

УДК 551.508.85:551.553.8
№ держ. реєстр. 049U003662
Інв. №

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(ОДЕКУ)**

65016 м. Одеса, вул. Львівська, 15, тел. 35-73-71

avto@odeku.edu.ua



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи ОДЕКУ
д. геогр. н., проф. Тучковенко Ю.С.

15.12.2022

ЗВІТ

**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
Удосконалення способів і засобів одержання даних про атмосферу
радіофізичними методами та аналізу даних**

**Розділ 3: АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ,
ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ДАНИХ ПРО
АТМОСФЕРУ
(проміжний)**

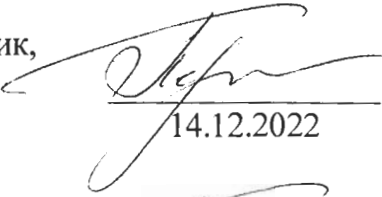
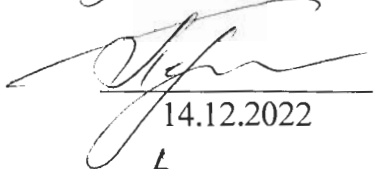
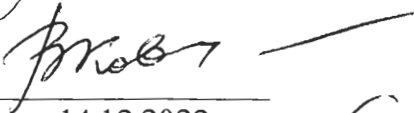
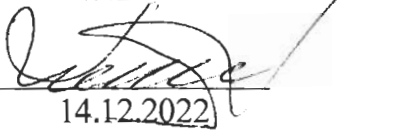
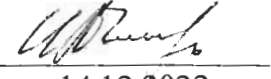
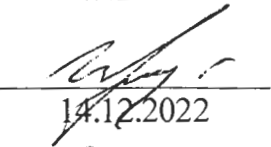
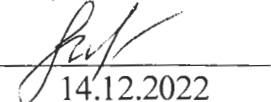
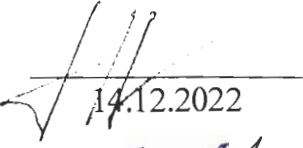
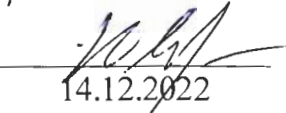
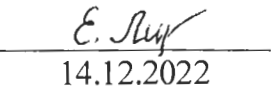
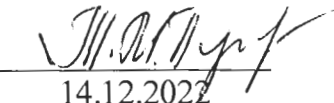
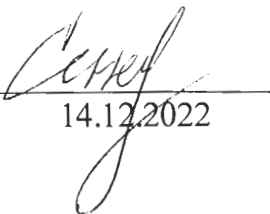
Науковий керівник, к.т.н.

Б.В. Перелигін

Рукопис закінчено «13» грудня 2022 р.

Результати цієї роботи розглянуті на засіданні
кафедри автоматизованих систем моніторингу
навколишнього середовища та інформатики ОДЕКУ
Протокол № 6 від « 14 » грудня 2022р.

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник, к.т.н., доцент	 14.12.2022	Б.В. Перелигін (загальне керівництво, вступ, висновок, розділи 1, 2, 3, 4, 5)
Відповідальний виконавець, к.т.н., доцент	 14.12.2022	Б.В. Перелигін (збір та підготовка матеріалів, розділ 3, 4)
Д.ф.-м.н., професор	 14.12.2022	В.В. Ковальчук (розділ 1)
Д.т.н., професор	 14.12.2022	В.І. Мещеряков (розділ 2)
Д.т.н., професор	 14.12.2022	І.О. Чмир (розділ 2)
Д.т.н., доцент	 14.12.2022	С.С. Великодний (розділ 5)
К.т.н., доцент	 14.12.2022	Г.А. Гнатовська (розділ 2)
К.т.н., доцент	 14.12.2022	С.А. Гор'єв (розділ 3)
К.т.н., доцент	 14.12.2022	Ю.В. Лавриненко (розділ 4)
Асистент	 14.12.2022	К.В. Лашина (розділ 2)
Зав.лаб. АСМ	 14.12.2022	Т.М. Пустовіт (оформлення звіту)
Нормоконтролер	 14.12.2022	О.Б. Сененкова

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 102 с., 36 рисунків, 7 таблиць, 45 джерел.

ДАТЧИКИ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ З НАНОКЛАСТЕРНОЮ ПІДСИСТЕМОЮ, ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ, СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ТЕПЛОАВАНТАЖЕНИХ РАДІОЕЛЕМЕНТІВ, ДОВГОТРИВАЛІ ЧАСОВІ РЯДИ, СПЕКТРАЛЬНО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ ДОВГОТРИВАЛИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ, РАДІОЛОКАЦІЙНЕ ПОЛЕ, ФОРМУВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ПОЛЯ ІЗ ЗАДАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ, БАЗИ ДАНИХ, СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БАЗАМИ ДАНИХ, РЕЛЯЦІЙНА БАЗА РАДІОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ДАНИХ.

Метою даного промжіного звіту є розробка технології створення датчиків нового покоління на основі гетеропереходів для вимірювання параметрів атмосфери, розробка системи забезпечення теплових режимів теплоавантажених радіоелектронних елементів, дослідження можливостей застосування методів спектрально-часового аналізу для довготривалих часових рядів, розробка методики формування радіолокаційного поля з заданими параметрами для моніторингу атмосфери, інтеграція до графічної бази даних системи радіолокаційних станцій моніторингу атмосфери.

Умови одержання звіту: за договором, 65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15, ОДЕКУ.

ЗМІСТ

ВСТУП		6
1	ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ДАТЧИКІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АТМОСФЕРИ	9
1.1	Фізична модель	9
1.2	Математична модель	12
2	АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ТЕПЛОАВАНТАЖЕНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ	23
2.1	Аналіз моделі взаємодії геометрії гілок термоелементів термоелементів з показниками надійності термоелектричного каскадного охолоджувача	23
2.1.1	Розробка та аналіз моделі зв'язку показників надійності з конструктивними та енергетичними параметрами.....	26
2.1.2	Аналіз результатів моделювання енергетичних, конструктивних і надійнісних показників охолоджувача.....	29
2.2	Визначення максимальних охолоджуючих можливостей двокаскадних охолоджувачів при варіації геометрії гілок у каскадах	39
2.2.1	Розробка надійнісно-орієнтованої моделі.....	40
2.2.2	Аналіз моделі і результати дослідження.....	44
2.2.3	SWOT-аналіз результатів дослідження.....	50
3	ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СПЕКТРАЛЬНО-ЧАСОВОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ УТОЧНЕННЯ ВІКУ КЛІМАТИЧНИХ ПОДІЙ.....	52
3.1	Постановка завдання.....	52
3.2	Початкові дані.....	53
3.3	Розв'язання завдання.....	55
3.4	Аналіз результатів.....	59
4	ФОРМУВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ПОЛЯ ІЗ ЗАДАНИМИ	

	ЕНЕРГЕТИЧНИМИ, ПРОСТОРОВИМИ ТА ЧАСОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ	65
4.1	Постановка завдання.....	65
4.2	Розв'язання завдання.....	66
5	ІНТЕГРАЦІЯ ДО ГРАФІЧНИХ БАЗ ДАНИХ СИСТЕМИ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ ІЗ ЗАДАНИМИ ТЕХНІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ	77
5.1	Модель метеорологічних даних	78
5.2	Вибір моделі даних та системи управління базою даних.....	80
5.2.1	Доцільність використання баз даних NoSQL	80
5.2.2	Доцільність використання об'єктно-реляційної системи управління базою даних.....	83
5.2.3	Вибір реляційної моделі.....	84
5.3	Реалізація метеорологічної бази даних.....	85
5.4	Використання метеорологічної бази даних у прикладних застосунках.....	90
	ВИСНОВКИ	94
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	98

ВСТУП

У найзагальнішому вигляді моніторинг можна визначити як організовану з контрольно-діагностичними цілями просторово-часову систему спостережень за змінами природних і природно-технічних систем, об'єктів і окремих складових їх частин у взаємодії з навколишнім середовищем.

Для удосконалення способів і засобів одержання даних моніторингу атмосфери радіофізичними методами потрібно, перш за все, удосконалювати засоби одержання інформації.

Виміри параметрів повітря проводяться за допомогою датчиків, які в поточному часі мають не оптимальні характеристики. Тому актуальним залишається створення датчиків нового покоління на базі гетероструктур з нанокластерною підсистемою.

Плівки, що мають нанокластерний растр, не завжди стабільні через мінливість морфології нанокластерів, що відкриває широкі перспективи для розвитку функціональної мікроелектроніки, зокрема, для створення квантово-розмірних носіїв інформації. З метою розширення можливостей практичного використання плівкових гетеропереходів поставлена задача дослідити властивості аморфних плівок з квазіметалевими центрами. Вирішення такої задачі дозволяє створити датчики нового покоління на основі гетеропереходів для вимірювання параметрів атмосфери.

Показники відмовостійкості термоелектричних охолоджувачів тепло навантажених приладів радіоелектронної системи, які працюють в складних умовах і в значній мірі обумовлюють життєздатність системи в цілому, закладаються на етапі проектування. У подальшій експлуатації вони тільки відпрацьовують свій ресурс, оскільки підвищення показники надійності можливо тільки структурними методами за рахунок надмірності (і відповідно вартості), а параметрична надійність закладається на етапі проектування.

Особливістю термоелектричного охолоджуючого пристрою як об'єкту проектування є те, що його енергетичні показники суттєво залежать від конструктивних параметрів, режимів функціонування і енергетичних показників. Для формування значних перепадів температур необхідні каскадні системи, способи управління і показники надійності відрізняються від одно каскадних систем забезпечення теплових режимів.

Аналіз систем автоматизованого проектування термоелектричного пристрою, обов'язковими складовими яких є результати аналізу об'єкту проектування, моделі взаємозалежності між параметрами і показниками об'єкту і інструментальна реалізація компонентів систем автоматизованого проектування, показав, що питанням підвищення показників відмовостійкості, які враховують вплив навантаження, технології виготовлення, режими роботи, зовнішні умови, приділена значна увага. Залишається недослідженим питання зв'язку показників надійності з конструктивними і енергетичними показниками каскадних термоелектричних пристроїв, які дозволять приймати проектні рішення і впливати на якість процесу проектування, є актуальною науково-технічною задачею.

Циклічність і ритмічність зміни палеокліматів відмічали багато дослідників. Але така циклічність не була доведена до появи даних про зміну ізотопного складу багаторічних льодовикових кернів. З середини ХХ століття все більшу роль у вивченні кліматичних систем минулого грає аналіз кернів з глибоких свердловин, пробурених на льодовиках в зонах акумуляції. Аналіз змісту в крижаному керні дейтерію, мікрочасток, парникових газів і ізотопів вже дозволив оцінити зміни температури повітря за період близько 800 тис. років. Кожна циклічність має свою міру стійкості в часі і цим циклам відповідає певна енергетика, яка залежить від багатьох зовнішніх і внутрішніх кліматоутворюючих чинників. Тому важливим завданням є виявлення не лише енергетично значущих періодів коливань, але і прояву найбільш "яскравих" періодичностей в кліматичній системі планети.

Головним ресурсом оглядового метеорологічного радіолокатора є енергія зондувального випромінювання. Головний він тому, що уся доступна радіолокаційна інформація знаходиться в прийнятою антеною відбитої від атмосфери частини енергії зондувального випромінювання. Уся подальша обробка в ідеальному випадку може зберегти кількість отриманої радіолокаційної інформації, а в не ідеальному – зменшити її кількість.

Проте отримання інформації необхідно забезпечити не в усій зоні спостереження метеорологічного радіолокатора, а в зоні, званій простором спостереження, яке повинне покриватися радіолокаційним полем системи гідрометеорологічного моніторингу.

Тому метою дослідження є з'ясування питання про найбільш раціональний розподіл енергії зондувального випромінювання за допомогою передавальних антен метеорологічних радіолокаторів в просторі спостереження, тобто про найбільш раціональну побудову радіолокаційного поля.

Аналізується доцільність зберігання метеорологічних даних у базі даних. Вибирається модель даних, що найкраще відповідає формату опису та зберігання метеорологічних даних, та СКБД, найбільш придатна для цієї моделі даних та задач заданої предметної області. Наведені вище задачі вирішувались при проведенні досліджень, а їх результати відбиті в даному проміжному звіті.

1 ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ДАТЧИКІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АТМОСФЕРИ

1.1 Фізична модель

Плівки, що мають нанокластерний растр, не завжди стабільні через мінливість морфології нанокластерів (НК), що відкриває широкі перспективи для розвитку функціональної мікроелектроніки [1, 2], зокрема, для створення квантово-розмірних носіїв інформації [3]. З метою розширення можливостей практичного використання пліткових гетеропереходів (ГП) нами поставлена задача дослідити властивості аморфних плівок з квазіметалевими центрами (КМЦ) [1]. Вирішення такої задачі дозволяє створити датчики нового покоління на основі гетеропереходів для вимірювання параметрів атмосфери

Стабілізація електричних характеристик аморфних плівок перехідних d-металів значно підвищується при легуванні елементами IV групи таблиці Менделєєва (вуглецю, кремнію, германію). Наявність цих елементів в ГП, додатково змінює електричні властивості плівок і впливає на характер їх провідності.

Нами вивчалися амфорні піроактивовані металеві плівки хрому (Cr) та нікелю (Ni), легованих вуглецем (C), на постійному та змінному струмі в діапазоні частот $10 \dots 10^9$ Гц при температурах $77 \dots 573^\circ\text{K}$.

Дослідні зразки плівок Cr і Ni були отримані методом піроактиваційного розкладання пар різних металоорганічних сполук в атмосфері інертного газу і являли собою резистивні смужки довжиною до 20 мм і шириною 0,01...2 мм; контактні майданчики напиляли у вакуумі $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст. Дротяні контакти приварювали до контактних майданчиків за допомогою термокомпресійного зварювання. Процес термічного розкладання (піроліз) супроводжується фотоактивацією молекул металоорганічних сполук

ультрафіолетовим (УФ) опроміненням. При високих рівнях активації молекули розпадаються на метал і леткий органічний радикал із вуглецю, який захоплюється плівкою металу. Подібним чином відбувалося автолегкування плівок вуглецем, що визначало їх напівпровідникові властивості.

У залежності від умов розкладання та інтенсивності УФ активації концентрацію домішкового вуглецю вдавалося змінювати від 0,001 до 10 ат. Дослідження фазового складу плівок показали, що при рівні легування $\sim 0,1\%$ вуглець не утворює карбідів, а присутній у вигляді квазімакроскопічних (розмірами до 100 Å) НК, розподілених у матриці аморфного металу. Кількісні оцінки середньої відстані між центрами в піролітичних плівках типу Cr КМЦ дають величину в кілька постійних ґрат відповідного металу, що, очевидно, менше довжини вільного пробігу носіїв в аморфному металі.

В аморфному стані піролітичні Cr і Ni мають найбільш яскраво виражені властивості неметалічної провідності їх вольтамперні характеристики (ВАХ), містять ділянки перемикань і негативного опору. Оцінки часу життя (шляхом порівняння прямого та зворотного ходу ВАХ) плівок Cr (КМЦ) у ізолюючому стані показують, що ця величина досить велика. Так, зворотний перехід із «відкритого» у вихідний «закритий» стан здійснюється імпульсом напруги зворотної полярності. Час перемикання становить доли секунд. Зі збільшенням температури порогова напруга перемикання монотонно зменшується від 1,2 при температурах рідкого азоту до 0,8 В при 200°C. При температурах вище 200° С ефект перемикання стає нестабільним, спостерігається мимовільний перехід у провідний металічний стан.

Нелінійність ВАХ піролітичного Ni КМЦ носить інший характер: області перемикання тут відповідає ділянка негативного опору n-типу. Температурна залежність питомого поверхневого опору плівок Cr КМЦ та Ni КМЦ показана на рис. 1.1.

Плівки Cr-КМЦ, морфологія яких представлена на рис. 1.2, мають

негативну величину ТКС, плівки Ni-КМЦ в області температур нижче $\sim 120^{\circ}\text{C}$ мають позитивний нахил, але при більш високих температурах значення ТКС у них стає негативним.

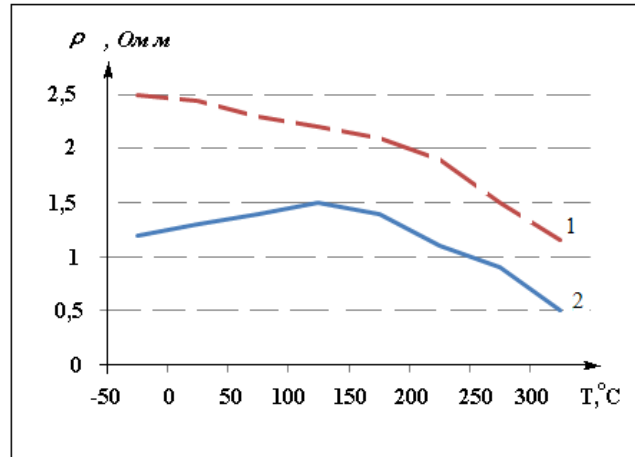


Рисунок 1.1 – Температурна залежність питомого поверхневого опору: 1–Sr-КМЦ; 2–Ni-КМЦ

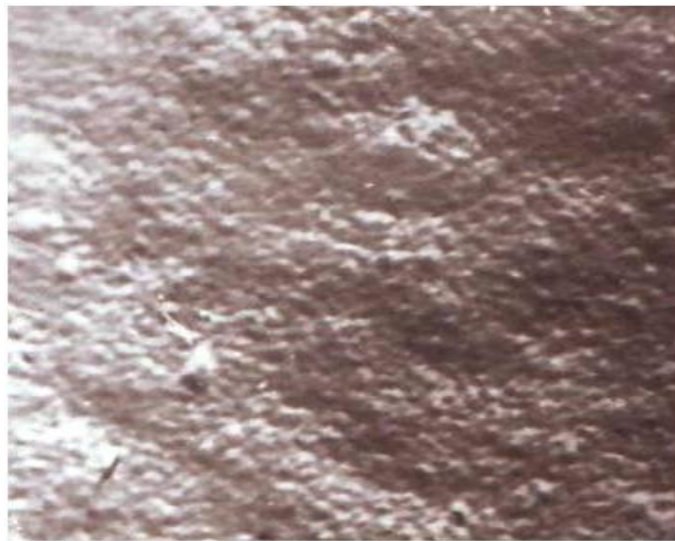


Рисунок 1.2 – Мікрофотографія плівки аморфного Sr з КМЦ вуглецю (збільшення у $8 \cdot 10^4$)

Зіставлення експериментальних даних свідчить про складний механізм псевдонапівпровідниковій провідності в аморфних перехідних металах, активованих вуглецевими КМЦ. Очевидно, провідність у своїй носить

стрибковий характері і вимагає кінцевої енергії активації. Для стрибкового механізму провідності характерно збільшення провідності на змінному струмі, яке спостерігається нами експериментально у плівок Cr-КМЦ і Ni-КМЦ, і залежність провідності від частоти, що описується, наприклад, двоцентровою моделлю перескоків [2].

Виникнення негативного опору n-типу у піролітичного Ni-КМЦ також свідчить про наявність у структурі плівок активних центрів захоплення. Поляризуємість цих центрів має бути великою, оскільки область з негативним опором у плівок зникає вже за частот ~ 250 КГц. Зазначені вище закономірності показують, що аморфні плівки Cr і Ni за участю КМЦ можуть застосовуватися в нелінійних функціональних приладах [2–4]. При цьому, зауважимо, що на відміну від приладів з p-n-переходами в даному випадку нелінійність є власною характеристикою кластеризованого матеріалу, що істотно спрощує завдання виготовлення нелінійних приладів на основі таких аморфних плівок та їх керметизованих варіантів.

Отже отримані результати розширюють можливості функціонального управління властивостями різних матеріалів шляхом їх кластеризації. Запропоновані результати можуть стати у нагоді при створенні абсолютно нових матеріалів для створення датчиків нового покоління на основі гетеропереходів для вимірювання параметрів атмосфери.

1.2 Математична модель

Аналіз утворення хімічних зв'язків між нанокластерними фрагментами (НКФ) представляє собою не лише актуальну теоретичну задачу, але визначає дорожню карту проведення вимірювань на рівні нанотехнологій. Отже, визначивши молекулярні орбіталі (МО) нанокластерів (НК) через МО НКФ, дозволяє розглядати будь-який нанокластер (НК), як систему пов'язаних між собою НКФ. Очевидно, що при утворенні хімічних зв'язків (ХЗ) між НКФ змінюється електронна структура НК в цілому. При цьому,

зокрема, змінюється розподіл електронної густини. Отже, розробці моделі визначення перерозподілу електронної густини в НК присвячена робота.

Виклад основного матеріалу. Припустимо, що НК складається з двох НКФ (або ж менших за геометричним розміром НК). Позначимо НКФ символом F^i , де $i = 1, 2$ нумерує НКФ. Щоб отримати орбіталь для i -го КФ: Ψ_j^i , де індекс j - номер орбіталі i -го НКФ, вирішується рівняння Хартрі-Фока-Рутана (ХФР) у наближенні МО, як лінійної комбінації скінченої кількості атомних орбіталей (ЛКАО) [1]:

$$\sum_{\mu > \nu} C_{i\mu} (F_{\mu\nu} - E_i S_{\mu\nu}) = 0 \quad (1.1)$$

У методі ХФР МО, записують у вигляді ЛКАО ζ_μ атомів, що утворюють певний НК (або i - НКФ):

$$\psi_j^i = \sum_{\mu=1}^{occ} C_{i\mu} \zeta_\mu^i \quad (1.2)$$

де $C_{i\mu}$ — коефіцієнти розкладу, що показують внесок окремих АО у МО;

$$\begin{aligned} F_{\mu\nu} &= H_{\mu\nu} + V_{\mu\nu}, & H_{\mu\nu} &\equiv \langle \zeta_\mu | \hat{K} - \sum_a \hat{V}_a | \zeta_\nu \rangle, & S_{\mu\nu} &= \langle \zeta_\mu | \zeta_\nu \rangle \\ V_{\mu\nu} &= \sum_i^{occ} C_{i\lambda} C_{i\sigma} \left[\langle \mu\nu | \lambda\sigma \rangle - \frac{1}{2} \cdot \langle \mu\sigma | \nu\lambda \rangle \right], \\ \langle \mu\nu | \lambda\sigma \rangle &= \langle \zeta_\mu(i) \zeta_\nu(j) | \frac{1}{r_{ij}} | \zeta_\lambda(j) \zeta_\sigma(j) \rangle \end{aligned} \quad (1.3)$$

де $S_{\mu\nu}, H_{\mu\nu}$ — матричні елементи (МЕ) інтегралів перекривання АО та гамільтоніану взаємодії, відповідно; $H_{\mu\mu}$ — діагональні МЕ — «кулонівські» інтеграли (КІ), характеризують електронегативність атома, до складу якого

входить μ – АО; $H_{\mu\nu}$ – недиагональні МЕ — «резонансні» інтеграли (PI). Індекс j нумерує n_i зайнятих ($j = 1, 2 \dots n_i$) та n_i^* вакантних орбіталей ($j = (n_i + 1), (n_i + 2) \dots n_i^*$).

Розглянемо ситуацію, коли структура НКФ (або навіть НК) така, для якої на найвищих (n_i) зайнятих енергетичних рівнях ($\psi_{n_1}^{(1)}, \psi_{n_2}^{(2)}$) знаходиться лише один електрон (тобто структури подібні до органічних радикалів [28]). Це означає, що орбіталі $\psi_{n_i}^i$ не є виродженими. Позначимо орбіталі НК (що утворений, наприклад, з двох НКФ $F^{(1)}$ та $F^{(2)}$) через $\psi_1^M, \psi_2^M \dots \psi_m^M$, де $m = n_1 + n_2 - 1$.

Будь-яку орбіталь НК $\psi_j^{(M)}$ можна записати як лінійну комбінацію МО НКФ $\psi_k^{(1)}, \psi_p^{(2)}$:

$$\zeta_j^{(M)} = \sum_{k=1}^{n_1^*} C_{jk}^{(1)} \zeta_k^{(1)} + \sum_{p=1}^{n_2^*} C_{jp}^{(2)} \zeta_p^{(2)}, \quad (1.4)$$

Повна хвильова функція (ХФ) $\psi^{(M)}$ M -го НК визначається через АО:

$$\psi^{(M)} = \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot m)!}} \det \left\| \zeta_1^{(M)}(\alpha) \dots \zeta_m^{(M)}(\alpha), \zeta_1^{(M)}(\beta) \dots \zeta_m^{(M)}(\beta) \right\|, \quad (1.5)$$

де $\zeta_1^M(\alpha), \zeta_1^M(\beta)$ — хвильові функції, що відповідають орієнтаціям спінів α та β відповідно. Аналогічно запишемо хвильові функції для НКФ $F^{(1)}$ ($\psi^{(1)}$) та $F^{(2)}$ ($\psi^{(2)}$):

$$\psi^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot n_1 - 1)!}} \det \left\| \zeta_1^{(1)}(\alpha) \dots \zeta_{n_1}^{(1)}(\alpha), \zeta_1^{(1)}(\beta) \dots \zeta_{n_1-1}^{(1)}(\beta) \right\|, \quad (1.6)$$

$$\psi^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot n_2 - 1)!}} \det \left\| \zeta_1^{(2)}(\alpha) \dots \zeta_{n_2}^{(2)}(\alpha), \zeta_1^{(2)}(\beta) \dots \zeta_{n_2-1}^{(2)}(\beta) \right\|, \quad (1.7)$$

хвильові функції $\psi^{(1)}$ та $\psi^{(2)}$ відповідають проекції повного спіну $M_S = +1/2$.

Утворення НК з НКФ, змінюється електронна структура власне НКФ. Щоб охарактеризувати ступінь цих змін, запишемо повну хвильові функції НК у вигляді, що відповідає просторовому розташуванню електронної густини т.зв. ідеальних (у сенсі відповідності геометрії макроструктури) складових НКФ.

Нехай цей НК має позначку M . Позначимо НК зі зміненою електронною конфігурацією НКФ (за рахунок їх об'єднання) символом \tilde{M} . У цьому випадку, кожний з НКФ має два різних за спіном стани. Тобто з двох фрагментів можна скомбінувати чотири стана, різних за спінами. Спін M -ї НК дорівнює нулю, тому з цих чотирьох станів потрібно вибрати синглетний стан, тоді три інших стани відповідають триплету. Приймаючи це до уваги запишемо хвильові функції НК \tilde{M} у вигляді:

$$\begin{aligned} \psi^{(\tilde{M})} = & \frac{A}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot m)!}} \det \left\| \zeta_1^{(1)}(\alpha) \dots \zeta_{n_1-1}^{(1)}(\alpha), \zeta_1^{(2)}(\alpha) \dots \zeta_{n_2-1}^{(2)}(\alpha), \right. \right. \\ & \zeta_{n_1}^{(1)}(\alpha), \zeta_1^{(1)}(\beta) \dots \zeta_{n_1-1}^{(1)}(\beta), \zeta_1^{(2)}(\beta) \dots \zeta_{n_2-1}^{(2)}(\beta), \zeta_{n_2}^{(2)}(\beta) \left. \left. \right\| + \right. \\ & + \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot m)!}} \det \left\| \zeta_1^{(1)}(\alpha) \dots \zeta_{n_1-1}^{(1)}(\alpha), \zeta_1^{(2)}(\alpha) \dots \zeta_{n_2-1}^{(2)}(\alpha) \right. \\ & \left. \left. \zeta_{n_2}^{(2)}(\alpha), \zeta_1^{(1)}(\beta) \dots \zeta_{n_1-1}^{(1)}(\beta), \zeta_1^{(2)}(\beta) \dots \zeta_{n_2-1}^{(2)}(\beta), \zeta_{n_1}^{(1)}(\beta) \right\| \right\}, \quad (1.8) \end{aligned}$$

де A — нормувальна стала. Для ортогональних АО $A=1$. Перенумеруємо АО у такій послідовності: $\zeta_1^{(1)}, \dots, \zeta_{n_1-1}^{(1)}, \zeta_1^{(2)}, \dots, \zeta_{n_2-1}^{(2)}, \zeta_{n_1}^{(1)}, \zeta_{n_2}^{(2)}$, тобто усього $n_1 + n_2 = n$ АО. Позначимо ці орбіталі символом $\zeta_i^{\tilde{M}}$ ($i = 1, 2, \dots, n$). АО не є ортогональними:

$$\langle \zeta_i^{\tilde{M}} | \zeta_j^{\tilde{M}} \rangle = \tilde{S}_{ij}, \quad (1.9)$$

Для спрощення розрахунків перейдемо до ортонормованого набору хвильових функцій $\tilde{\zeta}_i^{\tilde{M}}$:

$$\tilde{\zeta}_j^{\tilde{M}} = \sum_{k=1}^n b_{kj} \cdot \zeta_k^{\tilde{M}}, \quad (1.10)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \langle \tilde{\zeta}_i^{\tilde{M}} | \tilde{\zeta}_j^{\tilde{M}} \rangle = \delta_{ij}.$$

Коефіцієнти b_{kj} можна підібрати таким чином, щоб МО (1.8) не змінювалася. Запишемо хвильові функції $\psi^{(\tilde{M})}$ НК через $\tilde{\zeta}_i^{\tilde{M}}$:

$$\begin{aligned} \psi^{(\tilde{M})} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot m)!}} \{ & \det \left\| \tilde{\zeta}_1^{(\tilde{M})}(\alpha) \dots \tilde{\zeta}_{n-2}^{(\tilde{M})}(\alpha), \tilde{\zeta}_{n-1}^{(\tilde{M})}(\alpha), \tilde{\zeta}_1^{(\tilde{M})}(\beta), \right. \\ & \dots \tilde{\zeta}_{n-2}^{(\tilde{M})}(\beta), \tilde{\zeta}_n^{(\tilde{M})}(\beta) \left\| + \det \left\| \tilde{\zeta}_1^{(\tilde{M})}(\alpha), \dots, \tilde{\zeta}_{n-2}^{(\tilde{M})}(\alpha), \tilde{\zeta}_n^{(\tilde{M})}(\alpha), \right. \right. \\ & \left. \left. \tilde{\zeta}_1^{(\tilde{M})}(\beta), \dots, \tilde{\zeta}_{n-2}^{(\tilde{M})}(\beta), \tilde{\zeta}_{n-1}^{(\tilde{M})}(\beta) \right\| \right\}, \quad (1.11) \end{aligned}$$

Розглядаючи МО $\psi^{(\tilde{M})}$ та $\psi^{(M)}$, як вектори у гільбертовому просторі, введемо кут $\text{Cos}\theta_\psi$ між цими векторами, як, у певному сенсі, міру відмінності цих векторів між собою:

$$\text{Cos}\theta_\psi = \langle \psi^{(\tilde{M})} | \psi^{(M)} \rangle, \quad (1.12)$$

Інтеграли перекривання $S_{ij}^{(\tilde{M}M)}$ між орбіталями ζ_j^M та $\zeta_i^{\tilde{M}}$:

$$S_{ij}^{(\tilde{M}M)} = \langle \tilde{\zeta}_i^{(\tilde{M})} | \zeta_j^{(M)} \rangle = \sum_{k=1}^n b_{ki} \langle \zeta_k^{(\tilde{M})} | \zeta_j^{(M)} \rangle, \quad (1.13)$$

Для інтегралів $\langle \zeta_k^{(\tilde{M})} | \zeta_j^{(M)} \rangle$ з урахуванням (1.4) маємо:

а) для збудженого стану першого НКФ у НК, тобто якщо $\zeta_k^{(\tilde{M})} = \zeta_k^{(1)}$:

$$\langle \zeta_k^{(1)} | \zeta_j^{(M)} \rangle = C_{kj}^{(1)} + \sum_{l=1}^{n_2^*} C_{lj}^{(2)} \langle \zeta_k^{(1)} | \zeta_l^{(2)} \rangle, \quad (1.14)$$

б) якщо $\zeta_k^{(\tilde{M})} = \zeta_l^{(2)}$

$$\langle \zeta_l^{(2)} | \zeta_j^{(M)} \rangle = C_{lj}^{(2)} + \sum_{k=1}^{n_1^*} C_{ki}^{(1)} \langle \zeta_k^{(1)} | \zeta_l^{(2)} \rangle, \quad (1.15)$$

Інтеграли перекривання $\tilde{S}_{ij}^{(\tilde{M}M)}$ утворюють прямокутну матрицю ($n \times m$: n рядків, то m стовпчиків). Підставимо у вираз для кута $\text{Cos}\theta_\psi$ МО $\psi^{(\tilde{M})}$ та $\psi^{(M)}$. Запишемо співвідношення через мінори матриці $\tilde{S}_{ij}^{(\tilde{M}M)}$:

$$\text{Cos}\theta_\psi = \sqrt{2} \cdot \begin{vmatrix} S_{11}^{(\tilde{M}M)} & \dots & S_{1m}^{(\tilde{M}M)} \\ \dots & \dots & \dots \\ S_{m-11}^{(\tilde{M}M)} & \dots & S_{m-1m}^{(\tilde{M}M)} \\ S_{m1}^{(\tilde{M}M)} & \dots & S_{mm}^{(\tilde{M}M)} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} S_{11}^{(\tilde{M}M)} & \dots & S_{1m}^{(\tilde{M}M)} \\ \dots & \dots & \dots \\ S_{m-11}^{(\tilde{M}M)} & \dots & S_{m-1m}^{(\tilde{M}M)} \\ S_{m+11}^{(\tilde{M}M)} & \dots & S_{m+1m}^{(\tilde{M}M)} \end{vmatrix}, \quad (1.16)$$

Перший, з наведених детермінантів, утворюється шляхом викреслювання з $\tilde{S}_{ij}^{(\tilde{M}M)}$ останнього рядка, другий — передостаннього.

Отримані теоретичні результати можуть бути використані для розрахункових схем, де враховується інтеграли перекривання хвильових функцій.

Випадок знехтування інтегралами перекривання. У випадку, коли всі інтеграли перекривання $\tilde{S}_{ij}^{(\tilde{M}M)}$ дорівнюють нулю (це має місце в методах НДП, див. [2]), виділяючи внески зайнятих орбіталей НКФ, маємо:

$$\zeta_j^{(M)} = \sum_{k=1}^n C_{ki}^{(\tilde{M})} \zeta_k + \sum_{l_1=n_1+1}^{n_1^*} C_{il_1}^{(1)} \zeta_{l_1}^{(1)} + \sum_{l_2=n_2+1}^{n_2^*} C_{il_2}^{(2)} \zeta_{l_2}^{(2)}, \quad (1.17)$$

Вираз для $\text{Cos}\theta_\psi$:

$$\text{Cos}\theta_\psi = \sqrt{2} \cdot \left| \begin{array}{c} C_{11} \dots C_{1m-1} C_{1m} \\ \dots \\ C_{m-11} \dots C_{m-1m} \\ C_{m1} \dots C_{mm} \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{c} C_{11} \dots C_{1m-1} C_{1m} \\ \dots \\ C_{m-11} \dots C_{m-1m} \\ C_{m+11} \dots C_{m+1m} \end{array} \right|. \quad (1.18)$$

Сюди входять мінори матриці коефіцієнтів розкладу АО, аналогічні мінорам, записаним через інтеграли перекривання (1.16).

Припустимо, що хімічні зв'язки між фрагментами сполуки утворений за рахунок лише орбіталей $\zeta_m^{(M)}$. Запишемо її у вигляді $\zeta_m^{(M)} = a \cdot \zeta_{n_1}^{(1)} + \sqrt{1-a^2} \cdot \zeta_{n_2}^{(2)}$. При цьому, всі інші орбіталі збігаються з відповідними фрагментарними орбіталями $\zeta_k^{(1)}$, або $\zeta_k^{(2)}$ ($l < n_2$). Тоді $C_{ii} = 1$ ($i < n-1$), $C_{ij} = 0$ ($i \neq j, i \leq n-1, j \leq n-1$), $C_{n-1, n-1} = a$, $C_{n, n-1} = \sqrt{1-a^2} \text{та} \text{Cos}\theta_\psi = \sqrt{2}a \cdot \sqrt{1-a^2}$. Припускаючи, що $\text{Cos}\alpha = a$, $\text{Sin}\alpha = \sqrt{1-a^2}$ маємо:

$$\text{Cos}\theta_\psi = \frac{\text{Sin}2\alpha}{\sqrt{2}}, \quad (1.19)$$

Очевидно, що $\text{Cos}\theta_\psi \equiv \max$, якщо $\theta_\psi = 45^\circ$, тобто $\text{Cos}\theta_\psi = \frac{\sqrt{2}}{2}$. Таким чином, $\zeta_m^{(M)} = \frac{1}{2} \cdot (\zeta_{n_1}^{(1)} + \zeta_{n_2}^{(2)})$, тобто електронна пара, що зв'язує фрагменти, має максимум розподілу електронної густини між НКФ на середині хімічного зв'язку. У іншому випадку: $\text{Sin}\alpha \neq \sqrt{1-a^2}$, значення

$\text{Cos}\theta_\psi < \frac{\sqrt{2}}{2}$; тобто виникає поляризація хімічного зв'язку. Як граничний випадок маємо іонний тип, тоді $\text{Cos}\theta_\psi = 0$. Поворот вектора у гільбертовому просторі при утворенні хімічного зв'язку відбувається насамперед унаслідок виникнення сполученої електронної пари.

Приклад використання. Фрагментарний аналіз утворення білкових молекул з радикальних фрагментів з відкритими оболонками [2], свідчить про те, що внески вакантних орбіталей фрагментів не перевищують одного-двох відсотків. Ґрунтуючись на цьому факті, розглянемо випадок повного знехтування внесками від вакантних МО. Припустимо, що серед вакантних орбіталей АКС є така ХФ $\psi_{m+1}^{(M)}$ для якої внески вакантних орбіталей КФ достатньо малі. По суті - це розрихляюча МО, яка складена з $\psi_{n_1}^{(1)}$ та $\psi_{n_2}^{(2)}$. Приймаючи до уваги співвідношення (1.18), молекулярна орбіталь $\psi_{m+1}^{(M)}$ має вигляд: $\psi_{m+1}^{(M)} = \sqrt{1-a^2} \cdot \psi_{n_1}^{(1)} - a \cdot \psi_{n_2}^{(2)}$. У цьому випадку з коефіцієнтів C_{ki} можна скласти квадратну матрицю, включаючи хвильові функції $\psi_{m+1}^{(M)}$. Причому, така матриця (позначимо її, як \tilde{C}) є матрицею переходу від одного ортонормованого набору хвильових функцій ($\psi_k^{(M)}$, $k = 1, 2, \dots, n$) до іншого ($\psi_i^{(M)}$, $i = 1, 2, \dots, m, m+1$). Матриця \tilde{C} має вигляд:

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1m} & C_{1m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n-21} & C_{n-22} & \dots & C_{n-2m} & C_{n-2m+1} \\ C_{n-11} & C_{n-12} & \dots & C_{n-1m} & C_{n-1m+1} \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nm} & C_{nm+1} \end{bmatrix}. \quad (1.20)$$

Очевидно, що перший детермінант у співвідношенні (1.18) - це алгебраїчне доповнення елемента C_{nm+1} у матриці \tilde{C} , а другий (з точністю до знака) - доповнення елемента C_{n-1m+1} . Запишемо обернену матрицю \tilde{C}^{-1} . Її елементи $\tilde{C}^{-1} = dC_{ji}$, де dC_{ji} - алгебраїчне доповнення елемента C_{ji} в

матриці \tilde{C} .

Можна показати, що детермінант \tilde{C} дорівнює одиниці, тому:

$$\text{Cos}\theta_\psi = -\sqrt{2d}C_{n-1m+1}dC_{nm+1} = -\sqrt{2d}C^{-1}_{m+1n-1}C^{-1}_{m+1n}, \quad (1.21)$$

Враховуючи унітарність матриці \tilde{C} (а також, що МЕ C_{ki} — є дійсними) маємо:

$$\text{Cos}\theta_\psi = -\sqrt{2d}C_{n-1m+1}dC_{nm+1}, \quad (1.22)$$

тобто у формулу для $\text{Cos}\theta_\psi$ входять лише два коефіцієнти (при $\psi_{n_1}^{(1)}, \psi_{n_2}^{(2)}$) до складу МО $\psi_{m+1}^{(M)}$.

Матриця електронної густини. Для НК M та \tilde{M} матриці електронної густини $\rho(\vec{r}, \vec{r}')_1^{(M)}, \rho(\vec{r}, \vec{r}')_1^{(\tilde{M})}$ першого порядку, мають вигляд, відповідно :

$$\rho_1^{(M)}(\vec{r}', \vec{r}) = 2 \cdot \sum_{i=1}^m \psi_i^{(M)}(\vec{r}') \cdot \psi_i^{(M)}(\vec{r}), \quad (1.23)$$

$$\rho_1^{(\tilde{M})}(\vec{r}', \vec{r}) = 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-2} \psi_i^{(\tilde{M})}(\vec{r}') \cdot \psi_i^{(\tilde{M})}(\vec{r}) + \psi_{n-1}^{(\tilde{M})}(\vec{r}') \cdot \psi_{n-1}^{(\tilde{M})}(\vec{r}) + \psi_n^{(\tilde{M})}(\vec{r}') \cdot \psi_n^{(\tilde{M})}(\vec{r}), \quad (1.24)$$

Визначимо кут повороту між векторами $\rho_1^{(M)}(\vec{r}', \vec{r}), \rho_1^{(\tilde{M})}(\vec{r}', \vec{r})$:

$$\text{Cos}\theta_\rho = \frac{\int \rho_1^{(M)}(\vec{r}', \vec{r}) \cdot \rho_1^{(\tilde{M})}(\vec{r}', \vec{r}) \cdot dV \cdot dV'}{\sqrt{\int \rho_1^{(M)} \rho_1^{(M)} dV \cdot dV'} \cdot \sqrt{\int \rho_1^{(\tilde{M})} \rho_1^{(\tilde{M})} dV \cdot dV'}}, \quad (1.25)$$

Знаменник у (1.25) - добуток довжин векторів $\rho(\vec{r}, \vec{r}')_1^{(M)}, \rho(\vec{r}, \vec{r}')_1^{(\tilde{M})}$ - дорівнює: $\rho(\vec{r}, \vec{r}')_1^{(M)} \cdot \rho(\vec{r}, \vec{r}')_1^{(\tilde{M})} = \sqrt{4m} \cdot \sqrt{4m-2}$. Чисельник запишемо через $\tilde{S}_{ij}^{(\tilde{M}M)}$ з (1.13). Таким чином, (1.25) можна переписати у вигляді:

$$\text{Cos}\theta_\rho = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n-2} (S_{ki}^{(MM)})^2 + \sum_{i=1}^m [(S_{n-1i}^{(MM)})^2 + (S_{ni}^{(MM)})^2]}{\sqrt{m \cdot (4m-2)}}, \quad (1.26)$$

Співвідношення (1.26) – є корисним для параметричних схем, у яких знехтування інтегралами перекривання не впроваджується. Для НДП методів розрахунку, тобто коли хвильові функції $\psi_k^{(1)}$ та $\psi_l^{(2)}$ ортогональні, $\text{Cos}\theta_\rho$ визначається через коефіцієнти:

$$\text{Cos}\theta_\rho = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n-2} (C_{ki})^2 + \sum_{i=1}^m (C_{n-1i}^2 + C_{ni}^2)}{\sqrt{m \cdot (4m-2)}}, \quad (1.27)$$

або

$$\text{Cos}\theta_\rho = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n (C_{ki})^2 - \sum_{i=1}^m (C_{n-1i}^2 + C_{ni}^2)}{\sqrt{m \cdot (4m-2)}}, \quad (1.28)$$

З умови нормування хвильових функцій $\psi_k^{(M)}$ випливає тотожність для коефіцієнтів:

$$\sum_{k=1}^n C_{ki}^2 + \sum_{l_1=n_1+1}^{\tilde{n}_1} C_{l_1 i}^{(1)2} + \sum_{l_2=n_2+1}^{\tilde{n}_2} C_{l_2 i}^{(2)2} = 1. \quad (1.29)$$

Звідси

$$\text{Cos}\theta_\rho = \frac{2m-2 \cdot \sum_{i=1}^m (\sum_{l_1=n_1+1}^{\tilde{n}_1} C_{l_1 i}^{(1)2} + \sum_{l_2=n_2+1}^{\tilde{n}_2} C_{l_2 i}^{(2)2}) - \sum_{i=1}^m (C_{n-1i}^2 + C_{ni}^2)}{\sqrt{m \cdot (4m-2)}}. \quad (1.30)$$

Сума у чисельнику $-\sum_{i=1}^m (\sum_{l_1=n_1+1}^{\tilde{n}_1} C_{l_1 i}^{(1)2} + \sum_{l_2=n_2+1}^{\tilde{n}_2} C_{l_2 i}^{(2)2}) - \sum_{i=1}^m (C_{n-1i}^2 + C_{ni}^2)$ – це сумарна заселеність вакантних орбіталей фрагментів у НК; чим більше значення цієї складової, тим менше $\text{Cos}\theta_\rho$.

Знехтуємо вакантними орбіталями фрагментів $\psi_j^{(M)}$ ($j > m$) НК, тоді матриця коефіцієнтів C - це матриця переходу від одного ортонормованого набору МО $\psi_k^{(1)}, \psi_l^{(2)}$ до другого ортонормованого набору хвильових функцій $\psi_j^{(M)}$, тому

$$\sum_{k=1}^m C_{ki}^2 + \sum_{j=m+1}^{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2} C_{kj}^2 = 1, \quad (1.31)$$

для будь-якого значення k . Враховуючи це, запишемо:

$$\text{Cos}\theta_\rho = \frac{2m-2-2 \cdot \sum_{i=1}^m \left(\sum_{l_1=n_1+1}^{\tilde{n}_1} C_{l_1 i}^{(1)2} + \sum_{l_2=n_2+1}^{\tilde{n}_2} C_{l_2 i}^{(2)2} \right) - \sum_{i=m+1}^{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2} (C_{n-1i}^2 + C_{ni}^2)}{\sqrt{m \cdot (4m-2)}}, \quad (1.32)$$

Остання сума в чисельнику – внесок орбіталей НКФ $\zeta_{n_1}^{(1)}, \zeta_{n_2}^{(1)}$ у вакантні орбіталі КС.

Якщо знехтувати внесками вакантних орбіталей НКФ $\psi_i^{(M)}$, ($i \leq m$), а також у $\psi_{m+1}^{(M)}$, які відповідають розрихляючим орбіталям.

$$\text{Cos}\theta_\rho = \frac{2m-2-C_{n-1m+1}^2+C_{nm+1}^2}{\sqrt{m \cdot (4m-2)}}, \quad (1.33)$$

Значення $\text{Cos}\theta_\rho$ у цьому наближенні визначається тими ж коефіцієнтами, що й у формулі для визначення $\text{Cos}\theta_\psi$.

2 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ТЕПЛОНАВАНТАЖЕНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Аналіз моделі взаємодії геометрії гілок термоелементів термоелементів з показниками надійності термоелектричного каскадного охолоджувача

Термоелектричні охолоджуючі пристрої відносяться до найбільш перспективних пристроїв забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури. Це обумовлено відсутністю компонентів, що переміщуються, малими габаритами, високою швидкістю, механічною і ударною міцністю. Недоліком термоелектричних охолоджуючих (ТЕП) є більш низка холодопродуктивність порівняно з компресійними охолоджуючими пристроями, що робить актуальними дослідження, які направлені на підвищення холодопродуктивності. Очевидно, що основним методом підвищення холодопродуктивності ТЕП є вибір термоелектричних матеріалів термоелементів гілок з максимальних значенням термоелектричної ефективності. Але вибір напівпровідникових матеріалів термоелементів достатньо обмежено, тому при існуючій технології і заданих матеріалах необхідні конструктивні прийоми підвищення холодопродуктивності термоелектричних охолоджувачів.

Термоелектричний охолоджувач представляє собою конструкцію з паралельно розташованих холодного і гарячого керамічних електродів, між якими розташовані термоелементи, електрично послідовно з'єднані між собою. Існуюча модель термоелектричного охолоджуючого пристрою ґрунтується на законі збереження енергії, точніше на балансі теплових потоків за рахунок теплопровідності між навантаженням, холодним електродом, термоелементами, радіатором і зовнішнім середовищем.

Серед основних напрямів усунення проблеми підвищення холодопродуктивності термоелектричних охолоджуючих пристроїв, виявлених в ресурсах світової наукової періодики можуть бути виділені наступні:

- створення нових матеріалів з підвищеною термоелектричною ефективністю;
- використання тонкоплівкових технологій виготовлення термоелементів;
- перехід на нано структурні технології виготовлення матеріалу термоелементів;
- залучення зовнішніх електромагнітних полів для управління переносом зарядів в матеріалі термоелементу;
- оптимізація теплообміну в термоелектричному пристрої;
- залучення елементів теорії надійності в технології виготовлення термоелектричних охолоджувачів.

Як впливає з підходів, представлених у світовій періодиці, основним напрямом є створення нових матеріалів з більш високими значеннями термоелектричної ефективності і технології виготовлення. Разом з тим, промислово використовані термоелектричні матеріали вже у термін полосонті років мають дуже обмежене значення термоелектричної ефективності. Управління показниками термоелектричного охолоджувача електромагнітними полями суттєво ускладнює системи забезпечення теплових режимів, тому може бути рекомендовано тільки в спеціальних застосуваннях.

Дослідження впливу термоелектричних охолоджувачів на експлуатаційні показники надійності проводиться або на етапі технології виготовлення виробів, або після виготовлення. Це обмежує можливості впливати на результуючі показники надійності термоелектричного пристрою.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що дослідження по виявленню зв'язку між показниками надійності

термоелектричного пристрою і конструктивними параметрами, до яких у першу чергу відносяться термоелементи, актуально.

Термоелектричні охолоджувальні пристрої в умовах підвищених теплових навантажень або в режимах перемикання істотно знижують свої показники надійності. Це пов'язано, в тому числі, і термічними напругами місць з'єднання термоелементів з електродами. Очевидно, що чим вище діапазон перепадів температур, що генеруються, тим нижче показники надійності термоелектричних систем забезпечення теплових режимів тепло навантаженої радіоелектронної апаратури. Каскадні охолоджувачі забезпечують більший перепад температур порівняно з одно каскадними пристроями, тому вимоги до показників надійності виявляються жорсткішими. Посилення вимог до працездатності тепло навантаженої апаратури і, відповідно, до термоелектричних систем забезпечення теплових режимів робить актуальним пошук підходів до підвищення показників надійності каскадних охолоджувачів. У представлених дослідженнях розглянуто конструктивні підходи підвищення показників надійності двокаскадних термоелектричних пристроїв, що охолоджують.

Метою роботи є розробка та аналіз моделі, що зв'язує показники надійності двокаскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою з геометрією термоелементів та їх розподілом у каскадах.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

– розробити модель, яка зв'язує показники надійності двокаскадного охолоджувача з геометрією гілок термоелементів та їх розподілом у каскадах для різних перепадів температури та фіксованого теплового навантаження;

- визначити можливість підвищення показників надійності двокаскадного охолоджувача в робочому діапазоні температур за рахунок вибору конструктивних параметрів термоелементів та їх розподілу в каскадах.

2.1.1 Розробка та аналіз моделі зв'язку показників надійності з конструктивними та енергетичними параметрами

Інтерес до застосування каскадних термоелектричних охолоджувачів (КТЕУ) викликаний як необхідністю досягнення максимально можливого рівня охолодження, а й підвищенням економічності охолодження при заданому перепаді температури. У ряді випадків при проектуванні КТЕУ у розпорядженні розробника є ряд різних конструкцій КТЕУ, що відрізняються один від одного кількістю термоелементів n_1, n_2 у каскадах (відношенням n_1/n_2) та геометрією їх гілок. Під геометрією гілок розуміється відношення висоти l гілки каскаду до площі її поперечного перерізу S . Перед розробником стоїть завдання раціонального вибору геометрії гілок термоелементів з урахуванням різних обмежень за габаритами, масою, енергоспоживанням, показниками надійності при послідовному електричному з'єднанні каскадів.

Оцінимо основні параметри та показники надійності двокаскадних ТЕУ різних конструкцій ($n_1/n_2 = var$) при використанні в каскадах гілок термоелементів різної геометрії за умови $(l/S)_1 = (l/S)_2$ для різних перепадів температури ΔT у режимі $(Q_0/I)_{max}$.

Для вирішення поставленої задачі скористаємося співвідношеннями [4, 5].

Умову теплового сполучення каскадів можна записати як

$$Q_0 + W_1 = Q_{02}; \quad (2.1)$$

де Q_0 – теплове навантаження, Вт; W_1 – потужність споживання першого каскаду, Вт:

$$W_1 = 2n_1 I_{max1}^2 R_1 B_1 \left(B_1 + \frac{\Delta T_{max1}}{T_0} \Theta_1 \right); \quad (2.2)$$

Q_{02} – холодопродуктивність другого каскаду, Вт:

$$Q_{02} = n_2 I_{\max 2}^2 R_2 (2B_2 - B_2^2 - \Theta_2); \quad (2.3)$$

n_1, n_2 – кількість термоелементів в каскадах, шт.; $I_{\max 1}, I_{\max 2}$ – максимальний робочий струм в каскадах, А, $I_{\max 1} = \bar{e}_1 T_0 / R_1, I_{\max 2} = \bar{e}_2 T_1 / R_2$; R_1, R_2 – електричний опір гілки термоелементу в каскадах, Ом, $R_1 = (l/S)_1 / \bar{\sigma}_1, R_2 = (l/S)_2 / \bar{\sigma}_2$; $\bar{e}_1, \bar{\sigma}_1, \bar{e}_2, \bar{\sigma}_2$ – відповідно, усереднені значення коефіцієнта термоЕДС, В/К, та електропровідності, См/см, гілки термоелементу в каскадах; B_1, B_2 – відносний робочий струм в каскадах, $B_1 = I / I_{\max 1}, B_2 = I / I_{\max 2}$; I – величина робочого струму, А; T_0 – температура теплопоглинаючого спаю, К; T_1 – проміжна температура, К; T – температура теплопоглинаючого спаю, К; $\Delta T_{\max 1}, \Delta T_{\max 2}$ – максимальний перепад температури в каскадах, К, $\Delta T_{\max 1} = 0,5 \bar{z}_1 T_0^2, \Delta T_{\max 2} = 0,5 \bar{z}_2 T_1^2$; \bar{z}_1, \bar{z}_2 – усереднені значення ефективності матеріалу гілок термоелементів каскадів, 1/К; Θ_1, Θ_2 – відносний перепад температури в каскадах, $\Theta_1 = \Delta T_1 / \Delta T_{\max 1} = (T_1 - T_0) / \Delta T_{\max 1}, \Theta_2 = \Delta T_2 / \Delta T_{\max 2} = (T - T_1) / \Delta T_{\max 2}$.

Холодопродуктивність двокаскадного ТЕП визначається першим каскадом:

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1) = n_1 \gamma_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1), \quad (2.4)$$

а послідовне електричне з'єднання каскадів визначає рівність робочих струмів в каскадах:

$$I_{\max 1} B_1 = I_{\max 2} B_2 = I. \quad (2.5)$$

Загальний перепад температури на двокаскадному ТЕП ΔT складається з перепадів температури в каскадах ΔT_1 і ΔT_2 :

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T_{\max 1} \Theta_1 + \Delta T_{\max 2} \Theta_2. \quad (2.6)$$

Перетворимо вираз (2.1) з урахуванням (2.2) – (2.6) і одержимо формулу для розрахунку відносної холодопродуктивності двокаскадного ТЕП

$$C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1} = \frac{2B_1^3 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} - B_1^2 A + 2B_1 aБ - a \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}}}{1 + a \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} - 2B_1 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0}}, \quad (2.7)$$

$$\text{де } a = \frac{n_2 I_{\max 2}^2 R_2}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1};$$

$$A = 2 + 4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} + a \left(\frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right);$$

$$Б = \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}}.$$

За умови $dC_1/(dB_1)=0$ одержимо співвідношення для визначення оптимального відносного робочого струму першого каскаду $B_{\text{опт}}$, відповідного максимуму відношення $(Q_0/I)_{\max}$ двокаскадного ТЕП різних конструкцій ($n_1/n_2 = \text{var}$):

$$\begin{aligned} & 4B_1^4 \left(\frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right)^2 - 4B_1^3 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \left(1 + a \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right) + \\ & + B_1^2 \left(A \left[1 + a \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right] - 4aБ \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) + \\ & + 4B_1 a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} - a \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} \left(1 + a \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right) = 0. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Значення проміжної температури T_1 можна одержати з урахуванням температурної залежності параметрів матеріалу термоелементів, використав

метод послідовних наближень [6, 7]. Після цього можна обчислити основні значимі параметри двокаскадного охолоджувача такі як B_1 , B_2 , Θ_1 і Θ_2 .

Відносна величина інтенсивності відмов обчислюється як

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} + \frac{\lambda_2}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2} K_{T1} + \frac{n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left(B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2} K_{T2}, \quad (2.9)$$

де λ_0 – номінальна інтенсивність відмов, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$, 1/ч; C_2 – відносна величина теплового навантаження другого каскаду, $C_2 = (Q_0 + W_1) / (n_2 I_{\max 2}^2 R_2)$; K_{T1} , K_{T2} – коефіцієнти значущості, які враховують вплив низької температури.

Ймовірність безвідмовної роботи P двокаскадного ТЕП можна визначити з виразу

$$P = \exp(-\lambda_{\Sigma} t), \quad (2.10)$$

де t – назначений ресурс, $t = 10^4$ год.

2.1.2 Аналіз результатів моделювання енергетичних, конструктивних і надійнісних показників охолоджувача

Розрахунки основних значимих параметрів і показників надійності двокаскадного ТЕП проводилися в режимі максимальної холодопродуктивності при заданому струмі $(Q_0/I)_{\max}$ для різної конфігурації гілок термоелементів. Умови: $(I/S)_1 = (I/S)_2 = I/S = \text{var}$ при усередненому значенні ефективності термоелектричного модуля $\bar{z}_m = (2,4-2,5) \cdot 10^{-3}$ 1/К, для різних значень відношень кількості термоелементів в каскадах n_1/n_2 ,

перепадів температури ΔT при $T = 300$ К і тепловому навантаженні $Q_0 = 1,0$ Вт. Результати розрахунків зведені в табл. 2.1–2.4.

Таблиця 2.1 – Основні параметри і показники надійності двокаскадного охолоджувача при $\Delta T = 60$ К, $T = 300$ К, $Q_0 = 1,0$ Вт, $N = 2$, $(I/S)_1 = (I/S)_2 = I/S = \text{var}$ для різних значень відносин n_1/n_2 в режимі $(Q_0/I)_{\max}$

l/S	$R_1 \cdot 10^3$, Ом	$R_2 \cdot 10^3$, Ом	$I_{\max 1}$, А	$I_{\max 2}$, А	I , А	n_1 , шт.	n_2 , шт.	n_1+n_2 , шт.	U_1 , В	U_2 , В	U_{Σ} , В	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
$n_1/n_2 = 1,0$														
$T_1 = 280$ К; $B_1 = 0,435$; $B_2 = 0,40$; $\Theta_1 = 0,62$; $\Theta_2 = 0,21$;														
$K_{T1} = 1,035$; $K_{T2} = 1,018$; $W_1 = 8,45$ Вт; $W_2 = 8,24$ Вт; $W_{\Sigma} = 16,7$ Вт; $E = 0,060$; $C_1 = 0,062$														
40	36,4	41,67	1,215	1,33	0,53	300	300	600	16,0	15,5	31,5	16,6	49,8	0,9950
20	18,2	20,83	2,43	2,66	1,06	150	150	300	8,0	7,8	15,8	8,3	24,9	0,9975
10	9,1	10,4	4,86	5,32	2,10	75,1	75,1	150	4,0	3,9	7,9	4,15	12,4	0,99876
4,5	4,1	4,7	10,8	11,8	4,7	33,8	33,8	67,6	1,8	1,75	3,55	1,87	5,6	0,99944
2,0	1,82	2,08	24,3	26,7	10,6	15,0	15,0	30,0	0,80	0,78	1,58	0,83	2,48	0,99975
$n_1/n_2 = 0,67$														
$T_1 = 274$ К; $B_1 = 0,49$; $B_2 = 0,464$; $\Theta_1 = 0,53$; $\Theta_2 = 0,29$;														
$K_{T1} = 1,035$; $K_{T2} = 1,018$; $W_1 = 3,0$ Вт; $W_2 = 4,9$ Вт; $W_{\Sigma} = 7,9$ Вт; $E = 0,127$; $C_1 = 0,21$														
40	35,1	41,2	1,24	1,31	0,61	89,5	133,6	223,1	4,9	8,1	13,0	10,5	31,4	0,99686
20	17,5	20,6	2,48	2,62	1,21	44,7	66,7	111,4	2,46	4,04	6,50	5,2	15,7	0,99843
10	8,77	10,3	4,95	5,24	2,43	22,3	33,4	55,7	1,23	2,0	3,20	2,6	7,84	0,99922
4,5	3,95	4,64	11,0	11,6	5,40	10,0	15,0	25,0	0,56	0,91	1,47	1,17	3,52	0,99965
2,0	1,75	2,06	24,8	26,2	12,2	4,5	6,7	11,2	0,25	0,40	0,65	0,53	1,6	0,99984
$n_1/n_2 = 0,50$														
$T_1 = 269$ К; $B_1 = 0,525$; $B_2 = 0,506$; $\Theta_1 = 0,46$; $\Theta_2 = 0,36$;														
$K_{T1} = 1,035$; $K_{T2} = 1,017$; $W_1 = 2,14$ Вт; $W_2 = 5,0$ Вт; $W_{\Sigma} = 7,14$ Вт; $E = 0,140$; $C_1 = 0,32$														
40	34,8	40,8	1,24	1,29	0,65	58,7	117,5	176,2	3,3	7,67	11,0	11,5	34,5	0,99655
20	17,4	20,4	2,48	2,58	1,30	29,3	58,6	87,9	1,65	3,85	5,5	5,7	17,2	0,9983
10	8,7	10,2	4,97	5,17	2,61	14,7	29,4	44,1	0,82	1,92	2,74	2,88	8,64	0,99914
4,5	3,91	4,6	11,0	11,5	5,78	6,6	13,3	20,0	0,37	0,865	1,24	1,30	3,9	0,99961
2,0	1,74	2,04	24,8	25,9	13,0	2,9	5,9	8,8	0,165	0,385	0,55	0,57	1,71	0,99983
$n_1/n_2 = 0,33$														
$T_1 = 262$ К; $B_1 = 0,57$; $B_2 = 0,56$; $\Theta_1 = 0,35$; $\Theta_2 = 0,47$;														
$K_{T1} = 1,035$; $K_{T2} = 1,021$; $W_1 = 1,63$ Вт; $W_2 = 6,2$ Вт; $W_{\Sigma} = 7,8$ Вт; $E = 0,128$; $C_1 = 0,464$														
40	34,2	40,0	1,24	1,27	0,71	40,9	122,6	163,5	2,3	8,73	11,0	16,0	48,1	0,9952
20	17,1	20,0	2,48	2,54	1,42	20,4	61,3	81,7	1,15	4,35	5,50	8,0	24,0	0,9976
10	8,55	10,0	5,0	5,08	2,83	10,2	30,6	40,8	0,58	2,16	2,74	4,0	12,0	0,99880
4,5	3,85	4,5	11,0	11,3	6,27	4,6	13,9	18,5	0,26	0,98	1,24	1,82	5,45	0,999455
2,0	1,71	2,0	24,8	25,4	14,2	2,0	6,0	8,0	0,07	0,24	0,31	0,79	2,4	0,99976
$n_1/n_2 = 0,20$														
$T_1 = 254$ К; $B_1 = 0,605$; $B_2 = 0,609$; $\Theta_1 = 0,22$; $\Theta_2 = 0,60$;														
$K_{T1} = 1,035$; $K_{T2} = 1,025$; $W_1 = 1,29$ Вт; $W_2 = 9,0$ Вт; $W_{\Sigma} = 10,3$ Вт; $E = 0,097$; $C_1 = 0,621$														
40	33,9	40,0	1,246	1,237	0,75	30,6	153,0	183,6	1,71	12,0	13,7	25,9	77,7	0,99226
20	17,0	20,0	2,49	2,46	1,51	15,3	76,5	91,8	0,85	6,0	6,85	12,9	38,8	0,9961
10	8,47	10,0	5,0	4,93	3,0	7,6	38,2	45,8	0,43	3,0	3,43	6,46	19,4	0,9981
4,5	3,81	4,5	11,1	10,95	6,71	3,4	17,2	20,6	0,19	1,34	1,53	2,9	8,7	0,99913
2,0	1,69	2,0	25,0	24,6	15,1	1,5	7,6	9,1	0,085	0,60	0,69	1,28	3,85	0,99962
$n_1/n_2 = 0,1$														
$T_1 = 247$ К; $B_1 = 0,632$; $B_2 = 0,655$; $\Theta_1 = 0,11$; $\Theta_2 = 0,74$;														

$K_{T1} = 1,035; K_{T2} = 1,030; W_1 = 1,11 \text{ Вт}; W_2 = 16,6 \text{ Вт}; W_{\Sigma} = 17,7 \text{ Вт}; E = 0,0565; C_1 = 0,751$														
40	33,3	39,2	1,26	1,215	0,80	25,2	252	277,2	1,39	20,75	22,1	54,0	162,2	0,9839
20	16,7	19,6	2,51	2,42	1,58	12,7	127	139,7	0,70	10,5	11,2	27,2	81,7	0,99186
10	8,33	9,8	5,01	4,84	3,17	6,4	63,7	70,1	0,35	5,24	5,6	13,7	41,0	0,9959
4,5	3,75	4,41	11,1	10,75	7,04	2,9	28,6	31,5	0,16	2,36	2,52	6,14	18,1	0,9982
2,0	1,67	1,96	25,0	24,2	15,8	1,3	13,0	14,7	0,07	1,05	1,12	2,8	8,4	0,99916

Таблиця 2.2 – Основні параметри і показники надійності двокаскадного охолоджувача при $\Delta T = 70 \text{ К}$, $T = 300 \text{ К}$, $Q_0 = 1,0 \text{ Вт}$, $N = 2$, $(I/S)_1 = (I/S)_2 = I/S = \text{var}$ для різних значень відношення n_1/n_2 в режимі $(Q_0/I)_{\text{max}}$

I/S	$R_1 \cdot 10^3$, Ом	$R_2 \cdot 10^3$, Ом	$I_{\text{max}1}$, А	$I_{\text{max}2}$, А	I , А	n_1 , шт.	n_2 , шт.	n_1+n_2 , шт.	U_1 , В	U_2 , В	U_{Σ} , В	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
$n_1/n_2 = 0,67$														
$T_1 = 271 \text{ К}; B_1 = 0,55; B_2 = 0,506; \Theta_1 = 0,71; \Theta_2 = 0,33;$														
$K_{T1} = 1,043; K_{T2} = 1,016; W_1 = 8,6 \text{ Вт}; W_2 = 14,0 \text{ Вт}; W_{\Sigma} = 22,6 \text{ Вт}; E = 0,0442; C_1 = 0,094$														
40	34,2	40,82	1,197	1,31	0,66	218	325	543	13,0	21,2	22,6	22,6	40,9	0,9878
20	17,1	20,4	2,39	2,61	1,32	109	162	271	6,5	10,6	17,1	17,1	20,4	0,9939
10	8,55	10,2	4,79	5,23	2,64	54,5	81,3	136	3,3	5,3	8,6	8,6	10,2	0,9969
4,5	3,85	4,6	10,6	11,6	5,87	24,5	36,6	61,1	1,47	2,39	3,86	3,86	4,6	0,9986
2,0	1,71	2,04	23,9	26,1	13,2	10,9	16,3	27,2	0,65	1,06	1,71	1,71	2,05	0,99939
$n_1/n_2 = 0,50$														
$T_1 = 266 \text{ К}; B_1 = 0,59; B_2 = 0,556; \Theta_1 = 0,64; \Theta_2 = 0,40;$														
$K_{T1} = 1,043; K_{T2} = 1,018; W_1 = 4,54 \text{ Вт}; W_2 = 10,5 \text{ Вт}; W_{\Sigma} = 15,0 \text{ Вт}; E = 0,067; C_1 = 0,185$														
40	33,9	40,8	1,20	1,27	0,71	105	2102	315	6,4	14,8	21,2	32,7	65,4	0,9935
20	17,0	20,4	2,40	2,56	1,42	52,4	105	157	3,2	7,4	10,6	16,3	49,0	0,9951
10	8,5	10,2	4,8	5,1	2,84	26,2	52,3	78,5	1,60	3,7	5,3	8,1	24,4	0,9975
4,5	3,8	4,6	10,7	11,4	6,3	11,8	23,6	35,4	0,72	1,66	2,4	3,67	11,0	0,9989
2,0	1,70	2,04	24,0	25,6	14,2	5,3	10,5	15,8	0,32	0,74	1,06	1,64	4,9	0,99951
$n_1/n_2 = 0,33$														
$T_1 = 259 \text{ К}; B_1 = 0,64; B_2 = 0,61; \Theta_1 = 0,52; \Theta_2 = 0,51;$														
$K_{T1} = 1,043; K_{T2} = 1,022; W_1 = 2,8 \text{ Вт}; W_2 = 10,5 \text{ Вт}; W_{\Sigma} = 13,3 \text{ Вт}; E = 0,0752; C_1 = 0,351$														
40	33,6	40,0	1,198	1,26	0,767	59,1	177,2	236,3	3,65	13,7	17,4	35,0	105	0,9896
20	16,8	20,0	2,40	2,512	1,53	29,5	88,6	118,1	1,83	6,85	8,7	17,5	52,4	0,9948
10	8,4	10,0	4,79	5,03	3,07	14,8	44,3	59,1	0,91	4,33	5,2	8,75	26,2	0,9974
4,5	3,78	4,5	10,65	11,2	6,82	6,7	20,0	26,7	0,41	1,54	1,95	3,9	11,8	0,9988
2,0	1,68	2,0	24,0	25,1	15,3	3,0	9,0	12,0	0,18	0,69	0,87	1,8	5,3	0,99947
$n_1/n_2 = 0,20$														
$T_1 = 252 \text{ К}; B_1 = 0,68; B_2 = 0,67; \Theta_1 = 0,40; \Theta_2 = 0,64;$														
$K_{T1} = 1,043; K_{T2} = 1,027; W_1 = 2,14 \text{ Вт}; W_2 = 14,4 \text{ Вт}; W_{\Sigma} = 16,5 \text{ Вт}; E = 0,0606; C_1 = 0,50$														
40	32,3	39,2	1,218	1,234	0,83	41,7	208,7	250,4	2,54	17,3	19,8	54,2	162,7	0,9839
20	16,1	19,6	2,44	2,47	1,66	20,8	104,1	124,9	1,29	8,67	9,96	27,0	81,2	0,9919
10	8,06	9,8	4,88	4,94	3,32	10,4	52,1	62,5	0,65	4,33	5,0	13,5	40,6	0,9960
4,5	3,63	4,41	10,8	11,0	7,36	4,7	23,5	28,2	0,29	1,96	2,25	6,1	18,3	0,9982
2,0	1,61	1,96	24,4	24,7	16,6	2,1	10,4	12,5	0,13	0,87	1,0	2,7	8,1	0,99919
$n_1/n_2 = 0,1$														
$T_1 = 246 \text{ К}; B_1 = 0,715; B_2 = 0,722; \Theta_1 = 0,29; \Theta_2 = 0,77;$														
$K_{T1} = 1,043; K_{T2} = 1,031; W_1 = 1,77 \text{ Вт}; W_2 = 25,4 \text{ Вт}; W_{\Sigma} = 27,1 \text{ Вт}; E = 0,0369; C_1 = 0,632$														
40	32,0	38,5	1,22	1,21	0,87	33,1	331	364,1	2,03	29,0	31,0	106,5	319,4	0,9686
20	16,0	19,2	2,44	2,42	1,75	16,6	166	182,6	1,01	14,5	15,5	53,4	160	0,9841
10	8,0	9,6	4,89	4,84	3,5	8,3	83	91,3	0,51	7,26	7,8	26,7	80,0	0,9920
4,5	3,6	4,33	10,9	10,75	7,8	3,7	37	40,7	0,23	3,27	3,5	11,9	35,7	0,9964
2,0	1,6	1,92	24,4	24,2	17,5	1,7	17	18,7	0,10	1,45	1,55	5,47	16,4	0,9984

Таблиця 2.3 – Основні параметри і показники надійності двокаскадного охолоджувача при $\Delta T = 80$ К, $T = 300$ К, $Q_0 = 1,0$ Вт, $N = 2$, $(I/S)_1 = (I/S)_2 = I/S = \text{var}$ для різних значень відношення n_1/n_2 в режимі $(Q_0/I)_{\text{max}}$

I/S	$R_1 \cdot 10^3$	$R_2 \cdot 10^3$	$I_{\text{max}1}$	$I_{\text{max}2}$	I	n_1	n_2	n_1+n_2	U_1	U_2 , В	U_{Σ} , В	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$	P
$n_1/n_2 = 0,5$ $T_1 = 263$ К; $B_1 = 0,665$; $B_2 = 0,602$; $\Theta_1 = 0,846$; $\Theta_2 = 0,445$; $K_{T1} = 1,052$; $K_{T2} = 1,02$; $W_1 = 27,5$ Вт; $W_2 = 64,0$ Вт; $W_{\Sigma} = 91,5$ Вт; $E = 0,0109$; $C_1 = 0,0416$														
40	33,0	40,4	1,153	1,274	0,767	548	1096	1644	35,8	83,4	119,2	261,2	783,5	0,9246
20	16,5	20,2	2,307	2,549	1,53	273,7	547,5	821,2	18,0	41,8	59,8	130,4	391,3	0,9616
10	8,26	10,1	4,61	5,10	3,07	137	273,9	411,0	8,96	20,8	29,8	65,2	195,7	0,9801
4,5	3,72	4,55	10,23	11,31	6,80	61,8	123,5	185,3	4,0	9,41	13,4	29,4	58,8	0,9941
2,0	1,65	2,02	23,1	25,5	15,4	27,3	54,6	81,9	1,8	4,2	6,0	13,0	39,0	0,9961
$n_1/n_2 = 0,33$ $T_1 = 258$ К; $B_1 = 0,715$; $B_2 = 0,667$; $\Theta_1 = 0,746$; $\Theta_2 = 0,552$; $K_{T1} = 1,052$; $K_{T2} = 1,025$; $W_1 = 7,35$ Вт; $W_2 = 27,5$ Вт; $W_{\Sigma} = 34,8$ Вт; $E = 0,0287$; $C_1 = 0,1726$														
40	32,26	40,0	1,159	1,242	0,83	133,7	401,1	534,8	8,86	33,2	42,0	120,7	362,0	0,9644
20	16,1	20,0	2,32	2,503	1,66	66,7	200,0	266,7	4,42	16,6	21,0	60,2	180,6	0,9821
10	8,06	10,0	4,64	5,0	3,32	33,4	100,2	133,6	2,21	8,28	10,5	30,2	90,5	0,9910
4,5	3,63	4,5	10,3	11,12	7,36	15,0	45,1	60,1	1,0	3,74	4,74	13,6	40,7	0,9959
2,0	1,61	2,0	23,2	25,0	16,6	6,67	20,0	26,7	0,44	1,66	2,10	6,0	18,0	0,9982
$n_1/n_2 = 0,2$ $T_1 = 251$ К; $B_1 = 0,765$; $B_2 = 0,728$; $\Theta_1 = 0,63$; $\Theta_2 = 0,68$; $K_{T1} = 1,052$; $K_{T2} = 1,027$; $W_1 = 4,34$ Вт; $W_2 = 14,42$ Вт; $W_{\Sigma} = 18,8$ Вт; $E = 0,0532$; $C_1 = 0,318$														
40	31,75	39,2	1,164	1,223	0,89	73,2	365,5	438,6	4,88	16,2	21,2	136,7	273,3	0,9730
20	15,87	19,6	2,329	2,459	1,78	36,5	182,5	219,0	2,44	8,10	10,5	68,2	204,7	0,97974
10	7,94	9,8	4,655	4,92	3,56	18,3	91,4	109,7	1,22	4,05	5,3	34,2	102,5	0,9898
4,5	3,57	4,41	10,35	10,93	7,92	8,2	41,1	49,3	0,55	1,89	2,37	15,3	45,9	0,9954
2,0	1,59	1,96	23,3	24,6	17,8	3,6	18,3	21,9	0,24	0,81	1,05	6,82	20,46	0,9980
$n_1/n_2 = 0,1$ $T_1 = 245$ К; $B_1 = 0,815$; $B_2 = 0,80$; $\Theta_1 = 0,52$; $\Theta_2 = 0,81$; $K_{T1} = 1,052$; $K_{T2} = 1,031$; $W_1 = 3,39$ Вт; $W_2 = 47,6$ Вт; $W_{\Sigma} = 51,0$ Вт; $E = 0,0196$; $C_1 = 0,4474$														
40	30,77	38,46	1,173	1,196	0,956	52,8	528	580,8	3,55	49,8	53,4	259,4	778,2	0,9251
20	15,4	19,23	2,343	2,42	1,91	26,4	264,0	290,4	1,77	24,9	26,7	129,7	389,1	0,9618
10	7,69	9,62	4,69	4,84	3,82	13,2	132	145,2	0,89	12,46	13,4	64,85	194,6	0,9807
4,5	3,46	4,33	10,43	10,75	8,50	5,9	59,0	64,9	0,40	5,6	6,0	29,0	87,0	0,99134
2,0	1,54	1,92	23,4	24,2	19,1	2,64	26,4	29,0	0,18	2,49	2,67	13,0	38,9	0,9961

Таблиця 2.4 – Основні параметри і показники надійності двокаскадного охолоджувача при $\Delta T = 90$ К, $T = 300$ К, $Q_0 = 1,0$ Вт, $N = 2$, $(I/S)_1 = (I/S)_2 = I/S = \text{var}$ для різних значень відношення n_1/n_2 в режимі $(Q_0/I)_{\text{max}}$

I/S	$R_1 \cdot 10^3$	$R_2 \cdot 10^3$	$I_{\text{max}1}$	$I_{\text{max}2}$	I	n_1	n_2	n_1+n_2	U_1	U_2 , В	U_{Σ} , В	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$	P
$n_1/n_2 = 0,2$ $T_1 = 250$ К; $B_1 = 0,845$; $B_2 = 0,772$; $\Theta_1 = 0,866$; $\Theta_2 = 0,71$; $K_{T1} = 1,062$; $K_{T2} = 1,029$; $W_1 = 15,8$ Вт; $W_2 = 105,0$ Вт; $W_{\Sigma} = 120,8$ Вт; $E = 0,0083$; $C_1 = 0,11$; $C_2 = 0,24$														
40	30,77	39,2	1,12	1,224	0,945	236	1180	1416	16,7	111,0	127,7	584,8	1754	0,83912
20	15,4	19,6	2,239	2,43	1,89	117,9	589,5	707,4	8,35	55,5	63,9	292,2	876,5	0,9161
10	7,69	9,8	4,48	4,86	3,79	58,9	295	353,5	4,17	27,8	32,0	146,0	438,0	0,9571

4,5	3,46	4,41	9,95	10,8	8,41	26,5	132,6	159,1	1,88	12,5	14,4	65,7	197,2	0,9805
2,0	1,54	1,96	22,4	24,3	18,9	11,8	59,0	70,8	0,84	5,55	6,40	29,3	87,8	0,99126
$n_1/n_2 = 0,1$														
$T_1 = 244 \text{ K}; B_1 = 0,89; B_2 = 0,85; \Theta_1 = 0,80; \Theta_2 = 0,83;$														
$K_{T1} = 1,062; K_{T2} = 1,032; W_1 = 9,84 \text{ Вт}; W_2 = 135,8 \text{ Вт}; W_{\Sigma} = 145,6 \text{ Вт}; E = 0,0069; C_1 = 0,19; C_2 = 0,146$														
40	29,85	38,46	1,133	1,186	1,0	137,4	1374	1511	9,84	135,8	145,6	866,8	2600	0,77105
20	14,92	19,23	2,266	2,41	2,0	68,7	687	755,7	4,92	67,9	72,8	433,4	1300	0,871
10	7,463	9,62	4,53	4,82	4,03	34,4	344	378,4	2,44	33,7	36,1	217,0	651	0,9370
4,5	3,36	4,33	10,0	10,71	8,9	15,7	157	172,7	1,11	15,3	16,4	99,0	297,0	0,9707
2,0	1,49	1,92	22,7	24,15	20,2	6,9	69	75,9	0,49	6,72	7,20	43,5	130,6	0,9870
$n_1/n_2 = 0,05$														
$T_1 = 240 \text{ K}; B_1 = 0,912; B_2 = 0,88; \Theta_1 = 0,71; \Theta_2 = 0,91;$														
$K_{T1} = 1,062; K_{T2} = 1,036; W_1 = 6,81 \text{ Вт}; W_2 = 194,7 \text{ Вт}; W_{\Sigma} = 201,5 \text{ Вт}; E = 0,0050; C_1 = 0,282; C_2 = 0,079$														
40	29,80	38,4	1,133	1,176	1,03	92,5	1851	1944	6,62	189,0	195,6	1253	3757	0,6868
20	14,93	19,23	2,264	2,371	2,06	46,3	926,8	973,1	3,31	94,5	97,8	633,5	1900	0,8270
10	7,46	9,62	4,53	4,74	4,13	23,2	463,1	486,3	1,65	47,1	48,8	316,6	949,8	0,9094
4,5	3,36	4,33	10,0	10,53	9,12	10,6	211,0	221,6	0,75	21,3	22,0	144,2	432,7	0,9577
2,0	1,49	1,92	22,7	23,75	20,7	4,6	92,4	97,0	0,33	9,40	9,73	63,1	189,4	0,9812

Як видно з одержаних даних зі зменшенням відношення n_1/n_2 при фіксованих значеннях l/S , перепаду температури ΔT і тепловому навантаженні Q_0 основні параметри ТЕП змінюються наступним чином:

– проміжна температура T_1 зменшується (рис. 2.1);

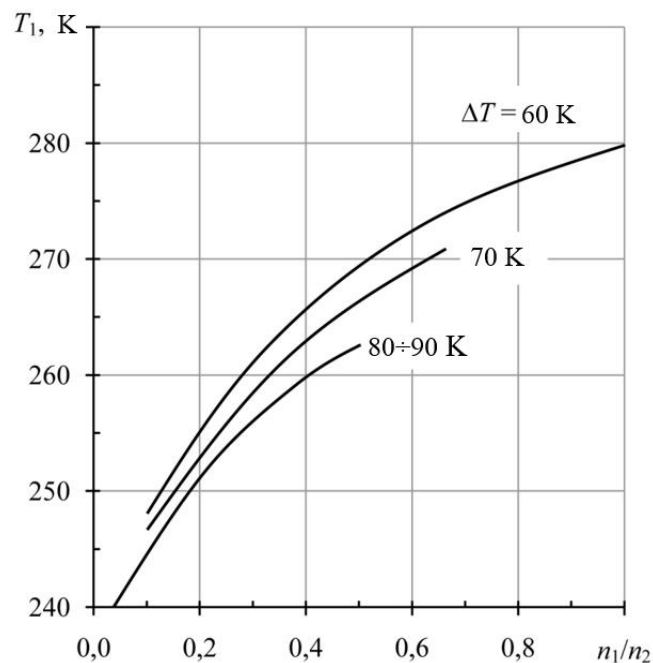


Рисунок 2.1 – Залежність проміжної температури T_1 двокаскадного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень ΔT при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 1,0 \text{ Вт}$ в режимі $(Q_0/D)_{\max}$

– відносний перепад температури у першому каскаді Θ_1 зменшується, а в другому Θ_2 підвищується, при цьому є значення n_1/n_2 , для яких $\Theta_1 = \Theta_2$, а саме: $\Theta_1 = \Theta_2 = 0,4$ при $\Delta T = 60$ К і $n_1/n_2 = 0,4$; $\Theta_1 = \Theta_2 = 0,51$ при $\Delta T = 70$ К і $n_1/n_2 = 0,33$; $\Theta_1 = \Theta_2 = 0,66$ при $\Delta T = 80$ К і $n_1/n_2 = 0,22$; $\Theta_1 = \Theta_2 = 0,81$ при $\Delta T = 90$ К і $n_1/n_2 = 0,11$ (рис. 2.2);

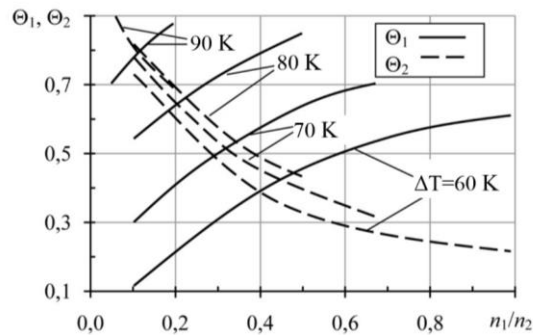


Рисунок 2.2 – Залежність відносного перепаду температури першого (Θ_1) і другого (Θ_2) каскадів двокаскадного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт в режимі $(Q_0/I)_{\max}$

– відносний робочий струм в каскадах B_1 і B_2 збільшується (рис. 2.3);

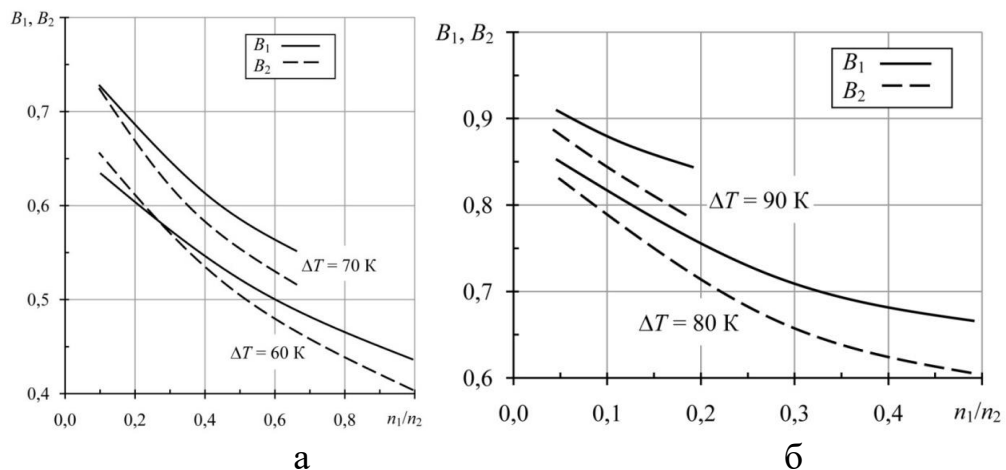


Рисунок 2.3 – Залежність відносного робочого струму першого (B_1) і другого (B_2) каскадів двокаскадного охолоджувача від відношення n_1/n_2 при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; в режимі $(Q_0/I)_{\max}$: а – $\Delta T = 60, 70$ К; б – $\Delta T = 80, 90$ К

– відносне теплове навантаження першого каскаду C_1 збільшується, а в другому C_2 зменшується, при цьому значення n_1/n_2 , для яких $C_1 = C_2$, а саме: $C_1 = C_2 = 0,38$ при $\Delta T = 60$ К і $n_1/n_2 = 0,45$; $C_1 = C_2 = 0,34$ при $\Delta T = 70$ К і $n_1/n_2 = 0,33$; $C_1 = C_2 = 0,27$ при $\Delta T = 80$ К і $n_1/n_2 = 0,24$; $C_1 = C_2 = 0,17$ при $\Delta T = 90$ К і $n_1/n_2 = 0,125$ (рис. 2.4, а);

– залежність холодильного коефіцієнту E від відношення n_1/n_2 проходить через максимум при $\Delta T = 60$ К і $n_1/n_2 = 0,5$; $\Delta T = 70$ К і $n_1/n_2 = 0,33$; $\Delta T = 80$ К і $n_1/n_2 = 0,20$; $\Delta T = 90$ К і $n_1/n_2 = 0,5$ (рис. 2.4, б);

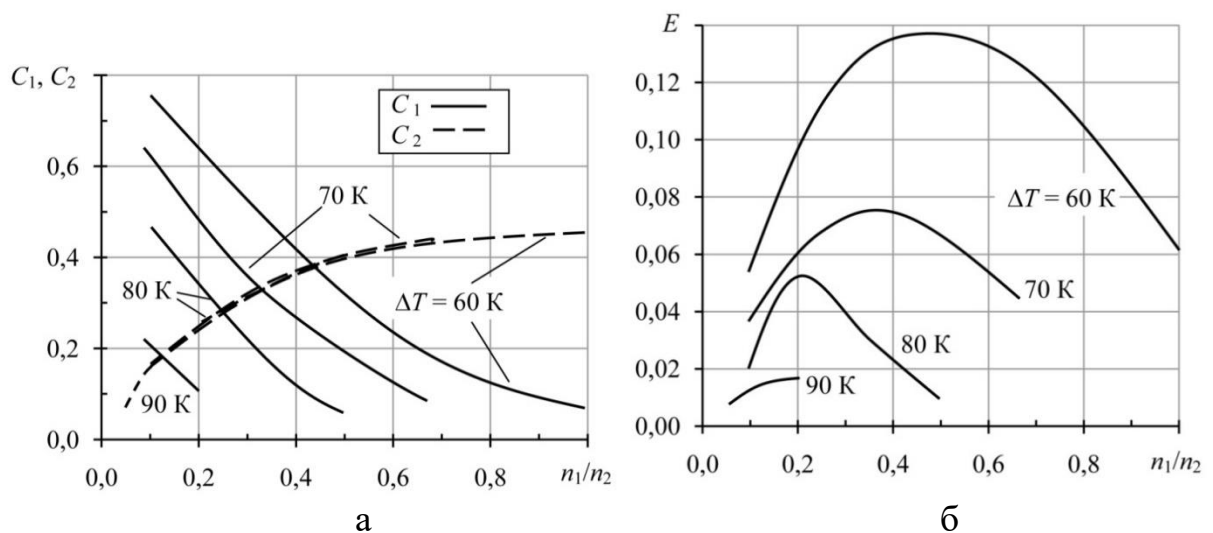


Рисунок 2.4 – Залежність відносного теплового навантаження C_1 і холодильного коефіцієнту E двокаскадного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт в режимі $(Q_0/I)_{\max}$: а – теплового навантаження C_1 ; б – холодильного коефіцієнту E

– робочий струм I підвищується для різних значень відношення l/S (рис. 2.5);

– функціональна залежність суммарного числа термоелементів $n_1 + n_2$ від відношення n_1/n_2 проходить через мінімум при $\Delta T = 60$ К і $n_1/n_2 = 0,33$, при $\Delta T = 70$ К і $n_1/n_2 = 0,5$, при $\Delta T = 80$ К і $n_1/n_2 = 0,2$, при $\Delta T = 90$ К і $n_1/n_2 = 0,15$ для різних значень l/S (рис. 2.6).

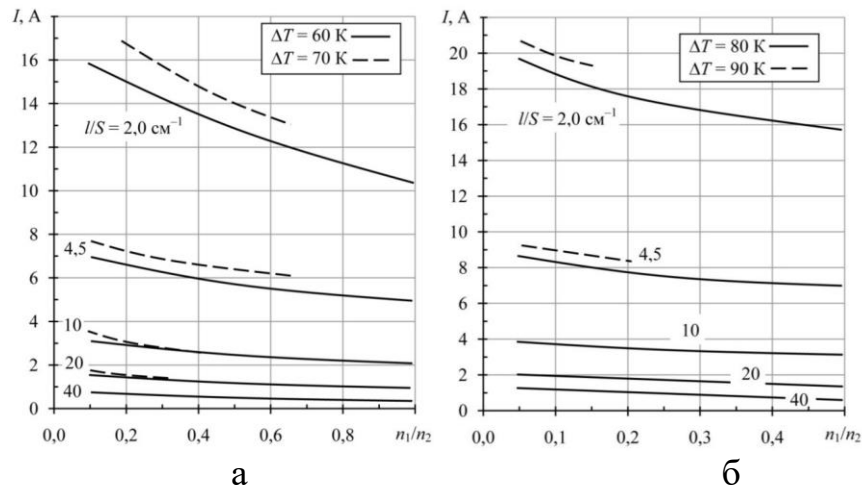


Рисунок 2.5 – Залежність робочого струму I двокаскадного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень l/S при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт в режимі $(Q_0/I)_{\max}$: а – $\Delta T = 60, 70$ К; б – $\Delta T = 80, 90$ К

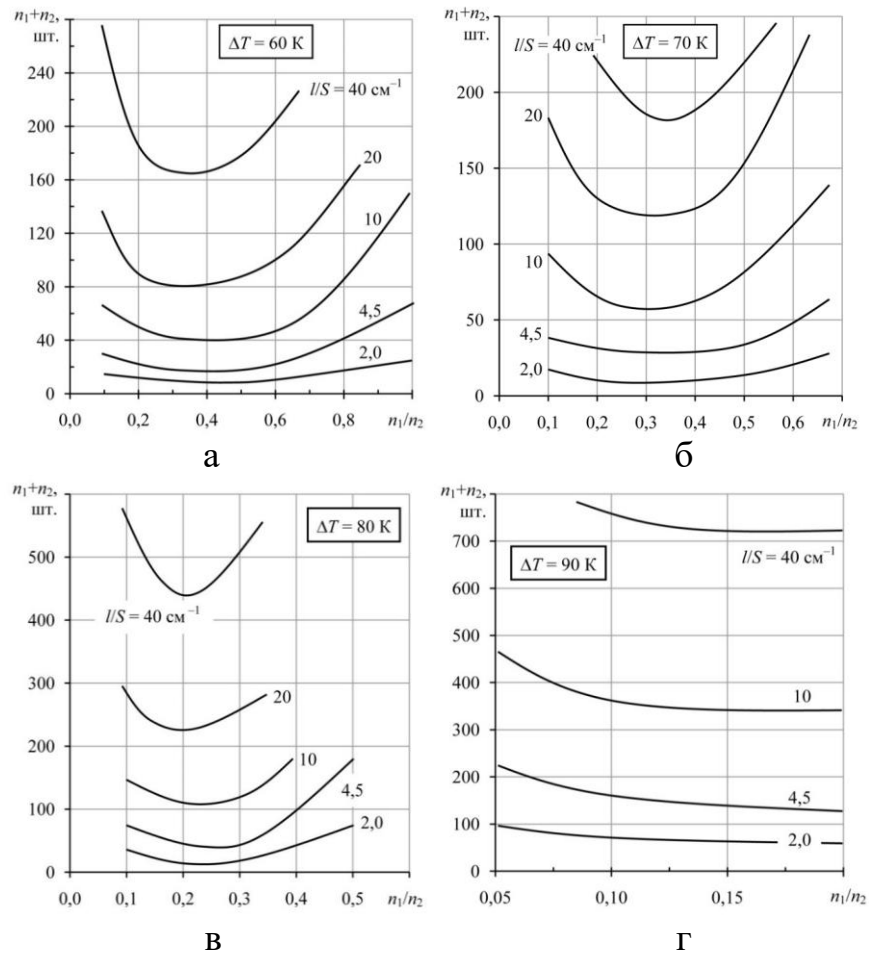


Рисунок 2.6 – Залежність сумарної кількості термоелементів двокаскадного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень l/S при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт в режимі $(Q_0/I)_{\max}$: а – $\Delta T = 60$ К; б – $\Delta T = 70$ К; в – $\Delta T = 80$ К; г – $\Delta T = 90$ К

– функціональна залежність інтенсивності відмов λ/λ_0 від відношення n_1/n_2 проходить через мінімум при $\Delta T=60\text{К}$ і $n_1/n_2=0,67$, при $\Delta T=70\text{К}$ і $n_1/n_2=0,33$, при $\Delta T=80\text{К}$ і $n_1/n_2=0,2$, при $\Delta T=90\text{К}$ і $n_1/n_2=0,15$ для різних значень l/S (рис. 2.7);

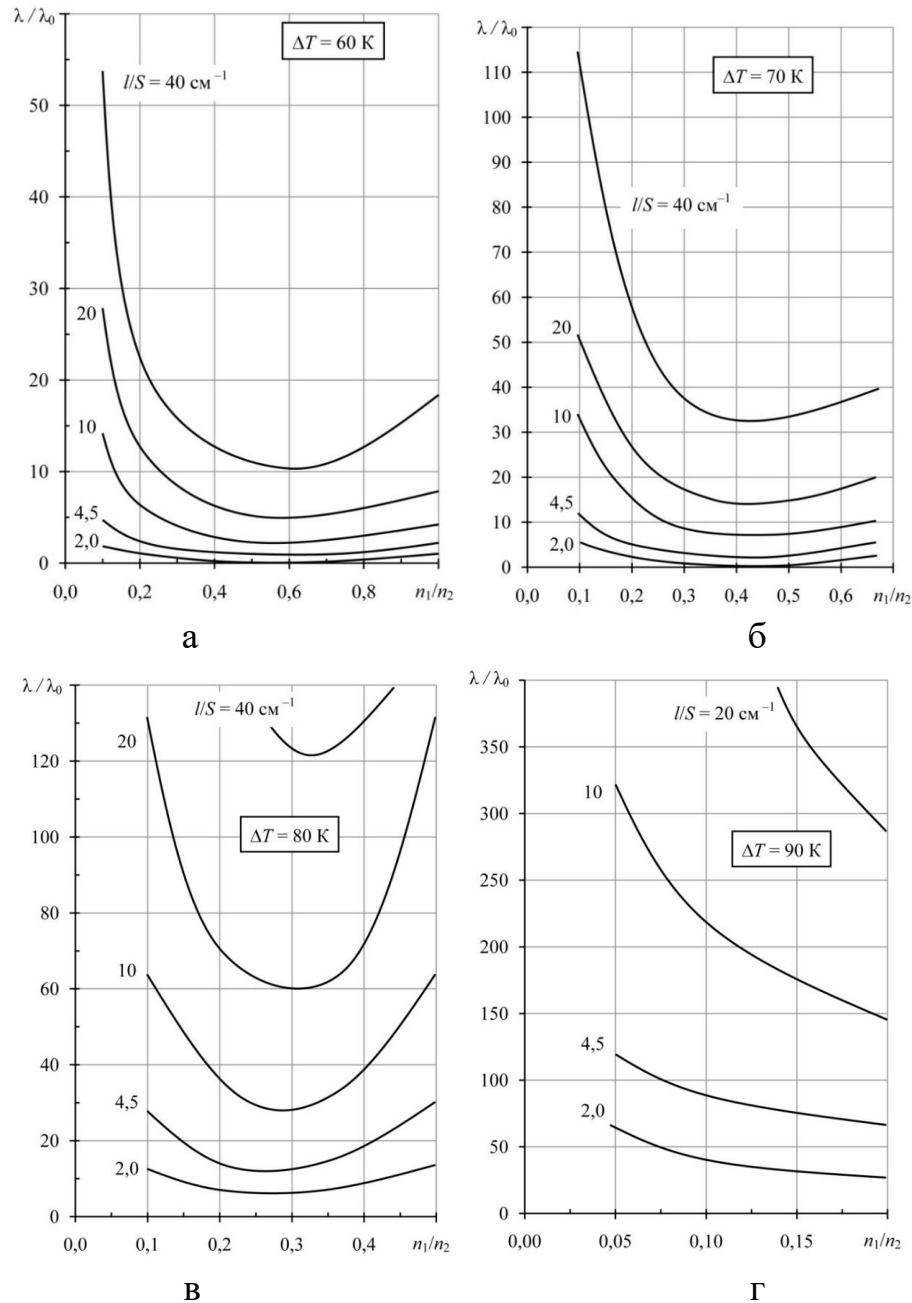


Рисунок 2.7 – Залежність відносної інтенсивності відмов λ/λ_0 двокаскадного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень l/S при $T=300\text{ К}$; $Q_0=1,0\text{ Вт}$; $\lambda_0=3\cdot 10^{-8}\text{ 1/ч}$; в режимі $(Q_0/I)_{\text{max}}$: а – $\Delta T=60\text{ К}$; б – $\Delta T=70\text{ К}$; в – $\Delta T=80\text{ К}$; г – $\Delta T=90\text{ К}$

– функціональна залежність ймовірності безвідмовної роботи P від відношення n_1/n_2 проходить через максимум при $\Delta T = 60$ К і $n_1/n_2 = 0,67$; $\Delta T = 70$ К і $n_1/n_2 = 0,5$; $\Delta T = 80$ К і $n_1/n_2 = 0,33$; $\Delta T = 90$ К і $n_1/n_2 = 0,2$ (рис. 2.8).

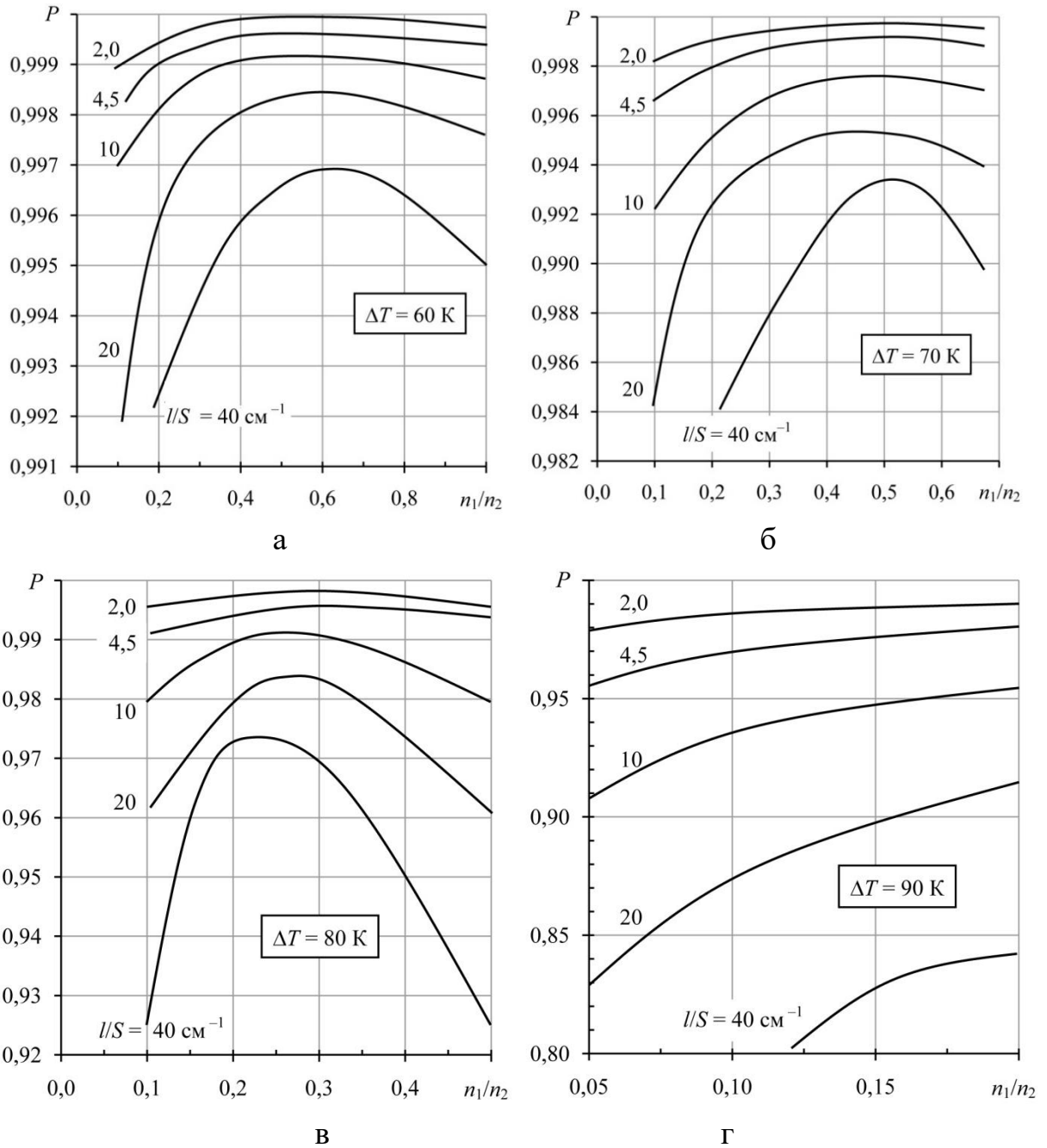


Рисунок 2.8 – Залежність ймовірності безвідмовної роботи P двокаскадного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень l/S при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $t = 10^4$ год; в режимі $(Q_0/I)_{\max}$: а – $\Delta T = 60$ К; б – $\Delta T = 70$ К; в – $\Delta T = 80$ К; г – $\Delta T = 90$ К

При цьому слід відзначити, що відносні робочі струми B_1 і B_2 , відносні перепади температури Θ_1 і Θ_2 , холодильний коефіцієнт E , відносне теплове навантаження C_1 і C_2 не залежать від геометрії гілок термоелементів в каскадах.

З одержаних графіків витікає, що інтенсивності відмов і ймовірності безвідмовної роботи мають явно виражені екстремуми, які можна використати при проектуванні при проектуванні двокаскадних термоелектричних охолоджувачів підвищеної надійності.

З проведених досліджень витікає, що при фіксованих значеннях ΔT і n_1/n_2 зменшення відношення l/S призводить до росту робочого струму, зменшенню кількості термоелементів і зниженню інтенсивності відмов, причому ці зміни можуть бути достатньо суттєвими. Наприклад, при зменшенні l/S з 10 до 4,5 значення I збільшується більш ніж у 2 рази при $\Delta T = 60$ К і $n_1/n_2 = 0,5$ (с 2,6 до 2,8 А), при $\Delta T = 70$ К і $n_1/n_2 = 0,5$ (с 2,8 до 6,3 А), при $\Delta T = 80$ К і $n_1/n_2 = 0,5$ (с 3,1 до 6,8 А), при $\Delta T = 90$ К і $n_1/n_2 = 0,2$ (с 3,8 до 8,4 А). При зменшенні l/S з 10 до 4,5 сумарна кількість термоелементів n_1+n_2 зменшується більш ніж у 2 рази при $\Delta T = 60$ К і $n_1/n_2 = 0,5$ (с 44 до 20 шт.), при $\Delta T = 70$ К і $n_1/n_2 = 0,5$ (с 80 до 35 шт.), при $\Delta T = 80$ К і $n_1/n_2 = 0,33$ (с 130 до 60 шт.), при $\Delta T = 90$ К і $n_1/n_2 = 0,2$ (с 355 до 160 шт.).

Що стосується інтенсивності відмов, то при зніженні l/S з 20 до 10 значення λ/λ_0 зменшується більш ніж у 2 рази при $\Delta T = 60$ К і $n_1/n_2 = 0,5$ (с 6,0 до 2,5), при $\Delta T = 70$ К і $n_1/n_2 = 0,5$ (с 16,3 до 8,0), при $\Delta T = 80$ К і $n_1/n_2 = 0,33$ (з 60 до 30), при $\Delta T = 90$ К і $n_1/n_2 = 0,2$ (з 290 до 145).

2.2 Визначення максимальних охолоджуючих можливостей двокаскадних охолоджувачів при варіації геометрії гілок у каскадах

Метою дослідження є визначення зв'язку охолоджуючих спроможностей і показників надійності двокаскадного термоелектричного

охолоджувача з геометрією гілок при їх послідовному з'єднанні.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити модель зв'язку інтенсивності відмов з конструктивними параметрами і енергетичними показниками двокаскадного термоелектричного охолоджувача.
2. Провести аналіз результатів моделювання для визначення умов досягнення максимального перепаду температур.

2.2.1 Розробка надійнісно-орієнтованої моделі

У ряді випадків у распорядженні розробника є ряд різних конструкцій каскадних термоелектричних пристроїв (КТЕП). Ці пристрої можуть відрізнятися один від одного кількістю термоелементів n_1 , n_2 в каскадах (відношенням n_1/n_2) і геометрією гілок (відношенням висоти l гілки каскаду до площі її поперечного перерізу S). Можливі також ряди стандартних (уніфікованих) модулів, на базі яких можна побудувати КТЕП при $(l/S)_i = \text{const}$ або $(l/S)_i = \text{var}$.

У попередніх звітах було розглянуто режим максимального перепаду температур ΔT_{max} двокаскадного ТЕП різних конструкцій ($n_1/n_2 = \text{var}$) при $(l/S)_1 = (l/S)_2 = 10 \text{ см}^{-1}$ і визначені їх максимальні охолоджуючі спроможності і показники надійності. Приведені розрахунки максимальних спроможностей, а саме величини максимального перепаду температури ΔT_{max} , при $(l/S)_1 = (l/S)_2 = 40 \dots 2,0 \text{ см}^{-1}$ і різних значеннях n_1/n_2 . Аналіз результатів показав, що ΔT_{max} не залежить від геометрії гілок термоелементів в каскадах, а залежить від ефективності первинних матеріалів.

Розглянемо оцінку охолоджуючих спроможностей і показників надійності двокаскадного ТЕП різних конструкцій ($n_1/n_2 = \text{var}$) при $(l/S)_1 = \text{var} = 20; 15; 10; 4,5 \text{ см}^{-1}$ і $(l/S)_2 = 10 \text{ см}^{-1}$ при послідовному електричному з'єднанні каскаду.

Для визначення оптимальної геометрії гілок термоелементів в першому каскаді $(l/S)_{1\text{опт}}$, що відповідає найбільшому значенню максимального перепаду температури ΔT_{max} двокаскадного ТЕП при заданій геометрії гілок термоелементів у другому каскаді $(l/S)_2 = \text{const}$, скористаємося співвідношеннями попередніх звітів.

Умову теплового сполучення каскадів можна записати у вигляді:

$$Q_{01} + W_1 = Q_{02}, \quad (2.11)$$

де $Q_{01} = 0$ при ΔT_{max} – теплове навантаження ТЕП, Вт.

Вхідні в цей вираз потужність споживання першого каскаду W_1 і холодопродуктивність другого каскаду Q_{02} розраховуються по формулам:

$$W_1 = 2n_1 \left[I^2 R_1 + \bar{e}_1 I (T_1 - T_0) \right] = 2n_1 \left[I^2 \frac{(l/S)_1}{\bar{\sigma}_1} + \bar{e}_1 I (T_1 - T_0) \right]; \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} Q_{02} &= 2n_2 \left[\bar{e}_2 I T_1 - 0,5 I^2 R_2 - K_2 (T - T_1) \right] = \\ &= -2n_2 \left[\bar{e}_2 I T_1 - \frac{0,5 I^2 (l/S)_2}{\bar{\sigma}_2} - \frac{\bar{\chi}_2}{(l/S)_2} (T - T_1) \right], \end{aligned} \quad (2.13)$$

де n_1, n_2 – кількість термоелементів в каскадах, шт.; I – величина робочого струму, А; R_i – електричний опір гілки термоелементу в i -м каскаді, Ом, $R_i = (l/S)_i / \bar{\sigma}_i$; $\bar{e}_i, \bar{\sigma}_i, \bar{\chi}_i$ – відповідно, усереднені значення коефіцієнту термо-ЕДС, В/К, електропровідності, См/см, і теплопровідності, Вт/(см·К), гілок термоелементів в i -м каскаді; T_0 – температура поглинаючого спаю, К; T_1 – проміжна температура, К; T – температури поглинаючого спаю, К.

Підставивши (2.12) і (2.13) в (2.1) одержимо вираз для проміжної температури:

$$T_1 = T_0 \left(1 + \frac{\bar{e}_1 I}{\bar{\chi}_1} (l/S)_1 \right) - 0,5 I^2 \frac{(l/S)_1^2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1}. \quad (2.14)$$

Підставивши (2.12)–(2.14) в (2.11), одержимо вираз для визначення температури теплопоглинаючого спаю:

$$T_0 = \frac{1}{\bar{e}_2 I + \frac{\bar{\chi}_2}{(l/S)_2} + I \frac{\bar{e}_1 (l/S)_1}{\bar{\chi}_1} \left(\bar{e}_2 I + \frac{\bar{\chi}_2}{(l/S)_2} \right) - I^2 \frac{n_1 \bar{e}_1^2 (l/S)_1}{n_2 \bar{\chi}_1}} \left[\frac{\bar{\chi}_2}{(l/S)_2} T + \right. \\ \left. + 0,5 I^2 \frac{(l/S)_1^2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1} \left(\bar{e}_2 I + \frac{\bar{\chi}_2}{(l/S)_2} \right) + 0,5 I^2 \frac{(l/S)_2}{\bar{\sigma}_2} + I^2 \frac{n_1 (l/S)_1}{n_2 \bar{\sigma}_1} - 0,5 I^3 \frac{n_1 \bar{e}_1 (l/S)_1^2}{n_2 \bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1} \right]. \quad (2.15)$$

Введемо наступні визначення:

$$A = \frac{\bar{\chi}_2}{(l/S)_2} T; \quad B = 0,5 I^2 \frac{1}{\bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1}; \quad f = \bar{e}_2 I + \frac{\bar{\chi}_2}{(l/S)_2};$$

$$C = 0,5 I^2 \frac{(l/S)_2}{\bar{\sigma}_2}; \quad D = I^2 \frac{n_1}{n_2 \bar{\sigma}_1};$$

$$E = 0,5 I^3 \frac{n_1 \bar{e}_1}{n_2 \bar{\sigma}_1 \bar{\chi}_1}; \quad p = I \frac{\bar{e}_1}{\bar{\chi}_1}; \quad K = I^2 \frac{n_1 \bar{e}_1^2}{n_2 \bar{\chi}_1}.$$

З урахуванням цього виразу (2.5) прийме вигляд:

$$T_0 = \frac{A + Bf(l/S)_1^2 + C + D(l/S)_1 - E(l/S)_1^2}{f + (l/S)_1 (pf - K)}. \quad (2.16)$$

За умови $\frac{dT_0}{d(l/S)_1} = 0$ одержимо:

$$(l/S)_{\text{опт}} = \frac{f}{pf - K} \left(\sqrt{1 - \frac{D(pf - K)}{(Bf - E)f} + \frac{(A + C)(pf - K)^2}{(Bf - E)f^2}} - 1 \right). \quad (2.17)$$

Інтенсивність відмов λ/λ_0 двокаскадного ТЕП можна визначити з виразу:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left(\frac{B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \Theta_1}{T_0}}{1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \Theta_1}{T_0}} \right)^2 K_{T_1} + n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left(\frac{B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2} \Theta_2}{T_1}}{1 + \frac{\Delta T_{\max 2} \Theta_2}{T_1}} \right)^2 K_{T_2}, \quad (2.18)$$

де Θ_i – відносний перепад температури в i -му каскаді, $\Theta_1 = (T_1 - T_0)/\Delta T_{\max 1}$, $\Theta_2 = (T - T_1)/\Delta T_{\max 2}$; $\Delta T_{\max i}$ – максимальний перепад температури в i -му каскаді, К, $\Delta T_{\max i} = 0,5 \bar{z}_i T_{i-1}^2$; C_i – відносне теплове навантаження в i -му каскаді, $C_1 = \frac{Q_{01}}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1}$, $C_2 = \frac{W_1 + Q_{01}}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2}$; B_i – відносний робочий струм в i -му каскаді, $B_i = I/I_{\max i}$; $I_{\max i}$ – максимальний робочий струм в i -му каскаді, А, $I_{\max i} = \bar{e}_i T_{i-1}/R_i$; \bar{z}_i – усереднене значення ефективності матеріалу гілок термоелементів i -го каскаду, 1/К; K_{T_i} – коефіцієнт значущості, який враховує вплив зниженої температури в i -м каскаді.

Ймовірність безвідмовної роботи P двокаскадного ТЕП можна визначити з виразу:

$$P = \exp(-\lambda t), \quad (2.19)$$

де t – назначений ресурс, год.

Падіння напруги двокаскадного ТЕП можна визначити з виразу:

$$U_{\Sigma} = W_{\Sigma}/I. \quad (2.20)$$

Вирази є основою для проведення розрахунків параметрів і показників надійності двокаскадного охолоджувача.

2.2.2 Аналіз моделі і результати дослідження

Розрахунок основних параметрів і показників надійності проводився для різних конструкцій двокаскадного ТЕП ($n_1/n_2=\text{var}$) при фіксованій кількості термоелементів у другому каскаді $n_2=27$, оптимальному значенні $(l/S)_1$ і $(l/S)_2=10 \text{ см}^{-1}$. Для пошуку оптимальної геометрії гілок термоелементів першого каскаду $(l/S)_{\text{опт}}$ використался параметр, який враховує геометрію гілок в каскадах:

$$a = \frac{(l/S)_1}{(l/S)_2}.$$

Результати розрахунків наведено в табл. 2.5 і на рис. 2.9–2.14.

Аналіз розрахункових даних показав, що при фіксованих значеннях параметру a зі зменшенням відношення n_1/n_2 :

- промісна температура T_1 зменшується (рис. 2.9);
- відносний робочий струм в каскадах B_1 і B_2 збільшується (рис. 2.10);
- відносний перепад температури в першому каскаді Θ_1 зростає для $a=0,45$ і $a=1,0$ і зменшується, проходячи через максимум для $a=1,5$ і $a=2,0$ (рис. 2.11, *a*). В другому каскаді Θ_2 зростає для різних значень a (рис. 2.11, *b*);
- величина робочого струму I зростає (рис. 2.12);
- оптимальне значення параметра геометрії гілок термоелементів $a_{\text{опт}}$ зменшується, проходячи через мінімум при $n_1/n_2=0,5$ (рис. 2.12);
- максимальний перепад температури ΔT_{max} зростає (рис. 2.13);
- інтенсивність відмов λ/λ_0 зростає (рис. 2.14, *a*) за рахунок росту відносних робочих струмів B_1 і B_2 , а також росту відносних перепадів температури Θ_1 і Θ_2 ;
- ймовірність безвідмовної роботи P зменшується (рис. 2.14, *b*).

Аналіз розрахункових даних показав, що при фіксованих значеннях відношення n_1/n_2 з ростом параметра a :

- проміжна температура T_1 зростає (рис. 2.9);

- відносний робочий струм першого каскаду B_1 зростає, а другого каскаду B_2 незначно зменшується (рис. 2.10);
- відносний перепад температури у другому каскаді Θ_2 зростає (рис. 2.11, б);
- ймовірність безвідмовної роботи P зменшується (рис. 2.14, б).

Таблиця 2.5 – Основні параметри і показники надійності двокаскадного термоелектричного охолоджувача при $T=300$ К, $Q_0=1,0$ Вт, $\bar{z}_m=2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К, $n_2=27$, $(l/S)_2=10$ см $^{-1}$ і вар'юванні параметра a для різних значень n_1/n_2 в режимі ΔT_{\max}

Конструкція (модули в каскадах)	a	$R_1 \cdot 10^3$, Ом	$R_2 \cdot 10^3$, Ом	$I_{\max 1}$, А	$I_{\max 2}$, А	B_1	B_2	Θ_1	Θ_2	T_1 , К	ΔT_{\max} , К	W_{Σ} , Вт	U_{Σ} , В	$(l/S)_1$	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
$n_1/n_2=1,0$; $n_1=27$; $I=2$ А																	
M4,5-27/M10-27	0,45	3,88	10,1	1,11	5,02	0,18	0,40	0,33	0,48	261,0	59,6	3,87	1,94	4,5	0,63	1,89	0,99981
M10-27/M10-27	1,0	9,43	10,53	4,7	5,25	0,43	0,380	0,67	0,23	279,0	64,0	5,63	2,82	10	1,33	4,0	0,99960
M13,8-27/M10-27	1,38	12,1	10,42	3,51	5,38	0,57	0,372	0,825	0,174	283,3	66,6	6,23	3,11	13,8	3,52	10,6	0,99894
M15-27/M10-27	1,5	13,9	10,64	3,13	5,41	0,64	0,37	0,87	0,124	287,7	66,1	6,64	3,33	15	5,38	16,1	0,9984
M20-27/M10-27	2,0	18,9	11,1	2,37	5,40	0,84	0,37	0,95	0,0	300	62,2	9,75	4,9	20	14,7	44,2	0,9956
$n_1/n_2=0,67$; $n_1=18$; $I=2,6$ А																	
M4,5-18/M10-27	0,45	3,81	10,0	10,6	4,97	0,245	0,523	0,43	0,57	255,9	68,7	6,2	2,4	4,5	2,11	6,32	0,99937
M10-18/M10-27	1,0	8,47	10,42	4,65	5,06	0,56	0,51	0,80	0,36	269,0	74,7	7,43	2,86	10	3,56	10,7	0,99893
M11,3-18/M10-27	1,13	9,58	10,42	4,1	5,04	0,634	0,516	0,81	0,38	267,7	75,7	7,73	3,0	11,3	4,85	14,55	0,99855
M15-18/M10-27	1,5	12,9	10,42	3,14	5,27	0,83	0,49	0,980	0,226	279,0	75,3	8,43	3,24	15	10,9	32,6	0,9967
M20-18/M10-27	2,0	18,2	10,9	2,36	5,35	1,10	0,49	0,987	0,084	291,4	68,6	9,70	3,72	20	27,3	82,0	0,99183
$n_1/n_2=0,50$; $n_1=13,5$; $I=3,1$ А																	
M4,5-13,5/M10-27	0,45	3,69	9,8	10,47	4,95	0,30	0,63	0,50	0,656	251,3	75,4	8,0	2,6	4,5	4,58	13,75	0,99862
M9,5-13,5/M10-27	0,95	7,8	10,1	4,83	5,11	0,64	0,61	0,91	0,44	263,5	82,4	9,1	2,95	9,5	6,27	18,8	0,99812
M10-13,5/M10-27	1,0	8,20	10,1	4,6	5,10	0,67	0,61	0,895	0,455	262,8	82,2	9,2	3,0	10	6,75	20,2	0,9980
M15-13,5/M10-27	1,5	12,1	10,1	3,1	5,3	1,0	0,59	1,0	0,32	272	79,0	10,0	3,25	15	17,25	51,8	0,99483

M10-27																		
M20-13,5/M10-27	2,0	17,9	10,5	2,37	5,4	1,31	0,575	0,93	0,135	286,7	69,0	11,4	3,67	20	37,5	112,6	0,9988	
$n_1/n_2=0,33; n_1=9; I=3,3 \text{ A}$																		
M4,5-9/M10-27	0,45	3,46	9,62	$\frac{10,6}{7}$	4,88	0,31	0,68	0,524	0,744	247,1	78,9	8,4	2,54	4,5	6,32	19,0	0,99810	
M10-9/M10-27	1,0	7,69	10,0	4,61	4,94	0,72	0,668	0,924	0,594	254,7	87,6	9,4	2,84	10	10,8	32,5	0,9968	
M11-9/M10-27	1,11	8,54	10,0	4,14	4,93	0,80	0,67	0,925	0,61	254,0	88,1	9,56	2,83	11,1	9,85	29,6	0,99705	
M15-9/M10-27	1,5	1»,1	10,0	3,03	5,09	1,09	0,648	1,0	0,485	261	86,8	10,1	3,07	15	18,1	54,2	0,9946	
M20-9/M10-27	2,0	17,0	10,0	2,3	5,20	1,43	0,635	0,81	0,41	265,6	77,3	10,9	3,30	20	33,4	100	0,9900	
$n_1/n_2=0,20; n_1=5; I=3,8 \text{ A}$																		
M4,5-5/M10-27	0,45	3,40	9,52	10,1	4,85	0,38	0,78	0,61	0,835	243	84,6	10,3	2,71	4,5	10,9	32,7	0,9967	
M9,99-5/M10-27	0,993	7,64	9,62	4,39	4,91	0,86	0,77	0,984	0,71	248,7	95,5	10,9	2,86	9,93	13,2	39,6	0,9960	
M10-5/M10-27	1,0	7,69	9,62	4,41	4,92	0,86	0,77	0,98	0,71	248,7	93,4	10,9	2,86	10	13,2	39,6	0,9960	
M15-5/M10-27	1,5	11,5	10,0	3,04	4,89	1,25	0,78	0,94	0,64	252	90,0	11,6	3,06	15	21,9	65,7	0,9935	
M20-5/M10-27	2,0	16,1	10,0	2,39	5,03	1,59	0,755	0,66	0,535	258	76,6	12,0	3,16	20	29,0	86,9	0,99135	
$n_1/n_2=0,1; n_1=3; I=4 \text{ A}$																		
M4,5-3/M10-27	0,45	3,40	9,52	9,97	4,79	0,40	0,835	0,637	0,90	240	88,1	11,1	2,78	4,5	14,4	43,2	0,9957	
M9,99-3/M10-27	1,0	7,52	9,52	4,32	4,85	0,926	0,825	0,99	0,83	243,1	96,9	11,4	2,86	$\frac{9,99}{7}$	15,9	47,7	0,99524	
M10-3/M10-27	1,0	7,52	9,52	4,32	4,85	0,926	0,825	0,99	0,83	243	96,8	11,4	2,86	10	15,9	47,7	0,9952	
M15-3/M10-27	1,5	11,3	9,52	2,96	4,91	1,35	0,815	0,875	0,769	246	91,2	11,6	2,91	15	21,5	64,4	0,9936	
M20-3/M10-27	2,0	15,9	9,62	2,35	4,91	1,70	0,815	0,51	0,71	248,7	77,3	12,0	3,0	20	25,2	75,5	0,9925	

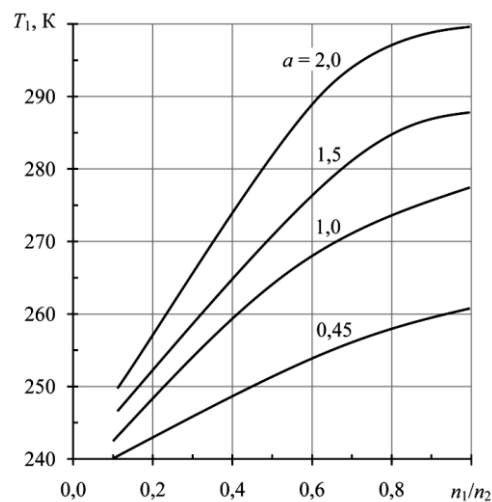


Рисунок 2.9 – Залежність проміжної температури T_1 двоканального термоелектричного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень параметру a при $T=300 \text{ K}$; $(l/S)_2=10 \text{ см}^{-1}$; $n_2=27$ в режимі ΔT_{\max}

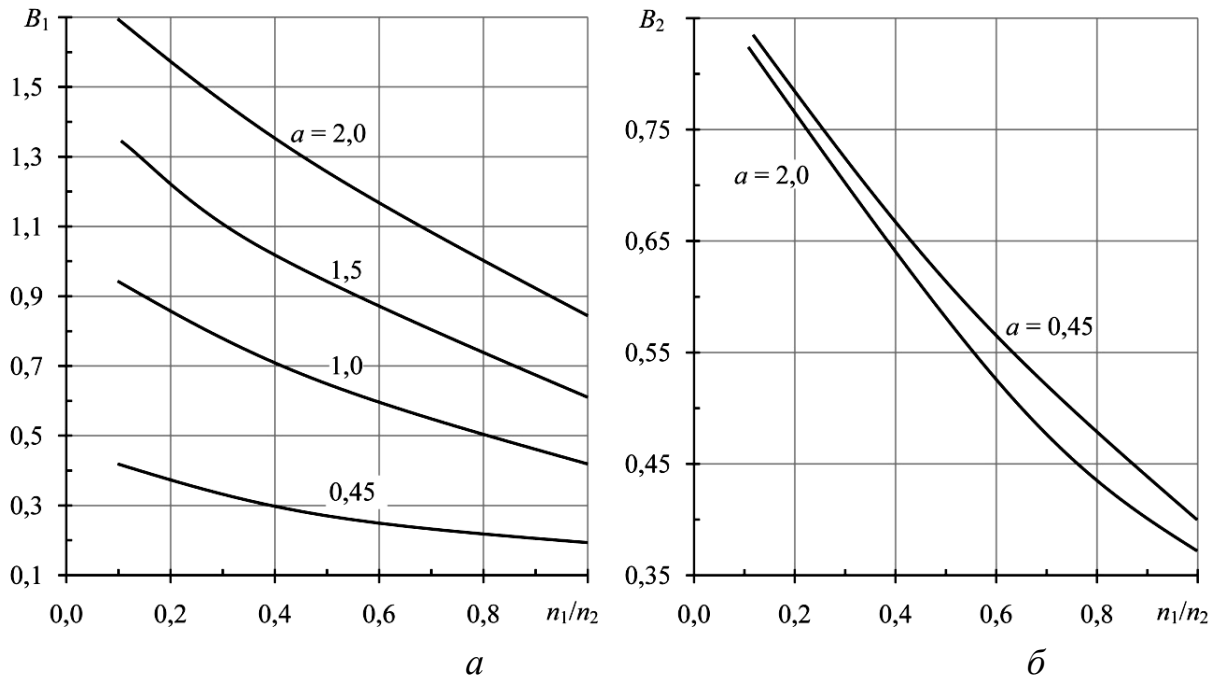


Рисунок 2.10 – Залежність відносного робочого струму каскадів двоканального термоелектричного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень параметру a при $T=300$ К; $(l/S)_2=10$ см⁻¹; $n_2=27$ в режимі ΔT_{\max} :
а – першого каскаду B_1 ; б – другого каскаду B_2 .

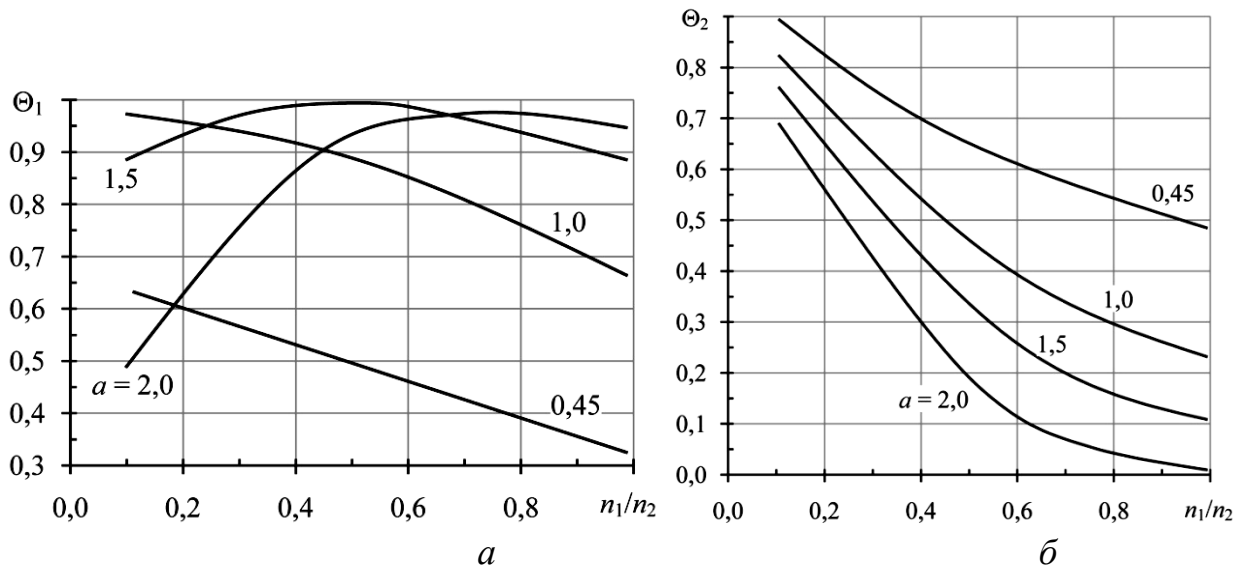


Рисунок 2.11 – Залежність відносного перепаду температури каскадів двокаскадного термоелектричного охолоджувача від відношення n_1/n_2 для різних значень параметру a при $T=300$ К; $(l/S)_2=10$ см⁻¹; $n_2=27$ в режимі ΔT_{\max} :
а – першого каскаду Θ_1 ; б – другого каскаду Θ_2 .

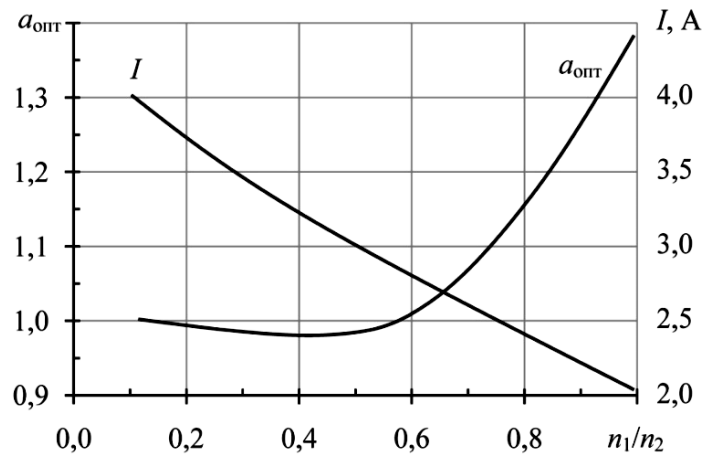


Рисунок 2.12 – Залежність оптимального значення параметра a , відповідного найбільшому значенню перепаду температури: параметра геометрії гілок a і робочого струму I двокаскадного термоелектричного охолоджувача від відношення n_1/n_2 при $T=300$ К; $(l/S)_2=10$ см⁻¹; $n_2=27$ в режимі ΔT_{max}

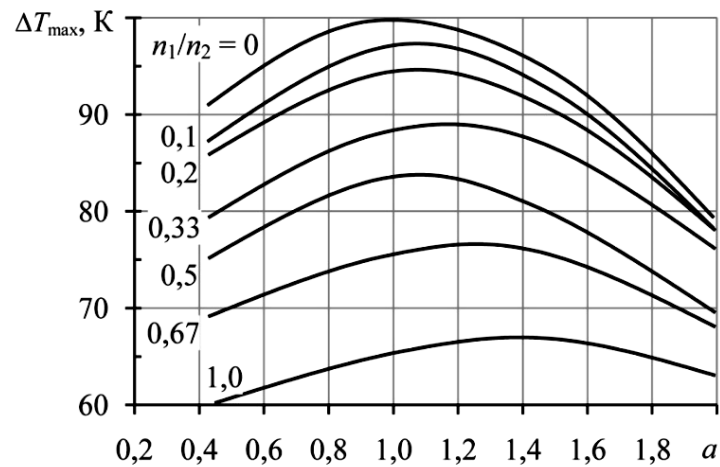


Рисунок 2.13 – Залежність максимального перепаду температури ΔT_{max} двокаскадного термоелектричного охолоджувача від величини параметру a для різних значень відношення n_1/n_2 при $T=300$ К; $(l/S)_2=10$ см⁻¹; $n_2=27$ в режимі ΔT_{max}

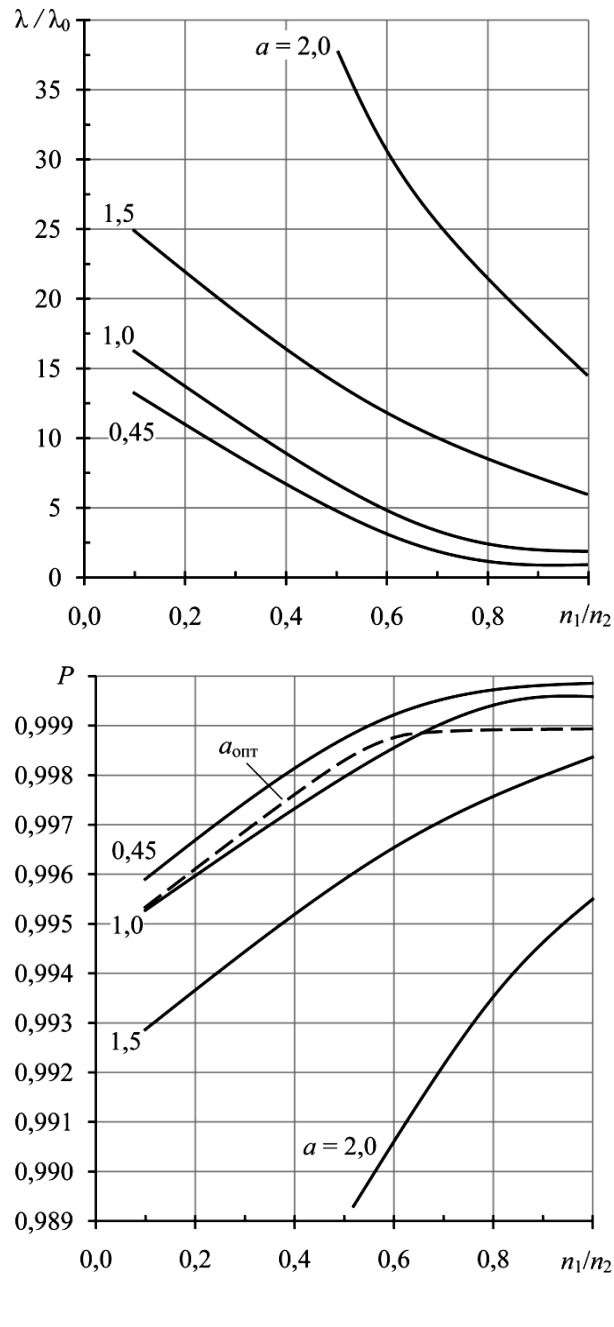


Рисунок 2.14 – Залежність відносної інтенсивності відмов λ/λ_0 і ймовірності безвідмовної роботи P двокаскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою від відношення n_1/n_2 для різних значень параметру a при $T=300$ К; $(l/S)_2=10$ см $^{-1}$; $n_2=27$ в режимі ΔT_{\max} : а – інтенсивності відносних відмов λ/λ_0 ; б – ймовірності безвідмовної роботи P

Як видно з рис. 2.13, функціональна залежність $\Delta T_{\max}=f(a)$ для різних значень відношення n_1/n_2 має чітко виражений максимум при заданій величині робочого струму I . Для кожного значення відношення n_1/n_2 можна

визначити оптимальну геометрію гілок термоелементів $a_{\text{опт}}=(l/S)_1/(l/S)_2$, яка відповідає найбільшому значенню максимального перепаду температури ΔT_{max} . Слід відмітити, що з ростом відношення n_1/n_2 величина параметру $a_{\text{опт}}$ зміщується в сторону більших значень від традиційного $a=1$ (коли $(l/S)_1=(l/S)_2=10$).

Результати розрахунку максимального перепаду температури ΔT_{max} при $a_{\text{опт}}$ ($\Delta T_{\text{max } a_{\text{опт}}}$) і при $a=1$ ($\Delta T_{\text{max } a=1}$) наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку максимального перепаду температури

n_1/n_2	$a_{\text{опт}}$	$\Delta T_{\text{max } a_{\text{опт}}}$	$\Delta T_{\text{max } a=1}$	$\gamma=\Delta T_{\text{max } a_{\text{опт}}}/\Delta T_{\text{max } a=1}$
1,0	1,38	66,6	64,0	1,041
0,67	1,13	75,7	74,7	1,01
0,50	0,95	82,4	82,2	1,0024
0,33	1,11	88,1	87,6	1,005
0,20	0,993	95,5	93,4	1,022
0,11	1,0	96,9	96,8	1,001
0,0	1,0	100	100	1,0

Як витікає з останньої колонки табл. 2.6, вигрaш залежить від відношення числа термоелементів в каскадах і досягає максимума при значенні відношення термоелементів дорівнюваному одиниці.

2.2.3 SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Сильною стороною даного дослідження було обґрунтування можливості підвищення показників надійності двокаскадних термоелектричних охолоджувальних пристроїв до 4% без доопрацювання існуючої технології промислового виробництва та зміни матеріалу термоелементів. З прикладної точки зору це дозволяє зберегти незмінними технічні умови експлуатації за кліматичними, механічними та радіаційними показниками виробів, що випускаються при підвищенні їх якісних характеристик.

Weakness. Слабкою стороною даного дослідження є той факт, що в запропонованій моделі враховано обмежену кількість факторів, що впливають, зокрема не враховані термічні деформації, які виникають у місцях з'єднання термоелементів з тепловідвідними керамічними електродами. У каскадних термоелектричних охолоджувачах температурні умови функціонування термоелементів у каскадах відрізняються, що може впливати на пластичні властивості паяних сполук. Ця складова не врахована запропонованою моделлю, і її вплив на показники надійності термоелектричних охолоджувачів потребує подальших досліджень та відповідних фінансових витрат.

Opportunities. Додаткові можливості щодо підвищення показників надійності двокаскадних термоелектричних охолоджуючих пристроїв полягають в обліку геометрії термоелементів та розподілу термоелементів у каскадах. Це дозволяє оптимізувати проектні рішення задля досягнення максимальних значень перепадів температур. При впровадженні на підприємствах елементів даних досліджень з'являється можливість на стадії проектування закладати виробу, які мають підвищеними показниками надійності.

Threats. Складності практичного використання отриманих результатів пов'язані з розширення номенклатури двокаскадних охолоджувачів, що випускаються, прив'язаних до конкретних умов експлуатації. Тому ця функція має бути закладена в алгоритм автоматизованої системи проектування та виготовлення, що є загальною тенденцією сучасного виробництва. Додаткові витрати пов'язані з доопрацюванням програмного продукту системи автоматизованого проектування термоелектричних охолоджувачів у напрямку обліку дослідженої складової надійності.

Таким чином, SWOT-аналіз дозволяє оцінити основні напрямки підвищення якості проектування та виготовлення двокаскадних термоелектричних охолоджувальних пристроїв за надійно орієнтованим критерієм.

3 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СПЕКТРАЛЬНО-ЧАСОВОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ УТОЧНЕННЯ ВІКУ КЛІМАТИЧНИХ ПОДІЙ

3.1 Постановка завдання

Циклічність і ритмічність зміни палеокліматів відмічали багато дослідників. Але така циклічність не була доведена до появи даних про зміну ізотопного складу багаторічних льодовикових кернів. З середини ХХ століття все більшу роль у вивченні кліматичних систем минулого грає аналіз кернів з глибоких свердловин, пробурених на льодовиках в зонах акумуляції. Аналіз змісту в крижаному керні дейтерію, мікрочасток, парникових газів і ізотопів вже дозволив оцінити зміни температури повітря за період близько 800 тис. років. [8, 9]. Детальні палеорекоonstrukції температури будуються на основі аналізу ізотопного складу кернів, а саме, відсоткового вмісту важкого ізотопу кисню ^{18}O (його середній зміст в природі – близько 0,2% від усіх атомів кисню). Молекули води, що містять цей ізотоп кисню, важче випаровуються і легше конденсуються. Тому, наприклад, у водяній парі над поверхнею моря зміст ^{18}O нижче, ніж в морській воді. А в конденсації на поверхні снігових кристалів, що формуються в хмарах, більш охоче беруть участь молекули води, що містять ^{18}O , завдяки чому їх зміст в осіданнях вищий, ніж у водяній парі, з якої опади формуються. Чим нижче температура формування опадів, тим сильніше проявляється цей ефект, тобто тим більше в них ^{18}O . Тому, оцінивши ізотопний склад снігу або льоду, можна оцінити і температуру, при якій формувалися опади. Був виявлений зв'язок між ізотопною кривою з гренландської свердловини Crete і кривими температур в Англії і Ісландії. Ці температури реконструйовані для останніх 300...500 років по надійних записах прямих спостережень за природними процесами [10–13]. Усе це дає підстави розглядати гренландські льодовикові керни як чутливого природного реєстратора температурних флуктуацій в Північній Півкулі і,

зокрема, в Європі.

Циклічності середньої періодичності (5000...10000 років) названі подіями Хайнриха і виділені як циклічності різких змін ізотопного складу льоду в льодовикових кернах Гренландії, що проявляються у вигляді гігантських серджей. Літологічні опади, відповідні подіям Хайнриха, виділяються як шари насичені детритом. Цей детрит перенесений айсбергами в результаті періодичної нестабільності льодових потоків з північноамериканського Лаврентийського льодовикового щита протягом останніх 70...60 тис. років [14]. Таким чином, періоди накопичення цих шарів і є подіями Хайнриха, що отримали порядкові номери, які зростають у міру збільшення віку. Датування подій Хайнриха не є простою і закінченою процедурою. У роботах [14–17] зроблені різні підходи до датування подій Хайнриха.

3.2 Початкові дані

У дослідженні спиратимемося на дані, отримані від двох найбільш відомих з пробурених в Гренландії за останні чверть століття свердловин, - GRIP і GISP2 [10–13]. Аналіз стану льодових кернів дає повну картину про зміни клімату Землі і стан атмосфери у минулому. Нашарування льоду, що збереглися, дозволяють робити висновки про значення і хід температур далеких епох з 1% помилкою [10–13]. Відновлена температура повітря в приземному шарі в центральній частині Гренландії за останні 50 000 років була отримана на основі аналізу стабільних ізотопів N_2 і Ar , отриманих з льодових кернів і відбиває хід зимових значень температури повітря, які, близькі до середньорічних температур [18]. Реконструйовані значення температури за останні 50 тисяч років надано World Data Center for Paleoclimatology, Boulder, USA [19]. Ці дані є набором точок, які фіксують зміну температури повітря в нерегулярні моменти часу.

Для дослідження були використані перетворений ряд

реконструйованих значень температури приблизно за 50 000 років (точніше – за 49 830 років). Для цього з початкового ряду була сформована вибірка значень температури через кожні тридцять років [18] (рис. 3.1).

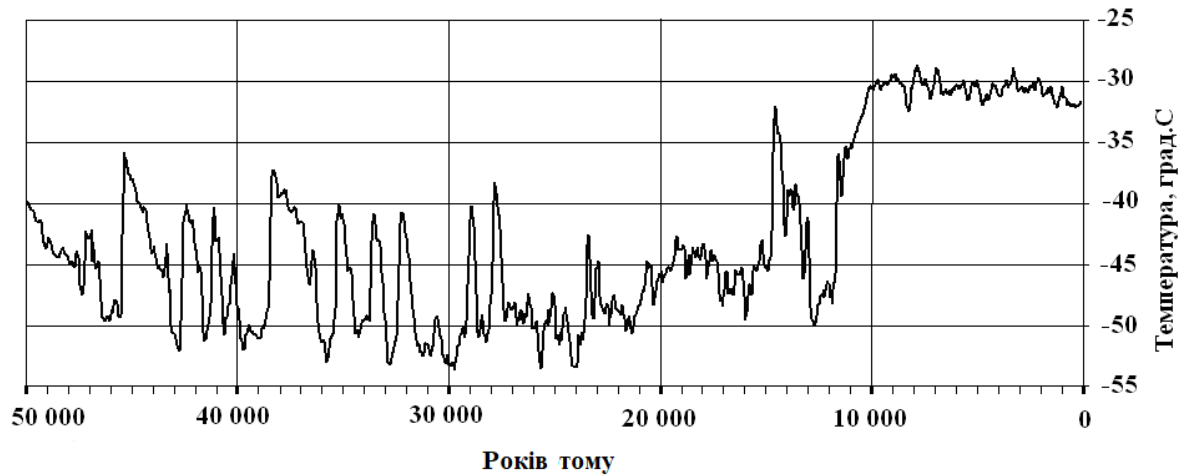


Рисунок 3.1 – Перетворений ряд реконструйованих значень температури в центральній частині Гренландії з дискретністю 30 років

Таким чином, довжина ряду складає 1661 значення. Період вибірки величиною в 30 років пов'язаний з тим, що зміна тенденцій в зміні температури і тиску, які спричиняють за собою зміну типу атмосферної циркуляції, призводять до відповідних змін в кутовій швидкості обертання Землі. При зниженій частоті появи меридіональної форми циркуляції спостерігається прискорення обертання Землі і навпаки [20]. Ця тенденція має квазіперіодичний характер із зразковим періодом в 30...35 років. Помітимо, що кратні гармоніки з періодами $\approx 30...60$ років характерні для стержних коливань рівня Світового океану, глобальної температури повітря і температури поверхні океану [21, 22].

Температура повітря за 49 830 років зазнавала значних змін (рис. 3.1). Зміни температури повітря і пов'язані з нею періодичності коливання атмосферної циркуляції проявляються упродовж деякого часового інтервалу і, з часом, змінюються або зникають повністю [22]. Кожна циклічність має

свою міру стійкості в часі і цим циклам відповідає певна енергетика, яка залежить від багатьох зовнішніх і внутрішніх кліматоутворюючих чинників. Тому важливим завданням є виявлення не лише енергетично значущих періодів коливань, але і прояву найбільш "яскравих" періодичностей в кліматичній системі планети.

3.3 Розв'язання завдання

У дослідженні зроблена спроба уточнення віку подій Хайнриха на основі вейвлетного аналізу. Для дослідження скористаємося одновимірним безперервним вейвлетним перетворенням. По аналогії з Фур'є-перетворенням вейвлетне перетворення є такимож розкладанням сигналу в ряд базисних функцій, помножених на певні коефіцієнти. Базисною функцією ряду в цьому випадку є не гармоніка, а т.з. вейвлет. У загальному випадку формула прямого безперервного вейвлетного перетворення виглядає так [23]:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (3.1)$$

де $W(a,b)$ – сукупність вейвлетних коефіцієнтів, що несе усю інформацію про сигнал s .

При побудові ряду базисних функцій, "материнська" вейвлетна функція представляється своїми різними стислими або розтягнутими версіями, зміщеними в певні місця на часовій (координатній) осі сигналу. Сказане може бути записане аналітично таким чином:

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (3.2)$$

де a – параметр, який задає міру стискання або розтягування (масштаб) вейвлетної функції; b – параметр, який задає зміщення функції по координатній (часовій) осі; ψ_0 – сама "материнська" вейвлетна функція, що задовольняє певним умовам.

Для здійснення вейвлетного перетворення базисні вейвлетні функції повинні задовольняти наступним умовам: 1) допустимості (нульового середнього $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0$); 2) обмеженості (вейвлет повинен мати скінченну енергію: $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx < \infty$); 3) локалізації (вейвлет має бути локалізований поблизу нуля аргументу як в часовому, так і в частотному просторі); 4) автономності базису [24].

На відміну від гармонік перетворення Фур'є, локалізованих тільки в частотній області і надаючих інформацію тільки про частотні властивості сигналу, вейвлетні функції мають частотно-часову локалізацію. У дискретному випадку параметри a і b міняються на дискретні значення $a = 2^j$ і $b = k2^j$, де j і k – цілі числа. В цьому випадку безперервний вейвлетний аналіз перетворюється на кратномасштабний вейвлетний аналіз, і тоді вейвлетна функція матиме вигляд:

$$\psi_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \psi\left(\frac{x-k}{a_0^j}\right), \quad (3.3)$$

а пряме вейвлетне перетворення записується так:

$$W(j,k) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) a^{-\frac{j}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a_0^j}\right) dx \quad (3.4)$$

Ідея кратномасштабного аналізу полягає в тому, що розкладання

сигналу виробляється по ортогональному базису, утвореному зсувами і кратномасштабними копіями вейвлетної функції. При цьому вводиться т.з. масштабуюча або скейлінгова функція $\varphi(x)$ з умовою нормування $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = 1$.

Це базис розкладання, що формується на основі вейвлетної функції. У кратномасштабному вейвлетному аналізі сигнал розглядається шляхом послідовних наближень його форми з різною мірою деталізації. Наближення (апроксимація) сигналу задається ітераційною формулою:

$$s_j(x) = \sum_k W(j, k) \varphi_{j,k}(x) \quad (3.5)$$

Задається як би масштаб розкладання (декомпозиції) і представлення сигналу. Причому масштаб або глибина розкладання задається безпосередньо параметром a вейвлетних коефіцієнтів (номером j) – це декомпозиція сигналу рівня j . Нульовий рівень – це початковий сигнал. Якщо використовується ортогональний вейвлет, то для аналізу загальної форми сигналу застосовується базис $\varphi(x)$, а для аналізу локальних особливостей сигналу – відповідно базис $\psi(x)$.

У вейвлетному аналізі, як і у Фур'є-аналізі, теж існує поняття спектру сигналу. Вейвлетний спектр є тривимірним зображенням коефіцієнтів $W(a, b)$. По осі абсцис відкладається координата (час) b сигналу, по осі ординат відкладаються значення масштабу a , а уздовж третьої координати відкладаються значення коефіцієнтів, номери j яких відповідають дискретним значенням масштабу на осі ординат. Номери коефіцієнтів уздовж осі ординат слідує від нульового (сам сигнал) до найбільшого значення (груба копія сигналу). Такий вейвлетний спектр є деякою рельєфною поверхнею і несе в собі інформацію про деталі сигналу непомітних на звичайному спектрі Фур'є. Наприклад, про розриви, зміни знаку першої і другої похідної і так далі. Правильне дешифрування вейвлетного спектру

може дати повну інформацію про сигнал. Способи візуалізації цієї інформації можуть бути різними. Замість зображення поверхонь часто представляють їх проекції на площину ab з ізолініями, що дозволяють простежити зміну інтенсивності амплітуд вейвлетного перетворення на різних масштабах часу [24].

При проведенні вейвлетного аналізу важливий вибір самого вейвлетного базису, тобто вейвлета. Його треба підбирати за вибраним критерієм оптимальності. Вибір глибини розкладання повинен забезпечувати надання усіх особливостей сигналу при економії обчислювальних ресурсів. Застосування методів вейвлетного аналізу дозволяє виділити найбільш значущі періодичності відповідно до величини енергії, яка доводиться на кожне коливання. Фур'є-аналіз не надає інформації про вклад в спектр різних часових періодів аналізованого ряду, тобто він не має властивості часової локалізації. Пропоноване для використання вейвлетне перетворення одновимірного ряду дозволяє отримати двовимірний масив значень коефіцієнтів $W(a,b)$. Розподіл цих значень в просторі (a,b) – за часовим масштабом і в часі – дає інформацію про еволюцію енергетичного вкладу у вейвлетний спектр процесів різного часового масштабу. Вейвлетний спектр дозволяє не лише виявити періодичності у випадковому процесі, але і простежити динаміку змін періодів коливань в часі [24].

При проведенні дослідження були застосовані методи вейвлетного аналізу до перетвореного ряду реконструйованих значень температури в центральній частині Гренландії. Аналіз проводився за допомогою пакету прикладних програм системи комп'ютерної математики. Для візуалізації була вибрана проєктивна форма відображення результатів розрахунків вейвлетних спектрів, тому що на ній краще спостерігаються особливості процесу, а на тривимірному спектрі їх розглянути складніше (порівняти рис. 3.2, а і 3.2, б). Для аналізу вибираємо вейвлет, що має досить вузьку і симетричну амплітудно-частотну характеристику і, значить, хорошу роздільну здатність по частоті і в той же час компактний носій, що забезпечить добре часове

розрізнення. Цим вимогам задовольняє симетричний вейвлет $\text{sym}b$ (рис. 3.2, в-г). Глибину розкладання чисельно вибираємо рівній розмірності аналізованого масиву даних, для того, щоб не пропустити особливості довгоперіодичних процесів усередині трикутника достовірності. При детальнішому аналізі короткоперіодичних процесів зменшуватимемо глибину розкладання для поліпшення спостереження особливостей.

3.4 Аналіз результатів

Аналіз усього ряду, тривалістю 49830 років з дискретністю 30 років, показав наявність багаторівневої структури, що характеризує часову динаміку відновленої за даними льодових кернів температури повітря Гренландії (рис. 3.3).

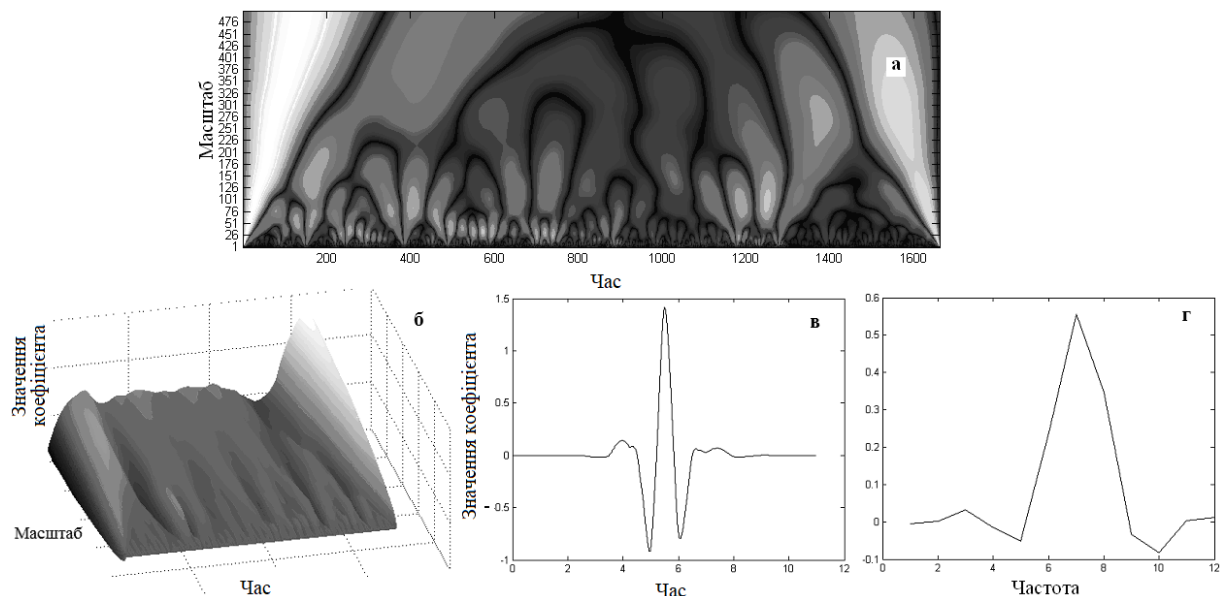


Рисунок 3.2 – Відображення одного і того ж вейвлетного спектру у вигляді скелетона (а) і у вигляді тривимірного зображення (б), форма вейвлета $\text{sym}b$ (в) і його частотна характеристика (г)

Верхній рівень представлений однією великомасштабною подією 28

000 років, яка тривала близько 29 250 років і характеризує льодовиковий період. Практично уся часова динаміка аналізованого процесу зосереджена в масштабі до 15 900 років, яка у свою чергу також ділиться на декілька рівнів (рис. 3.3, а).

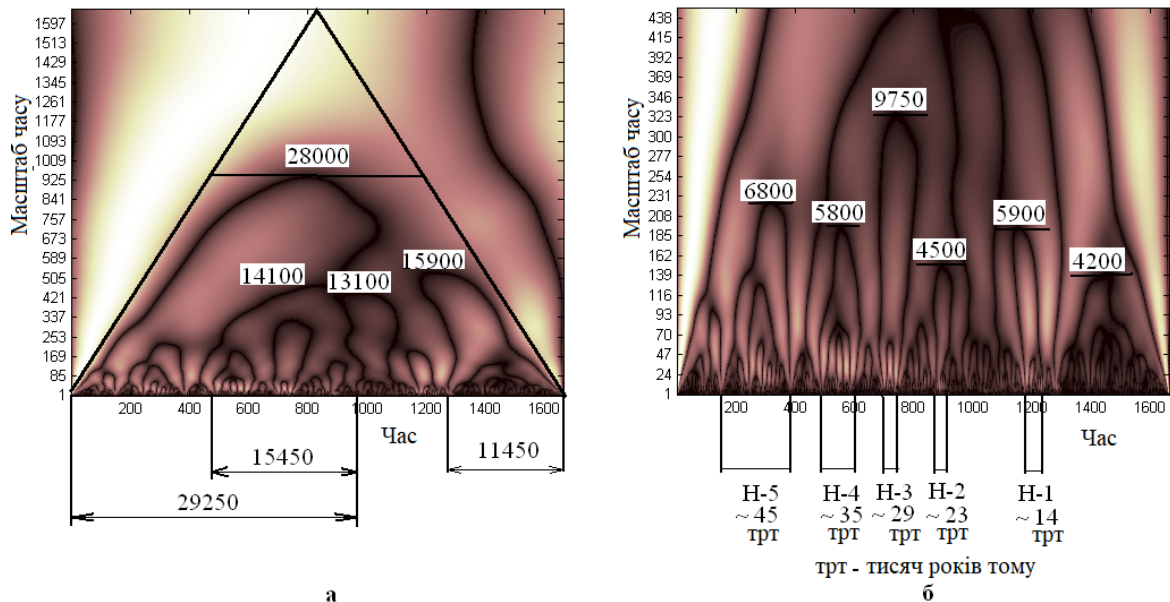


Рисунок 3.3 – Скелетон вейвлетного спектру отриманий при аналізі усього ряду температур (1661 значення) з глибиною розкладання 1661 (а) і з глибиною розкладання 450 (б)

У середньому рівні можна виділити великомасштабні періодичності: перша подія (14 100) тривалістю (15 450) років датується періодом 36 030...20 580 років, друге (13 100) тривалістю 2 550 років датується періодом 20 580...18 030 років. Ці події починаються в середині останнього льодовикового періоду і характеризують пікове Вислинське зледеніння. Подія масштабом 15 900 років датується періодом 11 430...наш час і починається Алередським потеплінням, включає пізній Дріас і сучасний Голоцен. Для детального аналізу більше короткоперіодичних процесів розкладемо той же ряд на меншу глибину (рис. 3.3, б).

Відомо, що події Хайнриха – середньочастотні (циклічність 5 000...10 000 років) зміни у складі донних відкладень протягом останніх 70...60 тисяч

років з ритмічним чергуванням шарів з валунами (породженими швидким утворенням айсбергів в Північній Атлантиці) і горизонтів, складених відносно тонкими обломками. Події Хайнриха мають порядкові номери, що зростають з давністю (углиб сторіч). Середній рівень цієї багатошарової структури характеризуються подіями: перше (масштаб: 6 800) тривалістю 7 200 років датується періодом 45 630...38 430 років і є Н-5. По датуванню [15] першу подію можна інтерпретувати як Н-5 (5-а подія Хайнриха) близько 45 тис. років назад. Друге (5 800) тривалістю 3 300 років датується періодом 35 130...31 830 років і є Н-4, співпадає з датуванням [14, 16]. Третя подія (9 750) тривалістю 1 800 років датується періодом 29 130...27 330 років, є Н-3 і співпадає з датуванням [14, 17]. Четверта подія (4 500) тривалістю 900 років датується періодом 23 730...22 830 років, є Н-2 і співпадає з датуванням [15, 17]. Слід зауважити, що ці події спостерігаються в льодовиковому періоді. Як бачимо для цих подій характерне зменшення тривалості. Далі можна відмітити ще дві події близьких по масштабу, таких, що мають відношення до післяльодовикового періоду: п'ята подія (5 900) тривалістю 1780 років датується періодом 14 580...12 800 років, є Н-1 і співпадає з датуванням [14, 16]. Шоста подія (4 200) тривалістю 7 200 років датується періодом 11130...3 930 років, захоплює період Алередського потепління, пізній Дріас і Атлантичний період – найтепліший і вологіший період Голоцену. Отримане нами датування подій Хайнриха помістимо в таблицю 3.1. Ця таблиця підтверджує, що події Хайнриха є середньочастотними (циклічність 5000...10 000 років), тільки Н-0 (виділено жирним шрифтом) випадає з цього правила – між Н-0 і Н-1 всього 3450 років.

Можливо, що в цей період спостерігалася подія, що привела до кліматичних змін, які Hemming [15] інтерпретував як Н-0. Для виявлення причини виникнення події Н-0, проведемо додаткові дослідження часового періоду, в якому спостерігалася ця подія. Для цього розглянемо скелетон, отриманий при аналізі частини ряду температур, що представляє об'єднання перехідного періоду і нашого часу (708 значень), з глибиною розкладання

600 (рис. 3.4).

Таблиця 3.1 – Масштаб (роки) і час (тис. років тому) початку подій Хайнриха

№ події	Початок події	Закінчення події	Масштаб події	Між подіями		Датування подій Хайнриха
				початком	кінцем	
1	45 630	38 430	6 800	10 500	6 600	H-5*
2	35 130	31 830	5 800	6 000	4 500	H-4(**,****)
3	29 130	27 330	9 750	5 400	4 500	H-3(***,****)
4	23 730	22 830	4 500	9 150	10 030	H-2(*,***)
5	14 580	12 800	5 900	3 450	1 700	H-1(**,****)
6	11 130	3 930	4 200			H-0

Примітка:

* – датування події Хайнриха за даними Hemming (2004) [15];

** – датування події Хайнриха за Vidal et al. [16];

*** – датування події Хайнриха за Bond [17].

**** – датування події Хайнриха за А.К. Васильчук [15].

Визначимо тривалість перехідного періоду в 21 270 років. Основна подія цього ряду має масштаб 16 230 років, максимум якого фіксується близько 8 350 років тому. Подію верхнього шару можна інтерпретувати як процес стійкого зростання температури повітря в Північній півкулі, яке добре представлено на рис. 3.4, а. Цей процес тривав аж до 6935 років назад, що добре відповідає Атлантичному періоду (5000...8000 років тому) найтеплішому і вологішому періоду Голоцену. Палеогеографічним еталоном періодизації Голоцену служить модифікований варіант широко відомої шкали (схеми) Блітта-Сернандера. Вона побудована на результатах досліджень торфовищ Данії, які провів норвежець Аксель Блітт (у 1876 р.) і швед Рутгер Сернандер (у 1910 р.), і є послідовність основних кліматичних подій (на думку авторів схеми, періодів), що мали місце в Північній Європі з кінця пізнього неоплейстоцена і до теперішнього часу. Періодизація Голоцену для Північної Євразії була уточнена Н.А. Хотинским [25].

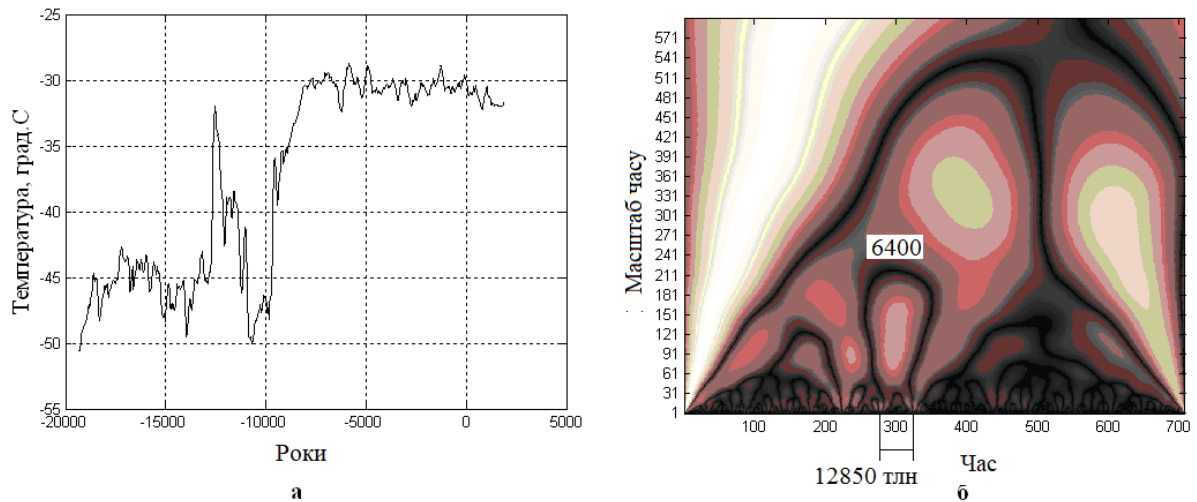


Рисунок 3.4 – Скелетон вейвлетного спектру з глибиною розкладання 600 (б) отриманий при аналізі частини ряду температур (а) – об'єднаних перехідного періоду і нашого часу (всього 708 значень)

Другий рівень скелетона вейвлетного спектру представлений трьома подіями.

Перша – масштабом 3 700 років з максимумом 16 150 років тому, подія почалася близько 17 150 років тому і закінчилася 14 600 років тому, характеризується закінченням останнього льодовикового максимуму, пік якого відноситься до часу близько 26...20 тисяч років тому [26-28].

Друга подія є найбільш потужною, з масштабом 6 400 років його максимум спостерігався близько 12 550 років тому, початок події відповідає періоду 12 850 років тому, кінець – 11 450 років тому. Саме цей відрізок часу виділяється стрімким падінням температури (рис. 3.1), кінець пізнього Дріаса датується віком приблизно 11 550 років тому, отриманим за допомогою різних методів [29-32]. У [33] вказується, що Міжнародна група учених, що працює у рамках міждисциплінарного проекту по вивченню палеоклімату Землі, точно датувала і ідентифікувала шар відкладень на дні озера Куицео (центральна частина Мексики), як той, що має однозначне позаземне походження і який міг утворитися після зіткнення метеороїду із земною поверхнею. Дані, отримані авторами статті [33], підтверджують, що раптове тисячолітнє похолодання, що почалося на Землі 12900 років тому, було

спровоковане падінням великого метеорита. Хронологічно шар відкладень, досліджений авторами статті, співпадає з датуванням останньої за часом події Хайнриха Н-0 близько 12900 років тому [15]. Таким чином, у вейвлетному спектрі присутнє підтвердження реакції кліматичної системи Північної півкулі на глобальну катастрофу на рубежі Плейстоцену і Голоцену. Помітимо також, що позитивний пік температури на рис. 3.1 близько 14 500 років тому, видно, є ознакою потепління, що почалося, яке було зупинено падінням великого метеорита.

Третя подія масштабом 4 550 років з максимумом 6 050 років тому почалося близько 11 350 років тому і триває по наш час. Максимум цієї події має різку межу закінчення близько 5 600 років тому і відповідає закінченню найтеплішого і вологішого періоду голоцену Північної Європи – Атлантичного періоду. Клімат в цей час був в цілому тепліший за нинішній. Потрібно помітити, що структура першого і третього подій формується декількома різномасштабними деталями, які слідуєть одна за одною і є періодичною структурою. Особливо яскраво це виражено в третій події, яка має відношення до Голоцену і ця періодична структура представляє цикли Бонда [34]. Підшар третьої події представлений формою з масштабом близько 2 400 років, початок якої фіксується близько 8 100 років тому і співпадає з глобальним похолоданням 6200 років до н.е. – найсуворішим глобальним похолоданням Голоцену. Воно тривало від 200 до 400 років, протягом яких клімат значно змінився, що привело до зникнення ряду ранніх неолітичних культур [35].

4 ФОРМУВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ПОЛЯ ІЗ ЗАДАНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ, ПРОСТОРОВИМИ ТА ЧАСОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ

4.1 Постановка завдання

Головним ресурсом оглядового метеорологічного радіолокатора є енергія зондувального випромінювання. Головний він тому, що уся доступна радіолокаційна інформація знаходиться в прийнятою антеною відбитої від атмосфери частини енергії зондувального випромінювання. Уся подальша обробка в ідеальному випадку може зберегти кількість отриманої радіолокаційної інформації, а в не ідеальному – зменшити її кількість.

Проте отримання інформації необхідно забезпечити не в усій зоні спостереження метеорологічного радіолокатора, а в зоні, званій простором спостереження, яке повинне покриватися радіолокаційним полем системи гідрометеорологічного моніторингу [36].

Тому метою дослідження є з'ясування питання про найбільш раціональний розподіл енергії зондувального випромінювання за допомогою передавальних антен метеорологічних радіолокаторів в просторі спостереження, тобто про найбільш раціональну побудову радіолокаційного поля.

Досягається вказана мета за рахунок кількісної оцінки параметрів геометричних моделей побудови радіолокаційного поля і логічного аналізу отриманих результатів. Поняття "найбільшої раціональності" розподілу енергії зондувального випромінювання примикає до поняття оптимізації, але при проведенні оптимізації якої-небудь системи вимагається вибрати критерій оптимізації або декілька їх (для даного випадку), оцінити їх кількісно і зробити певні висновки. Оцінка найбільшої раціональності надає

більшу свободу в підходах, методах з'ясування питання про розподіл енергії зондувального випромінювання.

Об'єктом дослідження є система гідрометеорологічного радіолокаційного моніторингу, а предметом дослідження є енергетика радіолокаційного поля, утворюваного системою гідрометеорологічного радіолокаційного моніторингу.

Постановка і рішення цієї задачі є актуальними, оскільки радіолокаційна система гідрометеорологічного моніторингу має бути побудована раціонально, що забезпечить її тривалу успішну і економну експлуатацію.

4.2 Розв'язання завдання

Простір спостереження є тією частиною повітряного простору, в якій існують атмосферні об'єкти, явища і процеси, що підлягають радіолокаційному моніторингу [37]. Геометрично простір спостереження можна представити у вигляді циліндричного об'єму, твірنا якого проходить по межах обслуговуваної території, а згори і знизу цей об'єм обмежений плоскими підставами, побудованими на мінімальній і максимальній потрібній висоті (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Простір спостереження

Мінімальна потрібна висота для радіолокаційного поля системи гідрометеорологічного моніторингу повинна складати близько 0,5 км, а максимальна – до 20...25 кілометрів [38]. Рациональний розподіл енергії зондувального випромінювання припускає повне і найбільш точне покриття ним простори спостереження. Здійснюється це покриття за допомогою розподілу зондувального випромінювання в просторі спостереження і прийомі з нього сигналів, відбитих від метеорологічних об'єктів і явищ. Зондувальне випромінювання в просторі розподіляється за допомогою антенної системи (рис. 4.2). На вказаному рисунку дальність дії радіолокатора позначена як R .

При розгляді питання раціонального розподілу енергії зондувального випромінювання в межах усього простору спостереження важливо уявляти собі розподіл енергії в зоні спостереження одиничного радіолокатора. Виходитимемо з того припущення, що область півсфери зони спостереження, яка відображена на рис. 4.2, протягом часу огляду послідовно заповнюється енергією зондувального випромінювання з щільністю потоку потужності, що дозволяє отримати відбитий сигнал із заданим відношенням сигнал/шум при певних видах гідрометеорологічних об'єктів.

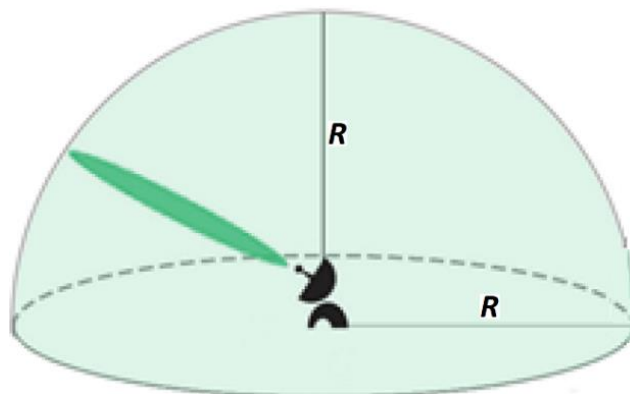


Рисунок 4.2 – Зона огляду (зона спостереження одиничного радіолокатора)

При такому припущенні поняття об'єму півсфери або її частини можна ототожнювати з енергією, розподіленою в цьому об'ємі півсфери або в її частині, що знаходяться в зоні спостереження одиничного радіолокатора. З [39] відомі формули об'єму сфери

$$V_{\text{сф}} = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (4.1)$$

і об'єму сферичного сегменту (див. рис. 4.3)

$$V_{\text{сфсг}} = \pi h_{\text{сг}}^2 \left(R - \frac{1}{3} h_{\text{сг}} \right), \quad (4.2)$$

де $h_{\text{сг}}$ – висота сегменту.

З'ясуємо, як залежатиме повнота використання енергії зондувального випромінювання від співвідношення дальності дії радіолокатора і висоти верхньої межі радіолокаційного поля. Міру повноти використання енергії позначимо як коефіцієнт використання енергії $K_{\text{иэ}}$.

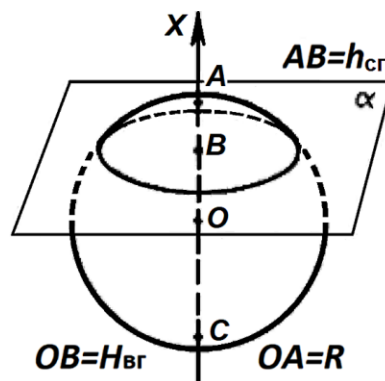


Рисунок 4.3 – Виділення сферичного сегменту

Встановимо на підставі запропонованого вище ототожнення

$$K_{\text{иэ}} = V_{\text{пн1}} / V_{\text{зн1}}, \quad (4.3)$$

де $V_{\text{пн1}}$ – об'єм простору спостереження, що покривається одним радіолокатором, $V_{\text{зн1}}$ – об'єм зони спостереження одного радіолокатора.

Об'єм простору спостереження, що покривається одним радіолокатором $V_{\text{пн1}} = \frac{1}{2} V_{\text{сф}} - V_{\text{сфсг}}$, а об'єм зони спостереження одного радіолокатора $V_{\text{зн1}} = \frac{1}{2} V_{\text{сф}}$.

Підставивши праві частини цієї рівності в (4.3), отримаємо

$$K_{\text{из}} = 1 - 2V_{\text{сфсг}}/V_{\text{сф}}. \quad (4.4)$$

Підставимо в останній вираз значення $V_{\text{сф}}$ і $V_{\text{сфсг}}$ із (4.1) і (4.2), причому в (4.2) при цьому зробимо заміну $h_{\text{сг}}$ на $R - H_{\text{вг}}$ (див. рис. 4.3). В результаті отримаємо

$$K_{\text{из}} = \frac{3 H_{\text{вг}}}{2 R} - \frac{1 H_{\text{вг}}^3}{2 R^3}. \quad (4.5)$$

Використання (4.5) для побудови окремих залежностей $K_{\text{из}}$ від R і $H_{\text{вг}}$ породить ціле сімейство графіків, що утруднить процес аналізу. Доцільніше побудувати один графік $K_{\text{из}}$ залежно від відношення $H_{\text{вг}}/R$, оскільки R і $H_{\text{вг}}$ не пов'язані і можуть задаватися довільно. Позначимо відношення висоти верхньої межі зони спостереження $H_{\text{вг}}$ до дальності дії R радіолокатора, тобто $H_{\text{вг}}/R$, як X . Тоді вираз (4.5) остаточно перетвориться в

$$K_{\text{из}} = \frac{3}{2} X - \frac{1}{2} X^3. \quad (4.6)$$

На рис. 4.4 представлено графічне відображення виразу (4.6).

Для прикладу, при висоті верхньої межі зони спостереження $H_{\text{вг}}=25$ і дальності дії радіолокатора $R=100$ км відношення їх складе величину $X=0,25$ при якому $K_{\text{из}} \approx 0,36$. Це говорить про те, що тільки 36% енергії зондувального

випромінювання при такому співвідношенні $H_{\text{вг}}$ і R використовуватиметься ефективно, інші 64% будуть витрачені даремно, фактично на нагрів стратосфери. Аналіз цього графіку також показує, що при фіксованій потрібній висоті верхньої межі $H_{\text{вг}}=25$ км збільшення дальності дії радіолокатора R приводить до погіршення повноти використання енергії зондувального випромінювання і $K_{\text{из}}$ зменшуватиметься.

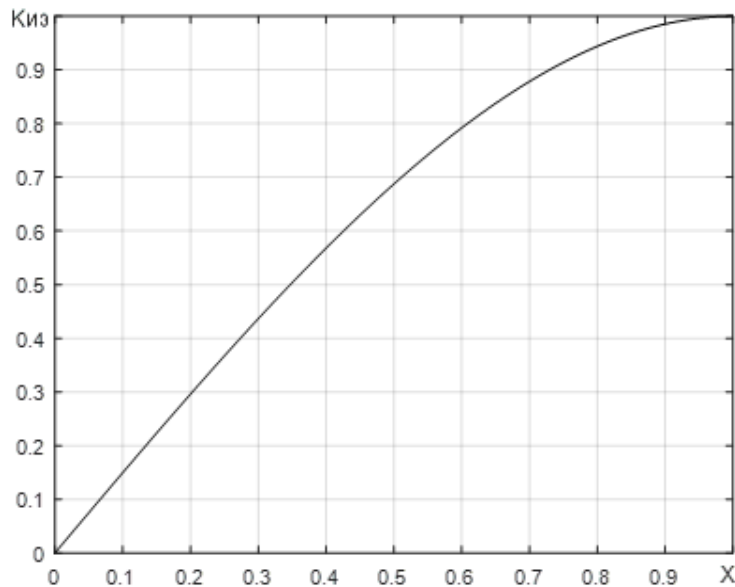


Рисунок 4.4 – Коефіцієнт використання енергії

Тому перед розробником системи моніторингу виникає протиріччя між потрібною дальністю дії радіолокатора і енергетичною ефективністю радіолокаційної системи гідрометеорологічного моніторингу, яке вимагає вирішення в процесі проектування системи моніторингу.

Вирішимо завдання розподілу енергії зондувального випромінювання в просторі спостереження усією системою гідрометеорологічного моніторингу.

Перший, і найбільш очевидний, спосіб рішення цієї задачі полягає в розставлянні радіолокаторів так, щоб їх зони спостереження перетиналися на потрібній висоті верхньої межі поля $H_{\text{вг}}$ (див. рис. 4.5).

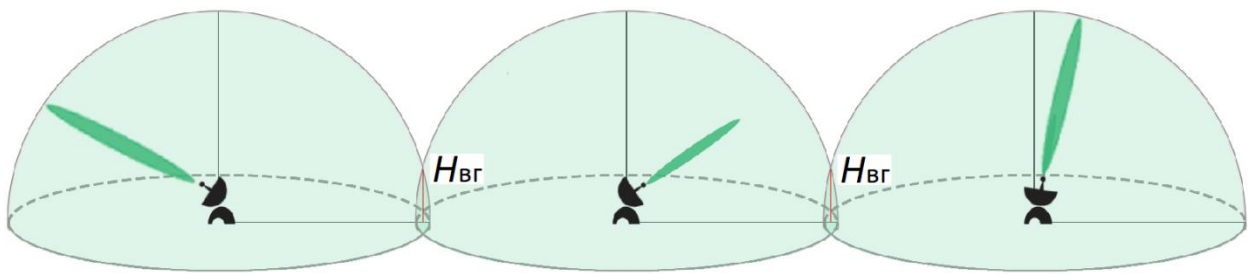


Рисунок 4.5 – Варіант розставлення радіолокаторів

При подібному розставленні радіолокаторів на місцевості із застосуванням геометричного підходу, а саме, у вершинах рівносторонніх трикутників [37], розподіл енергії зондувального випромінювання в просторі спостереження системи гідрометеорологічного моніторингу, тобто конфігурація радіолокаційного поля, набере вигляду, показано на рис. 4.6.

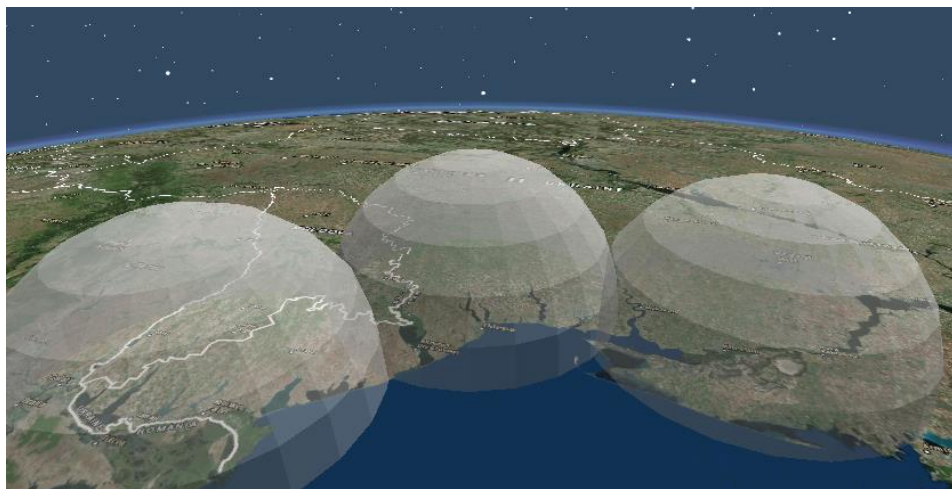


Рисунок 4.6 – Перший варіант конфігурації отриманого радіолокаційного поля

Така побудова забезпечить безпровальність радіолокаційного поля, тобто розподіл енергії зондувального випромінювання станеться по усьому простору спостереження. При цьому кожен з радіолокаторів здійснюватиме повний цикл сканування простору спостереження в діапазоні кутів місця ε

від 0 до 90 градусів. При існуючих радіолокаторах тривалість повного циклу безпровального сканування може тривати десятки хвилин, що може привести до пропуску небезпечних явищ погоди, які швидко розвиваються, з усіма тяжкими наслідками, які з цього пропуску витікають. І, крім того, при вказаному розподілі енергії зондувального випромінювання використовуватиметься ефективно тільки невелика частина усієї енергії зондувального випромінювання, а саме, тільки та, яка буде розподілена в просторі спостереження.

У приведеному вище способі розподілу енергії зондувального випромінювання з метою економії енергії можна обмежити підйом діаграми направленості антенних систем радіолокаторів до певного кута місця. Проте, в цьому випадку, значний район над радіолокаторами і в прилеглому до них просторі просто не буде обслугований.

Проте, з можливості обмеження підйому діаграми направленості антенних систем радіолокаторів до певного кута місця виникає другий спосіб розподілу енергії зондувального випромінювання в просторі спостереження усієї системи гідрометеорологічного моніторингу, що дозволяє економніше витратити енергію, концентруючи її в просторі спостереження. Радіолокатори в цьому випадку повинні розташовуватися у вершинах шестикутників [37], із забезпеченням половинного перекриття зон спостереження сусідніх радіолокаторів, як показано на рис. 4.7.

Подібна побудова системи дозволяє не робити повний цикл сканування антени від 0 до 90 градусів по куту місця ε для розподілу енергії (рис. 4.8). Це обумовлено тим, що сусідні радіолокатори "переглядатимуть" простір один над одним. При горизонтальному ($\varepsilon=0^\circ$) положенні діаграм направленості відстань між радіолокаторами має бути такою, щоб висота діаграми направленості антени одного радіолокатора над сусіднім радіолокатором дорівнювала потрібній висоті нижньої межі $H_{нт}$ радіолокаційного поля і простору спостереження (рис. 4.9). Це значення легко обчислюється за допомогою відомого виразу радіогоризонту з [40]:

$$D = 4,11(\sqrt{H_c} + \sqrt{h_a}), \quad (4.7)$$

де D – горизонтальна дальність, км; H_c – поправка висоти на кривизну Землі, м; h_a – висота електричного центру антени, м.

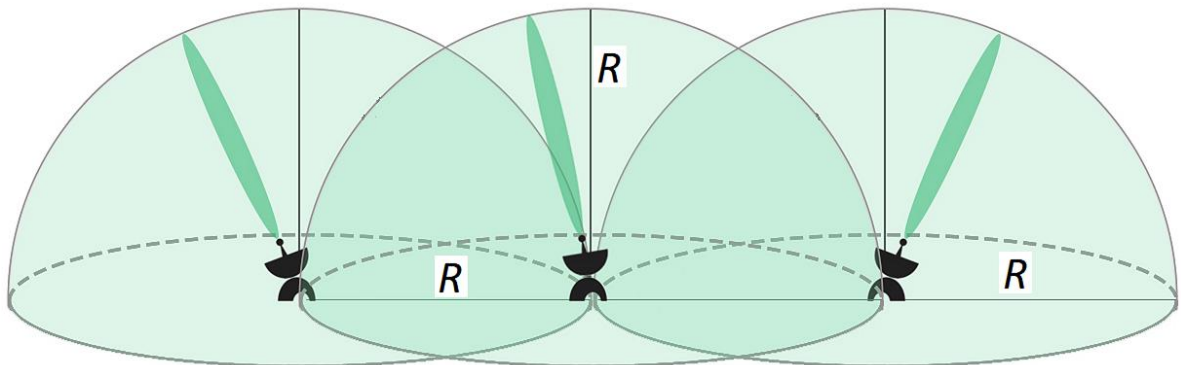


Рисунок 4.7 – Другий варіант побудови радіолокаційного поля з половинним перекриттям зон спостереження сусідніх радіолокаторів

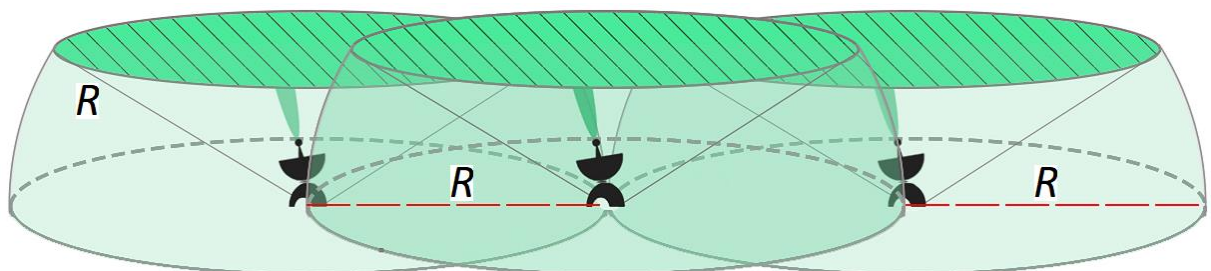


Рисунок 4.8 – Сусідні радіолокатори "переглядають" простір один над одним

Із (4.7) отримаємо, що при нормальній рефракції атмосфери, при висоті електричного центру антени рівної 5 метрам і при потрібній висоті нижньої межі $H_{нр}=H_c=500$ метрів це відстань CD (рис. 4.9) складе 101,23 км, тобто відстань між радіолокаторами при другому способі розподілу енергії зондувального випромінювання в просторі спостереження не повинна

перевищувати 100 км. За рахунок цього буде забезпечена потрібна висота нижньої межі радіолокаційного поля 500 метрів і менш в усьому просторі спостереження. Подальший підйом діаграми направленості по куту місця ε необхідно проводити до того моменту, коли точка перетину діаграм направленості сусідніх радіолокаторів досягне потрібної висоти верхньої межі $H_{\text{вг}}$ простору спостереження (точка O на рис. 4.9). За рахунок цього буде забезпечена потрібна висота верхньої межі радіолокаційного поля 25 км і більше в усьому просторі спостереження. При цьому значення максимального кута підйому діаграм направленості рівне $\varepsilon_{\text{макс}}=26,6^\circ$, яке легко виходить з рішення трикутника $O'OD$, вказаного на рис. 4.9.

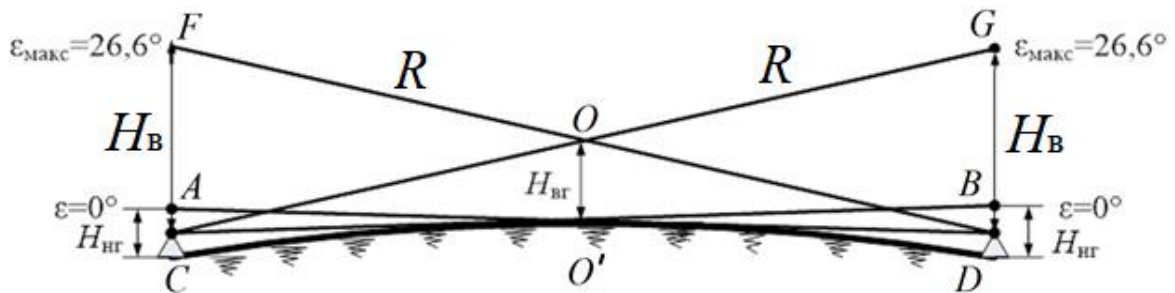


Рисунок 4.9 – Геометрія огляду в радіолокаційному полі з половинним перекриттям зон спостереження сусідніх радіолокаторів

При другому способі розподілу енергії зондувального випромінювання методику оцінки повноти використання енергії застосуємо ту ж, що і для першого способу, але з урахуванням того, що радіолокатор не проводить повного сканування в вертикальній площині. В цьому випадку в рівнянні (4.3) інакше розраховуватимуться $V_{\text{пн1}}$ – об'єм простору спостереження, що покривається одним радіолокатором і $V_{\text{зн1}}$, - об'єм зони спостереження одного радіолокатора.

З об'єму простору спостереження, що покривається одним радіолокатором, додатково треба відняти об'єм конуса, що утворюється, в якому не розподіляється енергія зондувального випромінювання цього

радіолокатора (т.з. "мертва воронка" на рис. 4.10, а), а перекривається вона за рахунок енергії сусіднього радіолокатора. А з об'єму зони спостереження одного радіолокатора треба відняти об'єм сферичного сектора першого роду, в якому не розподіляється енергія зондувального випромінювання цього радіолокатора (затемнена частина на рис. 4.10, б).

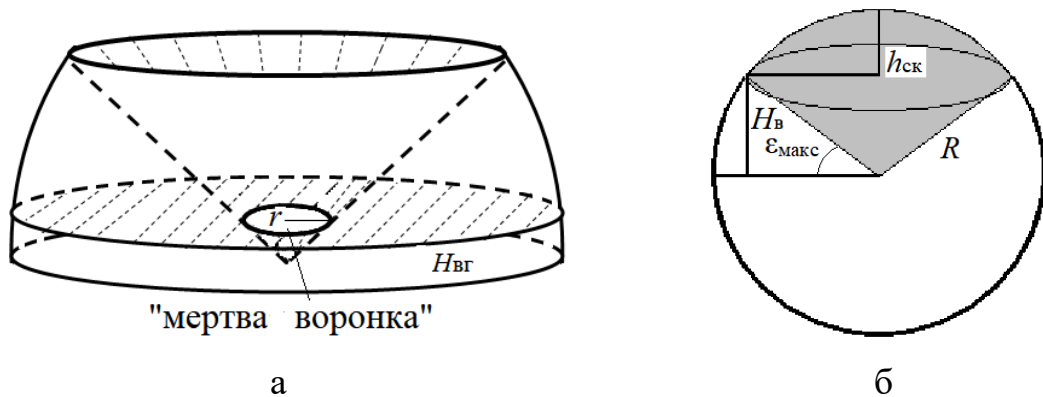


Рисунок 4.10 – Варіант розподілу енергії зондувального випромінювання

З урахуванням відмічених особливостей отримаємо: $V_{\text{пн1}} = \frac{1}{2} V_{\text{сф}} - V_{\text{сфсг}} - V_{\text{мв}}$ і $V_{\text{зн1}} = \frac{1}{2} V_{\text{сф}} - V_{\text{сфск}}$. Підставивши праві частини цієї рівності в (4.3), отримаємо

$$K_{\text{из}} = (\frac{1}{2} V_{\text{сф}} - V_{\text{сфсг}} - V_{\text{мв}}) / (\frac{1}{2} V_{\text{сф}} - V_{\text{сфск}}), \quad (4.8)$$

Для $V_{\text{сф}}$ і $V_{\text{сфсг}}$ вирази відомі, а для $V_{\text{сфск}}$ і $V_{\text{мв}}$ з [39] використовуємо відповідно вираз для розрахунку об'ємів сферичного сектора першого роду і конуса (рис. 4.9 і 4.10):

$$V_{\text{сфск}} = \frac{2}{3} \pi R^2 h_{\text{ск}}, \quad (4.9)$$

$$V_{\text{мв}} = \frac{1}{3} \pi r^2 H_{\text{вг}}, \quad (4.10)$$

де r – радіус основи мертвої воронки (конуса) на висоті $H_{\text{вг}}$.

Підставимо в (4.8) значення $V_{\text{сф}}$ і $V_{\text{сфсг}}$ із (4.1) і (4.2), $V_{\text{сфск}}$ і $V_{\text{мв}}$ із (4.9) і (4.10), причому при підстановці зробимо заміну змінних $h_{\text{сг}}$ на $R-H_{\text{вг}}$, $h_{\text{ск}}$ на $R-H_{\text{в}}$ і візьмемо до уваги, що $H_{\text{в}} = 2H_{\text{вг}}$, (див. рис. 4.9, 4.10). В результаті отримаємо

$$K_{\text{из}} = 0,6875. \quad (4.11)$$

Подібний результат говорить про те, що коефіцієнт використання енергії зондувального випромінювання одним радіолокатором при другому способі розподілу енергії не залежить ні від дальності дії радіолокатора, ні від висоти верхньої межі простору спостереження, тобто від висоти верхньої межі радіолокаційного поля. Він постійний, і рівний приблизно 0,7. Пояснюється це тим, що при заданій дальності дії радіолокатора збільшення $H_{\text{вг}}$ призводить до необхідності збільшення кута $\varepsilon_{\text{макс}}$, що веде до випромінювання більшої кількості енергії зондування поза простором спостереження, тому коефіцієнт використання енергії повинен зменшуватися. Але при цьому діє і зворотна тенденція, а саме, при підйомі діаграми направленості антени все більша частина енергії випромінювання покриває "мертву воронку", що призводить до прямо пропорційного збільшення коефіцієнта використання енергії, що компенсує його убування. Проведені вище міркування і розрахунки відносяться як до поодинокого радіолокатора, так і до групи радіолокаторів, які розподіляють енергію зондувального випромінювання усередині простору спостереження, утворюючи радіолокаційне поле.

5 ІНТЕГРАЦІЯ ДО ГРАФІЧНИХ БАЗ ДАНИХ СИСТЕМИ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ ІЗ ЗАДАНИМИ ТЕХНІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Для зберігання, обробки та вибірки метеорологічних даних бажано зберігати їх у базі даних (БД). Можна використовувати кілька баз даних: в одній зберігати вихідні необроблені дані, що надходять із радарів; в іншій зберігати оброблені, деяким чином апроксимовані дані, придатні для візуального перегляду та подальшого використання, наприклад, при складанні довгострокових прогнозів погоди. Також БД, що містить оброблені дані, може приєднуватися до прикладних програм, наприклад, для графічної візуалізації процесу утворення дощових та градових хмар.

Первинну БД з вихідними метеорологічними даними бажано зберігати в «хмарі» для організації максимально широкого доступу до неї. БД оброблених даних можна зберігати на сервері баз даних організації, у якій використовуються програми обробки та візуалізації метеорологічних даних.

Метеорологічні дані, що отримуються з радарів, можна зберігати у файлах або в базах даних. При зберіганні даних у файлах прямого доступу обробка даних у програмах виконується швидше, проте значно складніше переглядати ці дані, а також витягувати лише потрібні дані. Крім того, під час використання файлів даних неможлива паралельна робота з ними. Якщо потрібно використовувати одні й самі файли даних під час роботи кількох додатків, ці програми мають працювати послідовно.

Система управління базами даних (СУБД) дозволяє організувати перегляд та вибірку даних, організує паралельну роботу з одними й тими самими даними декільком користувачам чи застосункам. Отримання даних прикладною програмою з бази даних відбувається повільніше, ніж із файлів прямого доступу, проте ця затримка несуттєва, якщо воно виконується одноразово на початку роботи програми, а потім дані зберігаються в

оперативній пам'яті комп'ютера.

При необхідності обробки великого масиву метеорологічних даних може виникнути необхідність неодноразового завантаження даних з файлів або бази даних в оперативну пам'ять. Якщо прикладна програма дозволяє послідовно одноразово обробляти порціями метеорологічні дані, які можуть бути записані в оперативній пам'яті, то швидкодія програми зменшиться несуттєво. У разі, коли одні й ті самі дані можуть знадобитися в програмі багаторазово, бажано використовувати файли прямого доступу для читання даних.

У будь-якому разі бажано створити базу даних та імпортувати до неї масиви метеорологічних даних, отриманих з радарних станцій. Це дозволить організувати зручний перегляд необхідних даних, видалення з таблиць неактуальних даних, підготувати запити, які діставатимуть потрібні дані з БД оптимальним способом.

5.1 Модель метеорологічних даних

Роботу радарної установки простіше описувати у сферичних координатах. Промінь радара починає працювати в площині поверхні Землі, і азимутальний кут повороту променя радара φ описує повне коло (рис. 5.1). Потім він піднімається на заданий кут θ_1 (зенітний кут θ обчислюється від осі OZ, $\theta + \theta_1 = 90^\circ$) – і знову описує повне коло, вирізуючи тілесний кут Ω_0 (рис. 5.2).

Метеорологічні дані знімаються вздовж променя радара через заданий інтервал Δr . Зенітний кут змінюється дискретно на величину $\Delta\theta$. При цьому Δr , $\Delta\theta$ — задані константні значення.

Азимутальний кут також дискретно змінюється на величину $\Delta\varphi$, проте $\Delta\varphi$ є постійною величиною тільки для кожного заданого кута θ_1 , тобто $\Delta\varphi = f(\theta_1)$ або $\Delta\varphi_\theta$.

Пакет даних від одного радара в заданий момент часу включає всі виміри під час руху променю радара від горизонтальної площини до zenіту.

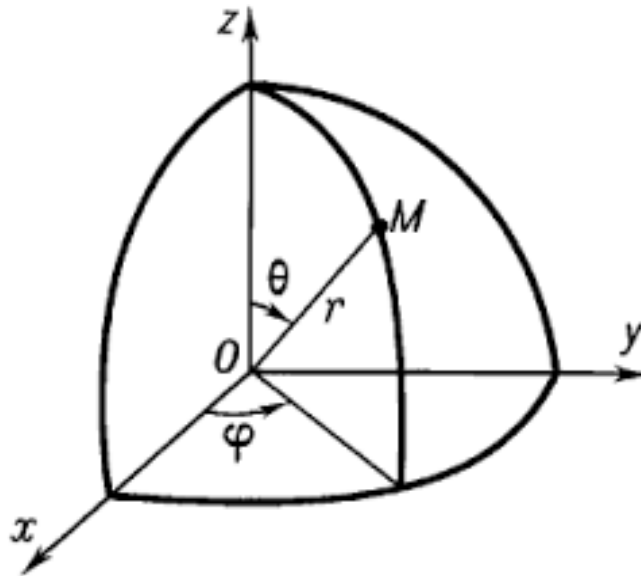


Рисунок 5.1 – Сферична система координат

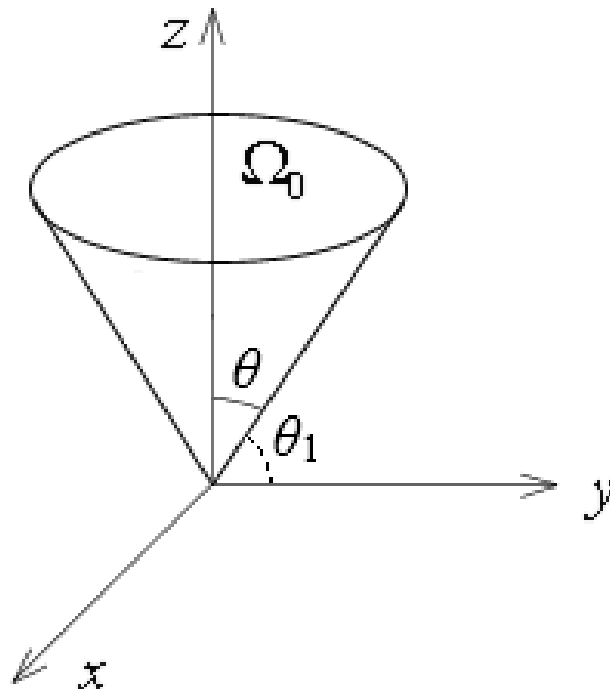


Рисунок 5.2 – Рух променю радара по конусу

Метеорологічні дані знімаються у заданому півсферію об'ємі. Для отримання приблизно однакової густини даних у декартових координатах необхідно збільшувати $\Delta\varphi$ при зростанні кута θ_1 . При прямуванні променю радара у площині земної поверхні $\Delta\varphi = 1^\circ$, тобто буде 360 вимірів для $\theta_1 = 0$. При $\theta_1 = 90^\circ$ буде лише одне значення азимутального кута $\varphi = 0$.

Таким чином, використовувати структуру у вигляді тривимірного масиву для опису метеорологічних даних некоректно. Значення координат r і θ_1 можна представити у вигляді індексів двовимірного масиву, але для кожного значення кута θ_1 буде своя кількість точок вимірювання по куту φ .

Тому структуру метеорологічних даних краще описувати у вигляді масиву масивів.

5.2 Вибір моделі даних та системи управління базою даних

Реляційна модель та СУБД, що працюють з базами даних, заснованих на цій моделі, безумовно домінували на ринку програмного забезпечення у 80-ті роки ХХ століття. У 90-х роках почали розвиватися СУБД, засновані інших моделях даних. Реляційні СУБД зараз все ще тримають першість для так званих транзакційних систем, наприклад, що використовуються для обслуговування терміналів у банках та супермаркетах.

В даний час поширення набули об'єктно-реляційні СУБД, а також бази даних NoSQL .

З об'єктно-реляційних СУБД в останні роки найбільш популярною є PostgreSQL; з NoSQL — MongoDB .

5.2.1 Доцільність використання баз даних NoSQL

MongoDB представляє найбільш популярну на даний момент документоорієнтовану систему управління базами даних. За різними оцінками входить до десятка найбільш використовуваних баз даних у світі

[41–43].

На даний момент останньою версією платформи була версія 6.0, яка побачила світ у липні 2022 року.

Якщо реляційні бази даних зберігають рядки, MongoDB зберігає документи. На відміну від рядків, документи можуть зберігати складну за структурою інформацію. Документ можна подати як сховище ключів та значень.

Ключ представляє просту мітку, з якою асоційовано певний шматок даних.

Однак за всіх відмінностей є одна особливість, яка зближує MongoDB та реляційні бази даних. У реляційних СКБД зустрічається таке поняття як первинний ключ. Це поняття описує стовпець, який має унікальні значення. MongoDB для кожного документа має унікальний ідентифікатор, який називається `_id`. І якщо явно не вказати його значення, то MongoDB автоматично згенерує для нього значення.

Кожному ключу порівнюється певне значення. Але тут також треба враховувати одну особливість: якщо в реляційних базах є чітко окреслена структура, де є поля, і якщо якийсь поле не має значення, йому (залежно від налаштувань конкретної БД) можна надати значення NULL. У MongoDB все інакше. Якщо якомусь ключу не зіставлено значення, цей ключ легко опускається у документі і використовується.

Якщо традиційному світі SQL є таблиці, то світі MongoDB є колекції. І якщо в реляційних БД таблиці зберігають однотипні жорстко структуровані об'єкти — кортежі відносин, — то в колекції можуть містити різні об'єкти, що мають різну структуру і різний набір властивостей.

Усю модель пристрою бази даних MongoDB можна представити таким чином:

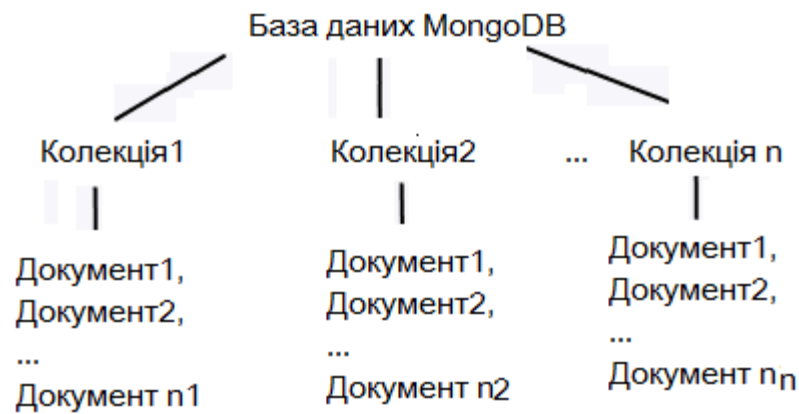


Рисунок 5.3 – Організація бази даних у MongoDB

Якщо в реляційних БД вміст складають таблиці, то у MongoDB база даних складається з колекцій.

Кожна колекція має своє унікальне ім'я – довільний ідентифікатор, що складається з не більше ніж 128 різних алфавітно-цифрових символів та підкреслення.

На відміну від реляційних баз даних MongoDB не використовує табличну організацію з чітко заданою кількістю стовпців та типів даних. MongoDB є документоорієнтованою системою, в якій центральним поняттям є документ.

Документ можна подати як об'єкт, який зберігає певну інформацію. У певному сенсі він подібний до рядків у реляційних СУБД, де рядки зберігають інформацію про окремий елемент.

Базу даних MongoDB зручно використовувати у випадках, коли відповідна колекції MongoDB таблиця реляційної БД буде мати порожні значення, тобто NULL . Прикладом є опис спільноти людей, для кожного з яких крім загальних властивостей, наприклад: прізвище, ім'я, ідентифікаційний код, — можуть мати якісь додаткові характеристики, відсутні в певній частині спільноти.

У випадку бази метеорологічних даних набір характеристик однаковий: сферичні координати точки вимірювання та вимірюване значення сигналу. Тому використання бази даних NoSQL не дає жодних переваг, а вибірка

даних за допомогою мови SQL у реляційних БД має ширші можливості, ніж аналог вибірки даних MongoDB .

5.2.2 Доцільність використання об'єктно-реляційної системи управління базою даних

СУБД PostgreSQL можна використовувати як реляційну СУБД, поряд з іншими популярними реляційними СУБД, такими, як MySQL або SQL Server. Перевага однієї з цих СУБД для вирішення задачі інтеграції метеорологічних даних може бути оцінена лише при повноцінному заповненні бази даних великими масивами даних, отриманих з репрезентативної сукупності радарних установок за необхідний інтервал часу, та обробки вибірок цих даних у клієнтських додатках.

Певною перевагою PostgreSQL є те, що вона підтримує не лише реляційну модель даних [44, 45]. Хоча дані в PostgreSQL також організовані як таблиць, але у цих таблицях можуть зберігатися такі типи даних, як масиви. Таким чином, виходить багатовимірна модель даних. Але це перевага проявляється, коли факти – у разі збережені значення вимірюваного сигналу радара – можна організувати як багатомірний куб даних, у якого виміри (де визначено даний факт) є індексами багатомірного масиву. В цьому випадку всі метеорологічні дані від одного радара за один вимір можна записати в одному рядку таблиці, разом із ідентифікатором радара та міткою часу, у вигляді тривимірного масиву, де індексами будуть сферичні координати. Це логічно, якщо координати ідуть через рівні проміжки — наприклад, один градус чи один метр. У випадку інших постійних проміжків можна зберігати масштабні коефіцієнти, на які їх перемножувати.

Але у разі метеорологічних даних не можна описати куб даних, оскільки вимірювання по азимутальному куті буде мати різне число на різних значеннях зенітного кута. Застосовувати розряджений куб даних з наявністю в ньому значень NULL неефективно.

5.2.3 Вибір реляційної моделі

MySQL версії 3.22 має межу за розміром таблиць 4 Гб. У MySQL версії 3.23, де використовують новий тип таблиць, максимальний розмір таблиці доведено до 8 мільйонів терабайтів.

У SQL Server максимальний розмір бази даних 524272 ТБ. Таблиці за розміром не обмежуються, але обмеження існують для рядка таблиці: не оптимізовані для пам'яті таблиці повинні мати кортежі розміром більше 8060 байт. Кількість кортежів у таблиці не обмежується.

Для підвищення швидкості обробки запитів на вибірку даних необхідно мінімізувати кількість операцій JOIN у запиті, а також кількість та складність предикатів у опції WHERE команди SELECT .

Для метеорологічної БД оптимізація таблиць БД можна виконати так:

1. Створити таблицю ідентифікаторів точок вимірювання радарового сигналу для півсфери. Ідентифікатори нумеруються послідовно: Id = 1 для $\theta_1 = 0$, $\varphi = 0$, $r = \Delta r$; Id = 2 для $\theta_1 = 0$, $\varphi = 0$, $r = 2\Delta r$; ... Id = 1+ K Γ для $\theta_1 = 0$, $\varphi = 1$, $r = \Delta r$; ... (K Γ – кількість точок вимірювання по радіусу вздовж променю радара).
2. Створити таблицю декартових координат, які відповідають сферичним координатам. Обидві таблиці мають однакову кількість кортежів, і той самий первинний ключ Id .
3. Створити таблицю географічного розташування радарів, де кожен радар матиме унікальний ідентифікатор IdRad .
4. Описати таблицю Методаних MeteoData (IdRad, Idt, Id, Mdat), де Idt – позначка часу вимірювання пакета методаних; вся напівсфера методаних за один оберт променя радара до зенітного положення записується з однією позначкою Idt ; Mdat – власне факти, що зберігаються, тобто значення сигналу радара.

Змінна величина $\Delta\varphi_\theta$ (у градусах) обчислюється за такою формулою:

$$\Delta\varphi_{\theta} = 1 / \cos(\theta_1 \cdot \pi / 180)$$

(θ_1 також задається у градусах).

При $\theta_1 = 90$ існує тільки одне значення азимутального кута $\varphi = 0$ і вимірювання значення метеорологічних даних йдуть уздовж вертикального променя радара.

5.3 Реалізація метеорологічної бази даних

Для фізичної реалізації БД метеорологічної БД було обрано СУБД Microsoft SQL Server 2019 (безкоштовний випуск).

Код створення БД:

```
CREATE DATABASE [Meteo]
```

```
GO
```

```
USE [Meteo]
```

```
GO
```

```
CREATE TABLE [dbo].[LenArray](
```

```
    [tet] [tinyint] NOT NULL,
```

```
    [Kfi] [smallint] NOT NULL
```

```
) ON [PRIMARY]
```

```
GO
```

```
CREATE TABLE [dbo].[spherCoor](
```

```
    [IdCoord] [int] NOT NULL,
```

```
    [r] [smallint] NOT NULL,
```

```
    [tet] [smallint] NOT NULL,
```

```
    [fi] [smallint] NOT NULL,
```

PRIMARY KEY CLUSTERED

```
(
    [IdCoord] ASC
)
) ON [PRIMARY]
GO
```

CREATE TABLE [dbo].[DataMeteo](

```
    [IdRadar] [int] NOT NULL,
    [IdTime] [int] NOT NULL,
    [IdCoord] [int] NOT NULL,
    [DataM] [tinyint] NOT NULL,
```

CONSTRAINT [FK__datameteo__IdCoord] FOREIGN KEY REFERENCES

[dbo].[spherCoor](

```
(
    [IdRadar]
```

```
)
```

CONSTRAINT [UQ__datameteo__3_Id] UNIQUE NONCLUSTERED

```
(
```

```
    [IdRadar] ASC,    [IdTime] ASC,    [IdCoord] ASC
```

```
)
```

```
) ON [PRIMARY]
```

GO

CREATE TABLE [dbo].[DataRadar](

```
    [IdRadar] [int] NOT NUUL,
```

```
    [NameRadar] varchar(100) not null UNIQUE.
```

PRIMARY KEY CLUSTERED ([IdRadar] ASC)

```
) ON [PRIMARY]
```

GO

Таблиця DataRadar зберігає дані про радарні пристрої. Крім назви (порядкового номеру, тощо) в цій таблиці можуть зберігатись дані про географічне розташування цих радарних пристроїв.

Можливі дані Вміст у таблицях метеорологічної БД наведені на рисунках 5.4 – 5.6.

109 %

SELECT *
FROM [Meteo].[dbo].[LenArray]

Results Messages

	tet	Kfi
1	0	360
2	1	360
3	2	360
4	3	360
5	4	359
6	5	359
7	6	358
8	7	357
9	8	356
10	9	356
11	10	355
12	11	353
13	12	352
14	13	351
15	14	349
16	15	348
17	16	346
18	17	344
19	18	342
20	19	340
21	20	338
22	21	336
23	22	334
24	23	331
25	24	329
26	25	326
27	26	324
28	27	321

109 %

SELECT *
FROM [Meteo].[dbo].[LenArray]

Results Messages

	tet	Kfi
64	63	163
65	64	158
66	65	152
67	66	146
68	67	141
69	68	135
70	69	129
71	70	123
72	71	117
73	72	111
74	73	105
75	74	99
76	75	93
77	76	87
78	77	81
79	78	75
80	79	69
81	80	63
82	81	56
83	82	50
84	83	44
85	84	38
86	85	31
87	86	25
88	87	19
89	88	13
90	89	6
91	90	1

Рисунок 5.4 – Вміст таблиці LenArray

В таблиці LenArray міститься інформація про кількість поворотів променя радара по азимутальному куту у залежності від кута підйому

променю від поверхні Землі. Ці дані необхідні для представлення у прикладних застосунках метеорологічних даних у вигляді масиву масивів змінної довжини.

SELECT *

FROM [Meteo].[dbo].[spherCoor]

	IdCoord	r	tet	fi
1	1	1	0	0
2	2	2	0	0
3	3	3	0	0
4	4	4	0	0
5	5	5	0	0
6	6	6	0	0
7	7	7	0	0
8	8	8	0	0
9	9	9	0	0
10	10	10	0	0
11	11	11	0	0
12	12	12	0	0
13	13	13	0	0
14	14	14	0	0
15	15	15	0	0
16	16	16	0	0
17	17	17	0	0
18	18	18	0	0
19	19	19	0	0
20	20	20	0	0
21	21	21	0	0
22	22	22	0	0
23	23	23	0	0
24	24	24	0	0
25	25	25	0	0
26	26	26	0	0
27	27	27	0	0
28	28	28	0	0
29	29	29	0	0

	IdCoord	r	tet	fi
	5224723	223	90	0
	5224724	224	90	0
	5224725	225	90	0
	5224726	226	90	0
	5224727	227	90	0
	5224728	228	90	0
	5224729	229	90	0
	5224730	230	90	0
	5224731	231	90	0
	5224732	232	90	0
	5224733	233	90	0
	5224734	234	90	0
	5224735	235	90	0
	5224736	236	90	0
	5224737	237	90	0
	5224738	238	90	0
	5224739	239	90	0
	5224740	240	90	0
	5224741	241	90	0
	5224742	242	90	0
	5224743	243	90	0
	5224744	244	90	0
	5224745	245	90	0
	5224746	246	90	0
	5224747	247	90	0
	5224748	248	90	0
	5224749	249	90	0
	5224750	250	90	0

Рисунок 5.5 – Вміст таблиці spherCoor

Таблиця spherCoor містить перелік точок виміру метеорологічних даних у вигляді узагальнених сферичних координат. Тут r – порядковий номер точки вимірювання даних вздовж променю радара. Абсолютне значення радіальної координати буде залежить від кроку зміни радіусу Δr , який також повинен зберігатись у БД; tet – кут підйому променю радара від

поверхні землі ($tet = 0$) до зеніту ($tet = 90$) у градусах; f_i – порядковий номер повороту променя радара по азимутальному куту.

IdCoord – ідентифікатор точки вимірювання метеорологічних даних у напівсфері, що описує промінь радара.

У таблиці DataMeteo зберігаються власне пакети вимірних метеорологічних даних. У кожному пакеті IdCoord приймає значення від нуля до IdMax; пакети відрізняються ідентифікаторами радара IdRadar та відміткою часу IdTime (рис. 5.6).

SELECT *
FROM [Meteo].[dbo].[DataMeteo]
where IdRadar = 1 and IdTime = 1

	IdRadar	IdTime	IdCoord	DataM
1	1	1	1	0
2	1	1	2	0
3	1	1	3	0
4	1	1	4	0
5	1	1	5	0
6	1	1	6	0
7	1	1	7	0
8	1	1	8	0
9	1	1	9	0
10	1	1	10	0
11	1	1	11	0
12	1	1	12	0
13	1	1	13	0
14	1	1	14	0
15	1	1	15	0
16	1	1	16	0
17	1	1	17	0
18	1	1	18	0
19	1	1	19	0
20	1	1	20	0
21	1	1	21	0
22	1	1	22	0
23	1	1	23	0
24	1	1	24	0
25	1	1	25	0
26	1	1	26	0
27	1	1	27	0

IdRadar	IdTime	IdCoord	DataM
1	1	2591851	51
1	1	2591852	51
1	1	2591853	51
1	1	2591854	51
1	1	2591855	51
1	1	2591856	51
1	1	2591857	51
1	1	2591858	51
1	1	2591859	51
1	1	2591860	51
1	1	2591861	51
1	1	2591862	51
1	1	2591863	51
1	1	2591864	51
1	1	2591865	51
1	1	2591866	51
1	1	2591867	51
1	1	2591868	51
1	1	2591869	51
1	1	2591870	51
1	1	2591871	51
1	1	2591872	51
1	1	2591873	51
1	1	2591874	51
1	1	2591875	51
1	1	2591876	51
1	1	2591877	51
1	1	2591878	51

Рисунок 5.6 – Вміст таблиці DataMeteo

5.4 Використання метеорологічної бази даних у прикладних застосунках

Для використання БД у застосунку створюється з'єднання з сервером, на якому розташована БД. Одним з поширених середовищ розробки додатків до баз даних є Microsoft Visual Studio. Це інтегроване програмне середовище дозволяє створювати на різних мовах програмування різноманітні проекти: консольні додатки, веб-додатки, мобільні додатки, проекти Windows Forms.

Для роботи з пакетами метеорологічних даних найбільш вдалим рішенням буде програмування мовою C# з використанням узагальнених колекцій. Колекція складається з об'єктів, кожен з яких є окремим пакетом метеорологічних даних. Об'єкти в колекцію можна додавати, а також вже відпрацьовані пакети можна усувати з колекції (тим самим звільняється місце у оперативній пам'яті).

Для додавання чергового пакету даних потрібно вибрати ці дані з БД за ідентифікатором радару та відміткою часу.

Вихідний код програми роботи з БД метеорологічних даних наведений нижче:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace WindowsFormsApp_Meteo
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        List<RadarItem> dataList;
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            dataList = new List<RadarItem>();
        }
    }
}
```

```

        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            this.radarDateTimeTableAdapter.Fill(this.meteoDataSet1.RadarDateTime);
            // TODO: данная строка кода позволяет загрузить данные в
            // таблицу "meteoDataSet.DataMeteo". При необходимости она может быть
            // перемещена или удалена.

            this.lenArrayTableAdapter.FillBy(this.meteoDataSet.LenArray);

            int i, j;

            j = this.meteoDataSet.LenArray.Rows.Count;
            if (j!=91)
            {
                MessageBox.Show("Ошибка! Заданы не все зенитные
углы!");
                Application.Exit();
            }

            i = 0;
            foreach(DataRow dr in this.meteoDataSet.LenArray.Rows)
            {
                if (Convert.ToInt16(dr[0]) != i)
                {
                    MessageBox.Show("Ошибка! Заданы не все зенитные
углы!");
                    Application.Exit();
                }
                j = Convert.ToInt32(dr[1]);
                Program.lenarray[i] = (short)j;
                Program.d_phi_arr[i] = 360.0 / j;
                i++;
            }

        }

        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            label1.Text = DateTime.Now.ToString("HH:mm:ss.fffffff");
            DateTime t1 = DateTime.Now, t2;
            //int[,] data = new int[91, 251][];
            int idRadar = (int)comboBoxRadar.SelectedValue;
            int idTime = (int)comboBoxTime.SelectedValue;

            this.dataTable1TableAdapter.FillBy(this.meteoDataSet.DataTable1,
            idRadar, idTime);
        }
    }

```

```

        dataList.Add(new RadarItem(idRadar, idTime,
this.meteoDataSet.DataTable1.Rows));
        //byte data_m_max = 0;
        /*for (int i = 0; i < 91; ++i)
        {
            int len = Program.lenarray[i];
            for (int j = 0; j < 251; ++j)
            {
                data[i, j] = new int[len];
            }
        }

        foreach (DataRow dr in this.meteoDataSet.DataTable1.Rows)
        {
            short r = Convert.ToInt16(dr[2]);
            short theta = Convert.ToInt16(dr[3]);
            short spherPhiPart = Convert.ToInt16(dr[4]);
            byte data_m = Convert.ToByte(dr[5]);
            if (data_m > data_m_max) data_m_max = data_m;
            data[theta, r][spherPhiPart] = data_m;
        }*/

        t2 = DateTime.Now;
        label2.Text = t2.ToString("HH:mm:ss.fffffff");
        label3.Text = (t2 - t1).TotalSeconds.ToString("F7") + "
c";

        //label5.Text = data_m_max.ToString();
        MeteoDataSetTableAdapters.QueriesTableAdapter qta = new
MeteoDataSetTableAdapters.QueriesTableAdapter();
        t1 = DateTime.Now;
        //label7.Text = qta.ScalarQueryMaxDataM(1, 1).ToString();
        t2 = DateTime.Now;
        label8.Text = "за " + (t2 -
t1).TotalSeconds.ToString("F7") + " c";
    }
}
class RadarItem
{
    public readonly int idRadar;
    public readonly int idTime;
    int[,] data;
    public RadarItem(int idRadar, int idTime,
System.Data.DataRowCollection rows)
    {
        this.idRadar = idRadar;
        this.idTime = idTime;
        data = new int[91, 251][];
        for (int i = 0; i < 91; ++i)
        {
            int len = Program.lenarray[i];
            for (int j = 0; j < 251; ++j)

```

```
        {
            data[i, j] = new int[len];
        }
    }
    foreach (DataRow dr in rows)
    {
        short r = Convert.ToInt16(dr[2]);
        short theta = Convert.ToInt16(dr[3]);
        short spherPhiPart = Convert.ToInt16(dr[4]);
        byte data_m = Convert.ToByte(dr[5]);
        //if (data_m > data_m_max) data_m_max = data_m;
        data[theta, r][spherPhiPart] = data_m;
    }
}
int[,] Data { get => data; }
}
```

ВИСНОВКИ

1. Реальна нанокластерна підсистема, до прикладу кремнію, складається з НК різних розмірів і різної морфології, тобто НКФ. Причому симетрія НКФ не завжди співпадає з симетрією матричного матеріалу. Так, НКП може бути сформована з поліедричних структур. Отже, вивчення в рамках молекулярно динамічної схеми таких НКФ дозволяють провести зіставлення з результатами вимірювань в експериментальних дослідженнях.

Співвідношення, що отримані у роботі, добре протестовані для НКФ з яких складаються НК кремнію певної симетрії. Розрахунки $\text{Cos}\theta_\psi$ та $\text{Cos}\theta_\rho$ за методом *MIENT* – α отримані по формулах (1.16) та (1.26).

Для найпростішого випадку, коли $\psi_{m+1}^{(M)} = -\sqrt{1-a^2} \cdot \psi_{n_1}^1 + a^2 \cdot \psi_{n_2}^2$, $C_{n-1m+1}^2 + C_{nm+1}^2 = 1$, для будь-якого значення a , маємо:

$$\text{Cos}\theta_\rho = \frac{2m-1}{\sqrt{m \cdot (4m-2)}} = \sqrt{\frac{2m-1}{2m}}$$

Зробимо зауваження щодо розрахунку $\text{Cos}\theta_\rho$ для НК типу Si_NX_M , коли X - атом пасиватора (наприклад, галогену). Розбудовуючи хвильові функції атомів галогену та кремнію використовувалася концепція локалізованих орбіталей, орієнтованих уздовж X3 X—Si.

Результати тестування виявили відповідність значень $\text{Cos}\theta_\psi$ із відомими закономірностями для низки галогенів в ряду $F - \text{Cl} - \text{Br} - \text{I}$, а також для фрагменту типу SiH_3 . Найбільшу зміну електронної структури викликає хімічного зв'язку кремнію з атомом фтору. Збільшення кількості атомів кремнію у НК зменшує $\text{Cos}\theta_\psi$. При цьому $\text{Cos}\theta_\rho$ збільшується.

Взаємозв'язок між $\text{Cos}\theta_\psi$ та $\text{Cos}\theta_\rho$ не є тривіальним. Наприклад, переходячи від НКФ $\text{SiH}_3 - \text{F}$ до $\text{SiH}_3 - \text{Br}$, $\text{Cos}\theta_\psi$ помітно збільшується ($\approx 0,08$), а $\text{Cos}\theta_\rho$ збільшується не суттєво ($\approx 0,005$).

Між НКФ $SiH_3 - X$ та $Si_2H_5 - X$ існує суттєва різниця, щодо розподілу електронної густини. $\cos\theta_p$ для однієї й тієї ж пари галогенів (Br, F) у цих сполуках змінюється по-різному. Це свідчить про те, що має місце суттєвий перерозподіл електронної густини у НК за рахунок зміни електронної структури складових, тобто фрагментів. НКФ SiH_3 істотно відрізняється від структур типу Si_2H_5 та Si_5H_{11} .

2. Запропоновано та проаналізовано модель взаємозв'язку показників надійності двокаскадних ТЕУ різних конструкцій з геометрією гілок термоелементів у каскадах у режимі ΔT_{max} при послідовному електричному з'єднанні каскадів. Отримані співвідношення дозволяють оцінити максимальні можливості охолодження і показники надійності двокаскадних охолоджувачів різних конструкцій.

Показано можливість збільшення максимального перепаду температури ΔT_{max} до 4% за рахунок вибору оптимальної геометрії гілок термоелементів у каскадах $(1/S)_1 > (1/S)_2$, що відрізняється від традиційної $(1/S)_1 = (1/S)_2$, при заданому робочому струмі. Запропонований підхід дозволяє оцінити максимальні можливості охолодження двохкаскадних охолоджувачів і вести оптимізаційне проектування систем забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури.

3. Застосування вейвлетного перетворення для аналізу перетвореного ряду значень температури повітря в центральній частині Гренландії дозволило виявити і наочно показати квазіперіодичну структуру описуваного ряду. Масштабно-часова розгортка, отримана в результаті вейвлетного перетворення досліджуваного ряду, виявила не лише осциляції з добре фіксованим періодом, але і нестационарні осциляції, і локалізовані періодичності.

Аналіз дав можливість визначити не лише масштаб осциляцій, але і виявити почало і кінець конкретної осциляції. Уточнений вік подій Хайнриха за даними вейвлетного аналізу і проведене порівняння з датуваннями Hemming [8], Vidal et al. [9], Bond et Lotti [10] і А.К. Васильчук [7].

Проведене датування подій Хайнриха за даними вейвлетного аналізу показало некоректну інтерпретацію кліматичних змін близько 12 тисяч років назад як Н-0. Раптове тисячолітнє похолодання, що почалося на Землі 12900 років тому, можливо, було спровоковане падінням великого метеорита, що знайшло віддзеркалення у вейвлетному спектрі.

Використання вейвлетного аналізу для довгоперіодичних кліматичних рядів дозволяє отримати точніший вік окремих подій в багатовіковому ланцюзі кліматичних змін. Необхідно підкреслити, що вейвлетне перетворення дозволяє поглянути на досліджуваний процес і з іншої точки зору: разом із загальною картиною, що представляє динаміку процесу в цілому, можна не лише визначити точний вік окремих осциляцій, але і співвіднести їх з конкретними кліматичними явищами і оцінити енергетику цих явищ.

4. Результати проведених досліджень, заснованих на кількісній оцінці параметрів геометричних моделей побудови радіолокаційного поля, дозволили виявити найбільш раціональний спосіб розподілу енергії зондувального випромінювання в просторі спостереження. Цей спосіб полягає в тому, що радіолокатори, які утворюють поле, розставляються у вершинах пов'язаних правильних шестикутників так, щоб зони спостереження суміжних радіолокаторів накладалися один на одного до повної дальності дії радіолокаторів. В цьому випадку енергетична неефективність отриманого радіолокаційного поля за рахунок накладення зон спостереження радіолокаторів усього лише здається. Насправді відсутність необхідності розподіляти енергію під великими кутами місця створює істотну економію енергії зондувального випромінювання і доводить міру повноти використання енергії випромінювання до 70%.

5. Метеорологічні дані можливо і доцільно інтегрувати у базу даних. При цьому бажано створювати щонайменше дві різні бази даних – БД первинних, необроблених даних у «хмарі», та БД оброблених, апроксимованих даних в організації, яка розробляє або використовує додатки

з метеорологічними даними. Оскільки формат вимірюваних радаром даних найбільш наближений до регулярних таблиць реляційної моделі, бажано використовувати реляційні СКБД для організації метеорологічних баз даних та сховищ даних.

6. У прикладних застосунках, що використовують дані з метеорологічної БД, доцільно завантажувати пакети даних у колекції об'єктів, де окремий об'єкт колекції є повним пакетом метеорологічних даних з одного радара за один прохід променю радара по всій півсфері вимірювань. У цьому випадку досить просто видаляти з оперативної пам'яті вже використані пакети даних та довантажувати нові пакети для обробки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kovalchuk V., Smorgh M. Metrology of the Real Nanoclusters: Structure and Optical Characteristics. *Metrology & Devices*. 2020. №2. P.56-60
2. Kovalchuk V. Optical Properties of clusters // *J. of Physics & Electronics*. 2018.V. 26 (1). P. 29-34
3. Ковальчук В.В. Нанокластерна модифікація гетероструктур. Одеса, К: НІ-ТЕС, 2007. 226 с .
4. Зайков В.П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств [Текст] Книга 1. Однокаскадные устройства/В.П. Зайков, Л.А. Киншова, В.Ф. Моисеев – Одесса: Политехпериодика, 2009. – 118 с.
5. Зайков В.П. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств [Текст]/В.П. Зайков, В.И. Мещеряков, А.А. Гнатовская//*Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков. – 2011. – Вып. № 49 (12). – С. 34 – 38
6. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. Analysis of the model of interdependence of thermoelement branch geometry and reliability indicators of the single-stage cooler. *Eastern –EuropeanJournalofEnterpriseTechnologies*, 2017, 1/1 (85), P. 26–33.
7. Зайков, В.П. Анализ возможностей повышения надежности термоэлектрических охлаждающих устройств/ В.П. Зайков,В.И. Мещеряков, Ю.И. Журавлев// *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – Харьков: Техноцентр, 2015. – Вып. 4/8 (76). – С. 17 – 25.
8. EPICA community members Eight glacial cycles from an Antarctic ice core // *Nature*. 2004. V. 429. P. 623-628.
9. Jouzel J.; Masson-Delmotte, V.; Cattani, O.; Dreyfus, G.; Falourd, S.; Hoffmann, G.; Minster, B.; Nouet, J.; Barnola, J. M.; Chappellaz, J.; Fischer, H.; Gallet, J. C.; Johnsen, S.; Leuenberger, M.; Loulergue, L.; Luethi, D.; Oerter, H.; Parrenin, F.; Raisbeck, G.; Raynaud, D.; Schilt, A.; Schwander, J.; Selmo, E.;

Souchez, R.; Spahni, R.; Stauffer, B.; Steffensen, J. P.; Stenni, B.; Stocker, T. F.; Tison, J. L.; Werner, M. & Wolff, E. W. (2007), 'Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years', *Science* 317(5839), 793-796.

10. Grootes P.M., Stuiver M., White J.W.C., Johnsen S.J., Jouzel J. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature* 366, 1993, pp.552-554.

11. Meese D.A., Alley R.B., Fiacco R.J., Germani M.S., Gow A.J., Grootes P.M., Illing M., Mayewski P.A., Morrison M.C., Ram M., Taylor K.C., Yang Q., Zielinski G.A. Preliminary depth-agescale of the GISP2 ice core. Special CRREL Report 94-1, US, 1994.

12. Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T.F. The GISP2 ^{18}O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Research* 44, 1995, pp.341-354.

13. Stuiver M., Braziunas T.F., Grootes P.M., Zielinski G.A. Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record. *Quaternary Research* 48, 1997, pp.259-266.

14. Васильчук А.К. Палинология и хронология повторно-жильных льдов: диссертация доктора геогр. наук. – М., 2009. – 362 с.

15. Hemming S. R., 2004, Heinrich events: massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Reviews of Geophysics*, 42, RG1005, doi: 10.1029/2003RG000128.

16. Vidal Laurence; Schneider, Ralph R; Marchal, Olivier; Bickert, Torsten; Stocker, Thomas F; Wefer, Gerold (1999): Link between the North and South Atlantic during the Heinrich events of the last glacial period. *Climate Dynamics*, 15(12), 909-919, doi:10.1007/s003820050321.

17. Gerard C. Bond and Rusty Lotti Iceberg Discharges into the North Atlantic on Millennial Time Scales During the Last Glaciation *Science* 17 February 1995: 1005-1010. [DOI:10.1126/science.267.5200.1005].

18. Мөнин А.С. (1982). Введение в теорию климата. – Л.: Гидрометеоиздат. – 246 с.

- 19.Мировой центр данных палеоклиматологии [Электронный ресурс]: USA World Data Center for Paleoclimatology – Режим доступа: <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/datalist.html>.
- 20.Рудяев Ф.И. (1998). // Доклад РАН. – Т.357, №6. – С.823–825.
- 21.Глок Н.И., Малинин В.Н. Статистический анализ стерических колебаний уровня Мирового океана // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета Научно-теоретический журнал. СПб.: РГГМУ, 2011, № 21. С. 126-137.
- 22.Кляшторин Л.Б, Любушин А.А. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. – М.: ВНИРО, 2005. 235 с.
- 23.Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.
- 24.Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. Успехи физических наук. 1996. Т.166. №11. С. 1145-1170.
- 25.Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии. – М.: Наука, 1987. 198 с.
- 26.Bowen D.Q., 1978, Quaternary geology: a stratigraphic framework for multidisciplinary work. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom. 221 pp. ISBN 978-0-08-020409-3
- 27.Mangerud J., Gyllencreutz R., Lohne O., Svendsen J. I., 2004. Glacial History of Norway. In: Quaternary Glaciations — Extent and Chronology: a Closer Look. Amsterdam: Elsevier, P. 279-296.
- 28.Quaternary Glaciations - Extent and Chronology: a Closer Look, 2004. Eds J. Ehlers, P. L. Gibbard, P. D. Hughes. Amsterdam: Elsevier, 1126 p.
- 29.Donald Rapp. Ice Ages and Interglacials: Measurements, Interpretation and Models. Springer, 2009. ISBN 978-3-540-89679-1.
- 30.Taylor K. C., 1997. «The Holocene-Younger Dryas transition recorded at Summit, Greenland». Science 278 (5339): 825–827. DOI:10.1126/science.278.5339.825. Bibcode:1997Sci...278..825T.
- 31.Hughen Konrad A., 2000. «Synchronous Radiocarbon and Climate Shifts

During the Last Deglaciation». *Science* 290 (5498): 1951–1954.
 DOI:10.1126/science.290.5498.1951. PMID 11110659.
 Bibcode:2000Sci...290.1951H.

32. Spurk M., 1998. «Revisions and extension of the Hohenheim oak and pine chronologies: New evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal transition». *Radiocarbon* 40 (3): 1107–1116.

33. Isabel Israde-Alcántara^a, James L. Bischoff^b, Gabriela Domínguez-Vázquez^c, Hong-Chun Lid, Paul S. DeCarlie, Ted E. Bunch^f, James H. Wittke^f, James C. Weaver^g, Richard B. Firestone^h, Allen Westⁱ, James P. Kennett^j, Chris Mercer^k, Sujing Xie^l, Eric K. Riechman^m, Charles R. Kinzieⁿ, and Wendy S. Wolbachⁿ. Evidence from central Mexico supporting the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis Edited by* Steven M. Stanley, University of Hawaii, Honolulu, HI, and approved January 31, 2012 (received for review July 13, 2011) www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1110614109.

34. Bond G. «A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates». *Science* 278 (5341): 1257–66. DOI: 10.1126/science.278.5341.1257. Bibcode: 1997 Sci.278.1257B.

35. Nesje Atle; Dahl, Svein Olaf. «The Greenland 8200 cal. yr BP event detected in loss-on-ignition profiles in Norwegian lacustrine sediment sequences». *Journal of Quaternary Science* 16 (2): 2001. 155–166. DOI:10.1002/jqs.567.

36. Перельгин Б.В. Реализация системного подхода при создании радиолокационной системы метеорологического мониторинга // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. 2017. № 190. С. 13–21.

37. Перельгин Б.В., Лужбин А.М. Построение сплошного радиолокационного поля системы гидрометеорологического мониторинга на основе геометрического подхода // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. 2017. № 191. С. 173–180.

38. Перельгин Б.В., Боровская Г.А., Лужбин А.М. Анализ требований потребителей к характеристикам информации, получаемой от

метеорологической радиолокационной системы мониторинга // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. 2016. № 187. С. 58–65.

39. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.

40. Мищенко Ю.А. Зоны обнаружения. М.: Воениздат, 1963. 96 с.

41. MongoDB. URL: https://flexberry.github.io/ru/gbt_mongodb.html

42. Переваги та недоліки використання СУБД MongoDB. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/24821/>

43. NoSQL – переваги та недоліки нереляційних баз даних. URL: <https://qagroup.com.ua/publications/nosql-perevagy-ta-nedoliky-nereliatcijnykh-baz-danykh/>

44. PostgreSQL. URL: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/PostgreSQL>

45. PostgreSQL – Overview. URL: https://www.tutorialspoint.com/postgresql/postgresql_overview.htm