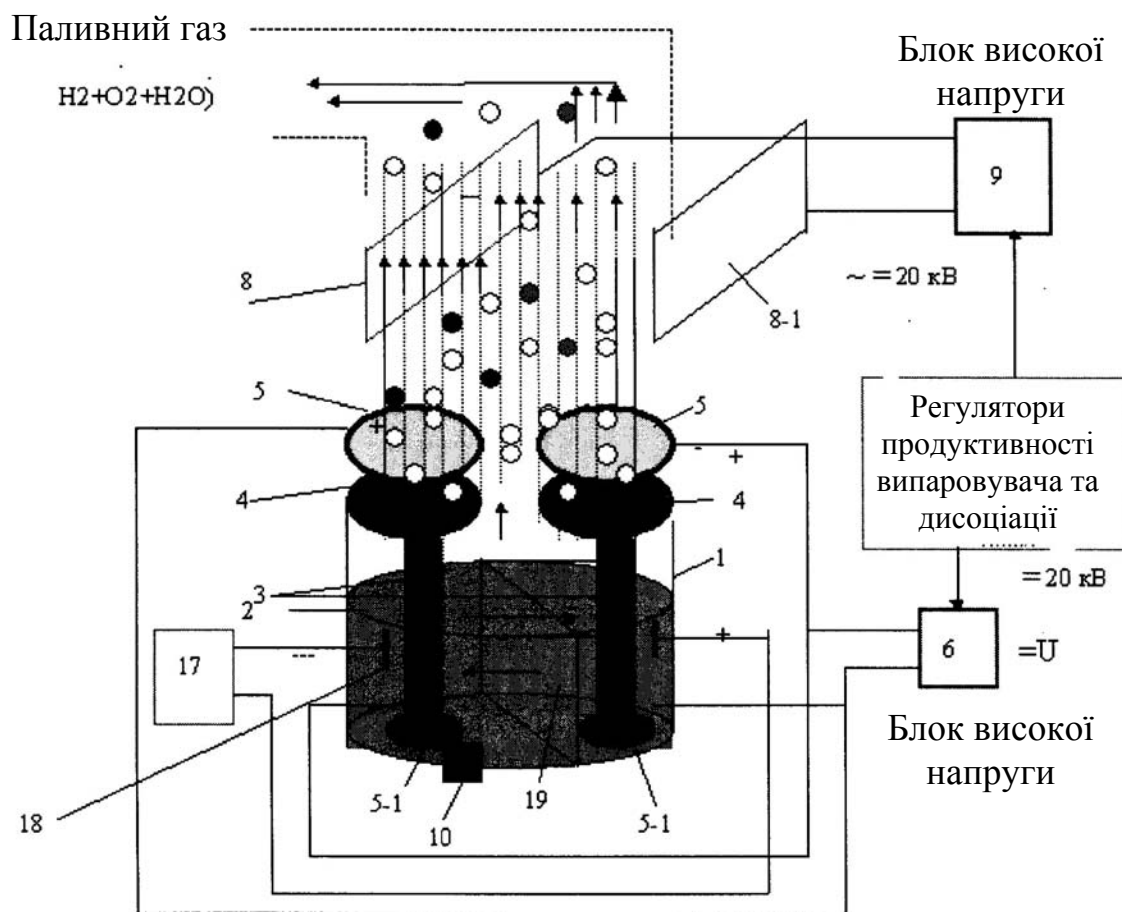


Рисунок 3.3 - Електроосмотичний генератор з напівпроникною діафрагмою

У випадку попереднього поділу исходно хімічно нейтральної води на хімічні активні (кислотної й лужну) фракції, реалізація технології одержання горючого газу з води стає можливий і при мінусових температурах (до  $-30$  град. Цельсія), що досить важливо й корисно взимку для автотранспорту. Тому що така “фракційна” електроактивованная вода взагалі не замерзає при морозах. Виходить, така установка по одержанню паливного газу й  $H_2$  з такої активованої води теж зможе працювати й при мінусових температурах навколишнього середовища й у морози. Це пристрій на відміну від пояснених вище доповнено електрохімічним активизатором рідини, двома парами електродів 5, 5-1. Пристрій (рис.3.3) містить ємність 1 з рідиною 2, наприклад, водою, два пористих капілярних гноти 3 з випарниками 4, дві пари електродів 5, 5-1. Джерело електричного поля 6, електричні потенціали якого приєднані до

електродів 5,5-1. Пристрій містить також газосборний трубопровід 7, розділовий фільтровий діафрагму-бар'єр-діафрагму 19, що розділяє ємність 1 надвоє. додатковий блок регульованого по величині знакопостоянного напруги 17, виходи якого через електроди 18 уведені в рідину 2 усередину ємності 1 по обох сторони напівпроникної діафрагми 19.

Цілком можливе використання даного способу для дисоціації й одержання паливних газів практично з будь-якої водо-органічної емульсії. Експерименти показують, що дана технологія дозволяє ефективно використати як сировина для виробітку паливного газу будь-які рідкі органічні розчини (відходи життєдіяльності людини й тварин). Такий гібридний паливний газ, отриманий з органічних відходів, менш вибухонебезпечний чим  $H_2$ .

Таким чином, дійсна паливна технологія ефективно застосовна як для газифікації водотопливних емульсій, так і для корисної газифікації рідких органічних відходів. Графіки залежності продуктивності паливного газу від параметрів процесу показані на Рисунок 3.4

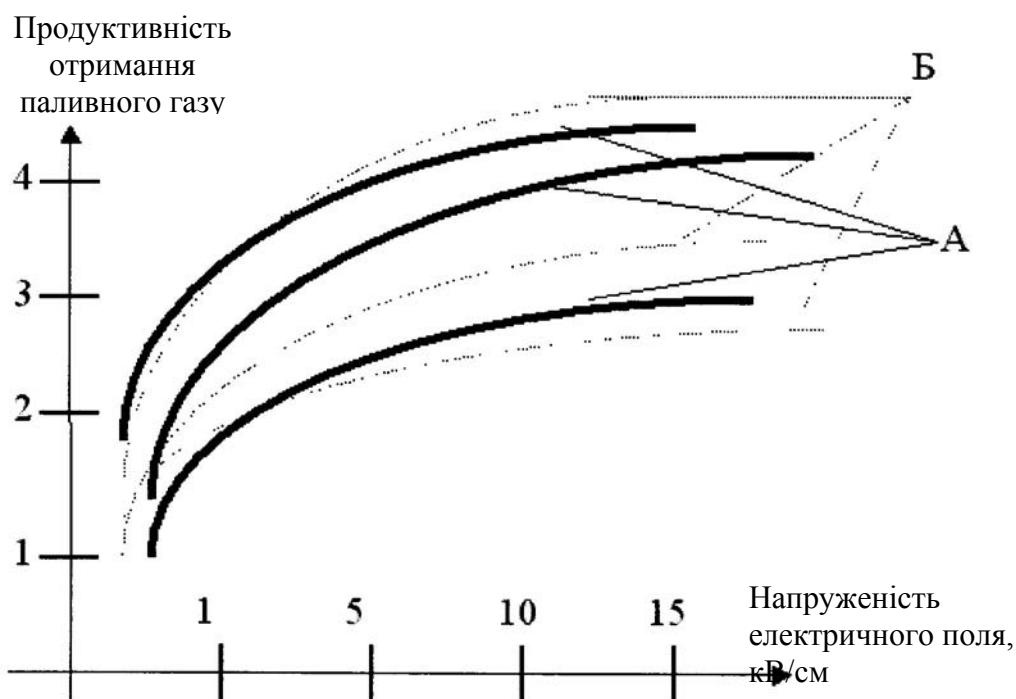


Рисунок 3.4 – Залежність продуктивності отримання паливного газу  
від напруженості електричного поля:

- А – продуктивність збільшується з ростом напруженості  
повздожнього електричного поля,  
Б – продуктивність збільшується з ростом площі випаровуючої поверхні  
електродів.

#### 4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ З ВИРОБНИЦТВА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНРЕГІЇ

Система з виробництв альтернативної енергії (рис.4.1) включає ВЕС, що виробляє електричну енергію, котра направляється для виробництва водню в елетролізер та обладнання що зберігає та розподіляє водень на потреб споживачів.

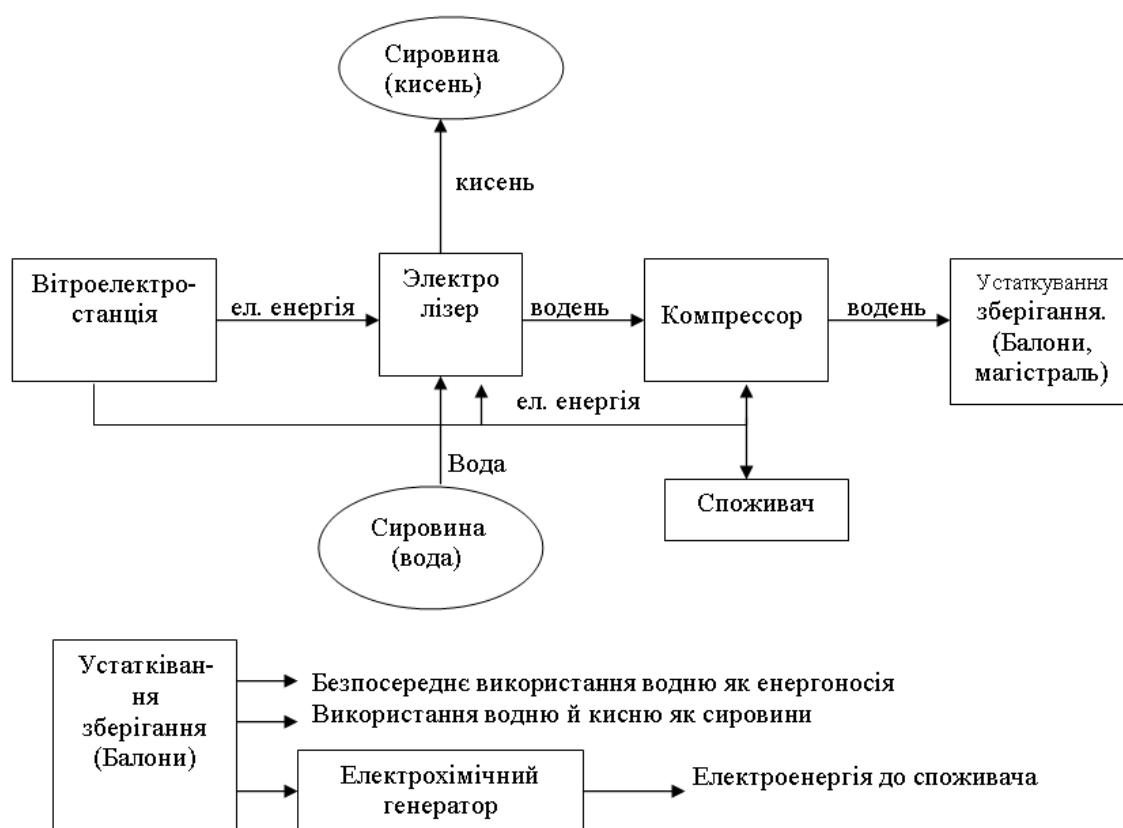


Рисунок 4.1 – Структурна схема взаємодії елементів системи від джерела енергії й сировини до споживача

## **5 РОЗРОБКА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ З ВИРОБНИЦТВА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ**

Метрологічне забезпечення й контроль якості передачі енергії системи по виробництву альтернативної енергії є одним із пріоритетних завдань при розробці, тому що кожний споживач хоче мати достовірне подання про товар або послугу, що буде йому надана, а виробник упевнений у якості й відповідності його продукту. Тому основна мета роботи розробка метрологічного забезпечення системи по виробництву альтернативної енергії, що складається з розробки засобу вимірювання потужності, розрахунку його метрологічних характеристик, і створення користувацького інтерфейсу.

Вітрогенератор є важливим елементом системи по виробництву альтернативної енергії, тому необхідно контролювати параметри його роботи. Для поліпшення метрологічного забезпечення й контролю якості передачі енергії системи по виробництву альтернативної енергії є розробка цифрового ватметра, використання пристрою збору даних USB-6008/6009, а також розробка програмного інтерфейсу в середовищі LAB VIEW.

### **5.1 Розробка структурної схеми**

Головною особливістю системи є те, що вітрогенератор перебуває на далекій відстані від споживача, тому з'являється потреба в розробці вилученого контролю, одержання й збору даних показників ВЕУ. Реалізується це за допомогою ватметра, плати збору даних (USB 6008/6009) і персонального комп'ютера. Програмний інтерфейс, за допомогою якого відбувається взаємозв'язок між людиною й комп'ютером побудований у середовищі Lab VIEW.

Структурна схема вимірювальної системи з контролю параметрів роботи системи по виробництву альтернативної енергії зображена на рисунку 5.1.

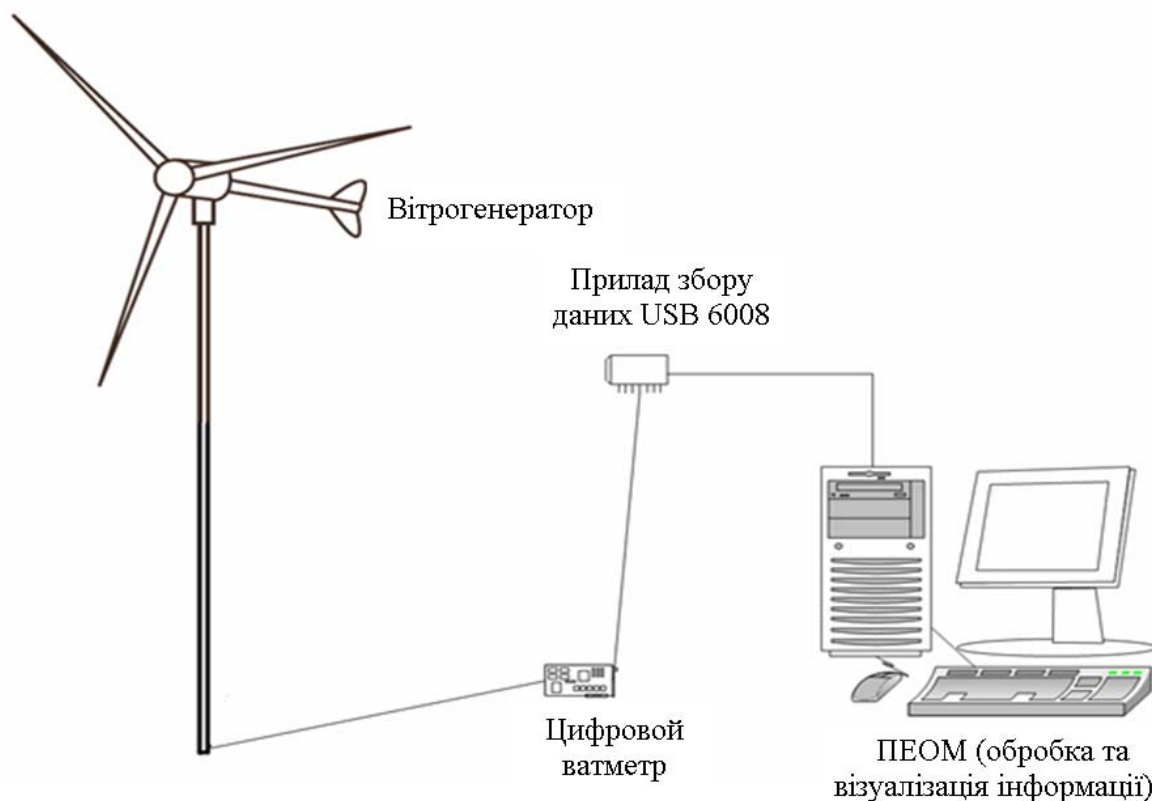


Рисунок 5.1 – Структурна схема вимірювальної системи з контролю параметрів роботи установки по виробництву альтернативної енергії

Основні її компоненти вимірювальної системи з контролю параметрів роботи установки по виробництву альтернативної енергії:

- ВЕУ;
- цифровий ваттметр;
- пристрій збору даних USB-6008/6009;
- програма Lab VIEW, у середовищі якої буде створений програмний інтерфейс, за допомогою якого відбувається взаємозв'язок між людиною й комп'ютером.

Створена структурна схема дозволяє наочно здійснювати візуалізацію роботи системи завдяки користувальницькому інтерфейсу, що

розроблений у середовищі програмування LabVIEW. Передача даних здійснюється за допомогою пристрою збору даних (ПЗД), завдяки чому оператор контролюючі параметри роботи ветрогенератора може перебуває на значній відстані від об'єкта вимірювання.

## 5.2 Розробка цифрового вимірювача потужності

Прилад призначений для вимірювання активної або реактивної потужності в однофазних ланцюгах змінного струму частотою 50 Гц і відображення на убудованому індикаторі поточного значення в заданих одиницях вимірювання. Прилад може застосовуватися в інформаційно-вимірювальних системах, а також самостійно використатися як прилад для індикації потужності. Прилад має послідовний інтерфейс RS-485. Кількість приладів, що підключаються до однієї інтерфейсної лінії зв'язку, не більше 32. По стійкості до впливу кліматичних факторів і по стійкості до механічних впливів прилади ставляться до групи 2 [3], але з розширенням температурного діапазону: від плюс 5 до плюс 50 °С и призначені для експлуатації при відносній вологості повітря від 30 до 80 % при температурі плюс 25 °С, атмосферному тиску від 84 до 106 кПа (630 - 795 мм рт. ст.).

Принцип роботи приладів у цифровому ваттметре полягає в наступному. Трансформатор струму з резистивної навантаженням ТР здійснює перетворення сигналу вхідного струму в напругу, що подається на вимірювальний пристрій (ИУ). Дільник СПРАВ здійснює перетворення сигналу вхідної напруги в напругу, що подається на ИУ.

Вимірювальний пристрій, зібраний на спеціалізованій мікросхемі, здійснює аналого-цифрове перетворення вхідних сигналів і обчислення потужності.

Пристрій керування УУ обробляє сигнал від вимірювального пристрою, видає інформацію на індикатор параметра ИНД, виконує

команди від функціональних перемичок, здійснює прийом і передачу сигналів послідовного інтерфейсу.

Вузол формування інтерфейсних сигналів УФС (для виконання з інтерфейсом) забезпечує прийом і передачу даних по інтерфейсі, а також електричне сполучення й гальванічна розв'язка сигналів пристрою керування й інтерфейсної лінії зв'язку.

Джерело стабілізованого живлення ИСП перетворить зовнішня напруга в стабілізовану напругу 5 В для живлення УФС і вторинного джерела живлення ИП. Вторинне джерело живлення застосоване для живлення внутрішніх вузлів приладу й забезпечує гальванічний поділ внутрішніх ланцюгів приладу й УФС. Структурна схема цифрового ваттметра наведена на рисунку 5.2.

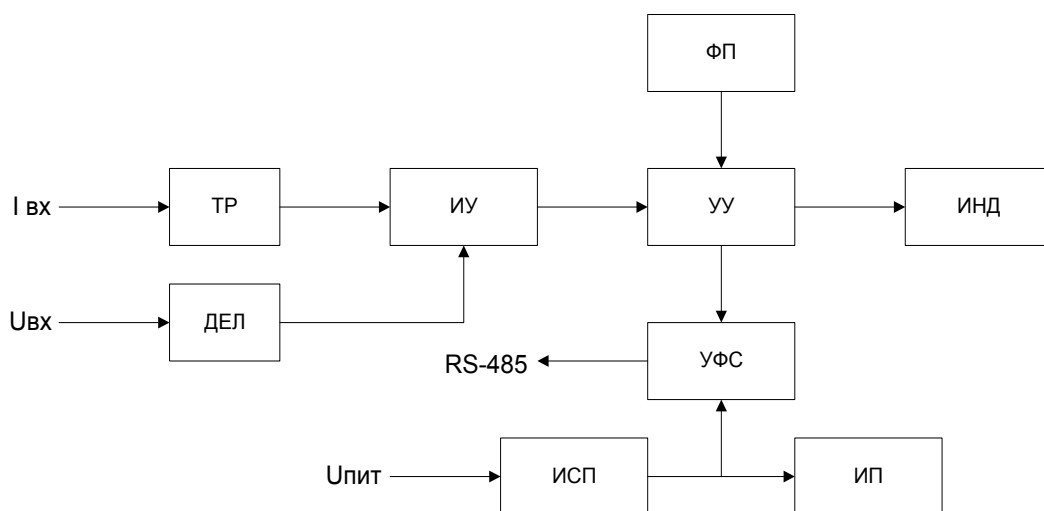


Рисунок 5.2 – Структурна схема цифрового ваттметра

ТР - струмовий трансформатор

СПРАВ - дільник напруги

ИУ - вимірювальний пристрій

УУ - пристрій керування

ИНД - індикатор параметра

УФС - вузол формування інтерфейсних сигналів

ИСП - джерело стабілізованого живлення

ИП - джерело вторинного живлення

ФП - функціональні перемички

Вузол функціональних перемичок ФП служить для завдання адреси приладу й швидкості обміну при роботі з послідовним інтерфейсом RS-485 і для калібрування приладу.

Прилади можуть мати інтерфейс RS-485 для зв'язку з комп'ютером. Лінія зв'язку являє собою кручену пару проводів, які можуть перебувати в загальному екрані. На одну лінію зв'язку може бути підключене до 32 приладів. Кожний прилад має свою мережну адресу, що задається перемикачами. Прилади приєднуються до лінії зв'язку паралельно. Зв'язок з комп'ютером може здійснюватися або через спеціальну плату, установлену у вільний слот системної шини комп'ютера, або через послідовний порт RS-232 із застосуванням додаткового пристрою - перетворювача рівнів напруги сигналів послідовного порту RS-232 у рівні напруги сигналів інтерфейсу RS-485.

Обмін даними відбувається з ініціативи комп'ютера, що посилає адресний запит на прилад, з яким передбачається встановити зв'язок. Одержавши запит, прилад порівнює запитувану адресу зі своєю адресою й при їхньому збігу видає відповідь.

Узгоджуючий резистор, номіналом 120 Ом, установлений у приладі, підключається на кінці лінії зв'язку за допомогою перемички між контактами «В» і «R».

Адрес приладу й швидкість обміну даними по інтерфейсному каналі встановлюються перемикачами SA1.1 - SA1.6, розташованими на задній панелі приладу (рисунок 5.3). Крайній перемикач ліворуч (побачивши приладу - позаду) установлює швидкість обміну, а інші перемикачі - адреса приладу у двійковому коді. Крайній перемикач праворуч - молодший розряд.

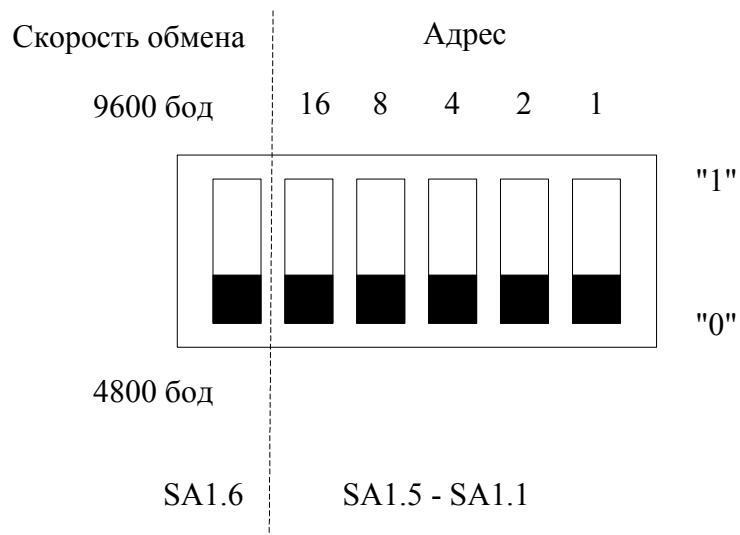


Рисунок 5.3 - Перемикачі установки адреси й швидкості обміну інтерфейсу RS- 485

Технічні характеристики. Клас точності - 0,5. Номінальні напруги й струми з номінальною частотою ( $50 \pm 0,5$ ) Гц, робоча область значень вхідних напруг, спосіб включення в електричне коло наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Номінальні напруги й струми, значень вхідних напруг, спосіб включення в електричне коло

| Номінальна напруга, В | Робоча область значень вхідних напруг, В | Номінальний струм, А | Спосіб включення                      |
|-----------------------|------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 127                   | від 0 до 153                             | 1; 5                 | Безпосередній                         |
| 220                   | від 0 до 265                             | 1; 5                 | Через трансформатор струму            |
| 380                   | від 0 до 456                             |                      |                                       |
| 100                   | від 0 до 120                             | 1; 5                 | Через трансформатори струму й напруги |

Номінальне вихідне значення вимірюваної потужності ( $Q_{\text{ном. вих}}$ ) розраховується по формулі:

$$Q_{\text{ном. вих}} = U_{\text{ном. вх}} \cdot I_{\text{ном. вх}} \cdot K_U \cdot K_I \cdot K, \quad (5.1)$$

де  $U_{\text{ном. вх}}$  – номінальне значення вхідної напруги;  $I_{\text{ном. вх}}$  – номінальне значення вхідного струму;  $K_U$  – коефіцієнт трансформації по напрузі (дорівнює 1 при безпосереднім підключенні);  $K_I$  – коефіцієнт трансформації по струму (дорівнює 1 при безпосереднім підключенні),  $K$  – номінальний коефіцієнт потужності, дорівнює 1.

Номінальний коефіцієнт потужності:

- для ваттметра  $\cos\varphi = 1$ ,
- для варметра  $\sin\varphi = 1$ .

Робоча область коефіцієнта потужності відповідає куту зрушення фаз від 0 до плюс 90°.

Межі основної похибки, що допускається, у нормальних умовах застосування рівні  $\pm 0,5 \%$ . Межа основної похибки, що допускається, виражений у вигляді наведеної похибки. Значенням, що нормує, є номінальне вихідне значення вимірюваної потужності.

Похибка приладів нормується без обліку похибок трансформаторів напруги й токи.

Розв'язна здатність дорівнює 0,05 % від номінального вихідного значення вимірюваної потужності. Робочий діапазон частоти вхідних сигналів по напрузі від 45 до 65 Гц.

Потужність, споживана приладами від вимірювального ланцюга при номінальних значеннях вхідних сигналів, не більше:

- а) 0,5 У.А - для послідовного ланцюга;
- б) 0,25 У.А - для паралельного ланцюга.

Вхідний опір приладів:

а) не більше 0,02 Ом - для послідовного ланцюга;

б) не менш 500 кому - для паралельного ланцюга.

Час установлення робочого режиму приладів не більше 30 хв.

Час перетворення приладів не більше 1,5 с.

Живлення приладів здійснюється від однофазної мережі змінного струму з напругою  $(220 \pm 22)$  В, частотою  $(50 \pm 1)$  Гц і змістом гармонік до 5 %.

Потужність споживання приладом від мережі не перевищує 10 У·А.

Межа значення, що допускається, додаткової похибки, викликаной зміною напруги живлення в межах, не перевищує межі значення, що допускається, основної похибки.

Межа значення, що допускається, додаткової похибки, викликаной зміною температури навколишнього повітря в межах діапазону робочих температур, не перевищує половини межі значення, що допускається, основної похибки на кожні 10 (Зі зміни температури).

Підрів значення додаткової похибки, що допускається, викликаним впливом підвищеної вологості в робочих умовах застосування при нормальному значенні температури, не перевищує межі значення, що допускається, основної похибки.

Межа значення, що допускається, додаткової похибки, викликаной впливом зовнішнього однорідного магнітного поля з індукцією 0, 5 мТл, що изменяющегося змінюється в часі, із частотою мережі живлення, дорівнює половині межі значення, що допускається, основної похибки.

Межа значення, що допускається, додаткової похибки, викликаной відхиленням частоти вхідної напруги від номінального значення в межах робочого діапазону, не перевищує межі значення, що допускається, основної похибки.

Межа значення, що допускається, додаткової похибки, викликаной зміною сумарного коефіцієнта нелінійних перекручувань вхідних сигналів

від 1 до 15 %, не перевищує межі значення, що допускається, основної похибки.

Придів значення додаткової похибки, що допускається, викликану зміною напруги вхідного сигналу на (10 % від номінального, не перевищує 0, 5 межі значення, що допускається, основної похибки.

Межа значення, що допускається, додаткової похибки, викликану зміною коефіцієнта потужності при куті зрушення фаз від 0 до плюс 90<sup>0</sup>С, не перевищує межі значення, що допускається, основної похибки.

Відхилення результату вимірювання від нуля, при номінальній напрузі в паралельному ланцюзі й відсутності струму в послідовному ланцюзі, не перевищує межі значення, що допускається, основної похибки.

При використанні інтерфейсу RS- 485 у приладах встановлюється унікальна адреса приладу від 0 до 31. Адреса (A) приладу встановлюється перемикачами SA1.1- SA1.5, розташованими на задній панелі приладу під кришкою (рисунок 5.3), відповідно до формули:

$$A = K_1 + 2K_2 + 4K_3 + 8K_4 + 16K_5, \quad (5.2)$$

де  $K_i = 0$  при нижнім положенні перемикача SA1.1,

$K_i = 1$  при верхнім положенні перемикача SA1.1.

При використанні інтерфейсу RS- 485 у приладах встановлюється швидкість обміну даними. Швидкість обміну по інтерфейсі RS- 485 відповідає таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Швидкість обміну по інтерфейсі RS- 485

| Положення перемикача SA1.6 | Швидкість обміну,<br>бод | Примітка                                      |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| Нижнє                      | 4800                     | Відлік перемикачів<br>робити праворуч ліворуч |
| Верхнє                     | 9600                     |                                               |

Позитивне амплітудне значення вихідного сигналу інтерфейсу має значення  $(2(0,5) \text{ В})$ , негативне амплітудне значення вихідного сигналу має значення мінус  $(2(0,5) \text{ В})$ .

Послідовні й паралельні ланцюги приладів протягом 2 ч витримують перевантаження відповідно струмом і напругою, рівним 120 % номінального значення.

Прилади витримують короточасні перевантаження вхідним струмом і напругою:

а) десять перевантажень струмом, що перевищує у два рази номінальне значення вхідного струму, тривалістю 10 секунд, з інтервалами 10 секунд;

б) п'ять перевантажень струмом, що перевищує в 10 разів номінальне значення вхідного струму, тривалістю 3 секунди, з інтервалами 2,5 секунди;

в) десять перевантажень напругою, що перевищує в 1,5 рази номінальне значення вхідної напруги, тривалістю 10 секунд, з інтервалами 10 секунд.

Ізоляція між корпусом і ізольованими від корпуса електричними колами витримує при нормальних умовах протягом 1 хв дія іспитової напруги практично синусоїдальної форми частотою від 45 до 65 Гц із діючим значенням 2 кв.

Ізоляція між ланцюгами живлення, послідовними й паралельними вхідними ланцюгами, інтерфейсним виходом витримує при нормальних умовах протягом 1 хв дія іспитової напруги практично синусоїдальної форми частотою від 45 до 65 Гц із діючим значенням:

1,5 кВ - для номінальних напруг 100, 127, 220 В;

2 кВ - для номінальної напруги 380 В.

Електричний опір ізоляції між корпусом і ізольованими від корпуса електричними колами в нормальних умовах не менш 20 МОм.

Прилади в транспортній тарі витримують вплив температури навколишнього повітря від мінус 50 до плюс 50 °С і відносної вологості повітря не більше 95 % при температурі 35 °С.

Прилади в транспортній тарі витримують протягом 1 ч прискорення  $30 \text{ м/с}^2$ , частотою від 80 до 120 ударів у мінуту.

Габаритные розміри приладів не більше  $48 \times 96 \times 144 \text{ мм}$ .

Маса приладів не більше 0,5 кг.

Прилади ставляться до відновлюваних, ремонтуємим виробам.

Середній час відновлення працездатного стану - 3 ч.

Середній наробіток на відмову приладів не менш 32000 ч у нормальних умовах застосування. Термін служби - не менш 10 років.

Конструктивно прилади виконані в корпусі для щитового монтажу. Загальний вид, габаритні й настановні розміри, розташування органів керування й індикації наведені на рисунку 5.4

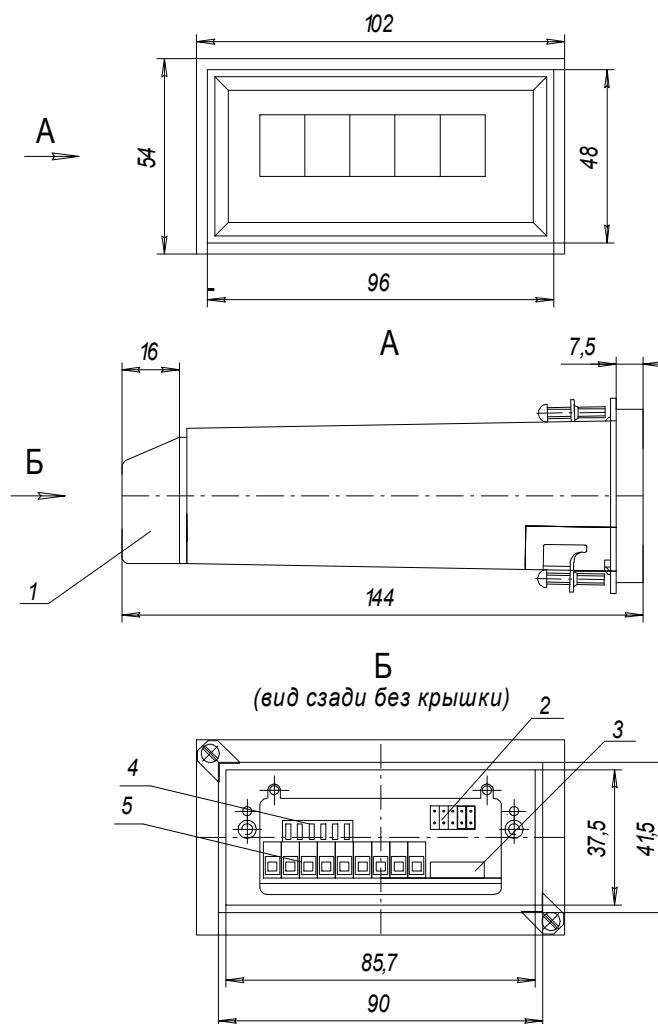


Рисунок 5.4 - Конструкція приладів

1 - Задня кришка; 2 - Функціональні перемички;

3 - Запобіжник на 0,25 А;

4 – Перемикачі установки адреси й швидкості обміну інтерфейсу RS- 485

5 - Клемні колодки

Прилади для установки на щиті мають комплект монтажних частин: два кронштейни, два гвинти й рамка, які фіксує прилад із внутрішньої сторони щита. Розміри вирізу в щиті 90(42 мм (припустиме відхилення - не більше плюс 0,6 мм).

Усе компоненти розташовані на трьох друкованих платах, що конструктивно представляють собою єдиний блок.

Плата індикації з'єднується з основною платою за допомогою 40-контактного рознімання. Плата, на якій розміщені функціональні

перемички, перемикач установки адреси й швидкості обміну інтерфейсу RS-485, кріпиться гвинтами до основної плати за допомогою спеціальних стійок.

Блок із трьох плат вставляється з боку передньої панелі в пластмасовий кожух по напрямних і кріпиться з боку задньої панелі двома гвинтами до стійок. До цих же стійок двома гвинтами кріпиться захисна кришка.

На плату індикації накладається кольорове скло, що фіксується прямокутною рамкою за допомогою чотирьох засувки, розташованих на кожній зі сторін рамки.

На передній панелі приладу розташовується (рис. 5.4) п'ятиразрядний семисегментний індикатор (далі - індикатор параметра), що призначений для відображення значень вимірюваної потужності.

На задній панелі приладу під кришкою, що служить для захисту елементів, що перебувають під нею, розташовані клемні колодки для зовнішніх з'єднань, запобіжник на 2 А, перемикач установки адреси й швидкості обміну інтерфейсу RS-485 (при наявності інтерфейсу), а також функціональні перемички для калібрування приладу.

Внешние з'єднання приладу показані на рисунку 5.5. До клем 1 і 2 підключається лінія вимірюваного змінного струму. До клем 3 і 4 підключається лінія вимірюваної змінної напруги. До клем 5 і 6 підключаються відповідно лінія А и лінія В інтерфейсу RS-485. Клеми 8 (Упит1), 9 (Упит2) служать для підключення живлення.

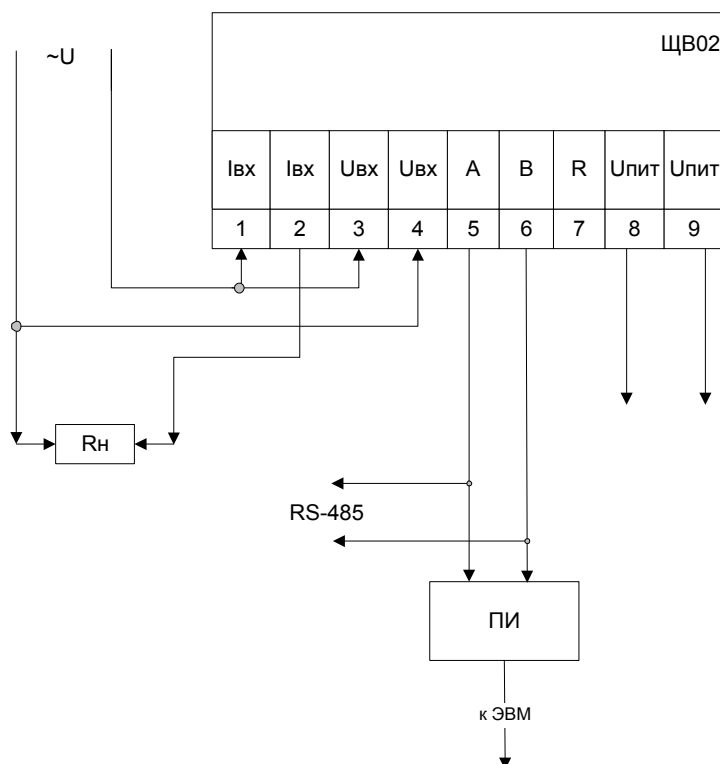


Рисунок 5.5 - Схема зовнішніх з'єднань приладів

### 5.3 Розробка віртуальних приладів

Самі високопродуктивні універсальні або спеціалізовані комп'ютери виявляються абсолютно безпомічними при рішенні завдань експериментального дослідження навколишнього середовища або керування реальними об'єктами, якщо їх не постачити достовірною інформацією про фізичні параметри середовища або не забезпечити засобами формування фізичних впливів на об'єкти. Необхідні автоматизовані пристрої вимірювання й генерації різних фізичних величин, що виконують із необхідною швидкістю й точністю перетворення цих величин у цифровий код і навпаки - цифровий код у значення фізичних величин. Подібні пристрої нерідко називають пристроями зв'язку з об'єктом (УСО), і тільки з їхньою допомогою можна, одержавши закодовані значення параметрів навколишнього середовища, організувати обробку даних по всіляких алгоритмах, подання в різних формах експериментаторові, реєстрацію, генерацію сигналів керування об'єктами

для досягнення заданої мети. Пристрою зв'язку з об'єктом разом з обчислювальними, візуалізуючими й пристроями, що реєструють, утворюють інформаційно-вимірювальні системи (ИИС) або системи автономного керування (САУ) [8].

При цьому до складу будь-якого УСО ИСС входять перетворювачі фізичних величин в електричні (датчики), різні проміжні перетворювачі електричних сигналів, аналого-цифрові й цифроаналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП), а також інтерфейсні блоки, призначені для обміну даними між обчислювальним пристроєм і УСО. Системи керування містять у собі все компоненти ИСС і, додатково, виконавчі пристрої. Як правило, в одній системі використовуються один обчислювальний пристрій (комп'ютер) і одне або трохи УСО, що забезпечують за допомогою відповідних датчиків і перетворювачів електричних сигналів сприйняття або генерацію великої кількості фізичних величин - від одиниць до сотень і навіть тисяч. Із цієї причини УСО найчастіше виконуються у вигляді уніфікованих модулів, кожний з яких обслуговує від 4-8 до декількох десятків каналів зв'язку з об'єктом, а з метою спрощення організації взаємодії з комп'ютером - сумісними з останнім на конструктивному, електричному й інформаційному рівнях. Інакше кажучи, модуль УСО виготовляє у відповідності зі стандартами, прийнятими в обчислювальній і/або вимірювальній техніці, і тому він без проблем може бути інтегрований з комп'ютером шляхом установки в слот системної шини або підключення до якого-небудь стандартного периферійного порту.

Характеристика пристрою збору даних (ПЗД) USB-6008/6009. ПЗД NI USB-6008/6009 приєднується до комп'ютера за допомогою інтерфейсу full-speed USB і містить вісім каналів введення аналогових сигналів (AI), два канали генерації аналогових сигналів (AO), 12 каналів цифрового введення/висновку (DIO) і 32-розрядний лічильник.

Програмна підтримка USB-6008/6009 у середовищі Windows 2000/XP здійснюється за допомогою драйвера NI-DAQmx.

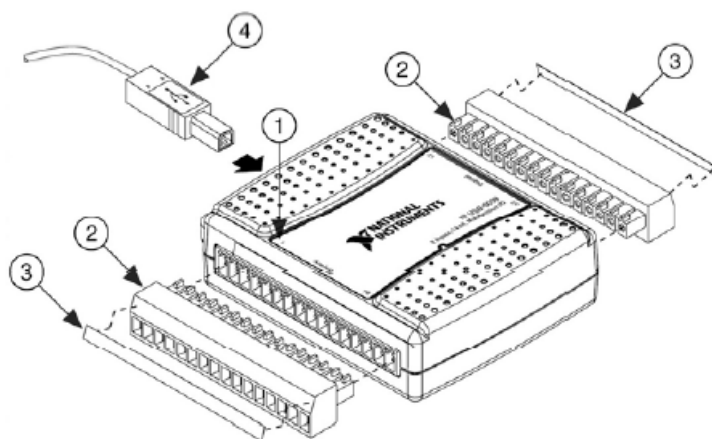


Рисунок 5.5 - Загальний вид ПЗД USB-6008/6009

1 -номера контактів. 2 - Рознімання для блоків клем.

3 - Наклейки, що ідентифікують сигнали, які не обходжений приєднати до відповідних терміналів. 4 - Кабель USB.

Таблиця 5.3 - Розходження характеристик USB-6008 і USB-6009

| Характеристика                                                 | USB-6008                                                                            | USB-6009                                                                            |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Дозвіл при аналоговому введенні                                | 12 біт (диференціальне підключення)<br>11 біт (підключення з загальним проведенням) | 14 біт (диференціальне підключення)<br>13 біт (підключення з загальним проведенням) |
| Максимальна частота дискретизації, один канал*                 | 10 кГц                                                                              | 48 кГц                                                                              |
| Максимальна частота дискретизації, декілька каналів (Сумарна)* | 10 кГц                                                                              | 42 кГц                                                                              |
| Конфігурація цифрового введення/виводу                         | Відкритий колектор                                                                  | Відкритий колектор або активне керування                                            |
| * Може залежати від конфігурації системи                       |                                                                                     |                                                                                     |

Програмна підтримка USB-6008/6009 у середовищі Windows 2000/XP здійснюється за допомогою драйвера NI-DAQmx. Компакт-диск NI-DAQmx містить утиліту VI Logger Lite, що є легенею у використанні інтерактивним інструментом, спеціально спроектованим для створення додатків реєстрації даних.

На наступній блок-схемі наведені ключові компоненти плат USB-6008/6009.

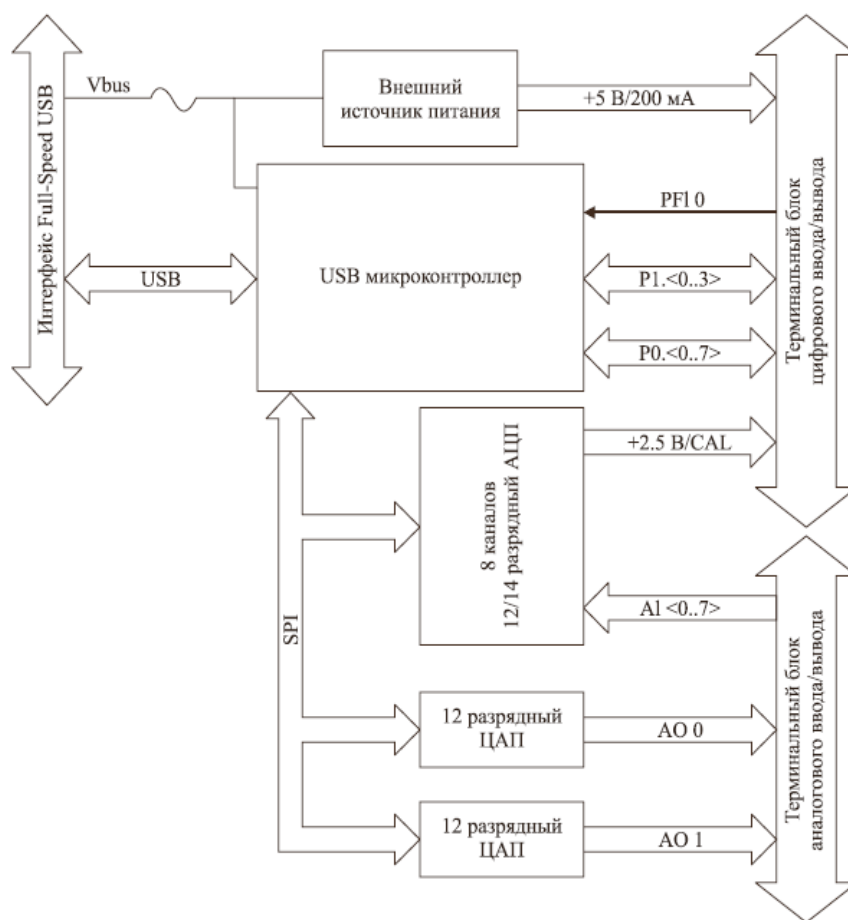
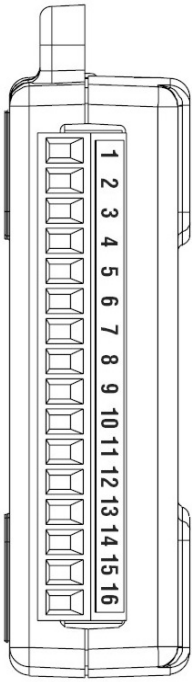


Рисунок 5.6 - Блок-схема пристрою

Комплект поставки USB-6008/6009 включає по одному знімному термінальному блоці для цифрових і аналогових сигналів. У таблицях 5.4 і 5.5 наведені позначення терміналів уведення/висновку аналогових і цифрових сигналів.

Таблиця 5.4 - Позначення терміналів уведення/висновку аналогових сигналів

| Модуль                                                                             | Термінал | Схема підключення із загальним проведенням | Диференціальна схема підключення |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------|----------------------------------|
|  | 1        | GND                                        | GND                              |
|                                                                                    | 2        | AI 0                                       | AI 0+                            |
|                                                                                    | 3        | AI 4                                       | AI 0-                            |
|                                                                                    | 4        | GND                                        | GND                              |
|                                                                                    | 5        | AI 1                                       | AI 1+                            |
|                                                                                    | 6        | AI 5                                       | AI 1-                            |
|                                                                                    | 7        | GND                                        | GND                              |
|                                                                                    | 8        | AI 2                                       | AI 2+                            |
|                                                                                    | 9        | AI 6                                       | AI 2-                            |
|                                                                                    | 10       | GND                                        | GND                              |
|                                                                                    | 11       | AI 3                                       | AI 3+                            |
|                                                                                    | 12       | AI 7                                       | AI 3-                            |
|                                                                                    | 13       | GND                                        | GND                              |
|                                                                                    | 14       | AO 0                                       | AO 0                             |
|                                                                                    | 15       | AO 1                                       | AO 1                             |
|                                                                                    | 16       | GND                                        | GND                              |

Таблиця 5.5 - Позначення терміналів уведення/висновку цифрових сигналів

| Модуль | Термінал | Сигнал |
|--------|----------|--------|
|        | 17       | P0.0   |



|  |    |        |
|--|----|--------|
|  | 18 | P0.1   |
|  | 19 | P0.2   |
|  | 20 | P0.3   |
|  | 21 | P0.4   |
|  | 22 | P0.5   |
|  | 23 | P0.6   |
|  | 24 | P0.7   |
|  | 25 | P1.0   |
|  | 26 | P1.1   |
|  | 27 | P1.2   |
|  | 28 | P1.3   |
|  | 29 | PFI 0  |
|  | 30 | +2.5 V |
|  | 31 | +5 V   |
|  | 32 | GND    |

У таблиці 5.6 описані сигнали, які можна підключати до терміналів введення/висновку.

Таблиця 5.6 - Опис сигналів

| Найменування сигналу | Джерело опорної напруги | Напрямок передачі | Опис                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GND                  | —                       | —                 | Ground – точка підключення опорної напруги при аналоговому введенні в схемі із загальним проведенням, крапка витікання струму зсуву при диференціальному введенні сигналу, при генерації аналогових сигналів, при |

|                        |        |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------|--------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        |        |               | цифровому уведенні/висновку, для забезпечення харчування постійною напругою +5 У, для забезпечення постійною опорною напругою +2.5 В                                                                                                                                                                                                                     |
| AI <0..7>              | Різний | Уведення      | Канали уведення аналогових сигналів 0 – 7. Служать для вимірів напруги в схемі із загальним проведенням; кожна лінія призначена для уведення одного сигналу. У диференціальній схемі AI 0 і AI 4 є позитивною й негативною лініями каналу 0. Наступні пари ліній також утворюють диференціальні входні канали: <AI 1, AI 5>, <AI 2, AI 6> і <AI 3, AI 7> |
| AO 0                   | GND    | Висновок      | Канал висновку аналогового сигналу – генерація напруги в нульовому каналі                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| AO 1                   | GND    | Висновок      | Канал висновку аналогового сигналу – генерація напруги в першому каналі                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| P1.<0..3><br>P0.<0..7> | GND    | Двунаправлені | Уведення/висновок цифрових сигналів – кожен з каналів можна індивідуально набудувати на уведення або висновок                                                                                                                                                                                                                                            |
| +2.5 В                 | GND    | Висновок      | Джерело опорної напруги                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

|       |     |          |                                                                     |
|-------|-----|----------|---------------------------------------------------------------------|
| +5 V  | GND | Висновок | Джерело постійної напруги +5 V і максимальним струмом 200 ма        |
| PFI 0 | GND | Уведення | Залежно від налаштування, введення цифрового тригера або лічильника |

Аналогові сигнали подаються на вхід USB-6008/6009 через сполучну панель. Схема підключення описується в таблиці 5.6.

На рисунок 5.6 наведена принципова схема аналогового введення плат USB-6008/6009.

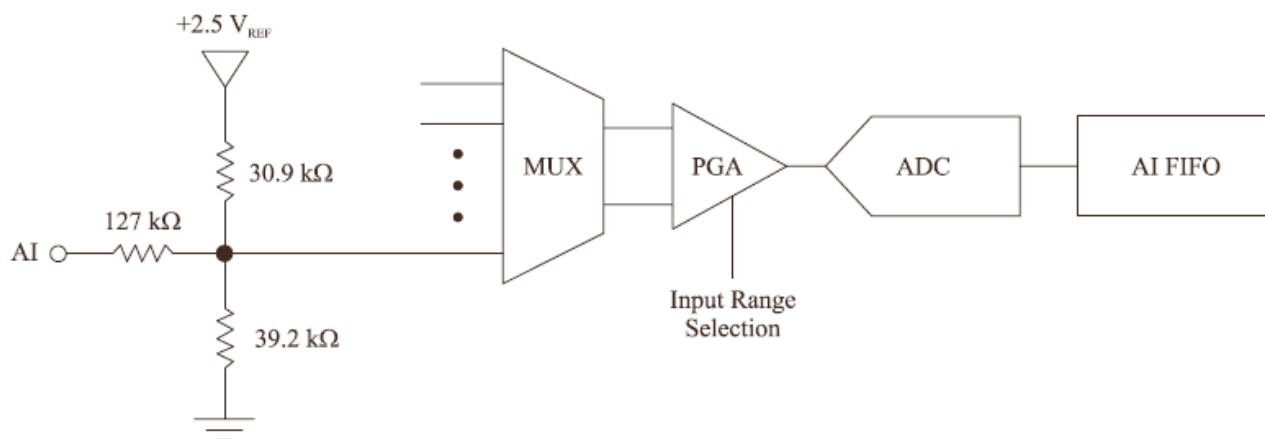


Рисунок 5.6 - Принципова схема блоку аналогового введення

Пристрій збору даних USB 6008/6009 містить один аналогоцифровий перетворювач (АЦП - ADC). Мультиплексор здійснює послідовне підключення кожного з каналів аналогового введення до підсилювача із програмувальним коефіцієнтом підсилення. Підсилювач із програмувальним коефіцієнтом підсилення (PGA - programmable-gain amplifier) забезпечує посилення вхідного сигналу в 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16 або 20 разів у диференціальній схемі підключення, і 1 у схемі із загальним проведнням. Посилення обчислюється автоматично на підставі діапазону вхідних напруг, програмувального в додатку. Аналогоцифровий

перетворювач (ADC) виконує дискретизацію аналогового сигналу, тобто переводить його в цифровий код.

Пристрій USB-6008/6009 може виконувати як однократне, так і багаторазове аналогоцифрове перетворення великої кількості вибірок. FIFO буфер служить для зберігання одержуваних даних щоб уникнути їхньої втрати під час операції аналогового уведення.

Після створення задачі аналогового уведення, ви можете сконфігурирувати PFI 0 як вхід цифрового тригера. Якщо тригер буде настроєний, то задача буде чекати наростаючого фронту на контакті PFI 0 для запуску збору даних. Для настроювання тригера необхідно вказати PFI 0 як джерело ai/Start Trigger і потім вибрати наростаючий фронт (rising edge).

Пристрій USB-6008/6009 містить два незалежних канали для генерації аналогових сигналів у діапазоні 0-5 В. Синхронізація ліній генерації здійснюється програмно. На рис. 5.7 демонструється принципова схема блоку генерації аналогових сигналів ПЗД USB-6008/6009.

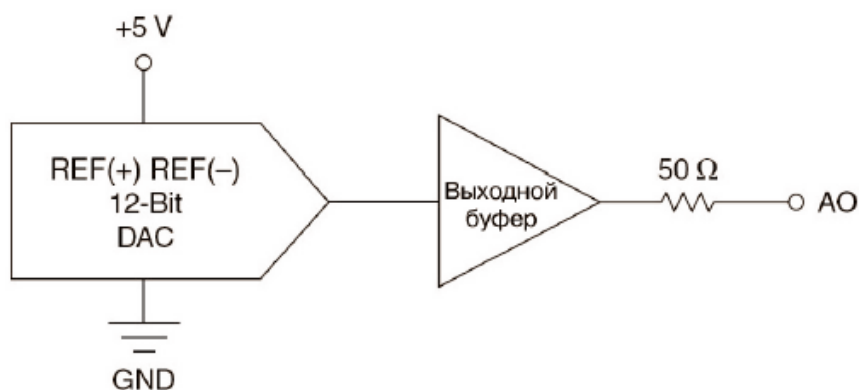


Рисунок 5.7 - Принципова схема блоку генерації аналогових сигналів

Цифроаналоговые перетворювачі (ЦАП - DAC) конвертують цифрові коди в аналогові сигнали.

ПЗД USB-6008/6009 містить 12 цифрових ліній, P0.<0..7> і P1.<0..3>, які формують цифровий (DIO) порт. GND - контакт лінії заземлення для цифрового порту. Кожну з ліній можна незалежно настроїти на генерацію або прийом.

Обґрунтування вибору програмного забезпечення для розробки користувальницького інтерфейсу Розробка користувальницького інтерфейсу.

Програмне забезпечення (ПЗ) - сукупність програм, що забезпечує рішення системи, керування її роботою й створення прикладних програмних засобів.

Сучасні засоби розробки прикладного ПЗ надають широкий вибір інструментів, ці засоби дозволяють створювати користувальницькі програми безпосередньо на стандартних мовах програмування, а також за допомогою спеціальних бібліотек, що є основою ряду інструментальних програмних засобів. Для створення користувальницького інтерфейсу було обране середовище програмування LabVIEW.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench - середовище розробки лабораторних віртуальних приладів) є середовищем програмування, за допомогою якої можна створювати додатка.

Потужна графічна мова програмування LabVIEW, іменований G (від graphical – графический), дозволяє в сотні разів збільшити продуктивність праці. Створення закінченого додатка за допомогою звичайних мов програмування може відняти дуже багато часу – тижня або місяці, тоді як з LabVIEW потрібно лише кілька годин, оскільки пакет спеціально розроблений для програмування різних вимірювань, аналізу даних і оформлення результатів. Тому що LabVIEW має гнучкий графічний інтерфейс і простий для програмування, він також відмінно підходить для моделювання процесів, презентації ідей, створення додатків загального характеру й просто для навчання сучасному програмуванню [9].

LabVIEW дозволяє розробляти прикладне програмне забезпечення для організації взаємодії з вимірювальною й керуючою апаратурою, збору, обробки й відображення інформації й результатів розрахунків, а також моделювання як окремих об'єктів, так і автоматизованих систем у цілому [10].

Безсумнівним достоїнством LabVIEW є те, що розроблювачеві й користувачеві доступні функціонально ідентичні системи програмування для різних операційних систем, таких як Microsoft Windows 95/98/NT/2000/XP, Linux, MacOS.

LabVIEW є ідеальним програмним засобом для створення систем вимірювання, а також систем автоматизації керування на основі технології віртуальних приладів (ВП). LabVIEW-програма в комплексі з такими апаратними засобами, вбудовуються як у комп'ютер многоканальні вимірювальні аналого-цифрові плати, плати захвата й синхронізації відеозображення для систем машинного зору, плати керування рухом і виконавчі механізми, а також вимірювальні прилади, що підключаються до комп'ютера через стандартні інтерфейси RS-232, RS-485, USB, GPIB (KIP), PXI, VXI, дозволяє розробляти системи вимірювання, контролю, діагностики й керування практично будь-якої складності [11].

LabVIEW має власну потужну математичну підтримку. Крім того, LabVIEW може інтегрувати в себе програми, написані в середовищі MatLab. Велика кількість убудованих алгоритмів цифрової обробки одновимірних і двовимірних сигналів дозволяє здійснювати досить складну обробку сигналу, зображення й експериментальних даних у тимчасовій, просторовій і спектральній областях. Програмне середовище LabVIEW постійно розширюється новими засобами обробки сигналів на основі вейвлет-аналіза, алгоритмів нечіткої логіки, мережних технологій і т.д.

Традиційно для дослідника функції моделювання й експериментування розділені. Моделювання здійснюється в середовищі математичних програмних пакетів, а експерименти підтримуються іншими

програмними засобами, що аж ніяк не підвищує ефективність досліджень. Ефективність використання середовища LabVIEW у наукових дослідженнях полягає в тому, що, залишаючись у її рамках, можна розробляти як математичну модель об'єкта, так і постачати цю модель експериментальними даними за допомогою апаратних засобів вводу-виводу, сполучених з реальним об'єктом [11].

При установці відповідних додаткових модулів можна використати LabVIEW як середовище розробки програм для різних цільових систем і операційних систем (ОС) [10]:

- системи на базі ОС реального часу (ОСВР) LabVIEW-RT;
- кишенькові комп'ютери й інші пристрої на базі ОС WindowsCE/PocketPC;
- кишенькові комп'ютери й інші пристрої на базі ОС PalmOS;
- багатофункціональні програмувальні пристрої, наприклад FPGA;
- сигнальні процесори (DSP).

В основі технології використання LabVIEW лежить комбіноване моделювання систем на ЕОМ, що включає аналітичне, імітаційне й натурне.

Для аналітичного моделювання характерно те, що алгоритм функціонування системи записується у вигляді деяких аналітичних співвідношень або логічних умов.

При імітаційному моделюванні алгоритм функціонування системи відтворюється в часі зі збереженням логічної структури й послідовності протікання елементарних явищ, що становлять процес. У цей час імітаційне моделювання - найбільш ефективний метод дослідження систем, а часто і єдиний практично доступний метод одержання інформації про поведінку системи, особливо на етапі її проектування.

Натурним моделюванням називають проведення дослідження на реальному об'єкті з можливістю втручання людини в процес проведення

експерименту й наступної обробки результатів експерименту на обчислювальній техніці.

Відмінність модельного експерименту від реального полягає в тім, що в модельному експерименті можуть бути реалізовані будь-які ситуації, у тому числі "неможливі" і аварійні, що в силу різних причин буває неприпустимо при роботі з реальними об'єктами. Всі представлені види моделювання можуть бути реалізовані з використанням системи програмування LabVIEW [10].

Система LabVIEW містить у собі:

- ядро, що забезпечує працездатність програмних процесів, поділ апаратних ресурсів між процесами;
- компілятор графічної мови програмування "G";
- інтегроване графічне середовище розробки, виконання й налагодження програм;
- набір бібліотек елементів програмування в LabVIEW, у тому числі бібліотеки графічних елементів користувальницького інтерфейсу, бібліотеки функцій і підпрограм, бібліотеки драйверів, бібліотеки програм для організації взаємодії з измерительно-управляючими апаратними засобами й т.п.;
- розвинену довідкову систему;
- великий набір програм-прикладів з можливістю як тематичного, так і алфавітного пошуку.

Система програмування LabVIEW має убудований механізм налагодження додатків. У процесі налагодження розроблювач може призначати крапки останова програми, виконувати програму "по кроках", візуалізувати процес виконання програми й контролювати будь-які дані в будь-якому місці програми.

Система LabVIEW дозволяє захистити програми від несанкціонованої зміни або перегляду їхнього вихідного коду. При цьому

розроблювач може або використати паролі на доступ до додатків, або зовсім видалити вихідний код із працюючого додатка.

Состав бібліотек системи LabVIEW дозволяє в короткий термін створювати необхідні інструменти для різних етапів досліджень, починаючи від елементарних приладів і закінчуючи керуючими, інформаційно-пошуковими й аналітичними системами. Це дає підставу говорити про принципові зміни, які вносить технологія LabVIEW у створення прикладного програмного забезпечення, оскільки ця система дозволяє реалізовувати довільний набір методів вимірювання, аналізу, відображення й керування в автоматизованих системах різного профілю на базі звичайного персонального комп'ютера.

Програми LabVIEW називаються віртуальними приладами (ВП, virtual instruments – VI), тому що вони функціонально й зовні подібні реальними (традиційними) приладам. Однак вони настільки ж подібні до програм і функціям на популярних мовах програмування, таких як C або Basic [9]. Віртуальний прилад складається із двох основних компонентів: лицьова панель і блок-діаграма [12].

Лицьова панель (front panel) – являє собою інтерактивний користувальницький інтерфейс ВП і названа так тому, що імітує лицьову панель традиційного приладу (рис. 5.8). На ній можуть перебувати ручки керування, кнопки, графічні індикатори й інші елементи керування (controls), які є засобами введення даних з боку користувача, і елементи індикації (indicators) - вихідні дані із програми. Користувач уводить дані, використовуючи мишу й клавіатуру, а потім бачить результати дії програми на екрані монітора.

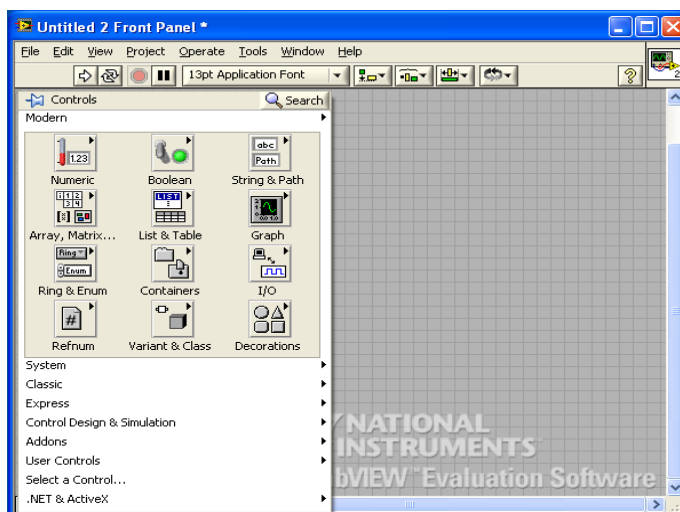


Рисунок 5.8 – Лицьова панель ВП LabVIEW

Блок діаграма (block diagram) – є вихідним програмним кодом ВП, створеним мовою графічного програмування LabVIEW, G (Джей). Блок-діаграма являє собою додаток, що виконується реально (рис. 5.9). Компонентами блок-діаграми є: ВП більше низького рівня, убудовані функції LabVIEW, константи й структури керування виконанням програми. Для того щоб задати потік даних між певними об'єктами або створити зв'язок між ними, користувач повинен намалювати відповідних провідників (wires). Об'єкти на лицьовій панелі представлені на блок-діаграмі у вигляді відповідних терміналів (terminals), через які дані можуть надходити від користувача в програму й назад.

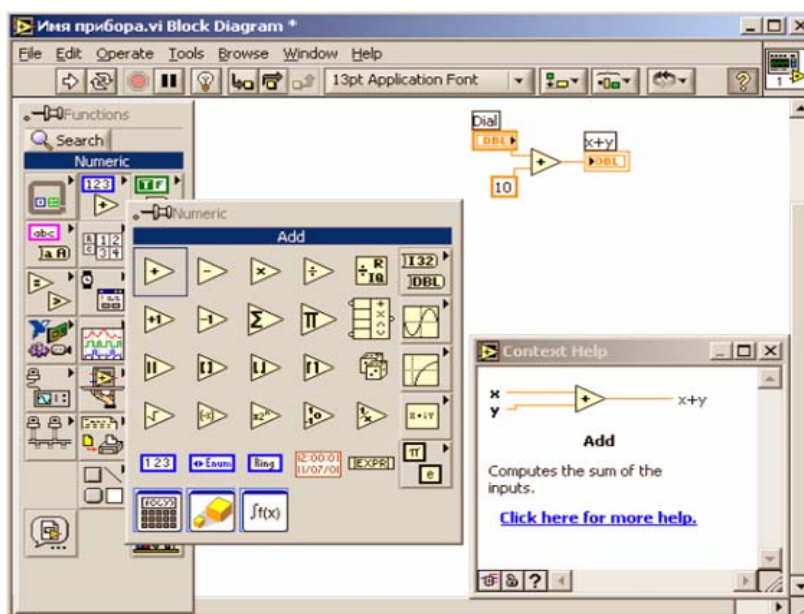


Рисунок 5.9 - Блок-діаграма ВП у середовищі LabVIEW

Для того щоб використати деякий ВП як підпрограма (подприбора) у блок-діаграмі іншого ВП, необхідно визначити його іконку (icon) і сполучну панель (connector). Віртуальний прилад, що застосовується усередині іншого ВП, називається віртуальним подприбором (ВПП, *SubVI*), що аналогічний підпрограмі в традиційних текстових мовах. Іконка є однозначним графічним поданням ВП і може використатися як об'єкт на блок-діаграмі іншого ВП. Сполучна панель являє собою механізм передачі даних у ВП із іншої блок-діаграми, коли він застосовується в якості подприбора – ВПП. Подібно аргументам і параметрам підпрограми, сполучна панель визначає вхідні й вихідні дані ВП.

ВП є ієрархічними й модульними (modular). Ви можете використати їх як самостійні додатки (top-level programs), так і в якості ВПП. Відповідно до цієї логіки LabVIEW треба концепції модульного програмування (modular programming). Спочатку ви розділяєте більше прикладне завдання на ряд простих підзадач. Далі створюєте ВП для виконання кожної з підзадач, а потім поєднуєте ці ВП на блок-діаграмі приладу більше високого рівня, що виконує прикладне завдання в цілому [9].

Технологія модульного програмування дуже гарна, тому що ви можете працювати з кожним ВПП окремо, що полегшує налагодження додатка.

Створення лицьової панелі. Лицьова панель задає зовнішній вигляд ВП і визначає інтерфейс взаємодії користувача із ВП. На лицьовій панелі перебувають різні елементи керування ВП (вимикачі, перемикачі, поля введення й т.д.) і елементи відображення вимірювальної інформації (цифрові індикатори, графічні екрани й т.д.) [13].

Лицьовою панеллю називається вікно, через яке користувач взаємодіє із програмою. Коли користувач запускає віртуальний прилад, лицьова панель повинна бути відкрита для того, щоб можна було ввести дані в програму, що виконується. З іншого боку, лицьова панель є вікном

перегляду результатів виконання ВП. На рисунок 5.10 показана лицьова панель ветроэлектро станції в середовищі LabVIEW.



Рисунок 5.10 – Користувальницький інтерфейс системи керування ветроэлектро станцією в середовищі LabVIEW

Лицьова панель в основному складається із сукупності елементів керування (controls) і індикаторів (indicators). Елементи керування імітують типові органи керування, які є в будь-якого вимірювального приладу. Елементи керування дозволяють користувачеві ввести дані; вони передають дані в блок-діаграму віртуального приладу. Індикатори відображають вихідні дані, що є результатом виконання програми.

#### 5.4 Оцінка похибок вимірювальної системи з контролю параметрів роботи установки з виробництва альтернативної енергії

У даному підрозділі систематизовані вирази для опису різних складових інструментальної похибки ИСЦПК, проаналізовані складові похибки, не враховані у відомих літературних джерелах. Запропоновано аналітичні вираження для таких складових інструментальної похибки ИСЦПК, як

похибка, викликана некрatністю й похибка мультиплексування. Розроблено методику підсумовування складових інструментальної похибки ИСЦПК.

5.4.1 Узагальнена модель похибки вимірювальних систем із цифровою обробкою сигналів на основі промислових комп'ютерів.

Ключовою відмінністю ИСЦПК від інших ЗВТ є те, що результат вимірювання виходить у результаті розрахунків по обчислювальних алгоритмах.

Як відомо з [27, 28], результат вимірювання за допомогою ИСЦПК відрізняється від щирого значення, що визначається по узагальненій моделі обробки сигналів.

Оскільки в процесі вимірювання неминує виникають похибки, алгоритмічна функція видозмінюється, а точніше в неї додається вектор похибок, і в такий спосіб узагальнена модель похибки буде виглядати так:

$$\tilde{Y} = \frac{k}{m} \sum_{q=1}^m \tilde{f}[x(t_q), \xi(t_q), a], \quad (5.3)$$

де  $\tilde{f}[x(t_q), \xi(t_q), a]$  - значення алгоритмічної функції  $f[x(t_q), a]$  в моменти дискретизації  $t_q$ , перекручені перешкодами й погрішностями;

$\xi(t_i) = \{\xi_1(t_q), \xi_2(t_q), \dots, \xi_n(t_q)\}$  - значення  $n$ -мірного вектора похибок  $\xi(t)$ , крім похибки дискретизації, а також усякого роду перешкод у крапках відліку  $t_q$ .

Таким чином, результат вимірювання за допомогою ИСЦПК може бути записаний:

$$\Delta Y = \tilde{Y} - Y. \quad (5.4)$$

Підставляючи в цю формулу  $\tilde{Y}$  й  $Y$ , одержимо:

$$\Delta Y = \frac{k}{m} \sum_{q=1}^m \tilde{f}[x(t_q), \xi(t_q), a] - \frac{k}{T} \int_0^T f[x(t), a] dt. \quad (5.5)$$

Можна також виділити похибка дискретизації в явному виді, тобто:

$$\Delta Y = \Delta Y_D + \Delta Y', \quad (5.6)$$

де  $\Delta Y_D = \frac{k}{m} \sum_{q=1}^m f[x(t_q), a] - \frac{k}{T} \int_0^T f[x(t), a] dt$  - похибка дискретизації;

$\Delta Y' = \frac{k}{m} \sum_{q=1}^m \{ \tilde{f}[x(t_q), \xi(t_q), a] - f[x(t_q), a] \}$  - величина, що враховує інші

складові похибки ЦОС.

Для того, щоб одержати формулу для розрахунку результуючої інструментальної похибки ИСЦПК, необхідно мати вираження для розрахунку всі складові похибки. Для цього необхідно мати інформацію про рівняння вимірювання, представленому у вигляді обчислювального алгоритму, а також інформацію про фізичний зміст тої або іншої складової.

Як було зазначено в розділі 1, вимірювальна інформація може бути представлена електричним сигналом у вигляді напруги або постійний або змінний токи. Отже, необхідно розглянути обидва випадки й для кожного систематизувати вираження для опису різних складових інструментальної похибки.

5.4.2 Аналіз математичних моделей похибки для вимірювального сигналу, представленого напругою змінного струму.

Розглянемо випадок, коли вимірювана величина представлена сигналом змінного струму.

Для того щоб показати, яким образом наявність обчислювального компонента в складі вимірювального ланцюга впливає на сумарну інструментальну похибка, розглянемо структурно-функціональну схему ИСЦПК, наведену на рис 5.11. ИСЦПК складається із трьох функціональних блоків: блоку аналогових вузлів (тобто, все те, що розташовується до АЦП), АЦП і обчислювальний компонент (ОК).

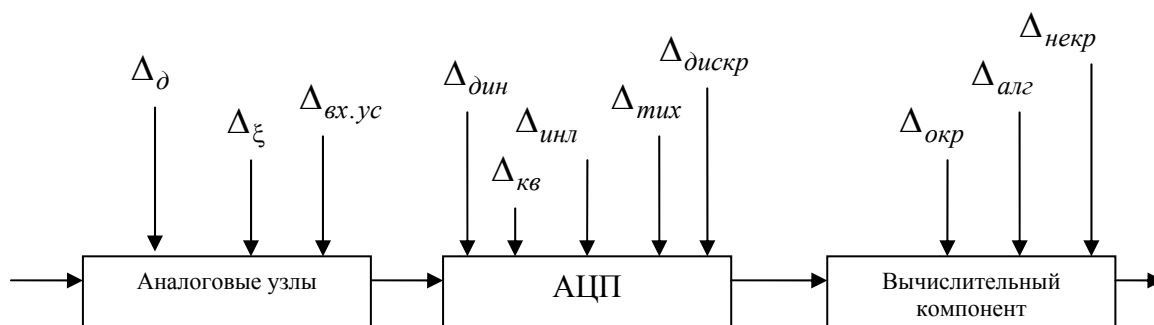


Рисунок 5.11 - Структурно-функціональна схема ИСЦПК у випадку, коли вимірювана величина представлена сигналом змінного струму

Розглянемо послідовність появи складових інструментальної похибки ИСЦПК у міру того, як вимірювальна інформація проходить по вимірювальному каналі.

Перетворення вимірювального сигналу в аналогових вузлах приводить до виникнення таких складових:

- 1)  $\Delta_\xi$  - похибка, викликана впливом шумів, що накладають на сигнал, і перешкод (від зовнішніх джерел, від вузлів електроживлення ЕОМ і т.д.);
- 2)  $\Delta_{вх.ус}$  - похибка, викликана зміною коефіцієнта підсилення вхідного диференціального підсилювача, що входить до складу плати збору даних;
- 3)  $\Delta_{тих}$  - похибка, викликана зрушенням сигналів при мультимплексуванні.
- 4)  $\Delta_\delta$  - додаткова похибка (обумовлена впливом температури й інших факторів).

При дискретизації й квантуванні сигналу з'являються такі складові:

- 1)  $\Delta_{кв}$  - похибка квантування, обумовлена виконанням аналогово-цифровим перетворювачем операції квантування;
- 2)  $\Delta_{инл}$  - похибка, викликана відхиленням характеристик АЦП від ідеальних, наприклад, інтегральною нелінійністю;

- 3)  $\Delta_{дин}$  - динамічні похибки (наприклад, похибка датування отсчётов);
- 4)  $\Delta_{дискр}$  - похибка дискретизації, обумовлена заміною безперервного сигналу на набір дискретних отсчётов.

На етапі реалізації обчислювальних алгоритмів виникають наступні складові:

- 1)  $\Delta_{окр}$  - похибка округлення, обумовлена кінцівкою розрядної сітки процесора ЕОМ;
- 2)  $\Delta_{алг}$  - похибка, що має місце у випадку, якщо обчислення виробляються по наближених алгоритмах;
- 3)  $\Delta_{некр}$  - похибка, викликана некрatністю періоду вимірюваного сигналу й інтервалу дискретизації (суть і причина виникнення цій складовій буде пояснена нижче).

5.4.3 Похибка, викликана некрatністю періоду сигналу й інтервалу дискретизації.

Розглянемо похибка  $\Delta_{некр}$ , обумовлену некрatністю періоду вимірюваного сигналу й інтервалу дискретизації.

Дана складова похибки викликана тим, що в загальному випадку період вимірюваного сигналу не кратний інтервалу дискретизації. Іншими словами, при діленні значення періоду вимірюваного сигналу на значення інтервалу дискретизації виходить остача. Це явище має місце практично завжди, тому що ймовірність того, що період вимірюваного сигналу буде точно кратний інтервалу дискретизації, близька до нуля.

Припустимо, період сигналу кратний інтервалу дискретизації (рисунок 5.12). Очевидно, що, по-перше, отсчеты на напівперіодах сигналу розташовані симетрично, а по-друге, кількість отсчетов (інтервалів дискретизації також) за період постійно.

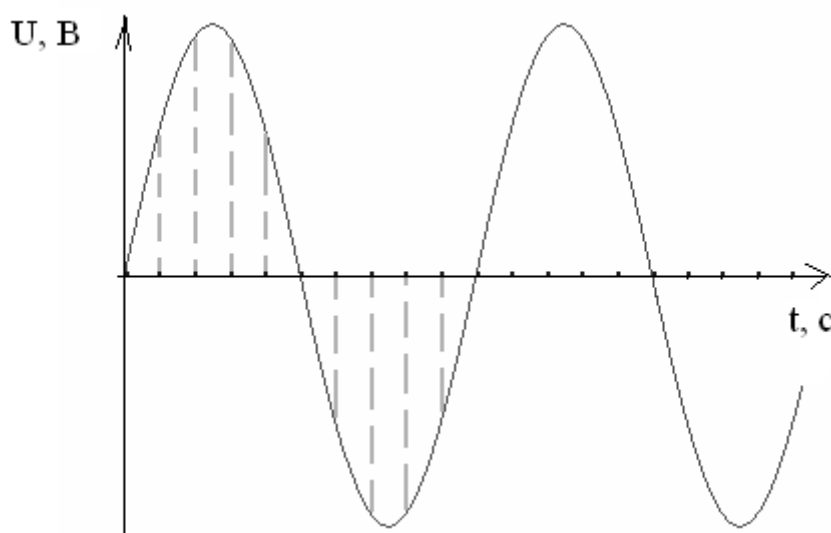


Рисунок 5.12 - Співвідношення періоду сигналу й інтервалу дискретизації у випадку їхньої кратності

У випадку ж, коли період сигналу не кратний інтервалу дискретизації (рисунок 5.13), видно, що отсчёты розташовано несиметрично, кількість отсчётов на напівперіодах неоднаково. Більше того, кількість інтервалів дискретизації мінливо для сусідніх періодів (наприклад, на малюнку 3.3, на перший період потрапило 6 отсчётов, а на другий – 5). Воно може приймати два значення:  $\text{int} \frac{T}{\Delta t}$  і  $\text{int} \frac{T}{\Delta t} - 1$  (під операцією  $\text{int}$  мається на увазі ділення з наступним відкиданням остачі). Внаслідок цього, обмірюване значення величини (наприклад, СКЗ) також приймає два різних значення, одне йз яких менше щирого, а інше більше.

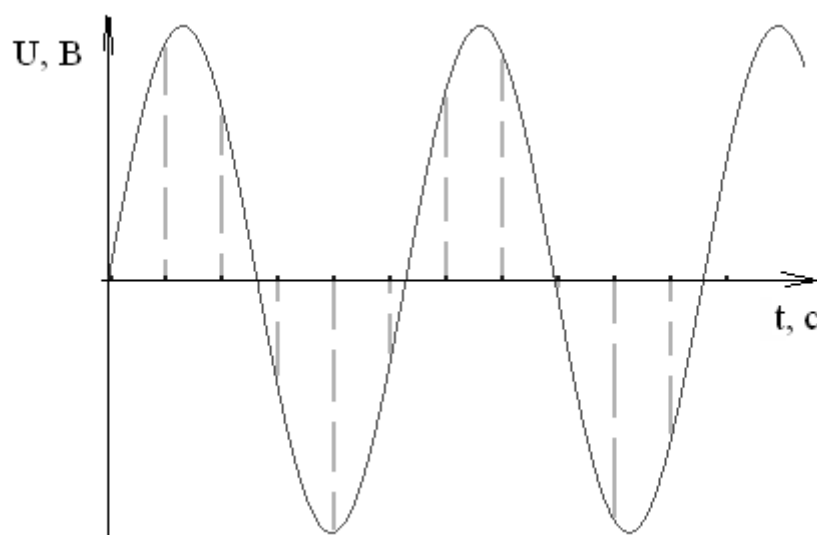


Рисунок 5.13 - Співвідношення періоду сигналу й інтервалу дискретизації у випадку їхньої некрatності

Якби період вимірюваного сигналу був кратний інтервалу дискретизації, то процес дискретизації відбувався б у якісь моменти часу  $t_{0i}$ . Насправді ж, відбувається дискретизація в моменти часу  $t_{pi}$ , що відстоять друг від друга на інтервал дискретизації  $\Delta t$ . Таким чином, «реальні» моменти дискретизації відстоять від «ідеальних» на якийсь відрізок часу  $\tau_i$ . У результаті цього в кожному відліку виникає похибка  $\Delta_i$ , як показано на рис.5.14.

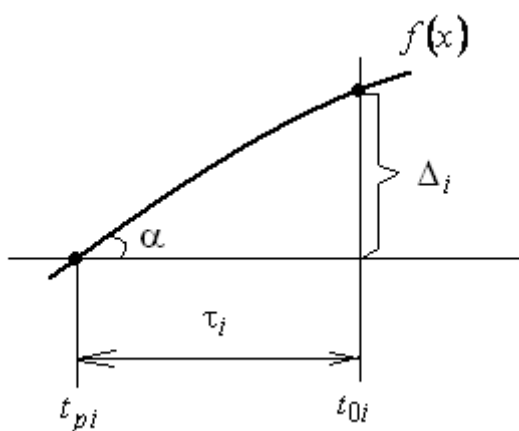


Рисунок 5.14 - Графічна інтерпретація процесу виникнення похибки некрatності

Попутно відзначимо, що дана похибка по своїй природі дуже нагадує динамічну похибка із прогресуючим зсувом моментів дискретизації.

Виразимо похибка  $\Delta_i$  через інші величини. Якщо зневажити нелінійністю функції  $f(x)$  на ділянці  $[t_{pi}, t_{0i}]$  (беручи до уваги той факт, що цей відрізок досить малий), то можемо записати:

$$\Delta_i = \tau_i \cdot \operatorname{tg} \alpha = \tau_i f'(t_{pi}). \quad (5.7)$$

Позначимо відношення «обмірюваного» періоду :

$$\gamma = \frac{m\Delta t}{T}. \quad (5.8)$$

Тоді виходить, що:

$$t_{0i} = \gamma t_{pi}, \quad (5.9)$$

І, отже:

$$\tau_i = \gamma t_{pi} - t_{pi} = t_{pi}(\gamma - 1). \quad (5.10)$$

Підставляючи це у формулу (5.7), одержимо:

$$\Delta_i = t_{pi}(\gamma - 1) \cdot f'(t_{pi}). \quad (5.11)$$

Відзначимо, що із цієї формули видно, що похибка буде дорівнює нулю в тому випадку, якщо  $\gamma = 1$ , тобто, коли період вимірюваного сигналу кратний інтервалу дискретизації.

Виведемо формули для оцінки похибки неkratності для різних алгоритмів обчислення.

Для того щоб оцінити похибка для алгоритму усереднення, запишемо:

$$\Delta Y_{некр} = \frac{k}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f(t_i) - \frac{k}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (f(t_i) + \Delta_i), \quad (5.12)$$

Звідси:

$$\Delta Y_{некр} = -\frac{k}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \Delta_i = \frac{k}{m} \sum_{i=0}^{m-1} i\Delta t(\gamma - 1)f'(i\Delta t). \quad (5.13)$$

У випадку гармонійного сигналу виду  $f(t) = A \sin(\omega t)$ , одержимо:

$$\Delta Y_{некр} = \frac{k}{m} \sum_{i=0}^{m-1} i \Delta t (\gamma - 1) A (\sin(i\omega \Delta t))' = \frac{k}{m} \sum_{i=0}^{m-1} i \Delta t (\gamma - 1) A \omega \cos(i\omega \Delta t). \quad (5.14)$$

Виносимо всі що можна з-під знака суми й одержуємо:

$$\Delta Y_{некр} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot \omega \cdot A \cdot (\gamma - 1)}{m} \sum_{i=0}^{m-1} i \cos(i\omega \Delta t). \quad (5.15)$$

Для того, щоб оцінити «зверху» значення даного вираження, підставимо замість суми значення максимального члена суми, тобто:

$$\Delta Y_{некр} \leq \frac{k \cdot \Delta t \cdot \omega \cdot A \cdot (\gamma - 1)}{m} (m - 1) \cos((m - 1)\omega \Delta t). \quad (5.16)$$

Або, у випадку, коли  $m \gg 1$ , можна прийняти відношення  $\frac{m-1}{m}$

рівним одиниці, тоді:

$$\Delta Y_{некр} \leq k \cdot \Delta t \cdot \omega \cdot A \cdot (\gamma - 1) \cos((m - 1)\omega \Delta t). \quad (5.17)$$

А оскільки косинус кута  $2\pi$  дорівнює 1 те тоді можна записати:

$$\Delta Y_{некр} \leq k \cdot \Delta t \cdot \omega \cdot A \cdot (\gamma - 1). \quad (5.18)$$

Виведемо тепер формулу для оцінювання похибки для алгоритму обчислення СКЗ. Для цього запишемо:

$$\Delta Y_{некр} = Y - Y'; \quad (5.19)$$

де  $Y$  - щире значення вимірюваної величини;

$Y'$  - значення вимірюваної величини, перекручене похибкою некратності.

Користуючись формулою (5.17), можна записати:

$$\Delta Y_{некр} = \sqrt{\frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f_i^2} - \sqrt{\frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (f_i + \Delta_i)^2}; \quad (5.20)$$

де  $f_i$  - значення напруги сигналу в  $i$ -й момент дискретизації,

$\Delta_i$  - значення похибки в  $i$ -й момент дискретизації.

Під знаком другого кореня проведемо наступну операцію: додамо й віднімемо вираження  $\frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f_i^2$ . Потім зробимо під коренем відповідні

перетворення:

$$\frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (f_i + \Delta_i)^2 - \frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f_i^2 + \frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f_i^2. \quad (5.21)$$

Помітимо, що останній член являє собою щире значення. Різниця перших двох членів можна привести до виду:

$$\begin{aligned} \frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (f_i + \Delta_i)^2 - \frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f_i^2 &= \frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (f_i^2 + 2\Delta_i f_i + \Delta_i^2) - \frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f_i^2 = \\ &= \frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (2 \cdot \Delta_i \cdot f_i + \Delta_i^2) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Скористаємося тепер формулою (5.22), одержимо:

$$\frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (2 \cdot \Delta_i \cdot f_i + \Delta_i^2) = \frac{k^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} [2 \cdot i\Delta t (\gamma - 1) f' \cdot f + (i\Delta t)^2 (\gamma - 1)^2 f_i'^2]. \quad (5.23)$$

Для випадку синусоїдального сигналу одержимо таке вираження:

$$\frac{2k^2\omega(\gamma-1) \cdot A^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} i\Delta t \cdot \sin(i\Delta t\omega) \cdot \cos(i\Delta t\omega) + \frac{k^2(\gamma-1)^2 A^2 \omega^2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (i\Delta t)^2 \cdot \cos^2(i\Delta t\omega). \quad (5.24)$$

Замінімо суми на інтеграли:

$$\frac{2k^2\omega(\gamma-1) \cdot A^2}{T} \int_0^T t \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) dt + \frac{k^2(\gamma-1)^2 A^2 \omega^2}{T} \int_0^T t^2 \cos^2(\omega t) dt. \quad (5.25)$$

Проінтегровано, одержимо

$$\begin{aligned} \frac{2k^2\omega(\gamma-1) \cdot A^2}{T} \cdot \frac{-\frac{1}{2}\omega \cdot \cos^2(\omega) + \frac{1}{4}\cos(\omega)\sin(\omega) + \frac{1}{4}\omega}{\omega^2} + \\ + \frac{k^2(\gamma-1)^2 A^2 \omega^2}{T} \cdot \frac{\omega^2 t^2 \left( \frac{1}{2}\cos(\omega)\sin(\omega) + \frac{1}{2}\omega \right) + \frac{1}{2}\omega \cos^2(\omega) - \frac{1}{4}\cos(\omega)\sin(\omega) - \frac{1}{4}\omega - \frac{1}{3}\omega^3 t^3}{\omega^3} \end{aligned}$$

Підставивши й спростивши, одержимо:

$$-\frac{k^2(\gamma-1)A^2}{2} + k^2(\gamma-1)^2 A^2 \omega^2 \left( \frac{1}{6} T^2 + \frac{1}{4} \frac{1}{\omega^2} \right). \quad (5.26)$$

Таким чином, остаточне вираження буде мати вигляд:

$$\Delta Y_{некр} = Y - \sqrt{\left[ -\frac{k^2(\gamma-1)A^2}{2} + k^2(\gamma-1)^2 A^2 \omega^2 \left( \frac{1}{6} T^2 + \frac{1}{4} \frac{1}{\omega^2} \right) \right] + Y^2} . \quad (5.27)$$

Графік залежності похибки некратності від частоти вимірюваного сигналу наведений на малюнку 5.15.

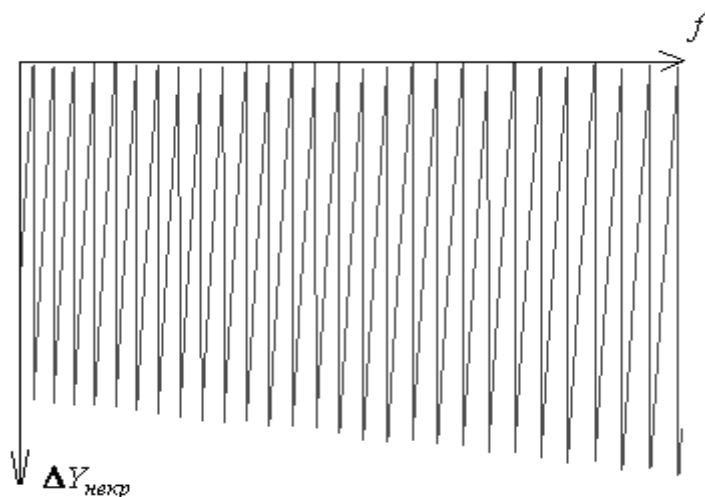


Рисунок 5.15 - Графік залежності похибки некратності від частоти вимірюваного сигналу

Очевидно, на графіку складна крива, що складається з пілоподібних імпульсів, амплітуда яких монотонно зростає. Залежність між значенням вимірюваної величини й похибкою лінійна, графік представлений на малюнку.

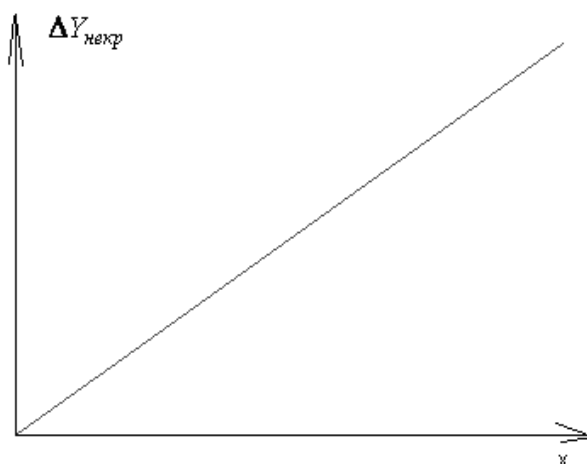


Рисунок 5.16 - Графік залежності між значенням вимірюваної величини й похибкою некратності

Тепер визначимо, наскільки часто на 1 період вимірюваного сигналу

буде доводитися  $m$  або  $m-1$  отсчётов. Визначимо це користуючись наступними міркуваннями. Для цього представимо наочно процес дискретизації в часі.

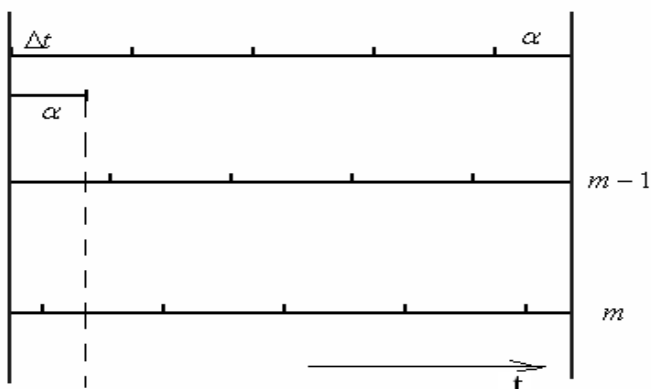


Рисунок 5.17 – Графічна інтерпретація процесу дискретизації, де  $\alpha$  - остача від ділення періоду сигналу на інтервал дискретизації,  $m$  - кількість відліків за період

На цьому малюнку дві вертикальні сині лінії позначають часовий проміжок, дорівнює періоду вимірюваного сигналу. Для початку представимо, що в деякій реалізації вимірювання перший відлік довівся рівно на початок періоду (верхня лінійка). Оскільки період сигналу не кратний інтервалу дискретизації, те самий останній інтервал буде менше  $\Delta t$ . Позначимо його  $\alpha$ . Цей інтервал є остачею від ділення періоду  $T$  на величину інтервалу дискретизації.

Очевидно, що кількість отсчётов буде дорівнює  $m$ , якщо перший відлік попадає на інтервал  $[0, \alpha]$ , а кількість отсчётов  $m-1$  відповідає випадку, коли перший відлік попадає на відрізок  $[\alpha, \Delta t]$ . Очевидно, що перший відлік з рівною ймовірністю попадає в будь-яку крапку на відріжку  $[0, \Delta t]$ , тому ймовірність появи  $m$  або  $m-1$  отсчётов прямо пропорційні величинам  $\alpha$  і  $\Delta t - \alpha$  відповідно й рівні  $\frac{\alpha}{\Delta t}$  й  $1 - \frac{\alpha}{\Delta t}$ .

Отже, необхідно визначати похибка некрatності по формулі:

$$\Delta Y_{некр} = \frac{\alpha}{\Delta t} \cdot Y' + \left(1 - \frac{\alpha}{\Delta t}\right) \cdot Y'', \quad (5.28)$$

де  $Y'$  - результат, отриманий у випадку влучення  $m$  отсчётов на період,

$Y''$  - результат, отриманий у випадку влучення  $m-1$  отсчётов на період.

Для того, щоб привести похибка неkratності до виду, зручному для підсумовування з іншими складовими, необхідно представити її у вигляді суми систематичної й випадкової складової.

Серединою інтервалу між  $Y'$  і  $Y''$  буде крапка  $\frac{Y' + Y''}{2}$ . Таким чином, систематична складова буде дорівнює  $\frac{Y' + Y''}{2}$ . Випадкову складову для спрощення можна прийняти розподіленої за рівномірним законом між крапками  $Y'$  й  $Y''$ . Тоді СКВ випадкової складової буде:

$$\sigma_{некр} = \frac{Y' - Y''}{t_p}; \quad (5.29)$$

де  $t_p$  - довірчий коефіцієнт для заданої ймовірності для равновероятного закону.

Як показують розрахунки, у випадку застосування в складі ИСЦПК модуля АЦП SDI-ADC16-16, похибка неkratності може становити від 0 до 0,9 %.

#### 5.4.4 Похибка дискретизації.

Похибка дискретизації виникає за рахунок заміни безперервної кривої східчастої кривої. При рівномірній дискретизації за часом із кроком  $\Delta t = \frac{T}{m}$ , вираження для визначення похибки дискретизації можна записати у вигляді:

$$\Delta Y_D = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f(i\Delta t) - \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (5.30)$$

Метод оцінки похибки дискретизації запропонований в [9, 10].

Залежно від того, яка є інформація про вхідний сигнал, оцінку

похибки дискретизації доцільно проводити різними методами. Якщо відомо інформацію про функцію  $f(t)$ , тобто, про характер зміни її в часі, оцінку похибки дискретизації доцільно проводити методом №1. Якщо ж є інформація про спектр досліджуваного сигналу (зокрема, дані про коефіцієнт гармонік), то оцінку похибки дискретизації доцільно проводити методом №2.

#### Метод №1.

Вираження для оцінювання похибки величини, обмірюваної за допомогою алгоритму усереднення по методу №1 було виведено в [27, 28]. Якщо від'ємник у формулі (2.29) розкласти по формулі Ейлера-Маклорена [74], одержуємо:

$$\frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \left( \frac{T}{m} \right) \cdot \left[ \frac{1}{2} f(t_1) + f(t_2) + \dots + f(t_{m-1}) + \frac{1}{2} f(t_m) \right] - \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n \frac{B_{2k}}{(2k)!} \cdot \left( \frac{T}{m} \right)^{2k} [f^{(2k-1)}(t_m) - f^{(2k-1)}(t_1)] + R_{2n} \quad ; \quad (5.31)$$

де  $t_1, t_2 \dots t_m$  - моменти часу, що відповідають першій, другий, m-й крапці дискретизації досліджуваного сигналу за період;

$B_{2k}$  - числа Бернуллі з індексом  $2k$ ;

$f^{(2k-1)}(t)$  - похідна  $(2k-1)$  порядку від функції  $f(t)$ ;

$R_{2n}$  - залишковий член.

Оцінити значення залишкового члена можна по формулі:

$$R_{2n} = -m \left( \frac{T}{m} \right)^{2n+3} \cdot \frac{B_{2n+2}}{(2n+2)!} \cdot f^{(2n+2)}(\xi); \quad (5.32)$$

де  $\xi \in (t_0, t_n)$ .

У формулі (3.30)  $t_1$  і  $t_m$  - це відповідно перший і останній момент дискретизації, тобто, фактично, 0 і  $T$ .

Підставляючи (3.30) в (3.29) одержуємо наступний результат:

$$\Delta Y_D = \frac{1}{2m} [f(0) + f(T)] + \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n \frac{B_{2k}}{(2k)!} \left( \frac{T}{m} \right)^{2k} [f^{(2k-1)}(T) - f^{(2k-1)}(0)] + R_{2n}; \quad (5.33)$$

На підставі даного методу можна також вивести вираження для оцінки похибки дискретизації при вимірюванні СКЗ. Запишемо:

$$\Delta Y_D = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f^2(i\Delta t)} - \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}; \quad (5.34)$$

Удамося до такого прийому: додамо й віднімемо з підкореневого вираження зменшуваного підкореневого вираження від'ємника:

$$\Delta Y_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} + \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f^2(i\Delta t) - \frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt \right] - \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}; \quad (5.35)$$

Розглянемо окремо вираження у квадратних дужках, позначимо його  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} \alpha = & \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f^2(i\Delta t) - \frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt = \frac{1}{2m} [f^2(0) + f^2(T)] + \\ & + \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n \frac{B_{2k}}{(2k)!} \left(\frac{T}{m}\right)^{2k} \left[ f^{2(2k-1)}(T) - f^{2(2k-1)}(0) \right] + R_{2n}. \end{aligned} \quad (5.36)$$

Таким чином, похибка дискретизації:

$$\Delta Y_D = \sqrt{U^2 + \alpha} - U; \quad (5.37)$$

де  $U$  - діюче значення досліджуваного сигналу.

### Метод №2.

В [27, 28] виведені вираження для оцінки похибки дискретизації по методу №2.

#### 1. Алгоритм усереднення.

Похибка дискретизації у вигляді відносної похибки:

$$\delta_D = \frac{F_1}{F_0} \frac{k_\varepsilon k_\partial}{m^r}. \quad (5.38)$$

Або у вигляді абсолютної похибки:

$$Y_D = \frac{F_1 \cdot k_\varepsilon k_\partial}{m^r}. \quad (5.39)$$

У цьому випадку  $k_\partial$  - постійна величина, мало чутлива до конкретного значення  $r$ . Вона змінюється від  $k_\partial \approx 1,6$  при  $r = 2$  до  $k_\partial \approx 1$

при  $r \gg 1$ .

Зробимо «оцінку зверху», тобто, приймемо такі значення  $k_\partial$  й  $r$ , при яких похибка буде максимальна. Очевидно, що похибка буде максимальної при  $k_\partial = 1,6$  й  $r = 2$ , тому що в цьому випадку чисельник буде мінімальним, а знаменник – максимальним.

Тоді вираження для відносної похибки можна записати так:

$$\delta_D = 1,6 \cdot \frac{F_1}{F_0} \frac{k_\varepsilon}{m^2}. \quad (5.40)$$

## 2. Алгоритм кореляційної обробки.

$$\delta_\partial \leq \sqrt{2} \frac{k_\partial k_\varepsilon}{m^r}. \quad (5.41)$$

Або, по «оцінці зверху»:

$$\delta_\partial \leq 2,2627 \cdot \frac{k_\varepsilon}{m^2}. \quad (5.42)$$

## 3. Алгоритм взаємно кореляційної обробки.

$$\delta_\partial \leq \frac{\sqrt{2}}{m^r} \cdot \frac{k(k_{\varepsilon 1} + k_{\varepsilon 2})}{\cos(\varphi + \omega\tau)}, \quad (5.43)$$

де  $k_{\varepsilon 1}$ ,  $k_{\varepsilon 2}$  - коефіцієнти гармонік двох вхідних сигналів ИСЦПК, що піддаються цифровий взаємно кореляційній обробці.

Зокрема, при вимірюванні активної потужності, коли  $\tau = 0$ , відносна похибка дискретизації:

$$\delta_\partial \leq \frac{\sqrt{2}k_\partial}{m^r} \cdot \frac{k_{\varepsilon 1} + k_{\varepsilon 2}}{\cos \varphi}; \quad (5.44)$$

Або, при «оцінці зверху»:

$$\delta_\partial \leq \frac{2,2627}{m^2} \cdot \frac{k_{\varepsilon 1} + k_{\varepsilon 2}}{\cos \varphi}. \quad (5.45)$$

При вимірюванні діючого значення ( $\tau = 0, \varphi = 0, k_{\varepsilon 1} = k_{\varepsilon 2}$ ), маємо:

$$\delta_\partial \leq \frac{2\sqrt{2}k_\partial k_\varepsilon}{m^r}; \quad (5.46)$$

Відповідно, для «оцінки зверху»:

$$\delta_o \leq \frac{4,5255 \cdot k_e}{m^2}. \quad (5.47)$$

Аналізуючи даного вираження, можна зробити такі висновки. Якщо ми приймемо  $r = 2$ , то очевидно, що похибка дискретизації обернено пропорційна квадрату кількості крапок дискретизації й прямо пропорційна коефіцієнту гармонік.

Помітимо, що вираження, наведені в даному підпункті, дозволяють обчислити похибка дискретизації для сигналів будь-якої форми - гармонійної, імпульсної й т.д.

Аналізуючи вираження для похибки дискретизації, можна прийти до висновку, що дана складова є систематичною.

#### 5.4.5 Похибка квантування

У роботах [27, 28] наведені вираження для визначення математичного очікування й дисперсії похибки квантування для різних алгоритмів ЦОС. Приведемо ці вираження:

##### 1. Алгоритм усереднення:

$$M[\Delta Y_{кв}] = kM[\xi]; \quad (5.48)$$

$$D[\Delta Y_{кв}] = \frac{k^2}{m} D[\xi]. \quad (5.49)$$

##### 2. Алгоритм кореляційної обробки:

$$M[\Delta Y_{кв}] = 0; \quad (5.50)$$

$$D[\Delta Y_{кв}] = \frac{k^2}{2m} D[\xi]. \quad (5.51)$$

##### 3. Алгоритм взаємної кореляційної обробки сигналів:

$$M[\Delta Y_{кв}] = k(X_{10}M[\xi_2] + X_{20}M[\xi_1]); \quad (5.52)$$

$$D[\Delta Y_{кв}] = \frac{k^2}{m} (X_1^2 D[\xi_2] + X_2^2 D[\xi_1]). \quad (5.53)$$

##### 4. Алгоритм автокорреляційної обробки сигналів:

$$M[\Delta Y_{кв}] = 2kX_0M[\xi]; \quad (5.54)$$

$$D[\Delta Y_{кв}] = \frac{2k^2}{m} X^2 D[\xi]. \quad (5.55)$$

Тут  $M[\xi]$  - математичне очікування одиничного відліку,  $D[\xi]$  - дисперсія одиничного відліку, яку варто прийняти  $\frac{q^2}{12}$ .

Як видно із цих формул, дисперсія похибки квантування обернено пропорційна кількості крапок дискретизації.

Знаючи дисперсію похибки, можна виразити саму похибка у вигляді довірчого інтервалу по формулі:

$$\varepsilon = t_p \sqrt{D[\Delta Y_{кв}]}; \quad (5.56)$$

де  $t_p$  - довірчий коефіцієнт.

Очевидно, що похибка квантування є випадковою похибкою, розподіленої по рівновероятному законі.

#### 5.4.6 Похибка округлення

Похибка округлення обумовлена, головним чином, тим, що числа в комп'ютері представлені приблизно через кінцівку розрядної сітки.

Більшість персональних комп'ютерів підтримують IEEE-стандарт двійкової арифметики. Стандарт передбачає два типи чисел із плаваючою крапкою:

- 1) числа звичайної точності, які представляються 32 бітами - 4 байтами в такому форматі: знак (1 біт), порядок (8 біт), мантиса (23 біта);
- 2) числа подвійної точності, які представляються 64 бітами - 8 байтами в такому форматі: знак (1 біт), порядок (11 біт), мантиса (52 біта).

Щоб знайти границю відносної похибки подання числа із плаваючою крапкою, припустимо, що застосовується найпростіше округлення - відкидання всіх розрядів числа, що виходять за межі розрядної сітки. Система числення - двійкова. Нехай треба записати число, що представляє нескінченний двійковий дріб:

$$a = \pm 2^p \left( \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{2^2} + \dots + \frac{a_t}{2^t} + \frac{a_{t+1}}{2^{t+1}} + \dots \right), \quad (5.57)$$

де  $p$  - порядок двійкового числа;

вираження в дужках - мантиса;

$$a_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, j = 1, 2, 3, \dots - \text{цифри мантиси.}$$

Нехай під запис мантиси приділяється  $t$  двійкових розрядів.

Відкидаючи зайві розряди, одержимо округлене число:

$$\tilde{a} = \pm 2^p \left( \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{2^2} + \dots + \frac{a_t}{2^t} \right). \quad (5.58)$$

Абсолютна похибка округлення в цьому випадку дорівнює:

$$A_0 = a - \tilde{a} = \pm 2^p \left( \frac{a_{t+1}}{2^{t+1}} + \frac{a_{t+2}}{2^{t+2}} + \dots \right). \quad (5.59)$$

Найбільша похибка буде у випадку  $a_{t+1} = 1$ ,  $a_{t+2} = 1$ , і т.д., тоді:

$$\Delta_0 = |a - \tilde{a}| \leq \pm 2^p \frac{1}{2^{t+1}} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots \right), \quad (5.60)$$

але тому що вираження в дужках прагне до 2, то одержимо:

$$\Delta_0 = |a - \tilde{a}| \leq 2^{p-t}. \quad (5.61)$$

Розглянемо, чому дорівнює похибка округлення при обчисленні фізичних величин по деяких розповсюджених алгоритмах ЦОС.

Очевидно, що похибка округлення є випадковою похибкою, розподіленої по рівновероятному законі. Тому доцільно для розрахунку похибки округлення застосовувати ті ж формули, що й для розрахунку похибки квантування. Припускаючи рівномірний закон розподілу похибки, дисперсію можна брати рівної  $D[\xi] = \frac{\Delta_0^2}{12}$ , а математичне очікування буде

$$\text{дорівнює } M[\xi] = \frac{\Delta_0}{2}.$$

Помітимо, що фактично похибка округлення має сенс ураховувати тільки в тих випадках, коли:

- а) розрядність процесора менше розрядності пристрою збору даних;
- б) формат змінних у програмі, що виконує обчислення, має менша

кількість розрядів, чим пристрій збору даних.

Якщо досліджувана ІСЦПК не задовольняє цим умовам, то враховувати похибка округлення не має змісту.

#### 5.4.6 Динамічна похибка

Розглянемо динамічну похибка для времяимпульсных АЦП. Наявність ненульового часу перетворення приводить до того, що миттєві значення сигналу квантуються в зміщені моменти часу, які залежать від цих значень сигналу. Таким чином, тимчасовий зсув, обумовлений динамічною похибкою датування, є функцією миттєвих значень сигналу.

В [27, 28] отримані вираження для визначення значення динамічної похибки датування для алгоритмів кореляційної й взаємно кореляційної обробки сигналів. Для алгоритму усереднення дана похибка буде дорівнює нулю.

Для алгоритму кореляційної обробки вираження:

$$\Delta Y_{t2} = \Delta Y'_{t2} + \Delta Y''_{t2} = c \frac{k}{2T} \int_0^T x^2(t) \dot{\phi}(t) dt + c^2 \frac{k^2}{6T} \int_0^T x^3(t) \ddot{\phi}(t) dt + O(c^3); \quad (5.62)$$

де  $\Delta Y'_{t2}$ ,  $\Delta Y''_{t2}$  - відповідно величини першого й другого порядку малості.

У випадку квазигармонічного вхідного сигналу й синусоїдального опорного сигналу, можна записати:

$$|\Delta Y'_{t2}| = k(v\omega\Delta t_{max}) A k_z. \quad (5.63)$$

А також:

$$|\Delta Y''_{t2}| \leq \frac{k}{6} (v\omega\Delta t_{max})^2 A. \quad (5.64)$$

Для алгоритму взаємної кореляційної обробки, абсолютна динамічна похибка датування:

$$\Delta Y_{t3} = \Delta Y'_{t3} + \Delta Y''_{t3} = \frac{k}{2T} \int_0^T (c_1 x_1^2 \dot{x}_2 + c_2 x_2^2 \dot{x}_1) dt - \frac{k}{2T} \int_0^T (c_1 x_1 - c_2 x_2) dt. \quad (5.65)$$

Якщо вхідні сигнали близькі до гармонійних, то:

$$|\Delta Y'_{t3}| \leq k(\omega\Delta t_{1max} + \omega\Delta t_{2max})(k_{1z} + k_{2z}) A_1 A_2; \quad (5.66)$$

$$|\Delta Y_{i3}''| \leq \frac{1}{2} k (\omega \Delta t_{1max} + \omega \Delta t_{2max})^2 A_1 A_2. \quad (5.67)$$

Аналізуючи вираження для динамічної складової похибки, можна зробити висновок, що це систематична похибка.

#### 5.4.8 Похибки, обумовлені зовнішніми впливами

На результат вимірювання ИСЦПК впливають наведення й витоку від живильної мережі 50 Гц, а також від інших джерел, наприклад, імпульсних блоків живлення ЕОМ, від шини процесора й т.д. Також можуть впливати зовнішні джерела електромагнітного випромінювання.

Щоб оцінити здатність СИТ уводити показники завадостійкості, згідно з якими складова похибки на виході СИТ, обумовлена перешкодами, нормована щодо перешкоди на його вході [27, 28].

У цифровій вимірювальній техніці показником завадостійкості звичайно є ступінь придушення перешкод на виході цифрових вимірювальних приладів щодо входу, що характеризується відношенням миттєвих значень електрорушійних сил, наведених перешкодами до й після обробки сигналів. Цей показник визначає миттєву завадостійкість і в процесі обробки сигналу може змінюватися. Тому більше об'єктивним є показник, що ґрунтується на інтенсивності перешкоди, усередненої за час обробки (вимірювання). За допомогою такого показника в [27, 28] отримані оцінки похибок ИСЦПК, обумовлених перешкодами, для всіх основних алгоритмів ЦОС.

Уведемо дисперсію алгоритмічної функції, обумовлену впливом перешкод у момент часу  $t_q$ ,

$$D[f_q] = \langle (f_q - M[f_q])^2 \rangle, \quad (5.68)$$

де  $M[f_q]$  - матожидание алгоритмічної функції  $f_q$ .

Як усереднена оцінка інтенсивності перешкоди на вході ИС виберемо значення середньої дисперсії за час ЦОС (або за час вимірювання):

$$D_0 = \frac{k}{m^2} \sum_{q=1}^m D[f_q]; \quad (5.69)$$

А як показник, що характеризує ступінь ослаблення перешкоди при проходженні через ИСЦПК, візьмемо відношення дисперсії результату вимірювання  $D[Y_\xi]$ , обумовленої впливом перешкоди, до величини  $D_0$ :

$$\rho = \frac{D[Y_\xi]}{D_0}. \quad (5.70)$$

Дана величина називається коефіцієнтом помеховосприимчивости, що є зворотною величиною від коефіцієнта завадостійкості.

Дисперсію  $D_0$  виражаємо через алгоритмічну функцію  $f_q$ :

$$D_0 = \frac{k^2}{m} \sum_{q=1}^m \sum_{i,r} R_{q,q}^{i,r} \frac{\partial f_q}{\partial \xi_{q,i}} \frac{\partial f_q}{\partial \xi_{q,r}}. \quad (5.71)$$

Коефіцієнт помеховосприимчивости однозначно визначає абсолютної й відносне СКЗ похибки, обумовленої перешкодами:

$$D[Y_\xi] = \rho D_0; \quad \delta_\xi = \sqrt{\rho} \delta_0;$$

де  $\delta_0 = \frac{\sqrt{D_0}}{Y}$  - відносне СКЗ перешкоди на вході ИСЦПК.

Дисперсію можна обчислити для всіх алгоритмів зі співвідношення (5.89).

Приведемо оцінки дисперсії  $D_0$  для кожного з алгоритмів у випадку стаціонарної перешкоди.

1. Алгоритм усереднення:

$$D_0 = k^2 \sigma_\xi^2; \quad (5.72)$$

де  $\sigma_\xi^2$  - дисперсія перешкоди у вхідному сигналі.

2. Алгоритм кореляційної обробки сигналів:

$$D_0 = \frac{k^2 \sigma_\xi^2}{2}; \quad (5.73)$$

3. Алгоритм взаємно кореляційної обробки сигналів:

$$D_0 = k^2 \left[ \sigma_{1\xi}^2 X_2^2 + \sigma_{2\xi}^2 X_1^2 + \frac{2}{k} \sigma_{1\xi} \sigma_{2\xi} r_{12}(\tau) Y \right]; \quad (5.74)$$

де  $\sigma_{1\xi}^2, \sigma_{2\xi}^2$  - дисперсії перешкод у сигналах  $x_1(t), x_2(t)$  відповідно;

$r_{12}(\tau)$  - коефіцієнт взаємної кореляції перешкод у сигналах.

4. Алгоритм автокорреляційної обробки сигналів:

$$D_0 = 2k^2 \sigma_\xi^2 \left[ X^2 + \frac{1}{k} r(\tau) Y \right]; \quad (5.75)$$

де  $r(\tau) = \frac{R(\tau)}{\sigma_\xi^2}$  - коефіцієнт кореляції перешкоди в сигналі  $x(t)$ .

Зокрема, при  $\tau = 0$  маємо  $r(\tau) = 1, Y = kX^2, D_0 = 4k^2 \sigma_\xi^2 X^2$ .

Приймаючи допущення про те, що інтервал кореляції перешкоди малий у порівнянні з інтервалом дискретизації алгоритмічної функції, в [27, 28] був розрахований коефіцієнт помеховосприимчивості:

$$\rho = \frac{1}{m}. \quad (5.76)$$

Тоді, виходячи з вираження (3.48) дисперсію результату вимірювання можна визначити як:

$$D[Y_\xi] = \rho \cdot D_0. \quad (5.77)$$

Очевидно, що дана складова похибки є випадковою.

#### 5.4.9 Похибки, обумовлені недосконалістю характеристик АЦП.

У більшості застосувань АЦП використовують для вимірювання повільно змінюється, низькочастотного сигналу (наприклад, від датчика температури, тиску, від тензодатчика й т.п.), коли вхідна напруга пропорційно щодо постійній фізичній величині. Тут основну роль грає статична похибка вимірювання. У специфікації АЦП цей тип похибки визначають аддитивна похибка (щопозначається іноді в закордонній літературі як Offset), мультиплікативна похибка (у закордонній літературі Full-Scale), диференціальна нелінійність, інтегральна нелінійність і похибка квантування. Ці п'ять характеристик дозволяють повністю

описати статичну похибка АЦП.

Також має місце похибка коефіцієнта перетворення, викликана зміною коефіцієнта підсилення вхідних підсилювачів на інструментальному пристрої збору даних.

Інтегральна нелінійність - це похибка, що викликається відхиленням лінійної функції передатної характеристики АЦП від прямої лінії. Звичайно передатна функція з інтегральною нелінійністю апроксимується прямою лінією по методу найменших квадратів. Часто апроксимуючої прямої просто з'єднують найменше й найбільше значення. Інтегральну нелінійність визначають шляхом порівняння напруг, при яких відбуваються кодові переходи. Для ідеального АЦП ці переходи будуть відбуватися при значеннях вхідної напруги, точно кратних значенню молодшого розряду. А для реального перетворювача така умова може виконуватися з похибкою. Різниця між "ідеальними" рівнями напруги, при яких відбувається кодовий перехід, і їхніми реальними значеннями виражається в одиницях молодшого розряду й називається інтегральною нелінійністю.

Відхилення функції перетворення від прямої лінії свідчить про наявність нелінійності. Для безперервних залежностей функції перетворення нелінійність найчастіше характеризується максимальним відхиленням.

Для того щоб оцінити вплив інтегральної нелінійності на результат вимірювання за допомогою ЦОС, приймемо наступні допущення: відхилення від ідеальної функції перетворення мають місце в обидва боки від її, значення відхилень функції перетворення усередині діапазону вимірювання розподілені по рівновероятному законі.

Тоді математичне очікування похибки, викликаной наявністю інтегральної нелінійності, буде дорівнює нулю, а дисперсія буде дорівнює:

$$D[\xi] = \frac{\Delta_{\text{ИНЛ}}^2}{3}, \quad (5.78)$$

де  $\Delta_{\text{ИНЛ}}$  - максимальне відхилення функції перетворення від реальної.

Далі необхідно застосовувати формули, які використовуються для розрахунку похибки квантування.

Таким чином, очевидно, що похибка, викликана наявністю інтегральної нелінійності, є випадковою похибкою.

5.4.10 Дослідження впливу похибки коефіцієнта перетворення на результат вимірювань.

Допустимо, значення напруги сигналу в  $i$ -е моменти дискретизації дорівнює  $f_i$ . Відповідно до уведеного раніше позначенням, коефіцієнт перетворення дорівнює  $k$ . При наявності похибки коефіцієнта перетворення, рівної  $\delta_k$  (у відносному виді), реальний коефіцієнт перетворення буде дорівнює  $k(1 \pm \delta_k)$ . Таким чином, обмірюване значення буде дорівнює  $k(1 + \delta_k)f_i$ .

Визначимо вираження для розрахунку похибки, викликаной відхиленням коефіцієнта перетворення, для різних алгоритмів ЦОС.

Для алгоритму усереднення похибка буде дорівнює нулю.

Для одержання вираження для алгоритму обчислення СКЗ скористаємося методикою, що вже була неодноразово використана раніше. Запишемо:

$$\Delta Y_{\text{ex.ys.}} = \sqrt{\frac{k^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt} - \sqrt{\frac{k^2(1 \pm \delta_k)^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt}; \quad (5.79)$$

Робимо додавання й вирахування під другим коренем:

$$\frac{k^2(1 \pm \delta_k)^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt - \frac{k^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt + \frac{k^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt; \quad (5.80)$$

Розглянь перші два доданки.

$$\frac{k^2(1 \pm \delta_k)^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt - \frac{k^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt = \frac{k^2(\pm 2\delta_k + \delta_k^2)}{T} \int_0^T f^2(t) dt. \quad (5.81)$$

У такий спосіб:

$$\Delta Y_{\text{ex.ys.}} = \sqrt{\frac{k^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt} - \sqrt{\frac{k^2(\pm 2\delta_k + \delta_k^2)}{T} \int_0^T f^2(t) dt + \frac{k^2}{T} \int_0^T f^2(t) dt}. \quad (5.82)$$

Або:

$$\Delta Y_{\text{ex.ys.}} = Y - \sqrt{\frac{k^2(\pm 2\delta_k + \delta_k^2)}{T} \int_0^T f^2(t) dt + Y^2}, \quad (5.83)$$

де  $Y$  - щире значення СКЗ.

Графік залежності похибки, викликаной зміною коефіцієнта перетворення від значення похибки коефіцієнта перетворення наведений на рис.5.18.

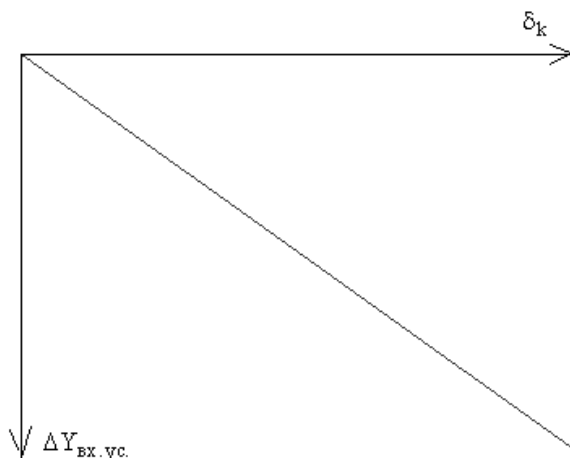


Рисунок 5.18 - Залежність похибки, викликаной зміною коефіцієнта перетворення від значення похибки коефіцієнта перетворення

Аналіз даного графіка дозволяє зробити висновок про те, що модуль похибки, викликаной зміною коефіцієнта перетворення, прямо пропорційний значенню похибки коефіцієнта перетворення.

Аналізуючи вираження для похибки, викликаной зміною коефіцієнта перетворення, можна зробити висновок, що дана складова є систематичною похибкою.

#### 5.4.11 Модель похибки, викликаной мультиплексуванням сигналів

Також отримані вираження для визначення абсолютної похибки, викликаной зрушенням при мультиплексуванні (актуально при вимірюванні, наприклад, потужності). По визначенню, похибка мультиплексування:

$$\Delta Y_{mix} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)[g(t) - g(t + \Delta t)]dt. \quad (5.84)$$

Для одержання конкретного приклада допустимо, що напруга й струм досліджуваного сигналу є найпростішими гармонійними сигналами й описуються формулами:

$$u(t) = A \cdot \cos(\omega t); \quad (5.85)$$

$$i(t) = B \cdot \cos(\omega t + \varphi), \quad (5.86)$$

де  $A$  й  $B$  - відповідно амплітуди сигналів напруги й токи.

Вираження для абсолютної похибки прийме вид:

$$\Delta Y_{mix} = A \cdot B \cdot \sin \frac{\Delta t}{2} \cdot \sin \left( \varphi + \frac{\Delta t}{2} \right), \quad (5.87)$$

де  $\Delta t$  - часове зрушення мультиплексування.

Таким чином, дана формула показує, що похибка мультиплексування не залежить від числа крапок дискретизації й від періоду вимірюваного сигналу, а залежить тільки від тимчасового зрушення мультиплексування. Графік залежності абсолютної похибки мультиплексування від зрушення

наведений на рисунку 5.19.

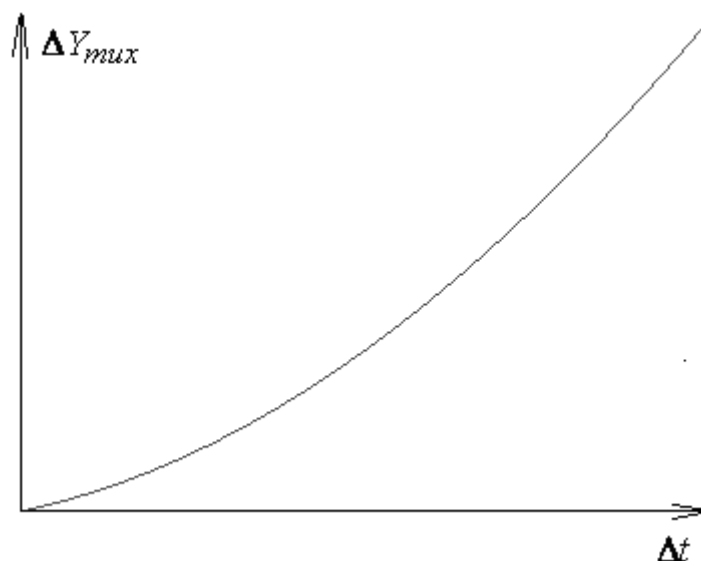


Рисунок 5.19 - Залежність похибки мультиплексування від значення тимчасового зрушення

Графік залежності абсолютної похибки мультиплексування від значення вимірюваної фізичної величини (ФВ) наведений на малюнку 5.20.

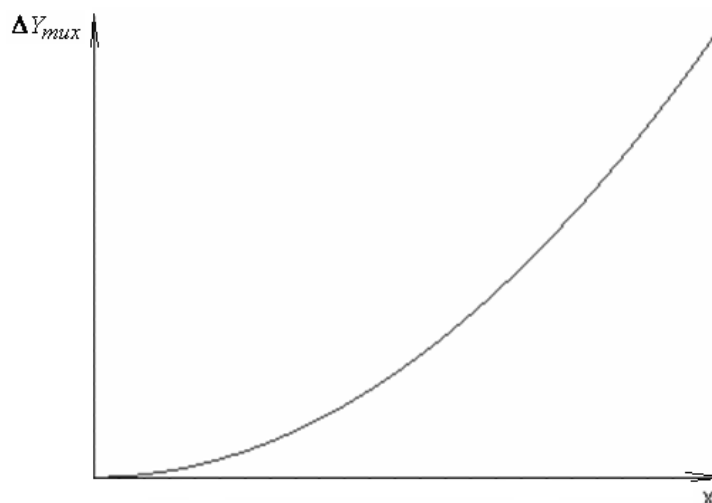


Рисунок 5.20 - Залежність похибки мультиплексування від значення вимірюваної фізичної величини

Аналізуючи вираження для похибки (3.84), викликані зрушенням сигналів при мультиплексуванні, можна зробити висновок, що дана складова є систематичною.

Кількісна оцінка даної складової показує, що значення похибки мультиплексування може лежати у межах 0,001% - 0,015%.

5.4.12 Методика підсумовування складові похибки для вимірювального сигналу, представленого напругою змінного струму

На підставі теорії похибок [75-79] розроблена методика підсумовування складових інструментальної похибки ИСЦПК. Дана методика дозволяє визначити сумарну інструментальну похибку ИСЦПК при наявності інформації про:

- технічних характеристиках ИСЦПК;
- параметрах вимірюваного сигналу;
- умовах роботи ИСЦПК;
- алгоритмі роботи ИСЦПК.

Запропонована в роботі методика підсумовування складові похибки передбачає виконання наступних операцій.

1. Підготовка вихідних даних, до яких ставляться:

- СКЗ перешкоди  $\sigma_{\xi}$ , отримане експериментальним шляхом;
- похибка диференціального підсилювача модуля АЦП  $\Delta_{к ус}$ , дані про значення якого наведені в технічній документації на модуль АЦП;
- інтегральна нелінійність в абсолютному або відносному виді, значення якої наведене в технічній документації на модуль АЦП;
- інтервал дискретизації  $\Delta t$ , що залежить від часу перетворення (наведеного в технічній документації на модуль АЦП) і від алгоритму роботи програми;
- період сигналу  $T$ ;
- коефіцієнт гармонік сигналу, встановлюється експериментальним шляхом за допомогою вимірника нелінійних переключувань;

- значення кванта  $q$ ;
- $p$  - розрядність змінних, застосовуваних для операцій з отсчётами;
- $\Delta t'$  - час перетворення (зазначено в технічній документації на модуль АЦП);
- границі довірчого інтервалу рекомендується обчислювати для ймовірності 0,9, оскільки довірчий коефіцієнт  $t_p$  для найпоширеніших випадків законів розподілу (наприклад, нормального, рівновероятного) близький до 1,6;
- прийняття допущення про некоррелированности складової похибки ИСЦПК. Дане допущення правомірно, оскільки складові інструментальної похибки ИСЦПК обумовлені різними й не зв'язаними між собою причинами.

За допомогою виражень, наведених у пункті 3.2. здійснити обчислення всіх складових інструментальної похибки ИСЦПК.

2. Підсумовування СКЗ випадкових складові похибки. Оскільки всі складові є некоррелированными, то підсумовування СКЗ можна здійснити згідно [75, 76] по формулі

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{некр}^2 + \sigma_{кв}^2 + \sigma_{окр}^2 + \sigma_{\xi}^2 + \sigma_{инл}^2} . \quad (5.88)$$

Таким чином, довірчий інтервал похибки ИСЦПК:

$$\varepsilon = t_p \cdot \sigma_{\Sigma} . \quad (5.89)$$

3. Підсумовування систематичних складові похибки алгебраїчно, оскільки вони є детермінованими:

$$\Delta_{сист} = \Delta_{НЕКР} + \Delta_{дискр} + \Delta_{окр} + \Delta_{дин} + \Delta_{к ус} + \Delta_{тих} + \Delta_{\partial} . \quad (5.90)$$

4. Одержання значення результуючого СКЗ інструментальної похибки ИСЦПК по формулі:

$$\sigma_{ИСЦПК} = \sqrt{\frac{\Delta_{сист}^2}{3} + \sigma_{\Sigma}^2} . \quad (5.91)$$

5. Одержання інтервальної оцінки інструментальної похибки ИСЦПК по формулі:

$$\Delta_{\text{ИСЦПК}} = t_p \cdot \sigma_{\text{ИСЦПК}}. \quad (5.92)$$

Значення похибки, отриманої в результаті розрахунку по формулі (3.92), є «оцінкою зверху», тобто, оцінкою для найбільш несприятливого сполучення всіх факторів, що впливають.

Як показують розрахунки за допомогою формул (5.88 - 5.92), при використанні в ИСЦПК модуля АЦП SDI-ADC16-16, технічні характеристики якого наведені в додатку В, у режимі без посилення похибка ядра ИСЦПК буде перебувати в інтервалі 0,2 % - 1 %, у режимі з посиленням 10 в інтервалі 1 % - 1,8 %, у режимі з посиленням 100 в інтервалі 2 % - 2,5 %, у режимі з посиленням 1000 в інтервалі 3,5-4 %.

#### 5.4.13 Аналіз математичних моделей похибки для вимірювального сигналу, представленого напругою постійного струму

Розглянемо випадок, коли вимірювана величина представлена електричним сигналом у вигляді напруги постійного струму.

Для того щоб показати, яким образом наявність обчислювального компонента в складі вимірювального ланцюга впливає на сумарну інструментальну похибка, розглянемо структурну схему ИСЦПК, наведену на рис. 5.21. У загальному випадку ИСЦПК складається із трьох функціональних блоків: аналогової частини, АЦП і ВК.

У випадку, коли вимірювальна інформація представлена електричним сигналом постійного струму, модель похибки істотно спрощується.

Розглянемо послідовність появи складових інструментальної похибки ИСЦПК у міру того, як вимірювальна інформація проходить по вимірювальному каналі.

Перетворення вимірювального сигналу в аналоговій частині приводить до виникнення таких складових:

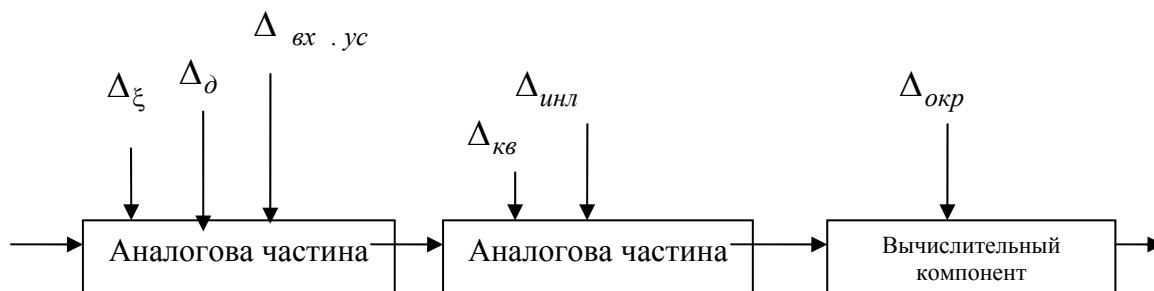


Рисунок 5.21 - Схема виникнення похибок при вимірюванні на постійному струмі

1)  $\Delta_{\xi}$  - похибка, викликана впливом шумів, що накладають на сигнал, і перешкод (від зовнішніх джерел, від вузлів електроживлення ПРК і т.д.);

2)  $\Delta_{вх.ус}$  - похибка, викликана зміною коефіцієнта підсилення вхідного диференціального підсилювача, що входить до складу плати збору даних;

3)  $\Delta_{\delta}$  - додаткова похибка.

При дискретизації й квантуванні сигналу з'являються такі складові:

1)  $\Delta_{кв}$  - похибка квантування, обумовлена виконанням аналогово-цифровим перетворювачем операції квантування;

2)  $\Delta_{инл}$  - похибка, викликана відхиленням характеристик АЦП від ідеальних, наприклад, інтегральною нелінійністю;

На етапі реалізації обчислювальних алгоритмів виникають наступні складові:

1)  $\Delta_{окр}$  - похибка округлення, обумовлена кінцівкою розрядної сітки процесора ЕОМ.

5.4.13 Аналітичні вираження для опису складові похибки для вимірювального сигналу, представленого напругою постійного струму.

### 1) Вплив похибки коефіцієнта перетворення на результат вимірювання.

Припустимо, що значення напруги сигналу в  $i$ -е моменти дискретизації дорівнює  $f_i$ . Відповідно до уведеного раніше позначенням, коефіцієнт перетворення дорівнює  $k$ . При наявності похибки коефіцієнта перетворення, рівної  $\delta_k$  (у відносному виді), реальний коефіцієнт перетворення буде дорівнює  $k(1 \pm \delta_k)$ . Таким чином, обмірюване значення буде дорівнює  $k(1 + \delta_k)f_i$ . У такому випадку, похибка одиничного відліку буде дорівнює  $f_i - k(1 + \delta_k)f_i = f_i[1 - k(1 + \delta_k)]$ . При реалізації алгоритму простого згладжування вираження для похибки вимірювання ряду з  $n$  отсчётов буде:

$$\Delta_{\text{ex.yc}} = \bar{Y}[1 - k(1 + \delta_k)], \quad (5.93)$$

де  $\bar{Y}$  - середнє арифметичне ряду (1.2).

Очевидно, що дана складова похибки є систематичної прогресивної, оскільки вона лінійно залежить від амплітуди вимірюваного сигналу.

### 2) Вплив похибки квантування на результат вимірювання.

Згідно [27, 28], математичне очікування похибки квантування, за умови, що остача від ділення числа  $x$  (миттєве значення квантуемого сигналу) на значення кванта  $q$  розподілений за рівномірним законом,

дорівнює  $M = -\frac{q}{2}$ , а дисперсія похибки квантування буде дорівнює

$D = \frac{q^2}{12}$ . Максимальне значення похибки квантування одиничного відліку

дорівнює величині кванта  $q$ .

Очевидно, що дана похибка є випадкової, закон розподілу – равновероятный. Среднеквадратичне значення похибки квантування

$$\sigma_{\text{кв}} = \frac{q}{2\sqrt{3}}.$$

### 3) Вплив похибки округлення на результат вимірювання.

Відповідно до пункту 3.2. 4., припускаючи рівномірний закон розподілу похибки, дисперсію можна брати рівної  $D[\xi] = \frac{\Delta_0^2}{12}$ , а математичне очікування буде дорівнює  $M[\xi] = \frac{\Delta_0}{2}$ .

Таким чином, похибка округлення вносить вклад і у випадкову складову, і в систематичну.

#### 4) Вплив інтегральної нелінійності на результат вимірювання.

Для того щоб оцінити вплив інтегральної нелінійності на результат вимірювання за допомогою ЦОС, приймемо, як і у випадку зі змінним струмом, що впливають допущення: відхилення від ідеальної функції перетворення мають місце в обидва боки від її, значення відхилень функції перетворення усередині діапазону вимірювання розподілені по рівновероятному законі. Тоді дисперсію результату вимірювання необхідно розраховувати, користуючись формулою (3.78).

### 5) Вплив перешкод на результат вимірювання.

Випадкова складова похибки, викликаной впливом перешкод на результат вимірювання, буде визначатися СКВ перешкоди  $\sigma_{\xi}$ .

5.4.14 Методика підсумовування складові похибки для вимірювального сигналу, представленого напругою постійного струму

На підставі теорії похибок [75, 76] розроблена методика підсумовування складових інструментальної похибки ИСЦПК для вимірювального сигналу, представленого напругою постійного струму. Дана методика дозволяє визначити сумарну інструментальну похибка ИСЦПК при наявності інформації про технічні характеристики ИСЦПК, параметрах вимірюваного сигналу, умовах роботи ИСЦПК, алгоритмі роботи ИСЦПК.

Запропонована методика підсумовування складові похибки передбачає виконання наступних операцій.

1. Підготовка вихідних даних, до яких ставляться:

- СКВ перешкоди  $\sigma_{\xi}$ , отримане експериментальним шляхом;
- похибка диференціального підсилювача модуля АЦП  $\Delta_{к\text{ус}}$ , узятє з технічної документації на модуль АЦП;
- інтегральна нелінійність в абсолютному або відносному виді, узята з технічної документації на модуль АЦП;
- величина кванта  $q$ ;
- $p$  - розрядність змінних, застосовуваних для операцій з отсчётами;
- границі довірчого інтервалу рекомендується обчислювати для ймовірності 0,9, оскільки довірчий коефіцієнт  $t_p$  для найпоширеніших випадків законів розподілу (наприклад, нормального, рівновероятного) близький до 1,6;
- прийняття допущення про некоррелированности складової похибки ИСЦПК. Дане допущення правомірно, оскільки складові інструментальної похибки ИСЦПК обумовлені різними й не зв'язаними між собою

причинами.

За допомогою виражень, наведених у пункті 2.3 здійснити обчислення всіх складових інструментальної похибки ИСЦПК.

2. Підсумовування випадкових складові похибки. Оскільки всі складові є некоррелированными, то підсумовування СКВ можна здійснити згідно [77, 78] по формулі:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{кв}^2 + \sigma_{окр}^2 + \sigma_{\xi}^2 + \sigma_{инл}^2} . \quad (5.94)$$

Таким чином, довірчий інтервал:

$$\varepsilon = t_p \cdot \sigma_{\Sigma} . \quad (5.95)$$

3. Підсумовування систематичних складові похибки алгебраїчно:

$$\Delta_{сист} = \Delta_{окр} + \Delta_{к ус} + \Delta_{\partial} . \quad (5.96)$$

4. Одержання значення результуючого СКВ інструментальної похибки ИСЦПК по формулі:

$$\sigma_{ИСЦПК} = \sqrt{\frac{\Delta_{сист}^2}{3} + \sigma_{\Sigma}^2} . \quad (5.97)$$

5. Одержання інтервальної оцінки інструментальної похибки ИСЦПК по формулі:

$$\Delta_{ИСЦПК} = t_p \cdot \sigma_{ИСЦПК} . \quad (5.98)$$

Значення похибки, отриманої в результаті розрахунку по формулі (5.98), є «оцінкою зверху».

Як показують розрахунки за допомогою формул (5.94 - 5.98), при використанні в ИСЦПК модуля АЦП SDI-ADC16-16, технічні характеристики якого наведені в додатку В, у режимі без посилення складова інструментальної похибки ИСЦПК, обумовлена характеристиками ядра, буде перебувати в інтервалі 0,05% - 0,4%, у режимі з посиленням 10 в інтервалі 0,5 - 1,2 %, у режимі з посиленням 100 в інтервалі 1,4 % - 2 %, у режимі з посиленням 1000 в інтервалі 2,4 % - 3 %.

#### 4.6 Висновки

У результаті виконання проекту розроблено способи використання вітрогенераторів широкими колами споживачів, конструкційні рішення відбору потужності руху повітряних мас, їх використання у виробництві та побуті, принципи користування устаткуванням різних потужностей в побуті та виробництві, а також для індивідуальних та колективних користувачів; структурну схему системи отримання, зберігання та використання водню у виробництві та побуті, а також виконано роботи по створенню окремих вузлів системи.

Виконано роботи з метрологічного забезпечення системи звиробництва та використання альтернативної енергії: розроблено вимірювальну систему з контролю параметрів роботи аерогідродинамічного двигуна на базі сучасної технології збору та обробки інформації LabVIEW NI. Систематизовано інформацію про похибки, що виникають у результаті впливу зовнішніх факторів, таких як шуми, перешкоди, наведення й т.п. Розроблено вдосконалений математичний апарат для оцінки метрологічних характеристик. Виконано дослідження, пов'язані з удосконалюванням методології метрологічного забезпечення вимірювальної системи для контролю параметрів системи з виробництва альтернативної енергії.

## **5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОНІТОРИНГ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

### **5.1. Аналіз нормативної документації з вимірювання енергетичних параметрів електромагнітних полів та оцінювання невизначеності вимірювань**

#### **5.1.1. Огляд міжнародних та європейських документів з вимірювань параметрів ЕМС**

На міжнародному рівні створенням нормативних документів в області ЕМС займаються Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) і Міжнародна електротехнічна комісія (IEC). ITU приймає міжнародні норми й договори, контролює використання земного спектра частот, розробляє рекомендації в області управління радіочастотним спектром. Основним документом, що визначає порядок керування використанням радіочастотного спектра, є Регламент радіозв'язку ITU, що містить міжнародну таблицю розподілу радіочастот. ITU включає три основних сектори – ITU-R (сектор радіозв'язку), ITU-T (сектор стандартизації електрозв'язку) і ITU-D (сектор розвитку електрозв'язку).

До складу IEC входять два комітети, які повністю займаються питаннями електромагнітної сумісності (ТС 77 «Електромагнітна сумісність устаткування, включаючи електричні мережі» і Міжнародний спеціальний комітет з радіоперешкод – CISPR), і близько 40 технічних комітетів, які частково вирішують питання ЕМС. Технічний комітет IEC ТС 77 складається з підкомітетів SC 77A «Низькочастотні електромагнітні явища», SC 77B «Високочастотні електромагнітні явища» і SC 77C «Перехідні електромагнітні явища великої енергії». Основним результатом діяльності ТС 77 на сьогодні є публікації серії IEC 61000 «Електромагнітна сумісність», що включають загальні питання ЕМС, термінологію, визначення (Частина 1), класифікацію й опис електромагнітної обстановки (Частина 2), норми перешкодоемісії й вимоги до перешкодостійкості устаткування

(Частина 3), методи випробувань і вимірювання (Частина 4), настанову з установки обладнання й пригніченню перешкод (Частина 5). У публікаціях CISPR розглядаються норми й методи вимірювань характеристик радіоперешкод, створюваних виробами, що є їхніми потенційними джерелами: промисловими, науковими, медичними радіочастотними пристроями, повітряними лініями, автотранспортними засобами, радіомовними приймачами, побутовими електроприладами, обладнанням інформаційних технологій. Ці публікації являють собою комплект документів, що доповнюють серію публікацій IEC 61000.

На європейському рівні розглянутими питаннями займаються Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI) і Європейський комітет зі стандартизації в області електротехніки (CENELEC).

Технічний комітет ETSI TC ERM (EMC і питання радіочастотного спектра) відповідає за розробку стандартів по EMC для обладнання телекомунікаційних мереж (крім абонентського обладнання), для обладнання радіозв'язку, а також для радіомовних передавачів.

В складі CENELEC діє технічний комітет TC 210 «Електромагнітна сумісність» і ряд технічних комітетів, підкомітетів і робочих груп, які також вирішують питання EMC. CENELEC розробляє європейські норми, що забезпечують застосування Директиви EMC [2].

Директива EMC 2004/108/ЄС є основним законодавчим документом по EMC, що прийнятий у країнах-членах Євросоюзу. Істотні вимоги Директиви полягають у тім, що апарати повинні бути виготовлені таким чином, щоб створювані ними електромагнітні перешкоди не перевищували рівня, що забезпечує функціонування обладнання, і апарати повинні мати достатній рівень стійкості до електромагнітних перешкод, що дозволяє їм функціонувати відповідно до призначення. Детальні технічні вимоги

встановлюються стандартами, які розробляються європейськими органами зі стандартизації.

Директива ЕМС є однією з 21 Директив т.зв. Нового й Глобального підходів Європейського Союзу, у яких сформована система гармонізації вимог стосовно безпеки продукції. Новий підхід передбачає в основному створення єдиної загальноєвропейської нормативної бази, що визначає вимоги до продукції. Його основні принципи полягають в наступному:

- у директивах на продукцію задаються обов'язкові для виконання істотні вимоги (essential requirements) безпеки;
- завдання встановлення конкретних значень характеристик продукції покладає на європейські стандарти, а в перехідний період - на національні стандарти;
- стандарти зберігають свій добровільний статус;
- продукція, випущена відповідно до гармонізованого (з директивою) стандартами, розглядається як така, що відповідає істотним вимогам даної директиви (принцип презумпції відповідності);
- факт відповідності гармонізованим стандартам, підтверджений певним способом (процедурою), є реалізацією принципу презумпції відповідності;
- якщо виробник продукції не бажає використовувати гармонізований стандарт або такий стандарт не існує, він повинен довести, що його продукція, відповідає істотним вимогам директиви, як правило, за допомогою третьої сторони (уповноваженого органа).

Глобальний підхід по суті визначає основи процедур і умов обов'язкового підтвердження відповідності продукції.

Таким чином, принцип презумпції відповідності є головним принципом процедур оцінки відповідності, прийнятих у країнах ЄС, відповідно до якого поки не доведено протилежне, виробник у юридично

обов'язковій формі (у формі декларації про відповідність) заявляє, що його продукція відповідає одному або декільком гармонізованим стандартам [3].

Як і до будь-якої іншої директиви Нового й Глобального підходів, до Директиви ЕМС 2004/108/ЄС розроблений Перелік стандартів, відповідність вимогам яких є доказом відповідності продукції вимогам Директиви ЕМС. У табл. 1.1 наведений перелік стандартів до Директиви ЕМС 2004/108/ЄС, що охоплює погоджену номенклатуру продукції.

Таблиця 5.1 - Нормативні документи на основну номенклатуру продукції Директиви ЕМС 2004/108/ ЄС

| Основна номенклатура продукції                                                                                            | Стандарти, що забезпечують виконання вимог ЕМС |                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                           | завадоемісія                                   | завадостійкість                                              |
| 1. Електропобутове й аналогічне обладнання й комплектувальні вироби                                                       | EN 55014-1:2006                                | EN 55014-2:1997                                              |
| 2. Світлотехнічна продукція                                                                                               | EN 55015:2006                                  | EN 61547:2009                                                |
| 3. Радіоелектронна побутова апаратура (телевізійні приймачі, звукова апаратура)                                           | EN 55013:2001                                  | EN 55020:2007                                                |
| 4. Професійна аудіо-, відео-, аудіовізуальна апаратура й апаратура керування світловими приладами для видовищних заходів. | EN 55103-1:2009                                | EN 55103-2:2009                                              |
| 5. Обладнання для інформаційних технологій                                                                                | EN 55022:2006                                  | EN 55024:1998                                                |
| 6. Обладнання для передачі сигналів у низьковольтних електричних мережах                                                  | EN 50065-1:2001                                | EN 50065-2-1:2003<br>EN 50065-2-2:2003<br>EN 50065-2-3 :2003 |

| Основна номенклатура<br>продукції                                                            | Стандарти, що забезпечують<br>виконання вимог ЕМС  |                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------|
|                                                                                              | завадоемісія                                       | завадостійкість |
| 7. Устаткування промислове,<br>наукове й медичне радіочастотне                               | EN 55011:2009                                      |                 |
| 8. Електричні лічильники, реле<br>часу для тарифікації й<br>регулювання навантаження         | EN 62052-11:2003<br>EN 62052-21:2004               |                 |
| 9. Морське радіонавігаційне<br>обладнання                                                    | EN 60945:2002                                      |                 |
| 10. Регулятори автоматичні<br>електричні побутового й<br>аналогічного призначення            | EN 60730-1:2000<br>серії стандарту<br>EN 60730-2-X |                 |
| 11. Вимикачі для побутових і<br>аналогічних стаціонарних<br>електричних установок            | EN 60669-2-1:2004                                  |                 |
| 12. Програмувальні контролери                                                                | EN 61131-2:2007                                    |                 |
| 13. Низьковольтна комутаційна<br>апаратура й апаратура керування                             | EN 60947-1:2007<br>серії стандартів<br>EN 60947-X  |                 |
| 14. Системи сигналізації                                                                     | EN 50130-4:1995                                    |                 |
| 15. Системи безперебійного<br>живлення                                                       | EN 62040-2:2006                                    |                 |
| 16. Устаткування електродугового<br>зварювання                                               | EN 60974-10:2007                                   |                 |
| 17. Керовані залишковим струмом<br>пристрої захисту побутового й<br>аналогічного призначення | EN 61543:1995                                      |                 |
| 18. Системи силового                                                                         | EN 61800-3:2004                                    |                 |

| Основна номенклатура<br>продукції                                                                                         | Стандарти, що забезпечують<br>виконання вимог ЕМС                                    |                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                           | завадоемісія                                                                         | завадостійкість                                                                 |
| електропривода з регульованою<br>швидкістю                                                                                | EN 61326-1:2006<br>серії EN 61326-<br>2-X                                            | EN 61326-1:2006<br>серії EN 61326-2-X<br>EN 61326-3-1:2008<br>EN 61326-3-2:2008 |
| 20. Засоби проводового зв'язку                                                                                            | серії стандартів<br>ETSI EN 300 386 V1.X.X                                           |                                                                                 |
| 21. Устаткування, що попадає під<br>дію Директиви ЕМС 2004/108/ЄС,<br>на яке немає спеціального<br>стандарту на продукцію | EN 61000-6-1:2007    EN 61000-6-<br>2:2005<br>EN 61000-6-3:2007    EN 61000-6-4:2007 |                                                                                 |

Примітка: у випадку, коли в стандарті вказуються випробування як на завадоемісію, так і на завадостійкість або коли розглядається тільки один з видів випробувань, осередки об'єднані

При цьому необхідно відзначити, що Директива 2004/108/ЄС не поширюється на радіоустаткування й термінальне обладнання зв'язку, тому що вимоги до зазначеного обладнання регламентується Директивою 1999/5/ЄС Європарламенту й Ради від 9 березня 1999 з радіоустаткування й термінального обладнання зв'язку й взаємного визнання їх відповідності.

Також Директива ЕМС не поширюється на авіаційне обладнання та таке, що встановлюється на літальні апарати (вимоги до зазначеного обладнання регламентуються спеціальними міжнародними правилами або правилами ЄС у частині електромагнітної сумісності) і радіоустаткування, що використовується радіоаматорами відповідно до Регламенту радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU), за винятком того випадку, коли обладнання доступно на ринку.

## 5.2. Аналіз стану вітчизняної нормативної та законодавчої бази в області ЕМС

Європейська політика сусідства відкриває для України нові можливості для партнерства, економічної інтеграції й співробітництва, а в перспективі дозволить Україні одержати право повноправного членства в ЄС.

19 травня 2010 р. Кабінетом міністрів України була прийнята постанова № 1070-р «Про затвердження плану першочергових заходів щодо реформування системи технічного регулювання».

Дане розпорядження передбачало затвердити план першочергових заходів щодо реформування системи технічного регулювання, зокрема підготувати проекти законів України «Про державний ринковий нагляд», «Про загальну безпеку продукції», «Про відповідальність постачальника за дефектну продукцію», «Про внесення змін у деякі закони України» і ін., а також забезпечити розробку не менш чим 1500 стандартів, необхідних для впровадження технічних регламентів.

На сьогоднішній день основним законодавчим документом у сфері ЕМС є Технічний регламент з ЕМС обладнання, розроблений на основі Директиви ЕМС 2004/108/ЄС, прийнятий постановою Кабміну України № 785 від 28.07.2009 р.

Застосування Технічного регламенту носить обов'язковий характер для всіх виробників і постачальників апаратури й обладнання.

На сьогоднішній день в Україні призначено понад 20 Органів під Технічний регламент з ЕМС. Якщо прийняти до уваги те, що Технічний Регламент був прийнятий у липні 2009 р., то вони були призначені під старий Технічний регламент. В області акредитації призначених органів в основному існують стандарти з ЕМС із «Переліку продукції, що підлягає обов'язковій сертифікації в Україні», це в основному ГОСТи (наприклад,

ГОСТ 23511-79, ГОСТ 29216-91 і ін.), тоді як гармонізованих національних стандартів мінімум.

Технічний регламент з ЕМС є лише одним з наочних прикладів тієї ситуації, що існує в Україні, коли крім гармонізованих стандартів (ДСТУ EN, ДСТУ ІЕС і ДСТУ CISPR), діють стандарти ранніх редакцій (ДСТУ), міждержавні стандарти (ГОСТ), стандарти, що збереглися від колишнього СРСР (ГОСТ і Норми ГКРЧ). Безумовно, таке різноманіття форм нормативної документації створює певні труднощі для розробників технічних засобів (ТЗ), особливо в тих випадках, коли до ТЗ застосовні різні нормативні документи, що містять неідентичні вимоги [6].

За станом на 2011 р. було розроблено більше 70 національних стандартів, гармонізованих з міжнародними і європейськими стандартами. Активну участь у підготовці проектів національних гармонізованих стандартів прийняли представники НТУУ «КПІ», ТК22 «Електромагнітна сумісність і стійкість радіоелектронних, електронних і електротехнічних засобів», Укрнднц, НВП «Стандарт-Сервіс», ГП ИЦ «ОМЕГА» та ін.

У табл. 1.2 наведені міжнародні, європейські, національні й російські стандарти на основні види випробувань продукції за параметрами ЕМС.

Таблиця 5.2 - Стандарти на основні види випробувань продукції за параметрами ЕМС

| Вид випробувань                                  | Міжнародні і європейські стандарти     | Національні стандарти України | Російські стандарти      |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Параметри завадоємисії:                          |                                        |                               |                          |
| - напруженість поля індустриальних радіоперешкод | CISPR 16-2-3:2010<br>EN 55016-2-3:2010 | ДСТУ CISPR 16-2:2005          | ГОСТ Р 51318.16.2.3-2009 |

| Вид випробувань                                  | Міжнародні і європейські стандарти                             | Національні стандарти України | Російські стандарти                        |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| - потужність індустриальних радіоперешкод        | CISPR 16-2-2:2010<br>EN 55016-2-2:2004<br>FprEN 55016-2-2:2009 | ДСТУ CISPR 16-2:2005          | ГОСТ Р 51318.16.2.2-2009                   |
| - напруга індустриальних радіоперешкод           | CISPR 16-2-1:2008<br>EN 55016-2-1:2009                         | ДСТУ CISPR 16-2:2005          | ГОСТ Р 51318.16.2.1-2008                   |
| - емісія гармонічних складових струму            | IEC 61000-3-2:2009<br>EN 61000-3-2:2006                        | ДСТУ IEC 61000-3-2:2008       | ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (IEC 61000-3-2:2005) |
| - коливання напруги, флуктуації напруги й флікер | IEC 61000-3-3:2008<br>EN 61000-3-3:2008                        | ДСТУ EN 61000-3-3:2004        | ГОСТ Р 51317.3.3-2008 (IEC 61000-3-3-2005) |
| Параметри завадостійкості:                       |                                                                |                               |                                            |
| - до електростатичних розрядів                   | IEC 61000-4-2:2008<br>EN 61000-4-2:2009                        | ДСТУ IEC 61000-4-2:2008       | ГОСТ Р 51317.4.2-99 (IEC 61000-4-2-95)     |
| - до радіочастотного електромагнітного поля      | IEC 61000-4-3:2010<br>EN 61000-4-3:2006                        | ДСТУ IEC 61000-4-3: 2007      | ГОСТ Р 51317.4.3-2006 (IEC 61000-4-3:2006) |
| - до наносекундних                               | IEC 61000-4-4:2004                                             | ДСТУ IEC 61000-4-4: 2008      | ГОСТ Р 51317.4.4-                          |

| Вид випробувань                                                                       | Міжнародні і європейські стандарти        | Національні стандарти України | Російські стандарти                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| імпульсних перешкод                                                                   | EN 61000-4-4: 2004                        |                               | 2007(IEC 61000-4-4:2004)                        |
| - до мікросекундних імпульсних перешкод великої енергії                               | IEC 61000-4-5:2005<br>EN 61000-4-5:2006   | ДСТУ IEC 61000-4-5: 2008      | ГОСТ Р 51317.4.5-99<br>(IEC 61000-4-5-95)       |
| - стійкість до кондуктивних перешкод, наведених радіочастотним електромагнітним полем | IEC 61000-4-6:2008<br>EN 61000-4-6:2009   | ДСТУ IEC 61000-4-6: 2007      | ГОСТ Р 51317.4.6-99<br>(IEC 61000-4-6-96)       |
| - до магнітного поля промислової частоти                                              | IEC 61000-4-8:2009<br>EN 61000-4-8:2010   | ДСТУ 2465-94                  | ГОСТ 50648-94                                   |
| - до коротких змін і провалів напруги мережі електроживлення                          | IEC 61000-4-11:2004<br>EN 61000-4-11:2004 | ДСТУ IEC 61000-4-11: 2007     | ГОСТ Р 51317.4.11-2007<br>(IEC 61000-4-11:2004) |

Наведені національні стандарти в табл. 2 у більшості випадків ідентичні міжнародним і європейським, тобто перекладені на українську мову з повною відповідністю змісту, смислу й форми міжнародного

стандарту. Існують як прихильники, так і противники такого способу прийняття національних стандартів.

У той же час необхідно відзначити, що більшість національних стандартів розроблено на основі попередніх публікацій міжнародних документів, дія багатьох з яких, зокрема в Європі, на сьогодні припинена. Це пов'язане з витратами часу, необхідними на опрацювання, переклад, редагування українських версій стандартів. Тому останнім часом все частіше звучать пропозиції щодо прийняття останніх версій міжнародних стандартів «методом обкладинки». З одного боку, це швидкий, більш дешевий спосіб приведення національних стандартів у відповідність із міжнародними. З іншого боку, у цьому випадку не враховуються калібрувальні можливості й технічна база України, які можуть не відповідати за рядом вимог, викладених у міжнародних і європейських стандартах.

Стосовно Технічного Регламенту з ЕМС на перехідний період в «Перелік національних стандартів України, які у випадку добровільного застосування, є доказом відповідності продукції вимогам Технічного регламенту з підтвердження відповідності електромагнітної сумісності» були включені як національні стандарти «старі» не гармонізовані так і гармонізовані стандарти. Надалі, протягом 2-3 років (до підписання Україною Угоди АСАА), передбачається зробити витяг не гармонізованих стандартів із зазначеного переліку. Для підписання цієї Угоди необхідно, щоб кількість гармонізованих стандартів складала 100 %.

Однак дія Технічного Регламенту з ЕМС буде не повною без прийняття закону України «Про державне регулювання в сфері забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів і якості електричної енергії».

В 2003 році розроблений проект даного закону, у якому визначені основні положення щодо діяльності органів державної влади в сфері забезпечення ЕМС в Україні, права й обов'язки фізичних і юридичних осіб, що розробляють, виготовляють та реалізують в Україні ТЗ. Також враховані

основні положення по забезпеченню безпеки громадян, навколишнього середовища, установлені основні напрямки державного регулювання, у т.ч., щодо розробки й введення стандартів, що встановлюють вимоги до електромагнітної сумісності технічних засобів. В 2005 році проект цього Закону був відхилений «у зв'язку з недоцільністю».

Законодавчі документи з ЕМС в Україні переробляються з урахуванням вимог європейських директив, отже вимоги, що наведені в директивах, повинні поширюватися на ТЗ, які застосовуються в Україні (як виготовлені, так і імпортовані).

Як згадувалося раніше, новою спробою впорядкування існуючої законодавчої й нормативної бази України й приведення її у відповідність до вимог європейського законодавства, є постанова Кабінету міністрів України № 1070-р від 19.05.2010 р. «Про затвердження плану першочергових заходів щодо реформування системи технічного регулювання».

Таким чином, можна відзначити, що в Україні активно розробляються законодавчі й нормативні документи з ЕМС. За останні декілька років прийнято багато законодавчих актів, розроблених на основі європейських директив, національних стандартів, гармонізованих з міжнародними і європейськими стандартами. Загалом станом на 2011 рік було розроблено більш ніж 70 національних стандартів з електромагнітної сумісності, які гармонізовані з міжнародними та європейськими документами, проте слід зазначити істотне відставання в прийнятті стандартів за цим напрямом. В 2010 році прийнято 8 із 29 встановлених планом національної стандартизації стандартів в області електромагнітної сумісності. Також на сьогоднішній день існує проблема, обумовлена тим, що більшість національних стандартів приймаються шляхом ідентичного перекладу, що не завжди є оптимальним, оскільки вимоги стандарту можуть не відповідати рівню вітчизняного технічного забезпечення.

Крім того, на сьогоднішній день актуальним є якнайшвидше прийняття Закону України «Про державне регулювання в сфері забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів і якості електричної енергії».

5.3 Аналіз законодавчої та нормативної документації з забезпечення безпеки людини від впливу на неї випромінювань від устаткування стільникового зв'язку

Забезпечення безпеки людини від впливу електромагнітних випромінювань регулюється вимогами Закону України «Про забезпечення санітарного й епідемічного благополуччя населення», Положень «Про державний санітарно-епідеміологічний нагляд в Україні» і «Державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань».

Таким чином, в Україні діє один документ, що містить гігієнічні вимоги до джерел електромагнітних полів, у той час як у Росії був прийнятий ряд санітарних норм (порядку 15-20), серед яких:

- СанПин 2.1.8'2.2.4.1190-03 Гігієнічні вимоги до розміщення й експлуатації засобів сухопутного рухливого радіозв'язку;
- СанПин 2.1.8'2.2.4.1383-03 Гігієнічні вимоги до розміщення й експлуатації передавальних радіотехнічних об'єктів;
- СанПин 2.2.4'2.1.8.055-96 (2003) Електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону.

Відповідно до Санітарних норм України рівні електромагнітного поля, створювані базовою станцією (БС) на території, призначеній для забудови в приміщеннях житлових і громадських будинків, лікувально-профілактичних, оздоровчих, дитячих навчальних закладів і т.д., не повинні перевищувати гранично-припустимий рівень (ГДУ) –  $2,5 \text{ мкВт/см}^2$ . Слід зазначити, що український ГДУ нижче, ніж в інших країнах. Так, наприклад, у Росії й Білорусії ГДУ становить  $10 \text{ мкВт/см}^2$ , а значення, яке запропоноване

Міжнародною комісією із захисту від неіонізуючого випромінювання (ICNIRP) і приведене в загальноєвропейському стандарті CENELEC 50166-2 у якості ГДУ в умовах непрофесійного впливу, знаходиться в межах 200-1000 мкВт/см<sup>2</sup>. Представники операторів мобільного зв'язку вважають цей рівень необ'єктивно заниженим.

Державний санітарно-епідеміологічний нагляд за БС здійснюється на стадіях узгодження місця їхнього розташування, експертизи проектів будівництва, прийняття в експлуатацію вже побудованих об'єктів і протягом усього періоду експлуатації органами держсанепідслужби.

Для встановлення базової станції стільникового зв'язку оператор зобов'язаний звернутися до установи держсанепідслужби для узгодження місця розташування БС.

Після узгодження місця розташування БС відповідна проектна організація розробляє проект будівництва БС, що також необхідно узгодити з держсанепідслужбою. Тільки після позитивних висновків державної санітарно-епідеміологічної експертизи дозволяється починати будівельно-монтажні роботи. Після монтажу БС на неї необхідно одержати санітарний паспорт, при розробці якого проводяться відповідні математичні розрахунки й інструментальні вимірювання рівнів електромагнітного поля й встановлюються безпечні технічні параметри БС. Прийняття в експлуатацію БС здійснюється спеціальною приймальною комісією, до складу якої обов'язково входить представник державної санітарно-епідеміологічної служби. Після прийняття БС в експлуатацію вона перебуває під постійним наглядом територіальних установ держсанепідслужби, які періодично обстежують БС і проводять контрольні вимірювання рівнів електромагнітного випромінювання.

При узгодженні проекту будівництва оцінюється відповідність проектних рішень вимогам санітарного законодавства, вихідним даним і дозвільним документам. Оцінюються фактори, які під час експлуатації

об'єкта можуть негативно впливати на здоров'я й умови роботи обслуговуючого персоналу радіотехнічного об'єкта, і оцінюються запропоновані заходи щодо зменшення негативного впливу фізичних факторів.

За результатами державної санітарно-епідеміологічної експертизи проектної документації оформлюється негативний або позитивний висновок на проект будівництва. Кожна БС, відповідно до вимог «Державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань», повинна мати санітарний паспорт.

Умовно роботу зі складання санітарного паспорта можна розділити на два етапи: 1 етап - математичне моделювання розподілу електромагнітного поля, що створюється радіотехнічним устаткуванням, на прилеглих територіях і приміщеннях; 2 етап - підтвердження отриманих розрахунковим шляхом результатів натурними інструментальними дослідженнями.

Розрахунок обов'язково проводиться з обліком: фонових рівнів електромагнітного поля, що створюється вже наявними джерелами випромінювання; висотності навколишньої забудови й функціонального призначення прилеглої території; особливостей рельєфу місцевості; перспективної забудови; технічних характеристик радіотехнічного об'єкта, що планується встановити (кількість і потужність передавачів, азимути випромінювання й конструктивні особливості антен і ін. результатів розрахунку очікуваних рівнів електромагнітного поля).

Визначення рівнів електромагнітного поля проводиться з метою прогнозування й визначення стану електромагнітної обстановки в місцях розміщення випромінюючих об'єктів базових станцій сухопутного рухливого радіозв'язку.

Електромагнітне поле радіочастот з погляду безпеки для людини оцінюють за показниками інтенсивності поля й енергетичного навантаження.

У діапазоні частот 60 кГц - 300 МГц інтенсивність електромагнітного поля характеризується напруженістю електричного (E) і магнітного (H) полів, енергетичне навантаження являє собою добуток квадрата напруженості поля на час його впливу.

У діапазоні частот 300 МГц - 300 ГГц інтенсивність електромагнітного поля характеризується поверхневою щільністю потоку енергії (ЩПЕ).

Весь стільниковий зв'язок працює в діапазоні частот, що перевищує 300 МГц, тому для БС інтенсивність електромагнітного поля характеризується поверхневою ЩПЕ.

При вимірюваннях варто враховувати особливість БС, що полягає в тому, що потужність випромінювання БС непостійна й залежить від кількості абонентів даної БС у цей момент. Тому особливо важливим для правильного проведення вимірювань рівнів електромагнітних полів радіочастот є вимога виводу передавачів БС у штучно створюваний режим максимальної потужності.

Гігієнічно значимі рівні електромагнітних полів радіочастот можуть спостерігатися в безпосередній близькості, на відстані до 3 - 5 метрів від передавальних антен БС.

За кордоном, основним параметром, що характеризує електромагнітне поле радіочастот, яке генерується ТЗ, є питомий коефіцієнт поглинання (SAR), що визначається за формулами:

- сила поля в тканинах

$$SAR = \frac{\sigma \vec{E}^2}{\rho}, \quad (5.1)$$

де  $E$  – діюче (середньоквадратичне) значення напруженості електричного поля в біологічній тканині, В/м;

$\rho$  – щільність людських тканин у кг/м<sup>3</sup>

$\sigma$  – електрична провідність людських тканин в S/m;

- щільність струму в тканинах

$$SAR = \frac{J^2}{\rho\sigma}, \quad (5.2)$$

де  $J$  – щільність струму, викликана електричним і магнітним полями, А/м<sup>2</sup>;

- підвищення температури в тканинах

$$SAR = c_i \frac{dT}{dt}, \quad (5.3)$$

де  $c_i$  – теплоємність людських тканин;

$dT/dt$  – тимчасова похідна температури людських тканин.

У документах CENELEC гранично припустиме усереднене значення SAR дорівнює 0,08 Вт/кг для населення.

Визначення SAR проводиться або за допомогою «фантома» (копією людського тіла) або за допомогою комп'ютерного моделювання.

Слід зазначити, що існує необхідність у переробці Санітарних норм і прийнятті нових нормативних документів у цій області, оскільки норми були прийняті за допомогою перекладу «Тимчасових санітарних норм і Правил захисту населення від впливу електромагнітних полів, створюваних радіотехнічними об'єктами» у 1989 році й практично ніяких змін і доповнень у них внесено не було з тих пір. У діючих санітарних нормах відсутні конкретна методика й порядок проведення вимірювань електромагнітних полів, не виділена специфіка випробувань базових і мобільних станцій стільникового зв'язку на предмет впливів випромінювань на організм людини.

У санітарних нормах наведений перелік методичних вказівок, згідно яким повинні проводитися вимірювання рівнів електромагнітних випромінювань для конкретних типів устаткування таких, наприклад, як засоби телебачення, радіомовлення, метеорологічні радіолокатори і ін., однак

у цьому переліку відсутні методичні вказівки для виміру рівнів електромагнітних полів устаткування стільникового зв'язку.

Розрахунок електромагнітних полів для БС проводиться в Україні згідно МВ 3860-85 «Методичні вказівки по визначенню рівнів електромагнітного поля й границь санітарно-захисної зони й зони обмеження забудови в місцях розміщення засобів телебачення й ЧМ-Радіомовлення».

Що стосується російської документації, був прийнятий ряд методичних вказівок, у яких містяться вимоги по проведеннях вимірювань для розглянутої галузі:

1 МУК 4.3.1167-02 «Методические указания. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц-300 ГГц».

2 МУК 4.3.1676-03 «Методические указания. Гигиеническая оценка электромагнитных полей, создаваемых радиостанциями сухопутной подвижной связи, включая абонентские терминалы спутниковой связи»

3 МУК 4.3.1677-03 «Методические указания. Определение уровней электромагнитного поля, создаваемого излучающими техническими средствами телевидения, ЧМ-радиовещания и базовых станций сухопутной подвижной радиосвязи»

У Європі питанням безпеки людини приділяється особлива увага, у зв'язку із чим розробляються й постійно вдосконалюються нормативні документи, зокрема методики проведення випробувань та вимоги до безпеки устаткування для здоров'я людини. Як було показано, у Росії також прийнято багато документів, що регулюють цю область. У зв'язку із цим варто виділити необхідність удосконалення вітчизняної нормативної бази забезпечення безпеки людини від впливу на неї випромінювань від устаткування стільникового зв'язку, оскільки вона істотно відстає від закордонної на сьогоднішній день.

#### 1.4 Огляд нормативних документів з оцінювання невизначеності вимірювань енергетичних параметрів ЕМС

Настанова з вираження невизначеності вимірювань GUM розроблялася як документ, що дає єдиний підхід до оцінювання точності вимірювань. Як будь-який нормативний документ, що претендує на універсальність, він містить велике число «білих плям», що викликають постійні питання й претензії користувачів. При його застосуванні для оцінювання невизначеності в конкретних областях вимірювань виникає необхідність у дослідженні цілого ряду проблем, властивих винятково цим областям. Вимірювання параметрів електромагнітної сумісності (ЕМС) також є досить специфічною областю й звичайне застосування GUM для рішення виникаючих у ній завдань часто викликає труднощі в співробітників випробувальних лабораторій з ЕМС. У зв'язку із цим на міжнародному і європейському рівнях постійно розробляються й удосконалюються нормативні й інформативні документи, що враховують особливості оцінювання невизначеності вимірювань в області ЕМС. Так, для роз'яснення ряду питань, пов'язаних з розрахунком, інтерпретацією й застосуванням невизначеностей вимірювань в області ЕМС на сьогоднішній день розроблений ряд нормативних документів, у яких містяться рекомендації, корисні при розробці або модифікації стандартів з ЕМС, а також при практичному застосуванні цих стандартів і підходів до оцінювання невизначеності.

На міжнародному рівні розробкою таких документів займається Міжнародна електротехнічна комісія (IEC), зокрема, її комітет CISPR. Підкомітетами А (вимірювання радіоперешкод і статистичні методи – Radio-interference measurements and statistical methods) і Н (норми для захисту радіослужб – Limits for the protection of radio services) CISPR була випущена серія публікацій CISPR 16-4, що складається з п'яти частин, об'єднаних загальною назвою «Невизначеності, статистика й моделювання меж».

Частини 16-4-1, 16-4-3, 16-4-4, 16-4-5 мають статус технічного звіту (CISPR/TR), а 16-4-2 - міжнародного стандарту (CISPR).

Технічний звіт CISPR/TR 16-4-1, розроблений підкомітетом CISPR A і присвячений оцінюванню невизначеності при стандартизованому випробуванні продукції на відповідність EMC. У ньому пріоритетна увага була приділена оцінкам невизначеності при вимірюваннях емісії, зокрема, пов'язаної з напругою, що поглинальними кліщами та вимірюваннями випромінювань у напівбезлунній камері й на відкритому випробувальному майданчику. У документі відсутній матеріал щодо невизначеності, пов'язаної з випробуваннями на відповідність стійкості, що планується розглянути в майбутньому (для цієї мети у звіті зарезервовані окремі розділи).

Стандарт CISPR 16-4-2 призначений для застосування при обчисленні невизначеності вимірювань в області EMC і встановлює способи врахування невизначеності вимірювань при оцінці відповідності технічних засобів нормам індустриальних радіоперешкод, установленим CISPR. Слід зазначити, що із серії публікацій CISPR 16-4 тільки цей документ має статус міжнародного стандарту.

Стандарт може бути використаний при проведенні будь-яких випробувань в області EMC, якщо при поданні результатів вимірювань потрібно оцінювати інструментальну складову невизначеності вимірювань, джерелом якої є вимірювальна система, що використовується при проведенні випробувань. Він містить основні положення з оцінювання інструментальної складової невизначеності вимірювань, зокрема величини й джерела невизначеності вимірювань, формули для розрахунку сумарної стандартної й розширеної невизначеностей, значення меж розширеної невизначеності для різних видів вимірювань  $U_{\text{CISPR}}$ , а також критерій відповідності рівня перешкод випробуваних технічних засобів установленим межі. Слід

зазначити, що стандарт був істотно перероблений і в червні 2011 була випущена остання оновлена версія стандарту.

Технічний звіт CISPR/TR 16-4-3 визначає вимоги й дає вказівки, засновані на статистичних методах, з визначення відповідності EMC продукції, що випускається серійно. Ці методи повинні переконати споживачів з 80% ступенем упевненості, що 80% пристроїв існуючих типів досліджені на відповідність вимогам емісії й стійкості. Тому документ містить конкретні вимоги для застосування так званого правила CISPR 80% /80% при випробуваннях на емісію й стійкість.

Дві останні частини, CISPR/TR 16-4-4, CISPR/TR 16-4-5 присвячені питанням статистики й моделювання меж.

На європейському рівні розробкою документів з оцінювання невизначеності в області EMC займається ETSI. Комітетом ERM розроблені документи інформативного характеру, об'єднані серією «Електромагнітна сумісність і питання Радіоспектру». До них відносяться ETSI TR 100 028-1, ETSI TR 100 028-2, присвячені оцінюванню невизначеностей вимірювань характеристик мобільного радіообладнання; частини документа ETSI TR 102 273, що розглядає невизначеності випромінюваних вимірювань; ETSI TR 102 215, що розглядає пропонований підхід, а також можливі межі невизначеності вимірювань для вимірювання випромінюваних електромагнітних полів більше 1 ГГц і ін.

Всі наведені міжнародні і європейські документи розроблені на основі GUM з урахуванням специфіки оцінювання невизначеності вимірювання конкретних параметрів EMC.

Необхідно зазначити відсутність вітчизняної нормативної документації, що розглядає питання оцінювання невизначеності вимірювання параметрів EMC. Прийняття таких стандартів заплановане Держспоживстандартом, однак, такі стандарти планують приймати методом

«обкладинки», що може викликати труднощі з інтерпретацією й ряд питань у користувачів такими стандартами.

## 5.2. Теоретичне дослідження особливостей оцінювання невизначеності вимірювань енергетичних параметрів ЕМС

### 5.2.1 Аналіз основних особливостей вимірювань ЕМС та оцінювання їх невизначеності

Для випробувань на завадоемісію вводиться поняття «стандартної невизначеності відповідності» (standards compliance uncertainty – SCU), пов'язаної із твердженням про те, що конкретна продукція відповідає вимогам, зазначеним у стандарті CISPR. Термін SCU введений для того, щоб розрізняти всі невизначеності, що виникають у ході реального випробування на відповідність емісії, від інструментальної невизначеності вимірювань (measurement instrumentation uncertainty – MIU), якою, як правило, обмежуються при вирішенні класичних задач метрології, коли всі відповідні величини, що впливають, відомі й «власні невизначеності вимірюваної величини» незначні. Однак, у стандартизованих вимірюваннях на відповідність емісії власна невизначеність, пов'язана з вимірюваною величиною, може бути значної в порівнянні з невизначеністю, що відноситься до вимірювальних приладів. У зв'язку з цим, у типових вимірюваннях емісії SCU представляє загальну невизначеність вимірюваної величини й включає власну невизначеність вимірюваної величини й MIU. Для SCU повинні визначатися параметри, джерела невизначеності й величини, що впливають.

Особливістю оцінювання невизначеності вимірювань при випробуваннях продукції на емісію є те, що її складовою є невизначеність, пов'язана з відбором зразків із загальної партії продукції, а також невизначеності, обумовлені стандартом, по якому проводяться випробування і який визначає вимірювану величину й метод вимірювання, засіб вимірювання й умови проведення вимірювань (рис. 2.1).

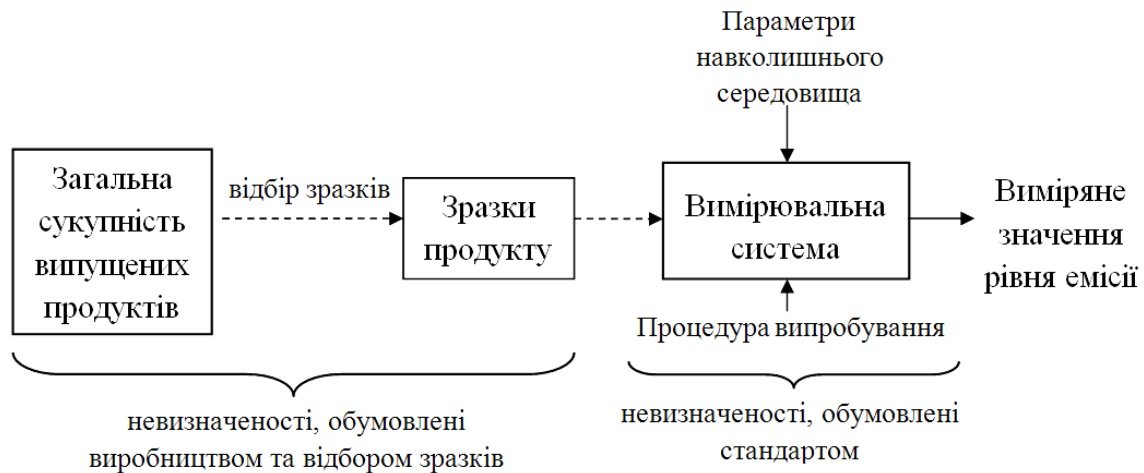


Рис. 2.1. Процес вимірювань на відповідність випромінювання й пов'язані з ним категорії джерел невизначеності

Однією з особливостей при оцінюванні невизначеності вимірювань на відповідність емісії є наявність етапу визначення основних цілей оцінювання невизначеності, оскільки залежно від мети потрібні різні типи аналізу невизначеностей (оцінювання SCU або MIU, або невизначеності, пов'язаної з методом вимірювань, або невизначеності, пов'язаної з характеристиками емісії продукції, що випускається серійно), і облік їх у критерії відповідності може бути різним. Крім того, залежно від цілей оцінювання невизначеності повинні прийматися в увагу різні категорії її джерел. Основні категорії джерел невизначеності, що мають істотне значення, зведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Основні категорії джерел невизначеності

|                                        |                                    |                                                         |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Обумовлені випробувальною лабораторією | Обумовлені стандартом випробування | Обумовлені виробництвом і відбором випробуваних зразків |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|

|                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• навички оператора;</li> <li>• аналіз і розрахунки;</li> <li>• протоколювання;</li> <li>• ступінь впровадження стандарту в процедуру вимірювання програмне забезпечення;</li> <li>• система якості.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• установлені технічні вимоги вимірювань;</li> <li>• характеристики вимірювального обладнання, включаючи калібрування й верифікацію;</li> <li>• опис процедури вимірювань;</li> <li>• умови навколишнього середовища;</li> <li>• розміщення випробуваного обладнання;</li> <li>• функціонування випробуваного обладнання;</li> <li>• тип випробуваного обладнання.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• виробничий допуск;</li> <li>• відбір зразків;</li> <li>• нерепрезентативна вибірка.</li> </ul> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

У процесі оцінювання невизначеності повинен бути зібраний повний список відповідних джерел невизначеності. З метою виявлення джерел невизначеності й величин, що впливають, варто розглянути повну специфікацію й кожне положення стандарту як можливе джерело невизначеності або величини, що впливає. Крім того, кожний крок у процедурі виміру представляє, у принципі, можливе джерело невизначеності. Для того щоб спростити завдання виявлення всіх можливих джерел невизначеності й уникнути подвійного обліку джерел пропонується використовувати причинно-наслідкову діаграму (діаграма «риб'ячий скелет») при складанні списку джерел невизначеності, із вказівкою їхнього взаємозв'язку й впливу на невизначеність результату вимірювань.

Важливим етапом також є перетворення кожного джерела невизначеності в одну або більше величин, що впливають. Тут можна виділити деяку особливість: величини, що впливають, які важко визначити і які не можуть бути визначені зовсім (невстановлені величини, що впливають)

повинні бути також включені в бюджет невизначеності, незважаючи на ці труднощі. Це можна зробити, якщо прийняти діапазон значень для розглянутої величини, що впливає, або розглянути діапазон імовірностей для джерела невизначеності. На рис. 2.2 показаний зв'язок між джерелами невизначеності, відповідними величинами, що впливають, і результуючими невизначеностями.

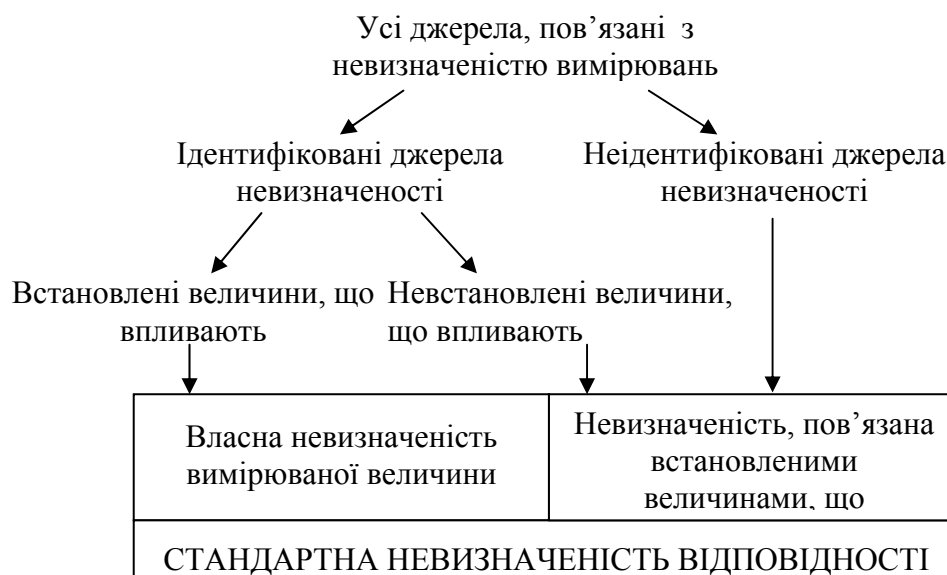


Рис. 2.2. Зв'язок між джерелами невизначеності, величинами, що впливають, й категоріями невизначеності

Після ідентифікації встановлених і невстановлених величин, що впливають, і пов'язаних з ними допусків, повинна бути визначена невизначеність результату вимірювань. Це може бути зроблено шляхом моделювання стандартизованого методу вимірювань або за допомогою проведення експерименту. Слід зазначити, в якості оцінки загальної невизначеності крім підсумовування дисперсій допускається приводити сумарну невизначеність, розраховану у вигляді повного диференціала.

При оцінюванні невизначеності необхідна модель, що описує зв'язок між вимірюваною величиною й всіма встановленими й невстановленими величинами, що впливають. Така модель може бути аналітичною або чисельною. Однак для вимірювань ЕМС, як правило, не існує точних моделей. Тому рекомендується застосовувати повторні вимірювання й статистичні методи для оцінювання величини стандартної невизначеності, пов'язаної з величинами, що впливають, типу А.

Типові випробування продукції, що випускається серійно, можуть бути виконані або при використанні одного зразка пристрою з подальшим періодичним випробуванням для забезпечення якості, або при використанні вибірки пристроїв того самого типу.

Для другого випадку здійснюється статистична оцінка відповідності граничних рівнів емісії відповідно до випробування, заснованого на нецентрованому  $t$ -розподілі (також з використанням піддіапазонів частот) або на біноміальному розподілі. Остання публікація CISPR/TR 16-4-3 також містить у собі новий математичний підхід для застосування правила 80%/80% на основі методу, що включає прийняту додаткову межу, а також обґрунтування для цього методу.

Кожний із цих методів заснований на різних статистичних методиках, і тому має різні властивості (переваги й недоліки) при застосуванні на практиці виробниками або вповноваженими органами. Так, випробування, засноване на нецентрованому  $t$ -розподілі, містить умову нормального розподілу сукупності. Поки ця умова виконується, випробування дає правильні результати щодо твердження вибірки. Перевага цього методу полягає в тому, що вибірка може бути відносно невеликою. Випробування, засноване на біноміальному розподілі, не містить ніяких умов щодо розподілу сукупності, однак вибірка повинна складатися мінімум із семи зразків продукції. При випробуванні, що включає прийняту додаткову межу, вибірка повинна містити менш семи зразків, і повинна виконуватися умова нормального розподілу сукупності.

В оцінці стійкості пристроїв увага повинна бути приділена докладному опису статистичного методу, що повинен застосовуватися в схемі CISPR вибіркового контролю. В CISPR/TR 16-4-3 виділено два стандартизовані методи: з використанням біноміального розподілу (вибірка по якісних ознаках) і з використанням нецентрованого  $t$ -розподілу (вибірка по кількісних ознаках). Метод біноміального розподілу повинен бути використаний у випробуваннях на стійкість, у яких рівень стійкості неможливо визначити, тобто можливо тільки провести випробування на відповідність або невідповідність заданому рівню стійкості. Метод нецентрованого  $t$ -розподілу підходить для випробування стійкості, у якому можуть бути визначені рівень стійкості або рівень сигналу, що є мірою

погіршення стійкості. Останній рівень повинен бути виражений у логарифмічних одиницях перед застосуванням методу нецентрованого  $t$ -розподілу.

Критерій відповідності продукції, що випускається серійно, складається із двох частин: одна полягає у вимозі правила 80%/80%, а інша - інструментальної невизначеності вимірювання. Тому результат випробування 80%/80% вказує на відповідність із межею доти, поки виконується вимога:  $U_{\text{Lab}}$  повинне бути менше або дорівнює  $U_{\text{CISPR}}$ . У тих випадках, коли  $U_{\text{Lab}}$  більше, ніж  $U_{\text{CISPR}}$ , результати вимірювань, які використовуються для правила 80%/80%, повинні бути збільшені на величину  $\Delta = [U_{\text{Lab}} - U_{\text{CISPR}}] U_{\text{CISPR}} < U_{\text{Lab}}$ .

Дотепер точно не визначено, як повинні поєднуватися (порядок старшинства) критерій відповідності правила 80%/80%, наведеного в CISPR/TR 16-4-3, і MIU критерій відповідності (CISPR 16-4-2) у випадку, коли обидва критерії застосовуються. Об'єднання цих двох критеріїв відповідності є предметом подальших досліджень в CISPR / A.

Слід зазначити, що правило 80%/80% захищає споживача від невідповідних пристроїв, але воно майже нічого не говорить про ймовірність того, що партія пристроїв, з яких був узятий зразок, буде прийнята. Ця довірча ймовірність дуже важлива для виробника. У зв'язку із цим, у додатку CISPR/TR 16-4-3, дана більш докладна інформація про довірчу ймовірність (ризик виробника).

### 5.2.2 Особливості оцінювання невизначеності вимірювання при вираженні вхідних величин в децибелах

У практиці електричних, акустичних, оптичних і інших видів вимірювань широке поширення отримала безрозмірна одиниця – децибел. Вона застосовується як для вираження відносних величин (загасання, посилення, динамічного й частотного діапазонів), так і для вираження

параметрів інтенсивності - щільності потоку потужності, рівня звукового тиску й інших енергетичних і силових величин відносно деякого вихідного значення, прийнятого за нульове в децибелах. Зручність застосування цієї одиниці вимірювань пов'язана із властивостями логарифма: використання операцій додавання й множення замість, відповідно, операцій множення й зведення в ступінь, а так само істотне скорочення числового вираження при широкому діапазоні.

Значення вихідних величин пов'язані зі значеннями величин, виражених у децибелах, нелінійною (показовою) залежністю, що ставить завдання визначення умов еквівалентності оцінок невизначеності вимірювань, що отримуються в обох випадках.

Для визначення цих умов еквівалентності і отримання коефіцієнтів перерахунку значень невизначеності вимірювань, отриманої в дБ, в абсолютні величини, була здійснена наступна процедура:

#### 1. Визначення оцінки вимірюваної величини

В якості оцінки вимірюваної величини при багаторазових вимірюваннях приймається середнє арифметичне окремих спостережень.

Запишемо загальне вираження для переведу в абсолютні значення  $x_i$  окремих показань індикаторного блоку  $A_{ni}$ , виражених у дБ:

$$X_i = X_0 \cdot 10^{\frac{A_{ni}}{M}},$$

де  $X_0$  - вихідний рівень, виражений в абсолютних одиницях;  $M$  - коефіцієнт, рівний 10 у випадку вимірювань енергетичних величин, і 20 у випадку вимірювань силових величин.

Середнє арифметичне результатів окремих спостережень  $x_i$  буде дорівнювати

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{X_0}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{A_{ni}}{M}}. \quad (2.1)$$

Запишемо значення окремого показання індикаторного блоку  $A_{ni}$  через випадкову погрішність  $\Delta_i$

$$A_{ni} = \bar{A}_n + \Delta_i, \quad (2.2)$$

де  $\bar{A}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{ni}$  – середнє арифметичне показань індикаторного блоку.

При підстановці вираження (2.2) в (2.1) отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{X_0}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\bar{A}_n + \Delta_i}{M}} = \frac{X_0}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}} \cdot 10^{\frac{\Delta_i}{M}} = \\ &= \frac{X_0}{n} \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\Delta_i}{M}} = \bar{X}^* \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\Delta_i}{M}}. \end{aligned}$$

Де  $\bar{X}^* = X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}}$  – оцінка вимірюваної величини, що отримується звичайно при перерахуванні із середнього арифметичного показань індикаторного блоку  $\bar{A}_n$ .

Наявність в останньому виразі величини  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\Delta_i}{M}}$  приводить до зміщення результату вимірювань.

Можна показати, що це зміщення при малих значеннях  $\Delta_i/M$  наближається до нуля. Дійсно, представляючи величину  $10^{\frac{\Delta_i}{M}}$  у вигляді перших членів розкладання в ряд Тейлора

$$10^{\frac{\Delta_i}{M}} = 1 + \frac{\Delta_i}{M} \ln 10,$$

отримаємо вираз:

$$\bar{X} = \frac{X_0}{n} \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}} \left[ \sum_{i=1}^n 1 + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{M} \ln 10 \right] = X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}} = \bar{X}^*,$$

тому що  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{M} \ln 10 = \frac{\ln 10}{M} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0$  й  $\sum_{i=1}^n 1 = n$ .

## 2. Оцінювання стандартної невизначеності за типом А

Розрахуємо стандартну невизначеність за типом А вимірюваної величини  $\bar{X}$ :

$$u_A(\bar{X}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} =$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( X_0 \cdot 10^{\frac{A_{ni}}{M}} - X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}} \right)^2} = \\
&= \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n + \Delta_i}{M}} - X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}} \right)^2} = \\
&= X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( 10^{\frac{\Delta_i}{M}} - 1 \right)^2}.
\end{aligned}$$

Цей вираз в припущенні  $\frac{\Delta_i}{M} \rightarrow 0$  можна привести до наступного виду:

$$\begin{aligned}
u_A(\bar{X}) &= \bar{X}^* \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( 1 + \frac{\Delta_i}{M} \ln 10 - 1 \right)^2} = \\
&= \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}.
\end{aligned}$$

З урахуванням виразу (2.2), можна записати:

$$\begin{aligned}
u_A(\bar{X}) &= \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_{ni} - \bar{A}_n)^2} = \\
&= \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* u_A(\bar{A}_n) \approx \begin{cases} 0,23 \cdot \bar{X}^* \cdot u_A(\bar{A}_n), & \text{при } M = 10; \\ 0,115 \cdot \bar{X}^* \cdot u_A(\bar{A}_n), & \text{при } M = 20, \end{cases}
\end{aligned}$$

де  $u_A(\bar{A}_n) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_{ni} - \bar{A}_n)^2}$  – стандартна невизначеність за типом А

середнього арифметичного показань індикаторного блоку.

Таким чином, при певних значеннях стандартної невизначеності типу А для показань індикатора  $A_{ni}$ , що спостерігаються, можна перейти до стандартної невизначеності  $u_A(\bar{X})$  шляхом множення  $u_A(\bar{A}_n)$  на  $\frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^*$ .

### 3. Оцінювання стандартної невизначеності за типом В

Аналогічним образом отримуємо вираз для стандартної невизначеності за типом В. Дійсно, нехай

$$\begin{aligned}
\bar{X} &= X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n + \Delta}{M}} = X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_n}{M}} 10^{\frac{\Delta}{M}} = \bar{X}^* \cdot 10^{\frac{\Delta}{M}} \approx \\
&\approx \bar{X}^* \left( 1 + \Delta \frac{\ln 10}{M} \right),
\end{aligned}$$

де  $\Delta$  – поправка на невиключену систематичну похибку (НСП) визначення  $\bar{A}_u$ .

Тоді поправка на НСП визначення  $\bar{X}$  буде дорівнює

$$\Delta X = \bar{X} - \bar{X}^* = \frac{\ln 10}{M} \bar{X}^* \cdot \Delta$$

і невизначеність вимірювання  $\hat{X}$  за типом В буде дорівнювати

$$u_B(\bar{X}) = \frac{\ln 10}{M} \bar{X}^* \cdot u_B(\bar{A}_u) \approx \begin{cases} 0,23 \bar{X}^* \cdot u_B(\bar{A}_u), & \text{при } M=10; \\ 0,115 \bar{X}^* \cdot u_B(\bar{A}_u), & \text{при } M=20, \end{cases} \quad \text{де } u_B(\bar{A}_u) = u(\Delta) \quad - \quad \text{стандартна}$$

невизначеність за типом В вимірювання  $\bar{A}_u$ .

#### 4. Оцінювання стандартної сумарної і розширеної невизначеностей

Розрахуємо сумарну стандартну невизначеність  $u_c(\bar{X})$

$$u_c(\bar{X}) = \sqrt{[c_A \cdot u_A(\bar{A}_u)]^2 + [c_B \cdot u_B(\bar{A}_u)]^2},$$

де  $c_A = \frac{\partial X}{\partial \bar{A}_u} = \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^*$  й  $c_B = \frac{\partial X}{\partial \Delta} = \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^*$  – коефіцієнти чутливості.

При підстановці коефіцієнтів чутливості у вираження для  $u_c(\bar{X})$ , отримуємо

$$u_c(\bar{X}) = \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \cdot \sqrt{u_A^2(\bar{A}_u) + u_B^2(\bar{A}_u)} =$$

$$= \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \cdot u_c(\bar{A}_u) \approx \begin{cases} 0,23 \cdot \bar{X}^* \cdot u_c(\bar{A}_u), & \text{при } M=10; \\ 0,115 \cdot \bar{X}^* \cdot u_c(\bar{A}_u), & \text{при } M=20. \end{cases}$$

Розширена невизначеність  $U(\bar{X})$  буде дорівнювати:

$$U(\bar{X}) = k \cdot u_c(\bar{X})$$

де  $k$  – коефіцієнт покриття, що визначається для ефективного числа степенів свободи й довірчої ймовірності за таблицею Стюдента.

Коефіцієнт покриття для абсолютних величин дорівнює коефіцієнту покриття для величин, виражених у дБ, тому що

$$v_{\text{eff}} = (n-1) \left[ \frac{u_c(\bar{X})}{u_A(\bar{X})} \right]^4 = (n-1) \times$$

$$\times \left[ \frac{\frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \cdot u_c(\bar{A}_u)}{\frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \cdot u_A(\bar{A}_u)} \right]^4 = (n-1) \left[ \frac{u_c(\bar{A}_u)}{u_A(\bar{A}_u)} \right]^4.$$

Таким чином, розширена невизначеність буде дорівнювати

$$U(\bar{X}) = k \cdot \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \cdot u_c(\bar{A}_u) \approx$$

$$\approx \begin{cases} 0,23 \cdot \bar{X}^* \cdot U(\bar{A}_u), & \text{при } M = 10; \\ 0,115 \cdot \bar{X}^* \cdot U(\bar{A}_u), & \text{при } M = 20. \end{cases}$$

Тобто можна розраховувати сумарну стандартну невизначеність  $u_c(\bar{A}_u)$  або розширену невизначеність  $U(\bar{A}_u)$ , а потім перейти до сумарної стандартної невизначеності  $u_c(\bar{X})$  або розширеної невизначеності  $U(\bar{X})$  шляхом їх множення на  $\frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^*$ .

## 5. Дослідження похибки отриманих оцінок

При виводі формул, що дають можливість переводити отримані в дБ значення невизначеностей в абсолютні величини, використовувалося розкладання в ряд Тейлора, обмежене членом першого ступеня. Тому існує необхідність аналізу похибки оцінювання невизначеності, що виникає в результаті лінеаризації.

Розрахунок похибки здійснений методом Монте-Карло. Для цього була виконана генерація масиву випадкових чисел  $\Delta$  із заданим СКО, нульовим математичним очікуванням і нормальним законом розподілу обсягом  $10^5$ .

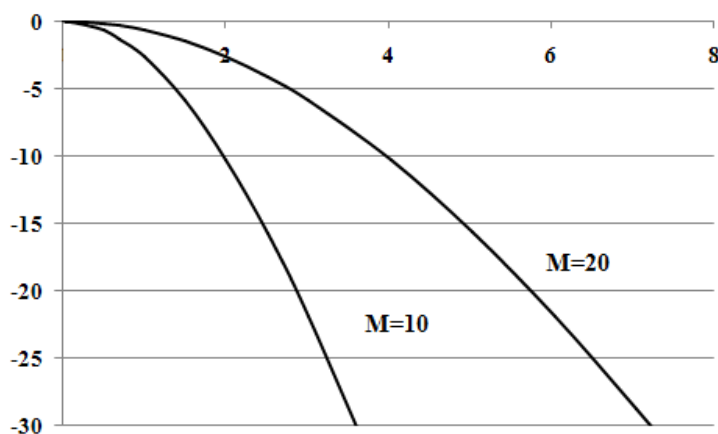
Оцінимо відносну похибку лінеаризації для середнього арифметичного  $\bar{X}$ :

$$\delta \bar{X} = \frac{\bar{X}^* - \bar{X}}{\bar{X}},$$

де  $\bar{X} = \frac{X_0}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\bar{A}_u + \Delta_i}{M}} = \bar{X}^* \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\Delta_i}{M}}$  – дійсне значення середнього арифметичного;

$\bar{X}^* = X_0 \cdot 10^{\frac{\bar{A}_u}{M}}$  – оцінка вимірюваної величини.

У результаті обчислень був отриманий графік, наведений на рис. 2.3.

Рис. 2.3. Залежність  $\delta\bar{X}(S(\Delta_i))$ 

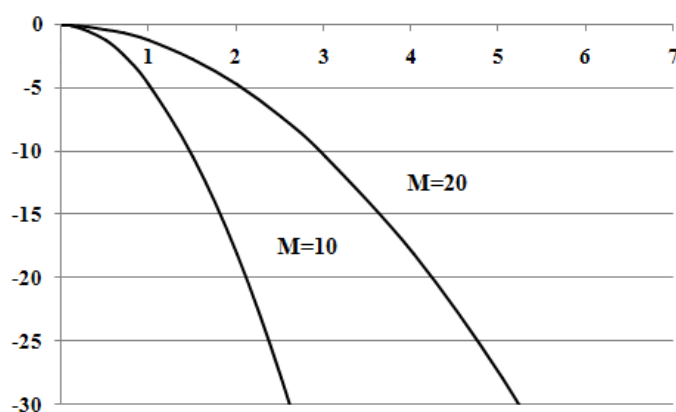
Оцінімо відносну похибку лінеаризації для стандартної невизначеності типу А  $u_A(\bar{X})$ :

$$\delta u_A(\bar{X}) = \frac{u_A^*(\bar{X}) - u_A(\bar{X})}{u_A(\bar{X})},$$

де  $u_A(\bar{X}) = \bar{X}^* \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( 10^{\frac{\Delta_i}{M}} - 1 \right)^2}$  – дійсне значення невизначеності за типом А;

$u_A^*(\bar{X}) = \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \cdot u(\bar{A}_n)$  – значення середнього арифметичного при розкладанні в ряд Тейлора.

У результаті обчислень був отриманий графік, наведений на рис.2.4.

Рис. 2.4. Залежність  $\delta u_A(\bar{X})(S(\bar{\Delta}))$ 

Оцінімо відносну похибку лінеаризації для стандартної невизначеності за типом В:

$$\delta u_B(\bar{X}) = \frac{u_B^*(\bar{X}) - u_B(\bar{X})}{u_B(\bar{X})},$$

де  $u_B(\bar{X}) = \bar{X}^* \cdot u_B(10^{\frac{\Delta}{M}} - 1)$  - дійсне значення невизначеності за типом В;

$u_B^*(\bar{X}) = \frac{\ln 10}{M} \cdot \bar{X}^* \cdot u_B(\bar{A}_H)$  - значення невизначеності за типом В при розкладанні в

ряд Тейлора.

Результат обчислення  $\delta u_B(\bar{X})$  наведений на рис. 2.5.

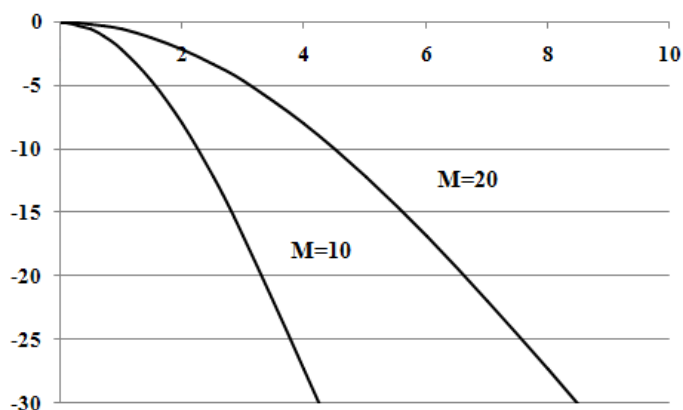


Рис. 2.5 – Залежність  $\delta u_B(\bar{X})(S(\Delta_i))$

Таким чином, можна зробити висновок, що процедура обчислення середнього арифметичного вхідних величин, виражених у децибелах з наступним перерахуванням в оцінку вимірюваної величини, дає, через наявність нелінійної залежності, що їх пов'язує, зміщену оцінку вимірюваної величини. Це зміщення не буде перевищувати 10 % при значеннях СКО випадкової похибки не більше 2 дБ для енергетичних величин і 4 дБ для силових величин.

Відносна хибка оцінювання стандартної невизначеності вимірювання за типом А не буде перевищувати 15 % при значеннях стандартної невизначеності типу А величини, вираженої в децибелах, при значеннях СКО випадкової похибки не більше 1,8 дБ для енергетичних величин і 3,6 дБ для силових величин.

Відносна похибка оцінювання стандартної невизначеності вимірювань за типом В не буде перевищувати 15 % при значеннях стандартної

невизначеності типу В величини, вираженої в децибелах, при значеннях СКО випадкової похибки не більше 2,8 дБ для енергетичних величин і 5,6 дБ для силових величин.

### 5.3. Розробка процедур оцінювання невизначеності вимірювань енергетичних параметрів електромагнітної сумісності

#### 5.3.1 Процедура оцінювання невизначеності вимірювань щільності потоку енергії електромагнітного поля

Одним із видів вимірювань, які проводять співробітники випробувальних лабораторій СЕС, є вимірювання щільності потоку енергії (ЩПЕ) електромагнітного поля з метою контролю інтенсивності випромінювань для забезпечення безпеки людини від впливу електромагнітних коливань, які створюють різні радіотехнічні об'єкти. Це завдання на сьогодні є надзвичайно актуальним, оскільки це стосується базових станцій мобільного зв'язку, кількість яких безупинно зростає.

За допомогою ЩПЕ характеризують інтенсивність електромагнітного поля у діапазоні частот 300 МГц—300 ГГц. У випробувальних лабораторіях СЕС для вимірювань ЩПЕ на сьогодні використовують прилади типу ПЗ-19.

Розглянемо процедуру оцінювання невизначеності вимірювання ЩПЕ електромагнітного поля за допомогою приладу ПЗ-19, засновану на модельному підході з урахуванням того, що вхідні величини таких вимірювань виражені у децибелах:

#### 1. Складання модельного рівняння

Показання ПЗ-19  $A_{\Pi}$  з урахуванням поправочних коефіцієнтів визначаються за виразом:

$$A_{\Pi} = A_{\text{и}} - K_f + K_a + K_{\text{да}},$$

де  $A_{\text{и}}$  — показання індикатора вимірювача ЩПЕ, дБ;  $K_a$  — значення коефіцієнта, обумовлене типом антени, дБ;  $K_f$  — відносний коефіцієнт

перетворення, дБ;  $K_{\text{да}}$  — коефіцієнт ослаблення сигналу на вході індикатора, дБ.

Вихідне модельне рівняння може бути доповнене поправками на наступні невиключені систематичні похибки (НСП): основну похибку  $\delta_{\text{осн}}$ ; похибку індикатора  $\delta_{\text{и}}$ ; температурну похибку  $\delta_T$ .

З урахуванням цих поправок модельне рівняння остаточно буде мати вигляд:

$$A_{\text{п}} = A_{\text{и}} + \delta_{\text{осн}} + \delta_{\text{и}} + \delta_T - K_f + K_{\text{а}} + K_{\text{да}}. \quad (3.1)$$

Усі складові рівняння (3.1) мають розмірність дБ. Дана методика оцінювання невизначеності передбачає її розрахунок у дБ із наступним перерахуванням в абсолютні одиниці.

## 2. Оцінювання значень вхідних величин:

- середнє арифметичне показань індикатора:

$$\hat{A}_{\text{и}} = \bar{A}_{\text{и}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{\text{и}i},$$

- де  $n$  — число багаторазових вимірювань ЩПЕ;
- значення коефіцієнта перетворення  $K_f = -10$  дБ (для антени АП-ППЭ-1);
- значення коефіцієнта  $K_{\text{а}} = 0$  дБ (для антени АП-ППЭ-1);
- значення коефіцієнта  $K_{\text{да}} = 0$  дБ;
- математичне очікування поправок на НСП:

$$\hat{\delta}_{\text{осн}} = \hat{\delta}_{\text{и}} = \hat{\delta}_T = 0.$$

## 3. Обчислення оцінки результату вимірювань:

$$\hat{A}_{\text{п}} = \bar{A}_{\text{и}} - K_f + K_{\text{а}} + K_{\text{да}}.$$

Абсолютне значення ЩПЕ електромагнітного поля визначається за формулою:

$$\Pi = \Pi_0 \cdot 10^{\frac{\hat{A}_n}{10}},$$

де  $\Pi_0 = 1 \text{ мкВт/см}^2$ .

4. Оцінювання невизначеностей вхідних величин:

а) стандартна невизначеність за типом  $A$  визначається за формулою

$$u_A(\bar{A}_n) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_{ni} - \bar{A}_n)^2}; \quad (3.2)$$

б) стандартні невизначеності за типом  $B$  оцінюються для границь поправок  $\delta_{\text{осн}}$ ,  $\delta_{\text{и}}$ ,  $\delta_T$  і границь НСП коефіцієнта перетворення  $\delta_f$ , взятих з технічного опису приладу; границі основної похибки  $\theta_{\text{осн}} = 1$  дБ; границі похибки індикатора  $\theta_{\text{и}} = 0,48$  дБ; границі температурної похибки  $\theta_T = 0,6$  дБ; границі похибки визначення коефіцієнта перетворення  $\theta_f = 0,5$  дБ (для антени АП-ППЭ-1). У припущенні рівномірного розподілу похибки усередині границь стандартні невизначеності за типом  $B$  будуть дорівнювати:

$$u(\delta_{\text{осн}}) = \theta_{\text{осн}} / \sqrt{3} = 0,577 \text{ дБ}; \quad u(\delta_{\text{и}}) = \theta_{\text{и}} / \sqrt{3} = 0,277 \text{ дБ};$$

$$u(\delta_T) = \theta_T / \sqrt{3} = 0,346 \text{ дБ}; \quad u(\delta_f) = \theta_f / \sqrt{3} = 0,289 \text{ дБ}.$$

Значення стандартних невизначеностей  $u(K_a)$  і  $u(K_{\text{да}})$  прийняті рівними нулю через відсутність даних у технічному описі приладу.

5. Визначення коефіцієнтів чутливості здійснюється за формулою:

$$c_i = \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|, \text{ у якій } x_i - i\text{-та вхідна величина модельного рівняння.}$$

Для лінійного модельного рівняння (3.1) всі коефіцієнти чутливості дорівнюють одиниці:

$$c_A = c_{\text{осн}} = c_u = c_T = c_f = 1.$$

6. Обчислення внесків невизначеності: оскільки всі коефіцієнти чутливості дорівнюють одиниці, всі внески невизначеності відповідають стандартним невизначеностям вхідних величин.

7. Бюджет невизначеності, складений за отриманими даними (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 - Бюджет невизначеності вимірювання ЩПЕ

| Вхідна величина       | Оцінка вхідної величини, дБ             | Стандартна невизначеність вхідної величини, дБ | Число степенів свободи $\nu_i$   | Закон розподілу вхідної величини | Коефіцієнт чутливості $c_i$  | Внесок невизначеності        |
|-----------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $A_{\text{и}}$        | $\bar{A}_u$                             | $u_A(\bar{A}_{\text{и}})$                      | $n - 1$                          | Стьюдент                         | 1                            | $u_A(\bar{A}_{\text{и}})$    |
| $\delta_{\text{осн}}$ | 0                                       | 0,577                                          | $\infty$                         | Рівномірний                      | 1                            | 0,577                        |
| $\delta_{\text{и}}$   | 0                                       | 0,277                                          | $\infty$                         | Рівномірний                      | 1                            | 0,277                        |
| $\delta_T$            | 0                                       | 0,346                                          | $\infty$                         | Рівномірний                      | 1                            | 0,346                        |
| $K_f$                 | - 10                                    | 0,289                                          | $\infty$                         | Рівномірний                      | 1                            | 0,289                        |
| $K_a$                 | 0                                       | $u(K_a)$                                       | $\infty$                         | Рівномірний                      | 1                            | $u(K_a)$                     |
| $K_{\text{да}}$       | 0                                       | $u(K_{\text{да}})$                             | $\infty$                         | Рівномірний                      | 1                            | $u(K_{\text{да}})$           |
| Вимірювана величина   | Результат вимірювань, дБ                | Сумарна стандартна невизначеність, дБ          | Ефективне число степенів свободи | Рівень довіри                    | Фактор покриття              | Розширена невизначеність, дБ |
| $A_n$                 | $\bar{A}_u - K_f + K_a + K_{\text{да}}$ | $u_c(A_n)$                                     | $\nu_{\text{eff}}$               | $p = 0,95$                       | $t_{0,95}(\nu_{\text{eff}})$ | $U$                          |

8. Визначення коефіцієнтів кореляції: вхідні величини є незалежними, тому всі можливі коефіцієнти кореляції дорівнюють нулю.

9. Визначення сумарної невизначеності здійснюється за формулою:

$$u_c(A_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^7 u_i^2(A_n)} = \sqrt{u_A^2(\bar{A}_u) + u_B^2(A_n)},$$

де  $u_B(A_n)$  — сумарна стандартна невизначеність за типом В вимірювання ЩПЕ за допомогою ПЗ-19, що дорівнює 0,78 дБ (для антени АП-ППЭ-1).

10. Обчислення розширеної невизначеності здійснюється за формулою

$$U = k \cdot u_c(A_{\Pi}), \quad (3.3)$$

де  $k$  — фактор покриття, що обчислюється як коефіцієнт Стюдента для ймовірності 0,95 і ефективного числа степенів свободи:

$$\nu_{\text{eff}} = (n-1) \left[ \frac{u_c(A_n)}{u_A(\bar{A}_u)} \right]^4.$$

Вираз для розрахунку розширеної невизначеності як функції стандартної невизначеності за типом А буде мати вигляд:

$$U = k \cdot u_c(A_n) = t_{0,95} \left[ (n-1) \left( 1 + \frac{u_B^2(A_n)}{u_A^2(\bar{A}_u)} \right)^2 \right] \sqrt{u_A^2(\bar{A}_u) + u_B^2(A_n)}.$$

Залежність розширеної невизначеності від значення стандартної невизначеності за типом А, що змінюється у межах від 0 до 0,5, і кількості спостережень  $n$  наведена на рис. 3.1.

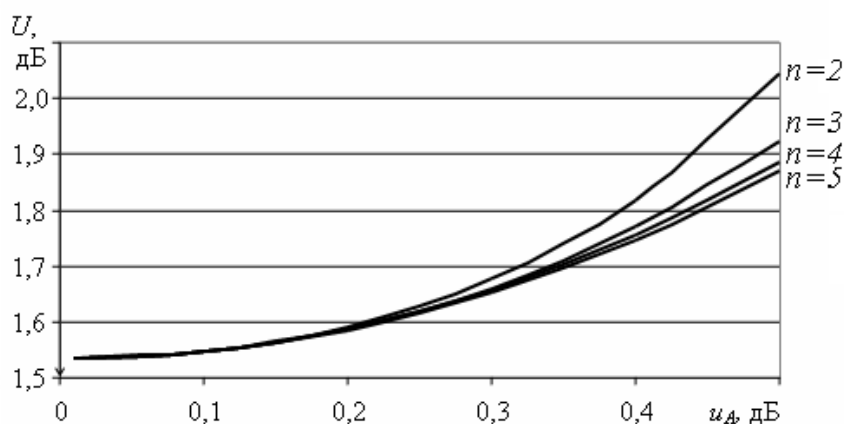


Рисунок 3.1. Залежність розширеної невизначеності (дБ) від стандартної невизначеності за типом А і кількості спостережень  $n$

Для отримання значення розширеної невизначеності в абсолютних одиницях, можна скористатися формулою перерахунку:

$$U(\Pi) = 0,23 \times \hat{\Pi} \times U,$$

$$\text{де } \hat{\Pi} = \Pi_0 \cdot 10^{\frac{\hat{A}_\Pi}{10}}.$$

Під час розрахунку  $U(\Pi)$  варто враховувати, що для її достовірного оцінювання значення  $U$  (дБ) не повинне перевищувати 2 дБ.

#### 11. Запис результату вимірювань

$$\Pi = \left( \hat{\Pi} \pm U(\Pi) \right) \frac{\text{мкВм}}{\text{см}^2}, \quad p = 0,95.$$

### 3.2 Процедура оцінювання невизначеності вимірювань вихідних параметрів Еталону –СН

Міжнародні стандарти з електромагнітної сумісності (ЕМС) встановлюють вимоги до технічних засобів за стійкістю до дії електромагнітних перешкод, що мають імпульсну природу. Для метрологічного забезпечення проведення таких випробувань в Україні створений еталон одиниць максимальних значень напруженості імпульсного електричного й магнітного полів (еталон РЕМП). Еталон РЕМП забезпечує відтворення в робочому обсязі імпульсів напруженостей електричного й магнітного полів, атестацію й повірку засобів вимірювань напруженостей імпульсних електричного й магнітного полів. Еталон РЕМП може бути також використаний для метрологічної атестації шунтів і атенюаторів при реверсному його використанні. У такому випадку еталон іменується – еталон СН (Сили струму й напруги).

Оцінювання невизначеності вимірювання коефіцієнту поділення здійснюється при десятикратному відтворенні імпульсу електричного поля. Обробка експериментальних даних здійснюється графоаналітичним методом.

Схема вимірювальної установки зображена на рисунку 3.2.

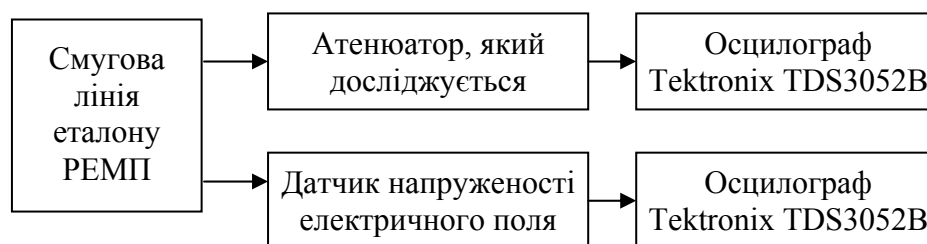


Рисунок 3.2. Схема вимірювальної установки

Процедура оцінювання невизначеності вимірювань вихідних параметрів Еталону –СН виконується у наступному порядку:

1. Складання модельного рівняння

Коефіцієнт поділення визначається формулою

$$k_a = \frac{V_2}{V_1}, \quad (k > 1),$$

де  $V_2$  – напруга на потенційному електроді, В, причому

$$V_2 = \frac{V_{o2} \cdot h}{k_{\Pi}} = \frac{X_2 \cdot k_2}{k_{\Pi}} \cdot h,$$

де  $V_{o2}$  – напруга на осцилографі у каналі 2, В;  $h$  – висота смугової лінії, м;

$X_2$  – кількість поділок на екрані осцилографа, які відповідають максимальному значенню осцилограми сигналу з датчика напруженості електричного поля;  $k_{\Pi}$  – коефіцієнт перетворення датчика напруженості електричного поля, В/(В/м);  $k_2$  – коефіцієнт чутливості осцилографа по каналу 2, В/под;

$V_1$  – напруга з дільника напруги, В, причому

$$V_1 = V_{o1} = X_1 \cdot k_1,$$

де  $V_{o1}$  – напруга на осцилографі у каналі 1, В;  $X_1$  – кількість поділок на екрані осцилографа, які відповідають максимальному значенню осцилограми

сигналу з атенюатора;  $k_1$  – коефіцієнт чутливості осцилографа по каналу 1, В/под.

Значення коефіцієнту поділення розраховується через середнє арифметичне  $n$  результатів спостережень відношення  $(X_2/X_1)$ . Таким чином, аналіз схеми вимірювальної установки та процедури вимірювання дозволяє записати модельне рівняння в наступному загальному вигляді:

$$k = \left( \frac{\overline{X_2}}{\overline{X_1}} \right) \frac{k_2 \cdot h}{k_{\Pi} \cdot k_1}, \quad (3.4)$$

$$\text{де } \left( \frac{\overline{X_2}}{\overline{X_1}} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{X_{2i}}{X_{1i}} \quad (3.5); \quad X_{1i}, \quad X_{2i} - i\text{-е спостереження максимального}$$

значення осцилограм в першому та другому каналах, відповідно.

2. Закон розповсюдження невизначеності та оцінювання розширеної невизначеності

Модельне рівняння (3.4) дозволяє записати вираження для відносної сумарної стандартної невизначеності параметра  $k_a$ , який вимірюється (закон розповсюдження невизначеності), у наступному вигляді:

$$\tilde{u}_c(k_a) = \sqrt{\tilde{u}_A^2(\overline{X_2/X_1}) + \tilde{u}_1^2 + \tilde{u}_h^2 + \tilde{u}_{\Pi}^2 + \tilde{u}_2^2}, \quad (3.6)$$

$$\text{де } \tilde{u}_A(\overline{X_2/X_1}) = \frac{u_A(\overline{X_2/X_1})}{\overline{X_2/X_1}} 100\% \quad (3.7) - \text{відносна невизначеність за типом А}$$

вимірювання відношення амплітуд осцилограм імпульсів, причому

$$u_A(\overline{X_2/X_1}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_{2i}/X_{1i} - \overline{X_2/X_1})^2}; \quad (3.8)$$

$\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_{\Pi}, \tilde{u}_h$  – відносні стандартні невизначеності, відповідно, коефіцієнтів чутливості вертикальних шкал осцилографів  $k_1, k_2$ , коефіцієнту

перетворення датчика напруженості електричного поля  $k_n$  та вимірювання відстані між електродами датчика  $h$ .

В загальному вигляді відносна стандартна невизначеність за типом В  $j$ -ї вхідної величини  $x_j$  визначається за формулою:

$$\tilde{u}(x_j) = \frac{u(x_j) \cdot 100\%}{|\hat{x}_j|}, \quad (3.9)$$

де  $u(x_j)$  – стандартна невизначеність за типом В, причому

$$u(x_j) = \frac{\theta_j}{\alpha_j}, \quad (3.10)$$

де  $\theta_j$  – границя невиключеної систематичної похибки (НСП)  $j$ -ї вхідної величини;  $\alpha_j$  – коефіцієнт, що відповідає прийнятому закону розподілу всередині границь НСП.

Якщо границі НСП вхідної величини подані у відносному вигляді  $\tilde{\theta}_j$ , відносна стандартна невизначеність за типом В визначається за формулою (3.10), в яку замість  $\theta_j$  підставляють  $\tilde{\theta}_j$ .

Розширена невизначеність шуканого вихідного параметру оцінюється за формулою:

$$U(k_a) = \frac{t_{0,95}(v_{eff}) \cdot \hat{k}_a \cdot \tilde{u}_c(k_a)}{100\%}, \quad (3.11)$$

де  $t_{0,95}(v_{eff})$  – фактор покриття, що визначається за табл. Стюдента для ймовірності 0,95 та ефективного числа степенів свободи, яке розраховується за формулою Велча-Сатерсвейта:

$$v_{eff} = (n-1) \left[ \frac{\tilde{u}_c(k_a)}{\tilde{u}_A(X_2/X_1)} \right]^4. \quad (3.12)$$

### 3. Бюджет невизначеності

Бюджет невизначеності наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Бюджет невизначеності вимірювання коефіцієнту поділення атенюатору

| Вхідна величина      | Оцінки вхідних величин                                       | Відносні стандартні невизначеності вхідних величин | ЧСС         | Розподіл ймовірностей    |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------|--------------------------|
| $\overline{X_2/X_1}$ | $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{X}_{2i}}{\hat{X}_{1i}}$ | $\tilde{u}_A(\overline{X_2/X_1}), \%$              | $n-1$       | Стюдент                  |
| $k_1$                | $\hat{k}_1$                                                  | $\tilde{u}_1, \%$                                  | $\infty$    | Рівномірний              |
| $k_{\Pi}$            | $\hat{k}_{\Pi}$                                              | $\tilde{u}_{\Pi}, \%$                              | $\infty$    | Нормальний               |
| $k_2$                | $\hat{k}_2$                                                  | $\tilde{u}_2, \%$                                  | $\infty$    | Рівномірний              |
| $h$                  | $\hat{h}$                                                    | $\tilde{u}_h, \%$                                  | $\infty$    | Нормальний               |
| Вихідна величина     | Оцінка вихідної величини                                     | Відносна сумарна стандартна невизначеність         | ЕЧСС        | Розширена невизначеність |
| $k_a$                | $\hat{k}_a$                                                  | $\tilde{u}_c(k_a), \%$                             | $\nu_{eff}$ | $U(k_a), \%$             |

Примітка. Значення коефіцієнту перетворення датчика напруженості електричного поля  $k_{\Pi}$  та відстані між електродами датчика  $h$  беруть з сертифікату атестації датчика в якому для цих параметрів указані довірчі границі похибки для ймовірності 0,95.

#### 4. Подання результату вимірювання

Результат вимірювання вихідного параметру подається у наступному вигляді:

$$k_a = \hat{k}_a \pm U(k_a), p = 0,95.$$

Примітка. Розширена невизначеність округляється до двох значущих цифр. Числове значення результату вимірювання повинно закінчуватися цифрами того ж розряду, що і значення розширеної невизначеності.

Розглянемо приклад оцінювання невизначеності вимірювання коефіцієнту поділення атенюатора

Результати спостережень максимального значення осцилограм у першому та другому каналах наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Результати спостережень максимального значення осцилограм у першому та другому каналах

| № спостереження,<br>$i$ | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $X_{1i}$                | 3,00  | 3,02  | 2,95  | 3,06  | 2,96  | 2,97  | 3,04  | 3,03  | 3,01  | 2,96  |
| $X_{2i}$                | 2,95  | 2,98  | 2,92  | 2,99  | 2,91  | 2,92  | 2,98  | 2,96  | 2,97  | 2,92  |
| $X_{2i}/X_{1i}$         | 0,983 | 0,987 | 0,990 | 0,977 | 0,983 | 0,983 | 0,980 | 0,977 | 0,987 | 0,986 |

Реалізація процедури оцінювання невизначеності вимірювання здійснюється в наступному порядку:

1) Здійснити оцінку вхідної величини  $\overline{X_2/X_1}$  за формулою (3.5), коефіцієнтів  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_n$  та відстані  $h$  за паспортними даними на відповідні прилади. Розрахувати оцінку вихідної величини  $k_a$  за формулою (3.4), підставивши значення  $\overline{X_2/X_1}$ ,  $\hat{k}_1$ ,  $\hat{k}_2$ ,  $\hat{k}_n$ ,  $\hat{h}$ . Для даного прикладу оцінки вхідних величин та оцінка вихідної величини наведені в табл. 3.

2) Обчислити стандартні невизначеності вхідних величин:

а) невизначеність вимірювання за типом А визначається для вхідної величини  $\overline{X_2/X_1}$  за формулою (3.8), а відносна невизначеність за типом А розраховується за формулою (3.7);

б) відносна невизначеність вимірювання за типом В визначається для параметрів  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_n$  за формулою (3.10), а відносна невизначеність за типом В для  $h$  розраховується за формулою (3.9). Для даного прикладу границі НСП дорівнюють:

- для  $k_1$ ,  $k_2$  границі НСП  $\theta_1 = \theta_2 = 1,5 \%$  у припущенні рівномірного закону розподілу похибки всередині границь ( $\alpha = \sqrt{3}$ );

- для  $k_n$  та  $h$  границі НСП відповідно  $\theta_n = 4,2 \%$ ,  $\theta_h = 0,1$  мм у припущенні нормального розподілу похибки всередині границь з ймовірністю 0,95 ( $\alpha = 1,96$ ).

3) Розрахувати відносну сумарну стандартну невизначеність за формулою (3.6).

4) Розрахувати за формулою (3.12) ефективне число степенів свободи та для отриманого значення  $v_{eff}$  за табл. Стюдента для ймовірності 0,95 визначити фактор покриття. У даному прикладі для  $v_{eff} = 879748$  фактор покриття дорівнює 1,96.

5) Обчислити відносну розширену невизначеність як додаток сумарної відносної стандартної невизначеності на фактор покриття. Отримане значення внести до бюджету невизначеності (табл. 3.2). Розширена невизначеність в абсолютних одиницях розраховується за формулою (3.11).

6) Записати результат вимірювання коефіцієнту поділення атенюатора:

$$k = 10930 \pm 530, \quad p = 0,95.$$

Результати розрахунку невизначеності вимірювань коефіцієнту поділення атенюатора зведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Бюджет невизначеності вимірювання коефіцієнту поділення атенюатору

| Вхідна величина      | Оцінки вхідних величин          | Відносні стандартні невизначеності вхідних величин, % | ЧСС      | Розподіл ймовірностей       |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|-----------------------------|
| $\overline{X_2/X_1}$ | 0,983                           | 0,138                                                 | $n-1$    | Стюдент                     |
| $k_1$                | 0,2 В/дел.                      | 0,87                                                  | $\infty$ | Рівномірний                 |
| $k_{\Pi}$            | $2,15 \cdot 10^{-5}$<br>В/(В/м) | 2,14                                                  | $\infty$ | Нормальний                  |
| $k_2$                | 0,1 В/дел.                      | 0,87                                                  | $\infty$ | Рівномірний                 |
| $h$                  | 0,478 м                         | 0,011                                                 | $\infty$ | Нормальний                  |
| Вихідна величина     | Оцінка вихідної величини        | Відносна сумарна стандартна невизначеність, %         | ЕЧСС     | Розширена невизначеність, % |
| $k$                  | 10927                           | 2,47                                                  | 879748   | 4,845                       |

### 5.3.3 Процедура оцінювання невизначеності вимірювань радіозавад від громадського наземного електротранспорту

При випробуваннях електротранспортних засобів на завадоємкість виконують вимірювання квазіпікових значень напруженості поля радіоперешкод у децибелах відносно 1 мкВ/м у смузі частот 0,24 - 300 МГц відповідно до вимог міждержавного стандарту ГОСТ 29205-91 «Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электротранспорта. Нормы и методы испытаний».

Вимірювання напруженості поля радіоперешкод проводять на транспортному засобі в спорядженому стані, установлюючи антену між опорами паралельно осі контактного проводу на відстані 10 м від осі руху транспортного засобу.

Вимірювання напруженості поля радіозавад здійснюють методом прямих вимірювань за допомогою приладу SMV-11 з антеною FMA-11(0÷1,6) МГц на частотах (0,24; 1,0) МГц та з антеною FMA-11(1,6÷30) МГц на частотах (3,5; 10,0; 30) МГц, та за допомогою приладу BSM 401-A1 з антеною MA-101 на частотах (30; 45; 90; 180; 300) МГц. На кожній частоті напруженість поля радіозавад реєструють під час розгону, гальмування транспортного засобу, його руху зі сталою швидкістю та коли він перебуває в нерухомому стані з увімкненими споживачами електричної енергії. При визначенні результату вимірювання напруженості поля радіозавад враховують основну похибку вимірювання, температурну похибку та додаткову похибку напруги шуму вимірювального приладу (з урахуванням похибок антени, яка використовується при вимірюванні напруженості поля на конкретних частотах).

Процедура оцінювання невизначеності вимірювань складається з наступних етапів:

#### 1. Складання модельного рівняння вимірювання радіозавад

Напруженість поля радіозавад визначається в децибелах на кожній частоті та для кожного режиму руху як максимальне значення, отримане з шести виконаних вимірювань, і модельне рівняння з урахуванням всіх поправок має вигляд:

$$E = E_{i \max} + \delta_{\text{осн}} + \delta_T + \delta_d, \quad (3.13)$$

де  $E_{i \max}$  – максимальне виміряне значення напруженості поля радіозавад, дБ;  $\delta_{\text{осн}}$  – основна похибка вимірювання приладу, дБ;  $\delta_T$  –

похибка діапазону температур, дБ;  $\delta_d$  – додаткова похибка напруги шуму вимірювального приладу, дБ.

## 2. Оцінювання невизначеності

Модельному рівнянню (3.13) відповідає наступний вираз для сумарної стандартної невизначеності вимірювання радіозавад  $u_c(E)$  згідно ДСТУ-Н РМГ 43:2006:

$$u_c(E) = \sqrt{u^2(\delta_{\text{осн}}) + u^2(\delta_T) + u^2(\delta_d)}, \quad (3.14)$$

де  $u(\delta_{\text{осн}}) = \frac{\theta_{\text{осн}}}{\sqrt{3}}$  (3.15),  $u(\delta_T) = \frac{\theta_T}{\sqrt{3}}$  (3.16),  $u(\delta_d) = \frac{\theta_d}{\sqrt{3}}$  (3.17) – стандартні невизначеності відповідно  $\delta_{\text{осн}}$ ,  $\delta_T$ ,  $\delta_d$  у припущенні рівномірного розподілу похибки усередині границь  $\theta_{\text{осн}}$ ,  $\theta_T$ ,  $\theta_d$ .

Розширена невизначеність визначається з виразу:

$$U(E) = k \cdot u_c(E), \quad (3.18)$$

де  $k = 2$  – фактор покриття.

## 3. Складання бюджету невизначеності

Бюджет невизначеності вимірювань напруженості поля радіозавад наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Бюджет невизначеності вимірювань напруженості поля радіозавад

| Вхідна величина       | Оцінки вхідних величин | Стандартні невизначеності вхідних величин | Коефіцієнт чутливості | Внески невизначеності, дБ |
|-----------------------|------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| $\delta_{\text{осн}}$ | 0                      | (3.15), дБ                                | 1                     | (3.15), дБ                |
| $\delta_T$            | 0                      | (3.16), дБ                                | 1                     | (3.16), дБ                |
| $\delta_d$            | 0                      | (3.17), дБ                                | 1                     | (3.17), дБ                |

| Вихідна величина | Оцінка вихідної величин и | Сумарна стандартна невизначеність | Фактор покриття | Розширена невизначеність |
|------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------------|
| E                | $\hat{E} = E_{i \max}$    | (3.14), дБ                        | 2               | (3.18), дБ               |

#### 4. Подання результату вимірювання

Результат вимірювання напруженості поля радіозавад подається у наступному вигляді:

$$E = \hat{E} \pm U(E), \quad p = 0,95. \quad (3.19)$$

Примітка. Розширена невизначеність округляється до двох значущих цифр. Числове значення результату вимірювання повинно закінчуватися цифрами того ж розряду, що і значення розширеної невизначеності.

Приклад оцінювання невизначеності вимірювань напруженості поля радіозавад від громадського наземного електротранспорту

Оцінка результату вимірювання напруженості поля радіозавад приладом SMV-11 з антеною FMA-11(0÷1,6) МГц на частоті 0,24 МГц  $E_{i \max} = 4$  дБ. Границі похибок  $\theta_{\text{осн}} = 2$  дБ,  $\theta_T = 0,3$  дБ,  $\theta_d = 1$  дБ (визначаються за паспортними даними на прилад та антену, які використовуються для вимірювання напруженості поля на даній частоті).

Результати розрахунку невизначеності вимірювань напруженості поля радіозавад зведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Бюджет невизначеності вимірювань при визначенні напруженості поля

| Вхідна | Оцінки | Стандартні | Коефіцієнт | Внески |
|--------|--------|------------|------------|--------|
|--------|--------|------------|------------|--------|

| величина              | вхідних величин          | невизначеності вхідних величин    | чутливості      | невизначеності, дБ       |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------------|
| $\delta_{\text{осн}}$ | 0                        | 1,15 дБ                           | 1               | 1,15                     |
| $\delta_{\text{Т}}$   | 0                        | 0,17 дБ                           | 1               | 0,17                     |
| $\delta_{\text{д}}$   | 0                        | 0,58 дБ                           | 1               | 0,58                     |
| Вихідна величина      | Оцінка вихідної величини | Сумарна стандартна невизначеність | Фактор покриття | Розширена невизначеність |
| Е                     | 4 дБ                     | 1,3 дБ                            | 2               | 2,6 дБ                   |

Результат вимірювання напруженості поля радіозавад має наступний вигляд:

$$E = (4,0 \pm 2,6) \text{ дБ, } p = 0,95.$$

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

В результаті проведених досліджень отримані найважливіші наукові і науково-технічні результати:

**В НВЧ діапазоні.** В результаті впливу електромагнітного НВЧ поля на насіння ячменю визначені оптимальні параметри по критерію «доза-експозиція» по енергії проростання та схожості насіння, а також для боротьби із грибковими захворюваннями. Показники схожості при такій обробці збільшувались до 4%, а також спостерігалось стійке зменшення ймовірність хвороб, особливо фузарфозу.

Одержані результати відповідають рівню сучасних досліджень. Важливість одержаних результатів в тому, що в умовах перманентної недостатності весняних осадків надзвичайно важливою є збільшення енергії проростання насінневого матеріалу. Збільшення врожайності в результаті обробки становить до 8%.

На основі експериментальних досліджень комбінованого впливу електромагнітного НВЧ поля і термічної обробки гарячим повітрям в процесі сушки фруктів, овочів та інших сільгосппродуктів визначені режими роботи близькі до оптимальних по критерію «енерговитрати–якість».

Екологічно чиста та енергозберігаюча технологія обробки дозволяє одержувати продукти високої якості.

**В ІЧ діапазоні.** Розроблена теплофізична модель об'єкту контролю, яка більше (в порівнянні з аналогами ) відображає реальні умови проведення АТК і дозволяє оцінювати очікуєме значення сигналу від дефекту з великою достовірністю, а також аналізувати закономірності методу. Розроблена модель по точності отримуваних результатів наближається до тривимірної моделі, а по затратах розрахункових ресурсів залишається на рівні двохмірної моделі. Розроблена теплофізична модель дозволяє не тільки оптимізувати режим контролю, а також і визначає поріг чутливості методу.

Запропонована методика оптимізації процедури проведення активного теплового контролю, яка заснована на критерії максимізації співвідношення сигнал/шум. Розроблений критерій оптимізації режиму спрямований на підвищення чутливості в умовах наявності випромінювальної завади.

На підставі розробленої моделі побудовані довідкові таблиці чутливості активного теплового методу та сформовані рекомендації щодо оптимізації режиму контролю.

Розроблені інформаційні ознаки і правила прийняття рішення при обробці результатів термографічного контролю газоперекачувального обладнання. Були виявлені три основні інформаційні ознаки термограм проконтрольованого обладнання: 1) відмінності термограм по формі; 2) відмінність термограм по змісту фону; 3) положення гістограми на шкалі температур. На підставі вказаних ознак були розроблені три часних критерія і один підсумковий.

Розроблені стенд і методика для теплової дефектоскопії об'єктів типу обертання - елементів авіаційної техніки. Розроблена процедура дозволяє виявляти дефекти типу розшарування у теплозахисних покриттях. Проведені випробування стенду і методики. Розроблена методика дозволила знизити ефект накопичення тепла при імпульсному нагріві контролюємої зона об'єкту.

Розроблена програма і методика вияву наявності рідкої фази у газових магістралях. Отримані розрахункові і експериментальні дані підтверджують принципову можливість використання термографічного методу для оцінювання рівня конденсату у газопроводах. Точність методу оцінювання рівню конденсату, який виникає внаслідок різниці температур навколишнього середовища і транспортуемого газу, значно підвищується у зимовий період.

Проведено термографічне обстеження трубопроводних магістралей високого тиску Запорізької АЕС. Були обстежені паропроводи у теплоізоляції і трубопроводи основного конденсату.

По паропроводам отриманий негативний результат: виявлення дефектів типу «зменшення товщини» стінки труби скрізь товстий шар використовуємої теплоізоляції неможливий. Наявність теплоізоляції створює подвійний негативний ефект: 1) маскує температурне поле труби і вносить температурний шум; 2) підсилює засвітку від інших джерел. В підсумку тепловий шум від обох факторів може складати більше  $23^{\circ}\text{C}$ , що значно перевищує рівень корисного сигналу.

При термографуванні трубопроводів основного конденсату був виявлений дефект труби, що підтверджує ефективність використання теплового методу для такого роду об'єктів. Температурні аномалії, які виникли внаслідок дефектів, на поверхні таких труб можуть досягати кількох градусів і у 4-5 разів перевищувати сигнали від завад.

**В оптичному діапазоні:** Проведено фізичне та математичне моделювання фізичних процесів в оптоволоконних лазерах з застосуванням рідких кристалів. Були досліджені фізичні ефекти в кільцевих резонаторах оптоволоконних лазерів. Досліджені фізичні ефекти синхронізації мод в резонаторах оптоволоконних лазерів. Проведено математичне моделювання лазерного далекоміра. Розроблена структура лазерного далекоміра та умов його використання.

Було проведено моделювання умов синхронізації мод в оптоволоконних лазерах. Розроблені математичні моделі резонаторів оптоволоконних лазерів з застосуванням рідких кристалів. Математичні моделі періодичних структур та відомості про розповсюдження електромагнітних хвиль в таких структурах.

Побудовано макет кільцевого волоконного лазера з синхронізацією мод.

Розроблена теоретична модель формування випромінювання оптоволоконних лазерів типа суперконтинууму для забезпечення прецизійної вимірювальної, сканувальної геодезичної та медичної техніки;

Проведено дослідження модуляційних характеристик оптоволоконних лазерів та їх впливу на спектр випромінювання, що є актуальним зокрема для вирішення задач лінійної та нелінійної лазерної спектроскопії;

Розроблено теоретичні моделі умов генерації, частотного перетворення лазерного випромінювання оптоволоконних лазерів та їх модуляційних властивостей з використанням рідких кристалів, які забезпечують керування поляризацією генеруємих мод.

**В області нетрадиційній енергетики.** Проведені дослідження використання вітрогенераторів, отримані конструкційні рішення відбору потужності руху повітряних мас, їх використання у виробництві та побуті, принципи користування устаткуванням різних потужностей в побуті та виробництві, а також для індивідуальних та колективних користувачів. Отримано структурну схему системи отримання, зберігання та використання водню, а також виконано роботи по створенню окремих вузлів системи. Розроблено способи використання устаткування для отримання, зберігання водню, та заходи безпеки при користуванні такого устаткування. Розроблено макет системи для отримання, зберігання та використання водню. Крім того, запропоновані заходи безпеки при використанні вітрогенераторів.

Запропоновано принцип адаптації транспортних засобів, що працюють на вуглеводневих енергоносіях, під водневий енергоносіє та заходи безпеки при користуванні воднем в транспортних засобах.

Виконано роботи з метрологічного забезпечення системи звиробництва та використання альтернативної енергії: розроблено вимірювальну систему з контролю параметрів роботи аерогідродинамічного двигуна на базі сучасної технології збору та обробки інформації LabVIEW NI.

Систематизовано інформацію про похибки, що виникають у результаті впливу зовнішніх факторів, таких як шуми, перешкоди, наведення й т.п. Розроблено вдосконалений математичний апарат для оцінки метрологічних характеристик.

Виконано дослідження, пов'язані з удосконалюванням методології метрологічного забезпечення вимірювальної системи для контролю параметрів системи з виробництва альтернативної енергії: а) обґрунтовано перелік контрольованих характеристик при метрологічній атестації й періодичній повірці; б) обґрунтовано кількість контрольованих оцінок у подіапазонах вимірів залежно від особливостей структури системи; в) розроблено моделі експлуатації й на їх основі оптимізована процедура визначення міжповірчих інтервалів.

Виконано експериментальних досліджень, метою яких є перевірка адекватності математичних моделей похибок шляхом фізичного моделювання роботи системи: а) розроблена «пробна» система на базі ПК з інструментальною платою збору даних, розроблено для неї програмне забезпечення; б) виконано розрахунку метрологічних характеристик.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень резонансного магнітоакустичного впливу на речовини, які містять воду, органічні речовини та їх суміші, а також впливу кавітації на рідкі середовища визначені впливи на показники дисоціації води, швидкість її нагрівання, а також на октановий і цетановий показники відходів нафтопереробки.

Може мати широкий спектр застосування в хімії, нафтохімії та в технологіях одержання альтернативного палива для зменшення затрат енергії на реакції дисоціації.

Встановлено, що в результаті резонансного магнітоакустичного впливу – при комплексній обробці магнітними, електромагнітними полями та акустичної кавітації призводить до зменшення теплоємності води в інтервалі температур  $25 \div 60^\circ\text{C}$  на порядок 200 – 400 Дж/(кг·°C).

Це явище може бути використане для безреагентної обробки води на теплових станціях для одержання пару для зменшення затрат енергії для нагрівання води до температури кипіння.

Проведені дослідження є новими, аналоги таких досліджень не відомі.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. М.А. Маргулис. Основы звукохимии. М.: «Высшая школа», 1984. 272 с.
2. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука. 1968. 268 с.
3. Классен В.И. Омагничивание водных систем. М.: «Химия», 1978. 240 с.
4. В.Г. Широносков. Резонанс в физике, химии и биологии. Ижевск. Издательский дом «Удмуртский университет», 2000/01. 92 с.
5. О. И. Мартынова, Б. Т. Гусев и Е. А. Леонтьев. К вопросу о механизме влияния магнитного поля на водные растворы солей // «Успехи физических наук». - 1969 г. - Т. 98, вып.1. - С. 195 – 199.
6. В. И. Лесин. Физико-химический механизм предотвращения парафиноотложений с помощью постоянных магнитных полей // Нефтепромысловое дело, 2001, № 5, С.21 – 23.
7. СВЧ-энергетика . Под редакцией Э. Окресса. Т. 2. Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности. М.: Издательство «Мир», 1971. 272 с.
8. СВЧ-энергетика . Под редакцией Э. Окресса. Т.3. Применение энергии сверхвысоких частот в медицине, науке и технике. М.: Издательство «Мир», 1971. 248 с.
9. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. – Саратов: Издат. Сарат. ун-та, 1983. 140 с.
10. Рогов И.И. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1988. 272 с.
11. Бородин И.Ф., Шарков.Г.А., Гарин А.Д. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. 56 с.

12. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения. – М.: РотапринтИРЭ, 1981.
13. Некрутман С.В. Аппараты СВЧ в общественном питании. - М.: Экономика, 1973. 118 с.
14. Явчуновский В.Я. Микроволновая и комбинированная сушка. Физические основы технологии и оборудования. – Саратов: Изд-во Саратовского университета. 1992. 212 с.
15. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. – М.: Энергия. 1968. 312 с.
16. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. – М.: Наука. 2003. 448 с.
17. Морозов Г.А. Микроволновые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: современные подходы// «Антенны» Выпуск 1(40), 1988, с. 88-97.
18. Jangu's Thuery. Microwave Industrial, Scientific and Medical Applications Edited by Edward M. Grant. Larstin Arteda House/ Boston/ London. 1992. 669 ps.
19. Славин В.Е., Экологически чистые волновые технологии в сельском хозяйстве. Израиль. [http://www.elektron2000.com/slavin\\_0029.html](http://www.elektron2000.com/slavin_0029.html)
20. Presman A.S. (1968) , Electromagnetic fields and wildlife., Moscou, A science, 28 p.
21. Khizhnyak E.P. and Ziskin M.C., (1996), Temperature Oscillations in Liquid Media Caused by Continuous (Nonmodulated) Millimeter Wavelength Electromagnetic Irradiation , Bioelectromagnetics, v.17, pp . 223 -229.
22. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии. К.: "Наукова думка", 1987. 417 с.
23. Зацепина Г.Н. Свойства и структура воды. М.: Изд-во МГУ. 1974. 168 с.
24. Зима И.И., Григорьева Н.Н., Васильев Н.Д., Кравченко А.В. Исследование населённостей геомагнитных энергетических уровней воды с учетом протолитической диссоциации. Проблемы бионики, №55, 2001.
25. Зима И.И., Богданов Г.Ф. Роторные взаимодействия в природе. Сборник научных трудов. Вып. 4(26), Харьков: ХВУ, 1999.

26. Зима И.И., Нечаев А.В., Богданов Г.Ф. Роторная спектроскопия потоков больших энергий / Харьков: Вестник ХГПУ, 1999, вып. 75.
27. Шумиловский Н.Н., Скрипко А.Л., Король В.С., Ковалев Г.В. Методы ядерного магнитного резонанса / Москва: Энергия, 1966.
28. Джеффрис К. Динамическая ориентация ядер / Москва: Мир. 1965.
29. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч.1. К.: Полиграфкнига, 1997. 940 с.
30. Зима И.И. Роторный геомагнетизм. Новый взгляд на извечные проблемы. Харьков, ООО Оберіг, 2005.
31. Зима И.И., Стрельченко В.И. Регистрация роторных излучений воды, возбуждаемых ультразвуковой кавитацией. Сб. материалов первой международной НТК «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития». Харьков: ХНУРЭ, 2006.
32. Варсонофьев В. Д., Кольман-Иванов Э.Э. Вибрационная техника в химической промышленности, М., 1985.
33. Мікрохвильові технології в народному господарстві. Втілення. Проблеми. Перспективи. (Промисловість, агропромисловий комплекс, медицина - формація). Випуск 2-3. [Зб. ст.] Ред. акад. МАІ Калінін Л.Г. Міжнар. акад. інформ.; Півен. філ. від-ня пром. радіоелектроніки МАІ, Український науково-технологічний центр. - Одеса, Київ, ТЕС, 2000 р. - 192 с.
34. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. Материалы второй всеукраинской научно-практической конференции «За чистое земледелие и экологическую безопасность». Выпуск 6. – Одесса, 2007 р. – 112 с.
35. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. Выпуск 7-8. - Одесса, 2009 р. – 144 с.
36. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур (Методи визначення якості).

37. Ахадов Я Ю. – Диэлектрические свойства чистых жидкостей. Справочник. – М.:Изд. Стандарт, 1972. – С. 412.

38. Патент UA 96328 «Спосіб розігріву загустілих або скристалізованих продуктів в металевих ємностях з невеликими розмірами люка та пристрій для його реалізації», опубл.25.10.2011 в бюл. №20. Автори: Галєєв Е.Р., Панченко О.Ю., Дохов О.І., Валєвахін Г.М.

39. Патент UA 83980 «Альтернативне паливо і спосіб його приготування», опубл. 26.08.2008 в бюл.№16. Автори: Дохов О.І., Кіуїла І.Г.,Толстих О.І., Кондрашов Е.В., Контар О.Я., Валевахін Г.М., Галєєв Е.Р., Стрільченко В.Й., Зарицький В. І.

40. Патент UA 95587 «Спосіб приготування альтернативного палива та пристрій для його реалізації», опубл. 10.08.2011 в бюл.№15. Автори: Бондаренко М.Ф., Дохов О.І., Корінько І.В., Піліграм С.С., Сліпченко М.І.,Толстих О.І.

41. Патент UA 89917 «Спосіб приготування альтернативного палива», опубл. 10.03.2010 в бюл. №5. Автори: Бондаренко М.Ф., Валєвахін Г.М., Дохов О.І., Контар О.Я., Кондратов Є.В., Сліпченко М.І., Стрільченко В.Й., Толстих О.І.

42. Біопаливо альтернативне АБТ. Технічне умови. ТУ В 24.1- 02071197-001:2009.

43. Тезисы доклада «Технологические факторы процесса сжигания альтернативного-композиционного топлива» Дохов А.И., Контарь А.А., Валевахин Г.Н., Галєєв Э.Р., Толстых А.И. Материалы VI Международной научно-практической конференции «Прикладные научные разработки» 27июня - 05 августа 2010 г. Том 7. Технические науки: Przemysl. Nauka i studia. Стр. 36-38.

44. Патент UA 56851 «Пневматична форсунка з центральною подачею повітря», опубл. 25.01.2011 в бюл. №2. Автори: Дохов О.І., Контар О.Я., Валєвахін Г.М., Галєєв Е.Р., Толстих О.І.

45. Контарь А.А., Валевахин Г.Н., Галеев Э.Р. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Украина. Одно из направлений уменьшения количества серы в жидких углеводородах. Материалы VII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки-2011» 27.06 2011-08.07.2011. Том 19. Технические науки. Praha. Publishing House. «Education and Science» 2011, с.39-39.

46. Справочник химика. Т.1. – М.: Госхимиздат, 1963. – С. 1048.

47. Патент UA 90331 «Гідродинамічний диспергатор - гомогенізатор», опубл. 26.04.2010 в бюл. №8. Авторы: Дохов О.І., Контар О.Я., Валевахін Г.М., Галеев Е.Р., Толстих О.І., Писаренко М.Г.

48. Рогов И.А., Некрутман М.С. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. М., Агромиздат, 1985, с.273-275.

49. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации)/ Под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова.– М.: «Радиотехника», 2003, с.18.

50. Патент UA 95542 «Пристрій для сушіння овочів, фруктів, ягід», опубл. 10.08.2011 в бюл. №15. Авторы: Дохов О.І., Галеев Е.Р., Валевахін Г.М.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК (Мачехин)

1. Унгер, Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы [Текст] : пер.с англ. – М. : Мир, 1980. – 656 с.
2. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М. : Наука, 1989. – 543 с.
3. Yeh, C The essence of dielectric waveguides [Текст] / C. Yeh, F.I. Shimabukuro. – Los Angeles: Springer, 2008. – 522 с.
4. [Tamura](#) K. et al. Technique for obtaining high-energy ultrashort pulses from an additive-pulse mode-locked erbium-doped fiber ring laser [Текст]/ [Doerr](#) C. //Optics Letters. – 1994,.– №1, P.10–19

5. Haus H. Additive pulse mode locking in fiber lasers [Текст]/ Ippen P.// IEEE J. Quantum Electron. – 1994,– №3, P.24–27
6. Dennis M. Experimental study of sideband generation in femtosecond fiber lasers[Текст]/ Duling I. //Quantum Electron.. – 1999 .– №9, P.54–77
7. Gubin A. Femtosecond  $\text{Er}^{3+}$  Fiber Laser for Application in an Optical [Текст]/ Clock/ M.A., N. Kireev, A.V. Tausenev, A.V. Konyashchenko, P.G. Kryukov, D.A. Tyurikov, A.S. Shelkovikov// “Laser Physics” Vol. 17, No. 11 pp.1286-1291 (2007).
8. Бейли, Д. Волоконная оптика Теория и практика [Текст] / Д.Бейли – М.: Электроника, 2006. -249 с.
9. Курков, А.С. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности [Текст] А.С. Курков // Журн. Квантовая электроника. 2004. – Т. 12, №4. – С. 883-884
7. Крюков П. Непрерывный фемтосекундный лазер на  $\text{Er}$ : волокне с диодной накачкой посредством рамановского конвертера[Текст]/ А.В. Таусенев, Г. // «Квантовая электроника», 34, №2 (2004), с. 106-110
8. Окоси, Т Волоконно-оптические датчики [Текст] / К. Окамото Мелешко – М: Атомиздат, 1990. 347 с.
9. Призма Глана-Тейлора [Электронный ресурс] / С.-Петербург. ООО "ЭЛАН+" . – Режим доступа : [www/URL: http://elan-optics.com/docs/polar\\_prizms/glan\\_taylor/1prizmaGlanaTeyloraizkalcita.pdf](http://www/URL: http://elan-optics.com/docs/polar_prizms/glan_taylor/1prizmaGlanaTeyloraizkalcita.pdf) - 10.12.2004 г. – Загл. С экрана.
10. Волоконные лазеры [Текст] :материалы III науч. –практ. конф., 12 апреля 2002 г. Новосибирск / редкол Е.М. Дианов. – Новочеркасск : Темп, 2002. – 25 с.
11. Вудс, М. Волоконные лазеры средней мощности и их применение [Текст] / М. Вудс. – Фотоника, 2004. 103 с.
12. Вейнберг, Д.К. Оптика световодов [Текст] : учеб. Д.К. Вейнберг, Д.К.Саттаров; Машиностроение 1977.- 320с.
13. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика [Текст] / Г. Агравал. – Мир, 1996. – 324 с.

14. Волоконные технологические лазеры и оценка эффективности их применения [Электронный ресурс]/ <http://technomag.edu.ru: www/URL: http://technomag.edu.ru/doc/70260.html> - 02.02.2008г. - Загл. с экрана.
15. Иоргачев, О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи [Текст] / О.В. Иоргачев. - М.: Эко-Трендз, 2002. – 282 с.
1. Курков, А.С., Дианов, Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности [Текст] / А.С. Курков, Е.М. Дианов. - «Квантовая электроника» №10 (2004).
2. Потапов, В.Т. Фотонные кристаллы и оптические волокна на их основе [Текст] / В.Т. Потапов. - Фотон-Экспресс, 2003.
3. Агравал, Г.О. Нелинейная волоконная оптика [Текст] / Агравал Г.О. - М.:Мир, 1996г.- 323с.
4. Иоргачев, Д.В., Бондаренко, О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи [Текст] / Д.В. Иоргачев, О.В. Бондаренко. М.: Эко-Трендз, 2002.
5. Tamura, K. , Doerr, C. R. , Nelson, L. E. , Haus, H. A. , Ippen, E. P. Technique for obtaining high-energy ultrashort pulses from an additive-pulse mode-locked erbium-doped fiber ring laser [Текст] / // K. Tamura, C. R. Doerr, L. E. Nelson, H. A. Haus, E. P. Ippen. - “OPTICS LETTERS” Vol. 19, No. 1/January 1 (1994).
6. Дианов, Е.М., Буфетов, И.А. Волоконные лазеры – новый прорыв в лазерной физике [Текст] / Е.М. Дианов, И.А. Буфетов. - «LightWave Russian edition» №4 (2004).
7. Gubin, M.A., Kireev, A.N., Tausenev, A.V., Konyashchenko, A.V., Kryukov, P.G., Tyurikov, D.A., Shelkovikov, A.S. Femtosecond  $\text{Er}^{3+}$  Fiber Laser for Application in an Optical Clock [Текст] / // M.A. Gubin, A.N. Kireev, A.V. Tausenev, A.V. Konyashchenko, P.G. Kryukov, D.A. Tyurikov, A.S. Shelkovikov. - “Laser Physics” Vol. 17, No. 11 pp.1286-1291 (2007).

8. Волоконные технологические лазеры и оценка эффективности их применения [Электронный ресурс]/ <http://technomag.edu.ru: www/URL: http://technomag.edu.ru/doc/70260.html> - 02.02.2008г. - Загл. с экрана.
9. Сэм, М. Лазеры и их применение [Текст] / М. Сэм. - Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 6. С. 111-117.
10. Вейнберг, В.Б., Саттаров, Д.К. Оптика световодов [Текст] / В.Б. Вейнберг, Д.К.Саттаров. - Л., Машиностроение,1977.- 320с.
11. Вудс, С., Дака, М., Флин, Г. Волоконные лазеры средней мощности и их применение [Текст] / С. Вудс, М. Дака, Г. Флин. - «Фотоника» №4 (2008).
12. Дианов, Е.М. Волоконные лазеры [Текст] / Е.М. Дианов. - «Конференции и симпозиумы» Т.174 №10,с.1139 – 1142.
13. Попов, В. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и СО<sub>2</sub> – лазеров [Текст] / В. Попов. - «Фотоника» №4 (2009).
14. Дианов, Е.М., Прохоров, А.М. Лазеры и волоконная оптика [Текст] / Е.М. Дианов, А.М. Прохоров. - «Успехи физических наук» Т.148 №2 (1986).
15. Таусенев, А.В., Крюков, П.Г. Непрерывный фемтосекундный лазер на Ег: волокне с диодной накачкой посредством рамановского конвертера [Текст] / А.В. Таусенев, П.Г. Крюков. - «Квантовая электроника», 34, №2 (2004), с. 106-110.

### **ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК (Стороженко)**

1. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов: ГОСТ 18353-79. – [Действующий от 1979-11-11]. – 22с.
2. Стороженко В.А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле : [Монография] / В.А. Стороженко, В.А. Маслова. – Х.: Смит, 2004. – 160с.

3. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. / Под общ. ред. В.В.Клюева. Т.5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль / В.П. Вавилов - М.: Машиностроение, 2004. – 697с.
4. Вавилов В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий микроэлектроники / В.П. Вавилов – М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.
5. Xavier P. V. Maldague. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing / Xavier P. V. Maldague – John Wiley & Sons, Inc., 2001. – p. 684.
6. Стороженко В.А. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом / В.А. Стороженко, В.П. Вавилов, А.Д. Волчек - К.: Техника, 1988. - 126 с.
7. Marinetti S. Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA / [S. Marinetti, E. Grinzato, P.G. Bison & others] // Infrared Physics and Technology – 2004. – vol. 46. – P. 85-91.
8. Maldague X. P. V. Chapter 2: Fundamentals of Infrared and Thermal Testing / [X. P. V. Maldague, T. S. Jones, H. Kaplan and others] – Columbus, Ohio: ASNT Press, 2001. – 718 p. – (Nondestructive Handbook: [3rd edition]. Vol. 3. Infrared and Thermal Testing / X. Maldague technical ed., P.O. Moore ed.).
9. Контроль неразрушающий тепловой. Термины и определения: ГОСТ 25314-82. – [Действующий от 1983-07-01]. – 7с.
10. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования: ГОСТ 23483-79. – [Действующий от 1980-01-01]. – 14с.
11. Infrared Methodology and Technology / X. Maldague ed. – NY: Gordon and Breach Publ., 1994. – 525 p. – (International Advances in Non Destructive Testing (IANDT): Monograph Series)
12. Вавилов В.П., Климов А.Г. Тепловизоры и их применения. –М.: Интел универсал. 2002.-88с.
13. <http://www.cinfrared.com/>

14. <http://www.infrared.com/>
15. <http://www.mikroninfrared.com/>
16. <http://www.flir.com/>
17. Антонова Л.Л. Математическая модель метода теплофизического контроля керамических электроизоляционных изделий / Л.Л. Антонова, А.А. Чуриков // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-18: сб. тр. 18 Междунар. конф. – Казань: изд-во Казанск. гос. технол. ун-та, 2005 – Т.4. –С. 133-136.
18. Васильев Е.Н. Теплофизическая модель термостабилизированной панели / Е.Н. Васильев, В.А. Деревянко, В.Е. Косенко, В.Е. Чеботарев.
19. Obbadi A. Two-dimensional Analysis of Thermal non Destructive Evaluation, by the numerical method of control volumes / [A. Obbadi, S. Belattar, M. Beihaqi and others] // IV International workshop Advances in signal processing for Nondestructive Evaluation of Materials, Canada, August 2001: proceedings / X.P.V. Maldague, Technical Editor. – Canada: ASNT, 2001. – Vol. 6. – p. 195-200.
20. Obbadi A. Characterization of delamination by a thermal method of non destructive testing / A. Obbadi, S. Belattar // Vth International Workshop Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials, Quebec City (Canada), 2-4 Aug. 2005: proceedings – Canada: ASNT, 2005. – p. 203-208
21. Thermal insulation, Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method: ISO 6781.
22. Thermal insulation. Thermography of buildings: SS024210 – Sweden.
23. Application of infrared sensing devices to the assessment of building heat loss characteristics: ANSI/ASHRAE Standard 101-1981 – U.S.A.
24. Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings: ASTM Standard C1060-90 (2003). - U.S.A.: ASTM, 2003.

25. Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging: ASTM C 1153-97 (2003). – ASTM International.
26. Standard practices for air leakage site detection in building envelopes: ASTM Designation E 1186-87 – U.S.A.
27. Manual for thermographic analysis of building enclosures: Standard 149-GP-2MP – Canada, 1986.
28. Thermal insulation: Thermography of buildings: Standard SS024210 – Sweden.
29. Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method (ISO 6781:1983, modified): DIN EN 13187 – Germany, 1999
30. Condition monitoring and diagnostics of machines: Standard ISO Committee Draft ISO/CD 18434 – 2003.
31. Condition monitoring and diagnostics of machines using infrared imaging: Standard ISO/TC 108/SC 5/WG 11. – 1997.
32. Condition monitoring and diagnostics of machines. Requirements for qualification and assessment of personnel. Part 7. Thermography: ISO 18436-7:2008
33. Infrared thermal imaging. Survey procedure for electrical equipment Standard MIL-STB-2194 – U.S.A.
34. Acceptance testing of electrical systems: Standard ATS-1999– Intern. Electr. Testing Assoc.
35. Maintenance testing of electrical systems: Standard MTS-199X – Intern. Electr. Testing Assoc.
36. Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography: ASTM E1934 - 99a(2005)e1
37. Infrared thermal imaging. Survey procedure for electrical equipment: Standard MIL-STB-2194 – U.S.A.
38. Orv Jay Utter. Inspections on Agricultural Aircraft / Orv Jay Utter // InfraMation Proceedings 2003

39. Норми випробування електрообладнання: ГKD 34.20.302-2002
40. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967. – 602 с.
41. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике [для научных работников и инженеров] / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1978. – 832 с.
42. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики [Издание 7] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский А.А. – М.: МГУ, 2004.- 798 с.
43. Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования / В.А. Стороженко, С.Б. Малик, А.В. Мякий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади і методи неруйнівного контролю. – 2008. – №48. – С. 84-91.
44. Пехович А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких - М.: Энергия, 1976 – 352 с.
45. Стороженко В.А. Температурная диагностика газокompрессорных агрегатов ГМК 10ГКН термографическим методом / В.А. Стороженко, С.А. Сапрыкин, С.Н. Мешков, А.А. Гарагуль, С.Б. Малик, Р.П. Орел // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання: Збірник тез доповідей 5 Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 2-5 грудня 2008р. – С. 76-79.
46. Стороженко В.А. Термографическая диагностика газоперекачивающих агрегатов / В.А. Стороженко, С.Н. Мешков, Р.П. Орел, С.Б. Малик // Современные методы и средства неразрушающего контроля и диагностики: материалы 16-й международной конференции, г. Ялта, 1-5 октября 2008 г.– С. 126-128.
47. Башков Е.А., Шозда Н.С. Поиск изображений в больших БД с использованием коэффициента корреляции цветовых гистограмм [электронный ресурс] / Е.А. Башков, Н.С. Шозда // GraphiCon: сб. трудов

конференции, 16-21 сентября 2002г. – Нижний Новгород, 2002. – Режим доступа к сборнику: [http://www.graphicon.ru/2002/pdf/Bashkov\\_Zhozda\\_Re.pdf](http://www.graphicon.ru/2002/pdf/Bashkov_Zhozda_Re.pdf).

48. Байгарова Н.С. Некоторые подходы к организации содержательного поиска изображений и видеoinформации / Н.С. Байгарова, Ю.А. Бухштаб, Н.Н. Евтеева, Д.А. Корягин – М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2002 – 24 с. – (Препринт / РАН, ИПМ, №78)

49. Пономаренко Н.Н. Меры подобия изображений для поисковых систем / Н.Н. Пономаренко, В.В. Лукин, С.К. Абрамов, А.А. Зеленский // Радиоэлектронные и компьютерные системы – 2007. – №2(21). – С. 49-58.

50. Новиков Д.А. Статистические методы в медико-биологическом эксперименте (типовые случаи) / Д.А. Новиков, В.В. Новачадов – Волгоград: Издательство ВолГМУ, 2005. – 84 с.

51. Система мониторинга и диагностики вращающегося оборудования по вибрации с пакетом программ Dream\_For\_Windows Версия 1.0 для анализатора - сборщика данных СД-11 – VibroTek, Inc., 2002 г.

52. Алмазова Е.Г. Оптимизация управления в здравоохранении на основе статистических моделей / Е.Г. Алмазова, Е.Н. Иванникова, В.С. Микшина, И.В. Улитина // Современные проблемы науки и образования – 2007. – №6 – С. 40-49

53. Стороженко В.А., Малик С.Б. Температурная диагностика машин и механизмов на основе статистического подхода / В.А. Стороженко, С.Б. Малик // Техническая диагностика и неразрушающий контроль – 2009. – №1. — С. 33-35.

54. Малик С.Б. Статистический подход к выбору критерия дефектности узлов силовых агрегатов по результатам термографирования/ С.Б. Малик // Прикладная радиоэлектроника – 2008 – Том 7 – №4 – С. 224-226.

55. Statistical Design and Analysis of Experiments With Applications to Engineering and Science. [Second Edition] / Robert L. Mason, Richard F. Gunst, James L. Hess - A John Wiley & Sons Publication, 2003. – 746 p.

56. Основы научных исследований [учеб. для техн. вузов] / [В.И. Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов и др.]; под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. – М.: Высш. шк., 1989. – 400 с.

57. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики [для технических приложений] / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

58. Попов Ю.А., Карпельсон А.Е., Хулап Г.С. и др. Возможности активного теплового контроля сотовых конструкций // Дефектоскопия. – 1977. - N 4. - С. 58-64.

59. Стороженко В.А., Мельник С.И., Мешков С.Н., Орел Р.П. Средства и методы тепловой дефектоскопии узлов авиадвигателей // Материалы конференции «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики». Харьков. - 2003. - С.16-20.

60. Стороженко В.А., Мельник С.И., Мешков С.Н. Тепловая дефектоскопия теплозащитных покрытий узлов авиадвигателей // Материалы 4-й Национальной научно – технической конференции - выставки «Неразрушающий контроль и техническая диагностика» (НКТД – 2003), Киев. - 2003. - С. 344 – 349.

61. Капцов И.И. Сокращение потерь газа на магистральных газопроводах. – М.; Недра, 1988. – 431с.

62. Експлуатаційник газонафтового комплексу. Довідник / В.В. Розгонюк, Л.А. Хачикян, М.А. Григіль, О.С. Удалов, В.П. Нікішин – Київ. Росток, 1998. – 431с.

63. Физические величины: Справочник: Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Михайлова – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

64. Стороженко В.А., Малик С.Б. Экспресс-метод оценки тепловых потерь в зданиях путем термографического обследования / «ТД и НК», Киев, №2, 2007, с.49-50.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК (Руженцев)

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

#### Література 4

1. Нікітенко О.М. Maple: Розв’язання інженерних та наукових задач. Навчальний посібник з грифом МОНмолодьспорту України. – Харків: ХНУРЕ. 2011. – 288с.
2. Егоров А.Б. Основы теории надёжности, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки. Навчальний посібник з грифом МОНмолодьспорту України. – Харків: ХНУРЕ. 2011. – 226с.
3. Дегтярьов О.В., Межевич О.С. Патент України «Аерогідродинамічний двигун» Пат. UA № 51548 від 26.07.2010, заявка и 2009 13573 от 25.12.2009. 4 с.
4. Белокурський Ю.П, Козлов В.Є., Козлова Г.М., Руженцев І.В. Патент України «Спосіб вимірювання частоти та періоду» Пат. № 85951 Україна, МПК G 01 R 23/00 Опубл. 10.03.2009, Бюл. №5.
5. Межевич А.С. О концепції отримання, зберігання та використання водню у виробництві та побуті // Праці V Міжнародної науково-практичної конференції “Актуальні питання та організаційно-правові засади співробітництва України і КНР у сфері високих технологій”.Київ, 2009,ст.71-74
6. Межевич А.С. Ветроэнергетика как один из возможных источников энергии для получения экологически чистого водородного энергоносителя // Общегосударственный научно-производственный и информационный журнал. «Энергосбережение, энергетика, энергоаудит», 2009. № 9 с.24-30.
7. Межевич А.С. Развитие водородной энергетикикак одно из перспективных направлений решения развивающегося на планете экологического и экономического кризиса.// Общегосударственный научно-

производственный и информационный журнал. «Энергосбережение, энергетика, энергоаудит», 2009. №11 с.34-42.

8. Межевич А.С. Развитие водородной энергетики. Конкурс проектів з енергозбереження та енергоефективності // «Ярмарок ідей 2009», Київ.

9. Межевич А.С. Пути усовершенствования устройств отбора энергии движущихся воздушных масс с вертикальной осью вращения. // Общегосударственный научно-производственный и информационный журнал. «Энергосбережение, энергетика, энергоаудит», 2009. №4 С. 19-25.

10. Дегтярёв А.В. Точечный метод измерения параметров и пространственной конфигурации внешнего магнитного поля объекта // Системи обробки інформації. Харків.– 2011. – Випуск 6 (96). – С. 116-119.

11. Дегтярёв А.В., Крюков М.А., Руженцев И.В. Модель эксплуатации измерительной информационной системы с цифровой обработкой сигналов // Радиоэлектронные и компьютерные системы. - 2011. № 1. – С. 20-25.

12. Дегтярёв А.В., Крюков М.А. Установление количества и распределения контролируемых отметок при метрологическом обеспечении измерительных систем с цифровой обработкой сигналов // Системи озброєння і військова техніка. – Випуск 3. – 2011. – С. 10-14.

13. Крюков М.А. Оценивание неопределённости измерения мультиметра на базе цифровой обработки сигналов // Системи обробки інформації: науково-технічний журнал – Харків: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2009. – Вип. 5(79). – С. 96 – 99.

14. Крюков М.А. Основные проблемы и пути совершенствования метрологического обеспечения распределённых измерительных систем // Системи управління, навігації та зв'язку: науково-технічний журнал – Київ: ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», 2009. – Вип. 1(9). – С. 118 – 120.

15. Крюков М.А. Совершенствование математической модели погрешности измерительной информационной системы с цифровой обработкой сигналов // Системи управління, навігації та зв'язку: науково-

технічний журнал – Київ: ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», 2010. – Вип. 1(13). – С. 89 – 93.

16. Крюков М.А. Методика задания и корректировки межповерочных интервалов измерительных систем с цифровой обработкой сигналов // Системи обробки інформації: науково-технічний журнал – Харків: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2011. – Вип. 6(96). – С. 91 – 95.

17. Крюков М.А. Метрологическое обеспечение распределённых измерительных систем: особенности, проблемы, пути совершенствования // М-ли XIII міжнар. форуму «Радіoeлектроніка та молодь в XXI столітті» 30.03.10 – 01.04.10. – Харків: ХНУРЕ, 2009. – С. 226.

18. Крюков М.А. Проблемы метрологического обеспечения распределённых измерительных систем // М-лы 5-й международной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ-2009”» 20.04.2009 – 25.04.2009. – Севастополь: Севастопольский национальный технический университет, 2009. – С. 208.

19. Крюков М.А. Исследование погрешностей измерительных информационных систем с цифровой обработкой сигналов // М-ли VII міжнар. науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» 12.10.2010 - 14.10.2010. – Харків: ННЦ «Інститут метрології», 2010. – Том №2. – С. 307 – 314.

20. Крюков М.А. Математический аппарат для оценки метрологических характеристик измерительных информационных систем с цифровой обработкой сигналов // М-ли XIV міжнар. форуму «Радіoeлектроніка та молодь в XXI столітті» 18.03.10 – 20.03.10. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – С. 291.

21. Крюков М.А. Оптимізація міжповірного інтервалу вимірювальної інформаційної системи з цифровою обробкою сигналів на основі моделі її експлуатації // Матеріали науково-практичного семінару «Проблеми розвитку, удосконалення та експлуатації озброєння і військової техніки у внутрішніх військах МВС України» - Харків: Академія Внутрішніх Військ МВС України, 2011. – С. 91 – 92.

22. Сафарян Г.Г., Сергієнко М.П. Дослідження невизначеності показників несинусоїдальності напруги // Метрологія та прилади, 2010. – № 5 (25). – С. 36 – 38.

23. Сергиенко М.П., Мартынова Н.А. Идентификация динамических характеристик измерительных преобразователей колебательного типа // Системи обробки інформації, 2011. – № 4 (95). – С. 65 – 67.

24. Сергиенко М.П. Применение метода прони для идентификации переходных характеристик средств измерительной техники колебательного типа // Системи обробки інформації, 2011. – вып. 3 – С.

25. Сергиенко М.П. Оценивание неопределенности динамических измерений / Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 5-6 липня 2010 р.). – К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 2010. – С. 62.

26. Сергиенко М.П. Идентификация импульсных характеристик колебательных измерительных преобразователей / Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Матеріали першої науково-технічної конференції (Харків-Київ, 13-14 грудня 2010 р.). – Х.: ДП «ХНДІ ТМ»; К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 2010. – С. 90.

27. Сергиенко М.П. Оценивание неопределенности динамических измерений / Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 5-6 липня 2010 р.). – К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 2010. – С. 62.

28. Сергиенко М.П. Идентификация импульсных характеристик колебательных измерительных преобразователей / Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Матеріали першої науково-технічної конференції (Харків-Київ, 13-14 грудня 2010 р.). – Х.: ДП «ХНДІ ТМ»; К.: ДП «ЦНДІ НіУ», 2010. – С. 90.

29. Козлов Ю.В. Вдосконалення методів та засобів вимірювання параметрів сигналів і навантаження лінії передачі / Дисертаційна робота. 2010. – 180 с.

30. Козлов Ю.В. Метод побудови мультиметрів НВЧ-діапазону // Системи управління, навігації та зв'язку. Зб. наук. праць. Вип. 2(18) – Харків: ХУПС, 2011– С.108-110.

31. Козлов Ю.В. Уменьшение неопределенности измерений параметров СВЧ-сигналов // Системи обробки інформації. Зб. наук. праць. Вип. 5(79) – Харків: ХУПС, 2009– С.103-106.

32. Козлов Ю.В. Інформаційна технологія побудови НВЧ-мультиметрів // Матеріали науково-практичної конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку» – Харків, 2011. – С. 9-11

33. Козлов Ю.В. Методы и средства измерения параметров сигнала и нагрузки линии передачи СВЧ // Материалы международ. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и ученых ”Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций ”РТ - 2010” – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – С. 285

34. Козлов Ю.В. Макет виртуального СВЧ-мультиметра // Материалы международ. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и ученых ”Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций ”РТ - 2009” – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – С. 199.

35. Козлов Ю.В. Метод идентификации коэффициентов передачи зондов дискретной измерительной линии // Материалы 13-го Международного форума ”Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” – Харків: ХНУРЕ, 2009. – С.230.

36. Белокурський Ю.П., Захаров В.М., Козлов В.Є., Щербіна О.О. Антена системи захисту інформації //Зб. наук. праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Харків: № 1 , 2011 – С. 20-28.

37. T. Gryshchenko, O. Nikitenko “UNIQUE EDUCATION SPACE” – A CASE STUDY FROM THE KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY RADIOELECTRONICS // Hannover

38. Gryschenko T.B. and Nikitenko O.M. New Life Standard of University Library // International Conference on Qualitative and Quantitative Methods in Libraries (QQML2009) Chania, Crete, Greece, 26-29 of May, 2009.

39. Bojarina L.O., Grischenko T.B. and Nikitenko O.M. First Stages to Improve the Quality Management System in University Library (QQML2010) Chania, Crete, Greece, 2010.

40. Volovenko M. V., Zinkivski V.M., Nikitenko O. M. CHAOTIZATION OF OSCILLATIONS' STATE IN CROSSED-FIELD SYSTEMS IVEC 2010.

41. Т.М. Крохмаль, О.М. Нікітенко ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ЗНАХОДЖЕННЯ КОРЕНІВ РІВНЯНЬ // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія та методика навчання фундаментальних дисциплін у вищій школі» 25–26 березня 2010 року Кривий Ріг ТЕОРІЯ ТА МЕТОДИКА НАВЧАННЯ МАТЕМАТИКИ, ФІЗИКИ, ІНФОРМАТИКИ КРИВИЙ РІГ, 2010, С. 119 – 122

42. Никитенко О.М., Козорезов Г.Г. Чурюмов Г.И., Являнский И.Ю., Воловенко М.В. РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНОДНЫХ БЛОКОВ МАГНЕТРОНОВ СО СВЯЗКАМИ В ОСНОВНОЙ И ВЫСШИХ ПОЛОСАХ ПРОПУСКАНИЯ // (КрыМиКо'2010).

43. Nikitenko O.M., Volovenko M.V. Oscillation States' Transformation in Crossed-Field Systems 8<sup>th</sup> International Vacuum Electron Sources Conference and NANOCarbon October 14 – 16 2010, Nanjing, China.

44. Mykola V. Volovenko, Victor M. Zinkivski, Olexandr M. Nikitenko Chaotization of Oscillations' State in Crossed-Field Systems International Vacuum Electronic Conference IVEC 2010 May 18 – 20 2010 Monterey California USA.

**ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК (Захаров)****ЛІТЕРАТУРА**

1. Захаров И.П., Водотыка С.В. Оценивание неопределенности измерений: основные подходы, модели и алгоритмы // Системы обробки інформації, 2009, вип. 5 (79), с. 9 – 14.
2. Захаров И.П., Шевченко Н.С. Особенности оценивания неопределенности измерений при выражении входных величин в децибелах // Системы обробки інформації, 2009, вип. 5 (79), с. 29 – 32.
3. Жарко Ю.Г., Захаров И.П., Слипченко Е.Н., Сорока Е.П. Оценивание неопределенности измерений при определении уровня радиоэлектронных помех, вызываемых системами зажигания автотранспортных средств // Системы обробки інформації, 2009, вип. 5 (79), с. 92 – 96.
4. Захаров І.П., Шевченко Н.С. Оцінювання невизначеності вимірювань щільності потоку енергії електромагнітного поля // Стандартизація, сертифікація, якість, №6, 2009, с. 33-35.
5. Захаров І.П., Малецька О.Є., Марков Б.Ф. та ін. РМУ 13-064-2008. Методика розрахунку невизначеності вимірювань при проведенні калібрувань засобів вимірювальної техніки. Харків: ННЦ "Інститут метрології" Держспоживстандарту, України, 2008, 21 с., надано чинності з 01.01.2009 р.
6. Захаров І.П., Сергієнко М.П., Чурюмов Г.І. Спосіб вимірювання частоти та відхилення частоти надвисокочастотних коливань сигналів. Рішення про видачу патенту від 16.11.09 на заявку № а 2007 08019.
7. Захаров И.П., Водотыка С.В. Основные подходы к оцениванию неопределенности измерений при выполнении метрологических работ // Метрология и метрологическое обеспечение: Сборник материалов Международной научно-технической конференции, 14-15 апреля 2009г., Минск, БелГИМ, с. 32-36.

8. Zakhatov I., Sergienko M., Vodotyka S. The main approaches to estimation of the measurement uncertainty during metrological operation // *Podstawowe problemy metrologii: Prace Komisji Oddziału PAN w Katowicach. Seria: Konferencje Nr 14, Sucha Beskidska, 10-13 maja, 2009, s. 100-103.*

9. Захаров И.П., Водотыка С.В., Сачева Е.Н. Методы, модели и алгоритмы оценивания неопределенности измерений при проведении калибровок // *Математическая, статистическая и компьютерная поддержка качества измерений. Материалы Международного научно – технического семинара, С.-Петербург, 30 июня – 2 июля, 2009, с. 38-39.*

10. Захаров И.П., Водотыка С.В., Оценивание неопределенности измерений: анализ основных подходов // *Метрология и метрологично осигуряване 2009: Сборник доклади XIX научен симпозиум с международно участие, 10-14 септември 2009 г., Созопол, България, с. 59-62.*

11. Водотыка С.В., Захаров И.П. Идентификация параметров калибровочной зависимости средств измерений методом Монте-Карло // *Приборостроение – 2009: материалы 2-й Междунар. науч. – техн. конф., 11-13 ноября 2009 г. Минск: БНТУ, 2009, с. 157-158.*

12. Захаров И.П., Шевченко Н.С. Оценивание неопределенности измерений плотности потока энергии электромагнитного поля радиочастотного диапазона. // *Приборостроение – 2009: материалы 2-й Междунар. науч. – техн. конф., 11-13 ноября 2009 г. Минск: БНТУ, 2009, с. 174-175.*

13. Vodotyka S. Using PUMA for Coefficients Estimation of Calibration Dependencies // *XI International PhD Workshop OWD 2009 – Wisla, 17-20 October. Conference Archives PTETiS, vol.26, 2009 p.97-99.*

14. Гусельніков В.К., Захаров І.П., Кондрашев С.І., Павленко Ю.Ф. Забезпечення єдності електро- радіовимірювань /Навчальний посібник під редакцією д.т.н., проф. Ю.Ф. Павленка. Харків: НТУ «ХПІ» 2011, 232 с.

15. Захаров И.П., Бочарова А.И., Водотыка С.В. Особенности оценивания неопределенности измерений в стандарте ISO 14253-2 // Системи обробки інформації, 2010, вип. 4 (85), с. 2-6.
16. Захаров И.П., Климова Е.А. Расчет значений коэффициента Стьюдента для дробного числа степеней свободы // Системи обробки інформації, 2010, вип. 4 (85), с. 43-47.
17. Захаров И.П., Князев В.В., Шевченко Н.С. Процедура оценивания неопределенности измерения коэффициента деления аттенюатора на эталоне СН // Системи обробки інформації, 2010, вип. 4 (85), с. 126 – 129.
18. Захаров И.П., Розвадовский А.Ф., Шевченко Н.С. Нормативная база в области электромагнитной совместимости: состояние и перспективы развития // Вестник НТУ ХПИ, 2010, вып. 34, с. 52 – 62.
19. Захаров И.П., Шевченко Н.С. Особенности оценивания неопределенности в области ЭМС в документах CISPR 16-4 // Системи обробки інформації, 2011, вип. 1 (91), с. 6 – 11.
20. Захаров И.П., Рабинович С.Г. Сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных при косвенных некоррелированных измерениях. // Системи обробки інформації, 2011, вип. 1 (91), с. 33 – 37.
21. Волков О.О., Захаров И.П., Лапченко А.Н. Оценивание неопределенности измерений при поверке мер электрического сопротивления многозначных, применяемых в цепях постоянного тока // Системи обробки інформації, 2011, вип. 1 (91), с. 135 – 138.
22. Водотыка С.В. Использование искусственных нейронных сетей при построении калибровочной зависимости средств измерения // Системи обробки інформації, 2011, вип. 1 (91), с. 24 – 27.
23. Водотыка С.В. Использование искусственных нейронных сетей с интервальной арифметикой при построении калибровочной зависимости средства измерения // Збірник наукових праць ХУПС, вип. 1 (27), 2011 р., с. 217-221.

24. Захаров И.П., Климова Е.А. Применение метода перебора для оценивания неопределенности косвенных некоррелированных измерений // Системи обробки інформації, 2011, вип. 4 (94), с. 16 – 19.

25. Захаров И.П., Водотыка С.В., Шевченко Е.Н. Методы, модели и бюджеты оценивания неопределенности измерений при проведении калибровок // Измерительная техника, №4, 2011, с. 20–27.

26. Водотыка С.В., Захаров И.П. Учет погрешности квантования при оценивании неопределенности результатов измерений с многократными наблюдениями // Системи обробки інформації, 2011, вип. 8 (98), с. 39 – 44.

27. Zakharov I.P., Vodotyka S.V., Shevchenko E.N. Methods, models, and budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration // Measurement Techniques, Vol. 54, No. 4, 2011, p. 387-399, DOI: 10.1007/s11018-011-9737-5.

28. Волков О.О., Захаров И.П., Лапченко А.Н. Оценивание неопределенности измерения при поверке (калибровке) цифровых омметров // Системи обробки інформації, 2011, вип. 6 (96), с. 110 – 112.

29. Захаров И.П., Шевченко Н.С. Особенности оценивания неопределенности измерений радиопомех от наземного электротранспорта // Системи обробки інформації, 2011, вип. 6 (96), с. 120 – 122.

30. Захаров И.П., Климова Е.А. Повышение достоверности оценивания результатов и неопределенности измерений с многократными наблюдениями входных величин // Метрология и метрологично осигуряване 2011: Сборник доклади XXI научен симпозиум с международно участие, 10-14 Септември 2011 г., Созопол, България, с. 35–38.

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Об'єкти АТНК

| б'єкт контролю                                                        | Вид дефекту                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Металеві пластини                                                     | Зміна товщини пластини, пази, отвори, виїмки                                                                                                      |
| Клеєні і паяні вироби                                                 | Відсутність клею або припаю при виготовленні                                                                                                      |
| Багатошарові вироби типу метал-неметал, неметал-неметал               | Бокові розшарування у готових виробах                                                                                                             |
| Композити                                                             | Обрив армуваної основи при виготовленні                                                                                                           |
| Склопластики                                                          | Тефлонова або фторопластова плівка, яка вноситься між корпусом при виготовленні                                                                   |
| Тепловиділювальні елементи                                            | Майлаолва плівка між корпусом і наповнювачем                                                                                                      |
| Труби металеві                                                        | Риски і зміна товщини                                                                                                                             |
| Стільникові структури                                                 | Зминання сот при виробництві, поява води.                                                                                                         |
| Вироби, які з'єднані дифузним зварюванням                             | Зниження якості обробки поверхні зразків (наприклад, шляхом травлення)                                                                            |
| Вироби електронної техніки                                            | Імітування режимів «коротке замикання», «холостий хід», «зміна номеналу». Погіршення теплоізоляції шляхом внесення плівки, ізоляції – окисленням. |
| Корпуса літальних апаратів                                            | Порожнечі, тріщини, включення.                                                                                                                    |
| Елементи конструкцій авіаційних двигунів із стільниковими структурами | Тріщини, відшарування                                                                                                                             |
| Теплообмінні апарати космічної техніки                                | Закупорювання охолоджувальних каналів, корозійне зношування, відшарування керамічного покриття.                                                   |
| Труби і циліндри: -металеві; - багатошарові із композитних матеріалів | Утворення рисок на внутрішніх поверхнях, корозійне зношення, тріщини, включення чужорідних матеріалів                                             |
| Шини                                                                  | Відшарування корду                                                                                                                                |
| Асинхронні трифазні електродвигуни (ПЕД)                              | Затирання підшипників, порушення маслообміну                                                                                                      |
| Димові труби                                                          | Коксування і прогар стінок                                                                                                                        |

|                                |                                             |
|--------------------------------|---------------------------------------------|
| Теплові труби і теплообмінники | Витік тепла                                 |
| Пічі для відпалювання цементу  | Приліпання цементу                          |
| Сосуди Дьюара                  | Порушення вакуумно-порошкової теплоізоляції |

Таблиця А.2 – Галузі застосування термографії

| Галузь застосування                                                | Об'єкти контролю                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Виявлені дефекти або процеси, які контролюються                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Енергетика                                                         | Електричні підстанції<br>Лінії електропередач<br>Теплотраси<br>Тепломеханічне обладнання<br>Паророзподільні мережі<br>Стви-гідроохолоджувачі<br>Труби димові<br>Статори турбогенераторів<br>Щітки електромашин<br>Склади сипких матеріалів<br>Електролізні ванни                                                                     | Погіршення електро- і теплоізоляції<br>Ослаблення механічного контакту<br>Засмічення теплообмінника<br>Тріщини у трубах<br>Коротке замикання<br>Пробій ізолятору<br>Знос струмовідних частин<br>Міста самозаймання сипких матеріалів                                                   |
| Машинобудування, металургія, виробництво конструкційних матеріалів | Печі металургійні<br>Ковши для розливу металу<br>Гарячий прокат<br>Шини<br>Композиційні матеріали<br>Зварні з'єднання<br>Наяні з'єднання<br>Клесні з'єднання<br>Труби<br>Машини і механізми<br>Бойлери<br>Теплообмінники<br>Батарей коксових печей і збірників газу<br>Трубопроводи<br>Агломератори<br>Виливниці<br>Валки<br>Каупери | Стовщення, і відсутність футеровки<br>Крайові розшарування<br>Непровари, непростеї і інші порушення суцільності<br>Відрив матриці<br>Стоншення стінок<br>Корозійне зношення<br>Дефекти збірки<br>Сторонні домішки<br>Зношення механічних частин<br>Засмічення труб<br>Витік води, пари |

| Виробництво<br>бумаги | Бумажна стрічка                                                                                                                                            | Місця<br>вологості<br>аномальної                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Електронна техніка    | Напівпровідникові прилади<br>Інтегральні мікросхеми<br>Печатні плати<br>Вузли і блоки електронної апаратури<br>Резистори<br>Конденсатори<br>Трансформатори | Однорідність напівпровідника<br>Тріщини, непровари, непроклеї, непропаї<br>Деекти <i>p-n</i> переходу<br>Змінювання номеналу<br>Короткі замикання<br>Обриви<br>Неякісний монтаж<br>Забруднення<br>Підтравлювання провідників<br>Невірне розташування елементів<br>Токові витіки |
| Автобудування         | Кузов<br>Автомобільне скло<br>Система обогрівання<br>Шини                                                                                                  | Тріщини у склі<br>Витіки тепла<br>Відшарування корду від резини                                                                                                                                                                                                                 |
| Будівництво           | Стінові панелі<br>Дахи будівель<br>Димові труби                                                                                                            | Дефекти стиків панелей<br>Тріщини<br>Погіршення теплоізолюючих якостей<br>Ділянки інфільтрації води<br>Обрив арматури<br>Ділянки ременту, який проводився раніше                                                                                                                |

|                                      |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ІЧ<br>аерофотоземка                  | Елементи земного ландшафту<br>Підземні теплотраси<br>Лідники<br>Ділянки геотермальної діяльності<br>Ліси і водні басейни<br>Фауна<br>Служба порятунку людей<br>Геологія<br>Сільгосппосіви                                  | Теплове забруднення водного і повітряного басейнів<br>Вогнища пожеж<br>Тріщини у ледяному покриві<br>Корисні копалини<br>Тектонічні зміни<br>Витіки тепла<br>Хвороби рослин<br>Ступінь визріання культур |
| Авіакосмічна і військова техніка     | Бортове радіообладнання<br>Винти гелікоптерів<br>Панелі ракет і літаків<br>Теплозахисне обшиття<br>Система самонаведення на ціль<br>Аеродромне покриття<br>Система оповіщення пораннього запуску ракет<br>Теплова розвідка | Дефекти тепло- і електрообладнання<br>Тріщини<br>Дефекти суцільності<br>Місія інфільтрації води<br>Крижані пробки<br>Виявлення живої сили ворога уночі<br>Випускні факели ракет                          |
| Залізничний транспорт і метрополітен | Букси<br>Тиристори<br>Вагони – холодильники<br>Енергогосподарство                                                                                                                                                          | Перегрів<br>Витіки тепло- і електроенергії<br>Дефекти теплової ізоляції                                                                                                                                  |
| Нафтохімія                           | Електрогосподарство<br>Трубоповоди<br>Цистерни<br>Хімічні реактори                                                                                                                                                         | Витіки тепло- і електроенергії<br>Витіки газів і нафти<br>Контроль рівня рідини у резервуарах<br>Дефекти теплоізоляції<br>Потоншення стінок                                                              |

|             |                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                  |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Мистецтво   | Настінний живопис<br>Картини<br>Кінематографія                                                                                                                                                                            | Структура і дефекти фресок<br>Виправлення первісного задуму (фарби, глини, конструкції)<br>Створення спеціальних візуальних ефектів              |
| Медицина    | Гастроентерологія<br>Онкологія<br>Нейрохірургія<br>Педіатрія<br>Дерматологія<br>Ортопедія<br>Ревматологія<br>Травматологія<br>ЛОР – патологія<br>Пульманологія<br>Ангіологія<br>Ендокринологія<br>Психологія і психіатрія | Запальні процеси<br>Локальні пухлини<br>Порушення кровообігу<br>Процеси загоювання ран<br>Поверхнюттєве сприйняття<br>Травми<br>Психічні процеси |
| Інші галузі | Аеродинаміка<br>Криміналістика<br>Таможня                                                                                                                                                                                 | Розігрівання обшиття літальних апаратів<br>Знаходження трупів, стріляних гільз, автомобілей<br>Детектор брехні<br>Виявлення схованок             |

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Результати розбракування вузлів газоперекачувального обладнання

|           |                       |   |          | D1a          | D2            | D3           | D1a*  | D2*   | D3*   | I            |
|-----------|-----------------------|---|----------|--------------|---------------|--------------|-------|-------|-------|--------------|
| агрегат 1 | всмоктувальні клапани | 1 | <i>l</i> | 1,038        | 0,041         | -67,3        | 0,85  | -0,73 | -0,63 | 1,63         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,603        | 1,186         | -38,5        | -0,24 | -0,46 | -0,37 | 0,40         |
|           |                       | 2 | <i>l</i> | 0,222        | 3,828         | 3,2          | -1,20 | 0,17  | 0,01  | 1,46         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,589        | 2,678         | 66           | -0,28 | -0,10 | 0,57  | 0,41         |
|           |                       | 3 | <i>l</i> | 0,216        | 1,068         | 26,1         | -1,21 | -0,48 | 0,21  | 1,74         |
|           |                       |   | <i>r</i> | <b>1,562</b> | 8,428         | <b>286,4</b> | 2,16  | 1,25  | 2,55  | 12,70        |
|           |                       | 4 | <i>l</i> | 0,15         | 1,969         | 37,8         | -1,38 | -0,27 | 0,32  | 2,06         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,971        | 6,549         | 93,3         | 0,68  | 0,81  | 0,81  | 1,78         |
|           |                       | 5 | <i>l</i> | 1,098        | 1,422         | -71,4        | 1,00  | -0,40 | -0,66 | 1,59         |
|           |                       |   | <i>r</i> | <b>1,521</b> | 3,114         | -112,3       | 2,05  | 0,00  | -1,03 | 5,27         |
|           | нагнітальні клапани   | 1 | <i>l</i> | 1,049        | 4,379         | -185,9       | 0,87  | 0,30  | -1,69 | 3,71         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 1,045        | 3,692         | -204,8       | 0,86  | 0,13  | -1,86 | 4,22         |
|           |                       | 2 | <i>l</i> | 0,591        | 1,699         | 18,9         | -0,27 | -0,34 | 0,15  | 0,21         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,637        | 1,469         | -2           | -0,16 | -0,39 | -0,04 | 0,18         |
|           |                       | 3 | <i>l</i> | 0,842        | 3,769         | 69,2         | 0,36  | 0,15  | 0,60  | 0,51         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,92         | 3,769         | 81,5         | 0,55  | 0,15  | 0,71  | 0,83         |
|           |                       | 4 | <i>l</i> | 1,049        | <b>12,974</b> | <b>462,1</b> | 0,87  | 2,32  | 4,12  | <b>23,16</b> |
|           |                       |   | <i>r</i> | 1,049        | <b>12,974</b> | <b>521,2</b> | 0,87  | 2,32  | 4,65  | <b>27,81</b> |
|           |                       | 5 | <i>l</i> | 0,989        | 2,059         | -116,3       | 0,72  | -0,25 | -1,07 | 1,72         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,989        | 2,341         | -120,5       | 0,72  | -0,18 | -1,10 | 1,77         |
| агрегат 4 | всмоктувальні клапани | 1 | <i>l</i> | 0,88         | 0,308         | -53,021      | 0,45  | -0,66 | -0,50 | 0,89         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,768        | 1,833         | -44,366      | 0,17  | -0,30 | -0,42 | 0,30         |
|           |                       | 2 | <i>l</i> | 0,899        | 1,825         | -65,329      | 0,50  | -0,31 | -0,61 | 0,71         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,263        | 2,735         | 21,721       | -1,09 | -0,09 | 0,17  | 1,23         |
|           |                       | 3 | <i>l</i> | 0,286        | 4,863         | 24,669       | -1,04 | 0,41  | 0,20  | 1,28         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,175        | 1,519         | 7,421        | -1,31 | -0,38 | 0,04  | 1,87         |
|           |                       | 4 | <i>l</i> | 0,548        | 3,039         | -29,522      | -0,38 | -0,02 | -0,29 | 0,23         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,396        | 6,079         | 61,288       | -0,76 | 0,70  | 0,53  | 1,34         |
|           |                       | 5 | <i>l</i> | 0,587        | 0,306         | 78,643       | -0,28 | -0,66 | 0,68  | 0,99         |
|           |                       |   | <i>r</i> | 0,409        | 0,603         | -19,57       | -0,73 | -0,59 | -0,20 | 0,92         |

|             |                       |   |          | D1a          | D2    | D3            | D1a*  | D2*   | D3*   | I            |
|-------------|-----------------------|---|----------|--------------|-------|---------------|-------|-------|-------|--------------|
| агрегат 4   | нагнітальні клапани   | 1 | <i>l</i> | 0,496        | 0,486 | -28,9         | -0,51 | -0,62 | -0,28 | 0,73         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,519        | 1,096 | -7,134        | -0,45 | -0,48 | -0,09 | 0,44         |
|             |                       | 2 | <i>l</i> | 0,433        | 1,004 | -2,374        | -0,67 | -0,50 | -0,04 | 0,70         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,675        | 0,396 | -37,998       | -0,06 | -0,64 | -0,36 | 0,55         |
|             |                       | 3 | <i>l</i> | 0,471        | 1,308 | 1,892         | -0,57 | -0,43 | -0,01 | 0,51         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,564        | 1,308 | -2,135        | -0,34 | -0,43 | -0,04 | 0,30         |
|             |                       | 4 | <i>l</i> | 0,423        | 1,916 | 45,363        | -0,69 | -0,28 | 0,38  | 0,71         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,611        | 1,612 | 5,964         | -0,22 | -0,36 | 0,03  | 0,18         |
|             |                       | 5 | <i>l</i> | 0,982        | 3,035 | 100,95        | 0,71  | -0,02 | 0,88  | 1,28         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,533        | 2,126 | 37,823        | -0,42 | -0,23 | 0,32  | 0,33         |
| агрегат 5   | всмоктувальні клапани | 1 | <i>l</i> | 0,503        | 4,983 | 67,547        | -0,49 | 0,44  | 0,58  | 0,78         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,988        | 4,375 | 106,97        | 0,72  | 0,30  | 0,94  | 1,48         |
|             |                       | 2 | <i>l</i> | 0,271        | 2,675 | 37,108        | -1,07 | -0,10 | 0,31  | 1,26         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,979        | 4,19  | 67,575        | 0,70  | 0,25  | 0,58  | 0,89         |
|             |                       | 3 | <i>l</i> | 0,237        | 5,954 | 16,106        | -1,16 | 0,67  | 0,12  | 1,80         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,26         | 0,608 | -3,916        | -1,10 | -0,59 | -0,06 | 1,56         |
|             |                       | 4 | <i>l</i> | 0,63         | 1,463 | -35,882       | -0,18 | -0,39 | -0,34 | 0,30         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 1,115        | 2,363 | -69,92        | 1,04  | -0,18 | -0,65 | 1,53         |
|             |                       | 5 | <i>l</i> | 0,881        | 0,608 | -54,372       | 0,45  | -0,59 | -0,51 | 0,82         |
|             |                       |   | <i>r</i> | <b>1,558</b> | 2,932 | -142,1        | 2,15  | -0,04 | -1,30 | 6,29         |
|             | нагнітальні клапани   | 1 | <i>l</i> | 0,657        | 1,634 | 20,907        | -0,11 | -0,35 | 0,16  | 0,16         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,819        | 3,154 | 40,562        | 0,30  | 0,01  | 0,34  | 0,20         |
|             |                       | 2 | <i>l</i> | 0,925        | 3,776 | 56,109        | 0,56  | 0,15  | 0,48  | 0,57         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,904        | 3,776 | 44,001        | 0,51  | 0,15  | 0,37  | 0,42         |
|             |                       | 3 | <i>l</i> | 0,553        | 1,94  | 1,859         | -0,37 | -0,28 | -0,01 | 0,21         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,622        | 1,643 | 19,162        | -0,20 | -0,35 | 0,15  | 0,18         |
|             |                       | 4 | <i>l</i> | 0,583        | 1,334 | -7,274        | -0,29 | -0,42 | -0,09 | 0,27         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,576        | 1,334 | 4,179         | -0,31 | -0,42 | 0,01  | 0,27         |
|             |                       | 5 | <i>l</i> | 0,61         | 1,419 | -9,895        | -0,23 | -0,40 | -0,11 | 0,22         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,366        | 0,829 | -36,821       | -0,84 | -0,54 | -0,35 | 1,11         |
| агрегат №12 | всмоктувальні клапани | 1 | <i>l</i> | 0,464        | 1,256 | -27,354       | -0,59 | -0,44 | -0,27 | 0,61         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,518        | 0,956 | -25,513       | -0,46 | -0,51 | -0,25 | 0,53         |
|             |                       | 2 | <i>l</i> | 0,138        | 1,272 | -5,182        | -1,41 | -0,44 | -0,07 | 2,17         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,186        | 0,308 | -13,532       | -1,29 | -0,66 | -0,14 | 2,11         |
|             |                       | 3 | <i>l</i> | 0,196        | 5,996 | 16,521        | -1,26 | 0,68  | 0,13  | 2,06         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 1,657        | 4,416 | 140,02        | 2,39  | 0,31  | 1,23  | 7,34         |
|             |                       | 4 | <i>l</i> | 0,593        | 0,624 | -62,231       | -0,27 | -0,59 | -0,58 | 0,76         |
|             |                       |   | <i>r</i> | 0,419        | 2,852 | -47,305       | -0,70 | -0,06 | -0,45 | 0,70         |
|             |                       | 5 | <i>l</i> | 0,159        | 5,122 | 8,021         | -1,35 | 0,47  | 0,05  | 2,05         |
|             |                       |   | <i>r</i> | <b>1,847</b> | 9,832 | <b>246,80</b> | 2,87  | 1,58  | 2,19  | <b>15,53</b> |

|                    |                     |   |          | D1a    | D2     | D3      | D1a*  | D2*   | D3*   | I    |
|--------------------|---------------------|---|----------|--------|--------|---------|-------|-------|-------|------|
| агрегат №12        | нагнітальні клапани | 1 | <i>l</i> | 0,503  | 0,782  | -2,158  | -0,49 | -0,55 | -0,04 | 0,55 |
|                    |                     |   | <i>r</i> | 0,738  | 0,466  | -32,817 | 0,10  | -0,63 | -0,32 | 0,50 |
|                    |                     | 2 | <i>l</i> | 1,272  | 1,114  | -90,981 | 1,43  | -0,47 | -0,84 | 2,97 |
|                    |                     |   | <i>r</i> | 1,223  | 0,798  | -84,261 | 1,31  | -0,55 | -0,78 | 2,62 |
|                    |                     | 3 | <i>l</i> | 1,334  | 4,574  | 107,95  | 1,59  | 0,34  | 0,95  | 3,52 |
|                    |                     |   | <i>r</i> | 1,429  | 6,786  | 167,06  | 1,82  | 0,86  | 1,48  | 6,25 |
|                    |                     | 4 | <i>l</i> | 1,428  | 3,01   | -198,15 | 1,82  | -0,03 | -1,80 | 6,55 |
|                    |                     |   | <i>r</i> | 1,436  | 4,274  | -223,9  | 1,84  | 0,27  | -2,03 | 7,59 |
|                    |                     | 5 | <i>l</i> | 1,223  | 4,134  | 88,982  | 1,31  | 0,24  | 0,78  | 2,37 |
|                    |                     |   | <i>r</i> | 1,375  | 5,39   | 80,538  | 1,69  | 0,54  | 0,70  | 3,62 |
| агрегат №13        | шатунні підшипники  | 1 | 0,419    | 1,053  | 6,449  | -0,70   | -0,49 | 0,04  | 0,73  |      |
|                    |                     | 2 | 0,228    | 0,351  | -17,0  | -1,18   | -0,65 | -0,18 | 1,85  |      |
|                    |                     | 3 | 0,611    | 2,223  | 44,31  | -0,22   | -0,21 | 0,37  | 0,23  |      |
|                    |                     | 4 | 0,272    | 0,117  | 3,736  | -1,07   | -0,71 | 0,01  | 1,65  |      |
|                    |                     | 5 | 0,297    | 1,989  | 7,193  | -1,01   | -0,27 | 0,04  | 1,09  |      |
| агрегат №12        | шатунні підшипники  | 1 | 0,802    | 0      | 6,826  | 0,26    | -0,74 | 0,04  | 0,61  |      |
|                    |                     | 2 | 0,61     | 4,446  | 6,826  | -0,23   | 0,31  | 0,04  | 0,15  |      |
|                    |                     | 3 | 0,423    | 4,446  | -40,7  | -0,69   | 0,31  | -0,39 | 0,73  |      |
|                    |                     | 4 | 0,335    | 0,741  | -7,087 | -0,91   | -0,56 | -0,09 | 1,15  |      |
|                    |                     | 5 | 0,472    | 1,482  | -6,221 | -0,57   | -0,39 | -0,08 | 0,48  |      |
| агрегат №4         | шатунні підшипники  | 1 | 0,853    | 1,041  | -38,34 | 0,38    | -0,49 | -0,37 | 0,52  |      |
|                    |                     | 2 | 0,248    | 1,092  | -14,0  | -1,13   | -0,48 | -0,15 | 1,53  |      |
|                    |                     | 3 | 0,593    | 4,368  | -58,5  | -0,27   | 0,29  | -0,55 | 0,46  |      |
|                    |                     | 4 | 0,231    | 0,858  | 18,542 | -1,17   | -0,53 | 0,14  | 1,68  |      |
|                    |                     | 5 | 0,237    | 0,624  | -3,718 | -1,16   | -0,59 | -0,06 | 1,69  |      |
| агрегат №1         | шатунні підшипники  | 1 | 0,366    | 1,685  | -22,4  | -0,84   | -0,34 | -0,22 | 0,86  |      |
|                    |                     | 2 | 0,347    | 0,187  | 2,976  | -0,88   | -0,69 | 0,00  | 1,26  |      |
|                    |                     | 3 | 0,329    | 1,357  | -6,702 | -0,93   | -0,42 | -0,08 | 1,04  |      |
|                    |                     | 4 | 0,454    | 0,889  | 20,901 | -0,62   | -0,53 | 0,16  | 0,68  |      |
|                    |                     | 5 | 0,609    | 2,761  | 6,012  | -0,23   | -0,08 | 0,03  | 0,06  |      |
| агрегат №12 (2006) | шатунні підшипники  | 2 | 1,273    | 30,381 | -348,9 | 1,43    | 6,43  | -3,15 | 53,33 |      |
|                    |                     | 3 | 1,303    | 25,935 | -302,8 | 1,51    | 5,38  | -2,74 | 38,73 |      |
|                    |                     | 4 | 0,421    | 2,964  | 0,808  | -0,70   | -0,04 | -0,02 | 0,49  |      |
|                    |                     | 5 | 0,424    | 1,482  | -0,788 | -0,69   | -0,39 | -0,03 | 0,63  |      |
| Average            |                     |   |          | 0,70   | 3,12   | 2,54    |       |       |       |      |
| Stdev              |                     |   |          | 0,40   | 4,24   | 111,47  |       |       |       |      |
| порог              |                     |   |          | 1,49   | 11,60  | 225,49  |       |       |       |      |
|                    |                     |   |          |        |        | -220,4  |       |       |       |      |