МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

На правах рукопису
УДК 621.38:537.533.3

ВІСЬТАК МАРІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

# МОДИФІКАЦІЯ РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУР ТА ЗАВАДОСТІЙКИХ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ОПТИЧНИХ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ

05.27.01- Твердотільна електроніка

Д И С Е Р Т А Ц І Я

На здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Науковий консультант:
д.ф.-мат.наук, проф.Микитюк З.М.

Львів - 2016

**ЗМІСТ**

ВСТУП 4

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ ХІМІЧНИХ ТА БІОЛОГІЧНИХ РЕЧОВИН 15

1.1. Основні тенденції розвитку оптичних сенсорів 15

1.2. Аналіз структурних рішень оптичних сенсорів 19

1.3. Рідкокристалічні оптичні сенсори 23

1.4. Елементна база та сигнальні перетворювачі оптичних сенсорів 42

Висновки до розділу 1 46

РОЗДІЛ 2. МОДИФІКАЦІЯ РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ 48

2.1 Аналіз, обгрунтування та вибір рідкокристалічних (РК) матеріалів для нових РК структур оптичних сенсорів 48

2.2 Гістерезисні властивості холестерико-нематичного фазового переходу 50

2.3 Розроблення методики розрахунку констант пружності в нематико-холестеричних сумішах 56

2.4 Залежність величини петлі польового гістерезису від констант пружності, концентрації ефірів холестерину в індукованих холестериках, кроку індукованої спіралі та діелектричної анізотропії 58

2.5 Моделювання впливу поверхні на характеристики холестеричних рідких кристалів для РК сенсорів. 62

2.6 Розроблення низькочастотного рідкокристалічного автогенератора для сенсорів фізичних величин 79

Висновки до розділу 2. 88

РОЗДІЛ 3. СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОКОМПОЗИТІВ ЯК АКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ 90

3.1 Дослідження спектральних характерстик нанокомпозитів на основі холестеричних рідких кристалів, інтеркальованих

наноразмірними частинками. 92
3.2 Дослідження спектральних характеристик нанокомпозитів на основі холестеричних рідких кристалів, інтеркальованих у пористі матриці. 102
3.3 Розроблення полімердиспергованого рідкокристалічного матеріалу як активного середовища оптичного сенсора. 112
3.4 Дослідження нелінійних явищ в холестеричних рідких кристалах (ХРК) з інтеркальованими золотими наночастинками для підвищення чутливості оптичних сенсорів . 114
Висновки до розділу 3. 127
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ РІДКОКРИСТАЛІЧНОГО АКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА СЕНСОРІВ БІОЛОГІЧНИХ РЕЧОВИН 130
4.1 Принципи побудови сенсорів біологічних речовин. 130
4.2 Загальна характеристика білків та вуглеводів. 137
4.3 Холестеричні рідкокристалічні матеріали як активне середовище сенсорів білків та вуглеводів. 141
4.4 Дослідження спектральних характеристик білків. 143
4.5 Дослідження спектральних характеристик вуглеводів 146
Висновки до розділу 4. 152
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОХОДЖЕННЯ СВІТЛА В СИСТЕМІ СВІТЛОДІОД-НАНОСТРУКТУРОВАНА МАТРИЦЯ-ФОТОДІОД 154
5.1 Розроблення методики створення оптичного сенсора на основі рідкокристалічних структур системи наноструктурована матриця-фотодіод-світлодіод. 154
5.2 Розроблення методу розрахунку коефіцієнта селективного відбиття активного середовища оптичних сенсорів. 156
5.3 Моделювання проходження світла крізь структуровану матрицю. 166
Висновки до розділу 5. 179

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБЛЕННЯ НОВИХ ЗАВАДОСТІЙКИХ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПТИЧНИХ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ . 181

6.1 Проблеми створення завадостійких сигнальних перетворювачів в оптичних сенсорах 181

6.2 Конвертери імпедансу з від’ємним струмовим зворотним зв’язком 184

6.3 Модифікація і розроблення конвертерів імпедансу з резистивним додатним зворотним зв’язком. 198

6.4 Модифікування та реалізація конвертерів імпедансу на транзисторних каскадах 210

6.5 Розроблення конвертерів імпедансу на операційних підсилювачах. 226

6.6 Реалізація та експериментальні дослідження сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів. 240

Висновки до розділу 6. 248

ВИСНОВКИ 251

ЛІТЕРАТУРА 255

ДОДАТКИ 280

# ВСТУП

**Актуальність теми дослідження** Сучасний розвиток науки, техніки та промисловості неможливий без розробки, виробництва та застосування широкого класу різноманітних сенсорів для вимірювання фізичних величин, складу хімічних та біохімічних сполук тощо. Досліджуються електрофізичні властивості неорганічних та органічних матеріалів із використанням останніх досягнень у технології мікро- та наноелектроніки, інтеркаляції тощо для створення нових сенсорів. У цьому напрямку виділяється широкий клас оптичних сенсорів, структура первинних перетворювачів яких – це джерело світла-оптично активний матеріал-фотоприймач. Численні провідні фірми, зокрема Vishay (США), Texas Instruments (США), ELMOS Semiconductor AG (ФРН), Telemetric LIDAR (Італія), AANDERAA Data Instruments (Норвегія), SICK AG (США), Zebra-Tech (Нова Зеландія), Mid Infrared Optoelectronics (Росія) виділяють величезні кошти на дослідження та розробку ефективних, технологічно привабливих елементів і структур сенсорних пристроїв. Як оптично активне середовище найчастіше використовують напівпровідникові органічні та неорганічні матеріали. Серед органічних матеріалів вирізняють рідкокристалічні матеріали (нематичні, холестеричні рідкі кристали та їхні суміші), для яких досліджено оптичні, електрооптичні, магнітооптичні ефекти тощо. На їхній основі розроблено оптичні РК сенсори температури, тиску, газів та інші. Основні їхні параметри визначаються фізичними властивостями РК матеріалів, а саме, величиною діелектричної анізотропії, петлі гістерезису, константами пружності та орієнтаційними ефектами. Однак на сьогодні потенціальні можливості РК матеріалів з погляду сенсорної техніки досліджені недостатньо, а також недостатньо вивчена кореляція оптичних властивостей у РК сенсорних структурах в залежності від зовнішнього впливу (СО, білки, вуглеводи), тому проведення досліджень з погляду створення нових сенсорних структур і підвищення їхніх параметрів є актуальним. Одним із перспективних напрямків створення сенсорних структур є модифікація РК через інтеркалювання їх наночастинками, однак цей напрямок на сьогодні мало

вивчений. Для його реалізації необхідно дослідити спектральні характеристики цих РК структур, а також їхню зміну під впливом зовнішніх факторів. Крім цього, попередні наші дослідження показали можливість створення сенсорних структур на основі інтеркаляції рідкого кристала наночастинками $Fe_2O_3$ та $Fe_3O_4$ , а також допованих наночастинками у пористі структури типу $Al_2O_3$. Проведення теоретичних та експериментальних досліджень у цьому напрямку дозволить цілеспрямовано модифікувати та створювати нові активні середовища для сенсорних пристроїв.

Відомо, що інформативний сигнал сучасних оптичних сенсорних пристроїв на основі РК формується здебільшого модуляцією спектральної характеристики РК активного середовища під зовнішнім впливом. Як правило, первинний перетворювач сенсорного пристрою складається з керованого, переважно імпульсного джерела світлового випромінювання (світлодіод, група світлодіодів зі зміщеними спектральними характеристиками, лазери, фотолюмінесцентні випромінювачі тощо) та фоточутливого елемента (фотодіоди, фототранзистори та фотоматриці на їх основі). При цьому важливим компонентом оптичних сенсорів є сигнальні перетворювачі. Однак на сьогодні існує проблема в створенні оптоелектронних сенсорних пристроїв – значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Так, інтенсивність випромінювання сторонніх джерел світла (сонця, ламп освітлення тощо) в сотні, а іноді в тисячі разів перевищує корисну складову зміни оптичного сигналу від активного середовища, спектральна характеристика якого несе інформацію про досліджувану хімічну чи біохімічну речовину.

Для усунення цих завад необхідне розроблення завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорних пристроїв. Основою функціонування таких сигнальних перетворювачів є конвертери імпедансу. Аналіз показав, що для забезпечення високої селективності інформативного сигналу та ефективного заглушення паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад необхідно розробити теоретичні засади

функціонування та схемотехніку широкого ряду конвертерів імпедансу, сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів. Для цього необхідно розробити схемотехнічні рішення конвертерів імпедансу на основі схем з від'ємним струмовим та додатним резистивним зворотним зв'язком з RC-колами фільтрів другого порядку. Необхідно дослідити ефект додаткової резонансної режекції на частотах, що передують переходу від низького до високого імпедансу, що забезпечує завадостійкість оптичного сигналу до зовнішнього освітлення та електромагнітних завад.

Тому проведення комплексних досліджень щодо розроблення та модифікації активного рідкокристалічного середовища та створення завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими роботами, планами і темами.**Результати дисертаційної роботи використані під час виконання науково-дослідних тем Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького "Моделювання та дослідження фізико-хімічних процесів у біологічних тканинах та технічних системах" № ДР0108U00128 та "Дослідження фізико-хімічних процесів у біологічних тканинах та технічних системах методами математичного моделювання" № ДР 0112U000161 та планових науково-дослідних тем Національного університету "Львівська політехніка: "Дослідження та розробка нових матеріалів та технології елементів електронної техніки" № ДР 0196U000169; "Розробка нових структур та сенсорів фізичних величин на основі рідкокристалічних та магнітних матеріалів" № ДР 0100U00486; "Розробка нових елементів та пристроїв електронної техніки на основі нанрозмірних органічних структур" № ДР 0113U003196; "Розроблення елементів та структурно-схемних рішень елементів та пристроїв органічної електроніки для реєстрації шкідливих газів" №ДР 0116U004141.

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є модифікація РК структур для підвищення спектральної чутливості до зовнішніх факторів та використання їх

як активного середовища оптичних сенсорів і створення завадостійких сигнальних перетворювачів цих сенсорів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити та дослідити:

– активні рідкокристалічні середовища для оптичних сенсорів з високою чутливістю до зовнішнього впливу;
– нові наноструктури на основі РК матеріалів з інтеркальованими нанодомішками, введеними в нанопористі структури;
– нові РК структури для реєстрації біооб’єктів (білків, вуглеводів) та шкідливих газів – монооксиду вуглецю (CO) та діоксиду сірки ($SO_2$);
– засади побудови сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів із високою селективністю інформативного сигналу та ефективним заглушенням паразитних сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад;
– конвертери імпедансу на транзисторних каскадах і операційних підсилювачах.

Для практичної реалізації мети роботи необхідно провести:

– моделювання впливу поверхні в приповерхневій області на характеристики РК;
– комп’ютерне моделювання проходження світла в системі первинного перетворювача ”світлодіод – активне середовище – фотодіод” і розробити рекомендації щодо особливостей сигнального перетворювача для оптичних сенсорів;
– структурно-параметричне модифікування конвертерів імпедансу з метою підвищення коефіцієнта підсилення, крутизни амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) та стабілізації корисної складової сигналу фоточутливого елемента.

**Об’єкти досліджень.**

Об’єктом дослідження є процеси поширення випромінювання в композитах на основі рідкокристалічних структур, допованих нанорозмірними частинками під впливом зовнішніх факторів.

**Предмет досліджень. .** Холестеричні рідкі кристали (ХРК), ХРК доповані нанорозмірними домішками, сигнальні перетворювачі оптичних сенсорів.

**Методи досліджень. .** Для вирішення наукових завдань, поставлених у дисертації, використовувались оптичні методи досліджень. Для визначення оптичних характеристик матеріалів РК середовищ, інтеркальованих нанорозмірними частинками та отримання спектрів пропускання та селективного відбивання, використовувались спектроскопічні методи (USB2000). Для дослідження текстурних змін у шарі РК, модифікованого наночастинками, використовувались мікроскопічні дослідження, а також просвітлювальна (HR-TEM-Fei Technai $G^2$ F20 STwin) та растрова електронна мікроскопія (JCM-5000), для дослідження структури пористих матеріалів і нанорозмірних частинок використовувався рентгеноструктурний аналіз (DRON-2M). Для визначення орієнтаційних ефектів НХС використовувались коноскопічні дослідження, а також комп'ютерне та математичне моделювання.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами досліджень розроблено:

- активне середовище на основі структури РК матеріал – наноструктурована матриця для новостворених оптичних сенсорів шкідливих газів;
- активне середовище на основі рідких кристалів для оптичних сенсорів концентрації біологічних речовин, а саме, протеїнів і вуглеводів;
- оптичний сенсор температури на основі РК оптичного автогенератора;
- завадостійкі сигнальні перетворювачі для оптичних сенсорів.

Новизна практичних розробок захищена патентами України на корисні моделі. Результати дисертації використовуються під час підготовки спеціалістів напрямку "Електроніка" Національного університету "Львівська політехніка", при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі біофізики Тернопільського державного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського, під час виконання науково-дослідних робіт на підприємстві НВП "Карат" (Львів), а також у Львівських медичних закладах (5-а лікарня та Львівська обласна клінічна лікарня). Результати впровадження підтверджено відповідними актами.

**Наукова новизна**

1. Розроблено концепцію створення та прогнозування параметрів оптичних сенсорів, активною речовиною яких є ХРК, нанокомпозит ХРК–нанодомішка та наноструктура нанокомпозит–пориста матриця. Створено нові активні середовища сенсорів, у яких інформативний сигнал формується селективним пропусканням оптичного випромінювання крізь активне середовище, яке взаємодіє з газами, рідинами та біооб'єктами. Розроблені активні середовища характеризуються підвищеною чутливістю до зовнішнього впливу. Використання довжини хвилі як єдиного інформативного сигналу уможливило розроблення універсального завадостійкого сигнального перетворювача та створення новиго напрямку в розробці оптичних сенсорів.
2. Встановлено що розроблені нанокомпозити системи ХРК-нанодомішка змінюють свої спектральні характеристики внаслідок сорбційної взаємодії введених у РК наночастиноко із зовнішніми факторами. Виявлено основні закономірності зміни спектральних характеристик нанокомпозитів під впливом СО. Показано, що зі збільшенням концентрації СО мінімум пропускання на спектральних характеристиках зміщується, а максимальні зміни в положенні мінімуму пропускання на спектральних характеристиках спостерігаються до досягнення концентрацією СО значення 20 мг/м$^3$. Саме в цьому діапазоні для нанокомпозиту на основі ХРК ЕЕ1 з домішкою магнетиту $Fe_2O_3$ отримано максимальне значення коефіцієнта спектральної чутливості, яке для концентрації магнетиту 3% становить 1,71 нм/мг/м$^3$.
3. Встановлено основні закономірності зміни спектральних характеристик нанокомпозитів під впливом двоокису сірки ($SO_2$). Показано, що максимальні зміни в положенні мінімуму пропускання на спектральних характеристиках для нанокомпозиту на основі CLC-2101L+5CB спостерігаються до досягнення концентрації $SO_2$ 20 мг/м$^3$. Коефіцієнт спектральної чутливості зростає зі збільшенням концентрації AlN у

нанокомпозиті. Максимальне його значення, яке становить 0,47 нм/мг/м$^3$, перебуває в діапазоні концентрацій $SO_2$ 25–75 мг/м$^3$ для нанокомпозиту CLC-2101L+5CB з домішкою 0,45% AlN. Для створення твердотільного газочутливого активного середовища оптичних сенсорів запропоновано використати наноструктуру, отриману внаслідок введення нанокомпозиту до наноструктурованих пористих матриць на основі $Al_2O_3$ та $SiO_2$. Для матриці на основі $Al_2O_3$ коефіцієнт спектральної чутливості набуває максимального значення до досягнення концентрацією монооксиду вуглецю значення 20 мг/м$^3$ і становить 1,45 нм/мг/м$^3$ при діаметрі пор 20 нм. Для матриці на основі $SiO_2$ максимальний коефіцієнт спектральної чутливості досягається в інтервалі 22,5–42,4 мг/м$^3$ і становить 1,47 нм/мг/м$^3$.

4. Встановлено основні закономірності зміни спектральних характеристик ХРК внаслідок введення в них водних розчинів білків і вуглеводів. Вперше виявлено, що зі збільшенням концентрації водного розчину білків і вуглеводів у РК відбувається зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область на 10–80 нм. При цьому спектральна чутливість лежить у межах від 0,54 до 2,11 нм/% для білків та від 1,17 до 4,5 нм/% у вуглеводах. Фізична природа зменшення кроку холестеричної спіралі та, як наслідок, зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область полягає в тому, що у водних розчинах білків під час їх взаємодії з молекулами ХРК відбувається біохімічна реакція, результатом якої є зміна спіральної структури РК. Водночас у вуглеводах проходить взаємодія між оксигрупою вуглеводів (карбоксильною групою) та ціаногрупою РК. В обох випадках наслідком цих факторів є збільшення довжини асоціату молекул та зменшення кроку спіралі. Така зміна оптичних характеристик ХРК під час взаємодії з біооб’єктами покладена в основу створення активного середовища оптичних сенсорів для виявлення та ідентифікації біооб’єктів.

5. На основі розробленої моделі проходження світла в системі “світлодіод – газочутливе середовище – фотодіод” встановлено вимоги до сигнального перетворювача оптичного сенсора. Активне середовище є системою на основі наноструктурованої матриці з інтеркальованим у неї ХРК. Вперше показано, що в якості джерела випромінювання необхідно використовувати світлодіоди з кутом розходження променя меншим ніж 10°, оскільки при більших значеннях виникає значне зменшення співвідношення сигнал/шум, обумовлене перерозподілом випромінювання між активними ділянками ХРК та пасивною матрицею. Встановлено мінімальну товщину нанокомпозиту, необхідну для забезпечення максимального селективного відбивання світла, яка становить 10 Р величини кроків спіралі при величині анізотропії показника заломлення ХРК 0,2.
6. Отримали розвиток теоретичні засади побудови широкого ряду конвертерів імпедансу сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів, перевагою яких є висока селективність інформативного сигналу та ефективне заглушення паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад. Розроблені конвертери імпедансу базуються на схемах з від’ємним струмовим та резистивним додатнім зворотними зв’язками з RC-колами фільтрів другого порядку. Показано, що перевагою розроблених конвертерів імпедансу є корисний ефект додаткової резонансної режекції на частотах, що передують переходу з низького до високого імпедансу. Зокрема, на основі SPICE моделей встановлено, що відношення між коефіцієнтами перетворення на робочій частоті та частоті електромагнітної завади сягає значень понад 80 дБ.
7. Вперше моделюванням та експериментальними дослідженнями виявлено резонансний характер функції перетворення конвертера імпедансу на ділянці спадання АЧХ операційного підсилювача, що дозволяє реалізувати частотно-селективні схеми сигнальних перетворювачів

оптичних сенсорів з заглушенням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла. Теоретично та експериментально показано, що функція частотної залежності імпедансу розробленого конвертера другого порядку (на операційному підсилювачі з граничною частотою 1 МГц) має два екстремуми. В околі першого екстремуму відбувається режекція завади мережі живлення частотою 50 Гц, а другого – селективне виділення інформативного сигналу частотою 700 Гц. Відношення значень імпедансу на частоті інформативного сигналу Z(F = 700 Гц) та частоті завади Z(F = 50 Гц) перевищує значення $10^4$, що відповідає значенню понад 80 дБ.

8. Отримали подальший розвиток алгоритмічно-схемні рішення транзисторних каскадів конвертерів імпедансу, які завдяки запропонованим методам оптимізації режимів роботи дозволяють підвищити в 2...3 рази параметричну стабільність та частотну селективність функції перетворення.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи, подані та опубліковані в співавторстві, отримано за безпосередньої участі автора на всіх етапах роботи. У роботі наведено результати досліджень, проведених особисто автором, а також у співпраці зі співробітниками лабораторії рідких кристалів кафедри електронних приладів Національного університету “Львівська політехніка”. Основні результати дослідження процесу модифікування ХРК нанорозмірними частинками та розроблені на їх основі електронні структури описано в монографії [143]. У роботі [215] запропоновані рішення конвертерів імпедансу, які базуються на схемах з від’ємним струмовим та резистивним додатним зворотним зв’язком з RC-колами фільтрів другого порядку, спектральні залежності немато-холестеричних сумішей [117], гістерезисні властивості холестерико-нематичного фазового переходу [119,113], температурна залежність констант пружності Франка $K_{22}$ і $K_{33}$ [114], динамічні характеристики індукованих холестериків [115], розроблено методику визначення констант пружності [116], спектральні характеристики

нанопористої структури діоксиду кремнію $SiO_2$, інтеркальованої ХРК і наночастинками [138], спектральні характеристики наноструктури пористого оксиду алюмінію, інтеркальованої ХРК і наночастинками [150,145,151], проведено моделювання проходження світла крізь структуровану матрицю [127], розроблено структурну,функціональну та принципову електричну схеми роботи оптичного сенсора монооксиду вуглецю на основі ХРК , модифікованого магнетитом $Fe_2O_3$ [136], розроблено активне середовище оптичного сенсора температури на основі полімер-диспергованого ХРК [152], проведено спектральні дослідження синтезованих нанострижнів [153], досліджено фізичні закономірності підвищення чутливості роботи оптичного сенсора монооксиду вуглецю [139], запропоновано конвертер імпедансу, який забезпечує індуктивний характер імпедансу кола навантаження оптичного сенсора, а відтак, заглушення постійної складової фотоструму [220], проведено структурно-параметричне модифікування конвертерів імпедансу з метою підвищення коефіцієнта підсилення та крутизни АЧХ [216], запропонована SPICE схема заміщення конвертера імпедансу зі струмовим зворотним звязком [217], досліджено спектральні характеристики та коефіцієнт спектральної чутливості холестеричної матриці водних розчинів різного типу білків для активного середовища оптичного сенсора для визначення протеїнів [204], досліджено та встановлено ряд нових закономірностей для характеристик інтеграторів операційних підсилювачів [222], досліджено спектральні характеристики та коефіцієнт спектральної чутливості холестеричної матриці водних розчинів різних вуглеводів для активного середовища оптичного сенсора біологічних об’єктів [205], розроблено нові активні РК середовища сигнальних перетворювачів оптоволоконного сенсора монооксиду вуглецю [134,135] і перетворювача оптоволоконного сенсора температури [133]. В усіх роботах спільно зі співавторами проведено постановку задач досліджень, інтерпретацію результатів експериментів, аналіз виявлених особливостей, а також підготовку публікацій до друку.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: 7 International Liguid Crystal Conference (1987, Pardubice); 8. International Liguid Crystal Conference (1989, Krakov, Poland); 13th International Liguid Crystal Conference (1990, Vancouver, Canada); International Topical Meeting on Optics of Liguid Crystal (1991, Florida, USA); I Sand T‘s 50th Annual conference, (1997, USA); International Congress on Imaging Science (ICPS), (1998, Belgium); 18 th International Liguid Crystal Conference (2002, UK); SID‘05. International Symposium (2005, Boston, USA); IX International Congress of Medical Sciens, (2010, Sofia, Bolgaria); Europian Conference of Liguid Crystal (2011, Marebor); IV Міжнародна науково-практична конференція “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки“ (2014, Чернівці); XI International Congress of Medical Sciens (2014, Sofia, Bolgaria); 13 International Conference “Electronic and related properties of organic solids” (2014, Poland); SPIE Photonics Europe 2014. Photonics, Optics, Lasers, Micro- and Nanotechnologies SQUARE Brussels Meeting Centre Brussels (Belgium 4 - 17 April 2014); XV International Congress of Medical Sciens (2015, Sofia, Bolgaria); 25th International Liquid Crystal Conference (29 June - 4 July 2014, Dublin, Ireland); International Conference TCSET 2016 (Lviv–Slavske, Ukraine).

**Публікації**. Результати дисертації опубліковано в 2 монографіях, 56 наукових працях, із яких 3 авторські свідоцтва та патенти, 28 статтях у наукових фахових виданнях України та інших держав, з них 16 статей – в реферованих журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science та/або Scopus та 25 публікаціях у матеріалах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій.

**Структура та об’єм дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновку та списку літератури. Вона містить 280 сторінок, 210 рисунків, 3 таблиці та 222 використаних джерел літератури.

# РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ ХІМІЧНИХ ТА БІОХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

## 1.1. Основні тенденції розвитку оптичних сенсорів

Успіхи в галузях фізики твердого тіла, мікроелектроніки, мікропроцесорної техніки, інформаційних технологій, матеріалознавства, квантової електроніки, інтегральної оптики та біофізики створили основи для розвитку нового напрямку, а саме, сенсорної техніки для вимірювання фізичних величин. Сенсорна електроніка загалом розглядається в монографіях [1-5]. Залежно від характеру відгуку (первинного сигналу), що виникає в чутливому шарі, активного середовища поділяють на такі типи:

- електрохімічні (потенціометричні, кулонометричні тощо);
- електричні (напівпровідникові на основі оксидів металів тощо);
  магнітні (сенсори Холла, магніторезистори тощо);
- термометричні;
- оптичні (спектрофотометричні, колориметричні, люмінесцентні тощо);
- біосенсори (на основі різного біологічного матеріалу: ферментів, тканин, бактерій, антигенів, рецепторів тощо).

У сучасній сенсорній техніці широке застосування знаходять оптичні методи формування інформативного сигналу [6]. Такий сигнал обумовлюється селективним поглинанням чи відбиванням оптичного випромінювання від досліджуваної речовини чи активного середовища, що взаємодіє з цією речовиною. Спектральна характеристика вимірюється оптопарою, яка складається з керованого, переважно імпульсного джерела оптичного випромінювання та фоточутливого елемента. Джерелом випромінювання може бути світлодіод, група світлодіодів зі зміщеними спектральними характеристиками, лазери, фотолюмінесцентні випромінювачі тощо, а фоточутливими елементами – фотодіоди, фототранзистори та фотоматриці на їх основі.

Розвиток оптичних сенсорів за останні роки знайшов своє відображення в статтях [7-11]. Характерними прикладами таких сенсорів є:

- оптичні телекомунікаційні мережі [7,9,11];
- оптичні інтегральні схеми [10];
- оптичні телеметричні сенсори моніторингу довкілля з лазерним підсвіченням [8].

Для дослідження чи контролю складу газів, рідин біохімічних сполук використовують оптичні сенсори, зокрема:

- сенсори бензолу, толуолу, хлороформу [12];
- мікро- та наносистеми для аналізу рідин [13];
- сенсори газу на джерелах інфрачервоного (ІЧ) випромінювання [14];
- сенсори кисню [15];
- інтерференційні тонкоплівкові сенсори шкідливих газів [16-17].

Прикладами публікацій по оптичних сенсорах біологічних речовин є [18]. Впроваджується поняття «оптоелектронного носа» [19]. Ведуться роботи зі створення оптичних сенсорів хімічних і біологічних речовин на ефекті поверхневого плазмонного резонансу [20]. Враховуючи простоту реалізації, в оптичних сенсорах широко використовуються методи та засоби колориметрії [21-23], зокрема з використанням RGB (Red-Green-Blue) фотодіодів [22].

Значну актуальність отримали оптичні сенсори ІЧ-діапазону. В літературі розглядаються, зокрема:

- напівпровідникові джерела ІЧ-випромінювання [23];
- ІЧ сенсор для контролю перегріву провідників [24];
- портативний ІЧ сенсор сірководню [25];
- хімічний ІЧ сенсор на плазмонному резонансі[26];
- ІЧ детектор на Si-CCD матриці з двофотонною абсорбцією [27];
- моніторинг мастила в коробці передач на ІЧ сенсорі [28];
- ІЧ сенсори роботів індустріального та медичного застосування [29];
- ІЧ мультисенсорні пристрої сучасних систем протиповітряної оборони [30];
- ІЧ сенсор руху людини [31];

- ІЧ сенсор для самокерованих автомобілів [32];
- ІЧ детектор наближення для телеопераций [33].

Спостерігається значний прогрес у розвитку оптичних сенсорів та елементів волоконно-оптичної техніки [34] та інтегральної [35] електроніки. Характерними пристроями в цьому напрямку є:

- абсорбційний сенсор на мікроструктурованому оптичному волокні [36];
- MEMs оптична система зі структурованими каналами мікропотоків рідин [37];
- сенсор температури на оптичному волокні з наповненням срібними наночастинками та рідиною [38];
- оптоволоконні кристалічні пристрої для моніторингу каталітичних реакцій [39];
- інтегровані сенсори для смарт-контейнерів [40];
- наноструктуровані оптичні сенсори [41];
- фотодіод із гідронізованою нанокристалічною кремнієвою структурою [42];
- імплантований оптичний сенсор для моніторингу гемоглобіну та перфузії шкіри [43].

Новим напрямком розвитку оптичних сенсорів є тонкоплівкові транзистори. Серед публікацій у цьому напрямку можна назвати:

- мультифункціональний фотосенсорний тонкоплівковий транзистор на подвійному активному шарі [44];
- тонкоплівкові a-Si TFTs структури для фотосенсорів [45];
- інтегрована платформа мікроманіпуляцій та біосенсорики на LTPS TFT структурі [46].

Актуальним на сьогодні є розроблення оптоелектронних сенсорів на основі рідкокристалічних чутливих елементів. Це, зокрема:

- сенсор сили поверхневого зсуву на гомеотропних рідких кристалах [47];
- рідкокристалічний сенсорний мікрочіп [48];
- одночіпові рідкокристалічні пристрої для хімічних і біологічних сенсорів [49];

- оптоволоконний рідкокристалічний сенсор гідростатичного тиску [50];
- рідкокристалічний сенсор температури на трьохелектродних високоомних шарах [51];
- технологія 3D корпусування мініатюрних біомедичних сенсорів на рідкокристалічних полімерах – LCP [52];
- сенсори температури на оптоволоконних рідкокристалічних структурах із нададомішками [53];
- рідкокристалічний сенсор температури на плазмонному ефекті [54];
- ємнісні перетворювачі рідкокристалічних сенсорів [55];
- хімічні та біологічні рідкокристалічні сенсори [56];
- рідкокристалічний сенсор газів на мікроструктурованих підкладках [57];
- оптоволоконний сенсор тиску з використанням рідкокристалічних речовин [58];
- хімічні та біологічні сенсори на основі анізотропних РК середовищ [59];
- тривимірний сенсор сили на основі рідкокристалічних матриць [60];
- газовий сенсор на рідкокристалічних полімерах, легованих вуглецевими нанотрубками [61];
- хімічно-біологічний сенсор на рідкокристалічній структурі з прикладеним електричним полем [62];
- рідкокристалічний сенсорний фотоперетворювач на оптоволокні [63];

Сучасний рівень технології та інтегральної схемотехніки уможливлює створення оптичних сенсорів зі спеціалізованими та здебільшого інтегрованими вузлами сигнального перетворення. Прикладом таких інтегрованих пристроїв є інтегральна схема для ємнісних хімічних і біологічних сенсорів на рідкокристалічних структурах [64];

Питанням сучасної схемотехніки сигнального перетворення в сенсорних, зокрема фотосенсорних пристроях присвячена література [65-72].

## 1.2. Аналіз структурних рішень оптичних сенсорів

Роботу характерного для сучасної мікроелектроніки оптичного сенсора розглянемо на прикладі тонкоплівкового оптоелектронного колориметричного детектора газів [63]. Перевагою тонкоплівкової колірної інтерферометрії є, по-перше, можливість використання лише невеликої кількості сенсорних елементів за рахунок високої інформативності колірного образу досліджуваного об’єкта і, по-друге, порівняно проста реалізація багатоканальних сенсорних масивів малих розмірів. Як чутливі шари в таких сенсорах зазвичай застосовують тонкі органічні плівки, здатні до зміни забарвлення під час взаємодії з досліджуваною речовиною, зокрема газовим оточенням. Адсорбція молекул аналіту веде до зміни оптичної товщини плівки (геометричної товщини або/та показника заломлення) і тим самим її інтерференційного забарвлення, яке фіксується за допомогою колориметричної установки.

Принцип роботи колориметричної вимірювальної системи ґрунтується на порівняльному аналізі кольорових характеристик сигналів, отриманих у результаті інтерференції білого світла на тонкому шарі чутливого елемента та зміни колірного стану його поверхні до та після впливу досліджуваної речовини. Колірний стан задається величинами R, G, B складових світла, відбитого від тонкої плівки.

Перспективним напрямком розвитку колориметрії є використання фоточутливих ПЗЗ матриць, зокрема у веб-камерах. Істотною перевагою такого рішення є можливість одночасного спостереження за всією чутливою поверхнею сенсора чи багатьма її окремими частинами. За допомогою безпровідних веб-камер можна створювати системи дистанційного багатоканального моніторингу забруднення оточуючого середовища на промислових об’єктах.

Оптоелектронна колориметрична установка складається з інжекційної герметичної вимірювальної кювети, де містяться досліджувані зразки композитних плівок, кільцевого світлодіодного освітлювача як джерела білого

світла, мініатюрної веб-камери як приймача відбитого від чутливої поверхні світла та персонального комп’ютера [63].

Отримані дані у вигляді RGB характеристик (значень RGB складових відбитого світла) обробляються на комп’ютері за допомогою спеціального програмного забезпечення. Керуюча програма обробляє фотознімки зразка, отримані з веб-камери, та видає результат у вигляді трьох кольорових кутових R, G, B компонент. Для розрахунку відгуку колориметричного сенсора застосовують так званий фазовий метод обробки колірного зображення зразка, який дозволяє визначати кутове положення вектора кольору в тривимірному RGB-просторі.

Характерний приклад колориметричного фотосенсора показано на рис. 1.1, а його спектральні характеристики та програмне забезпечення аналізу результатів вимірювання – на рис. 1.2.

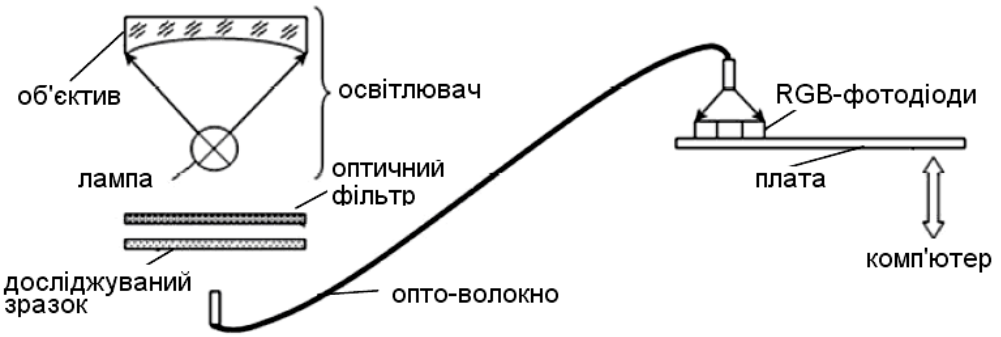
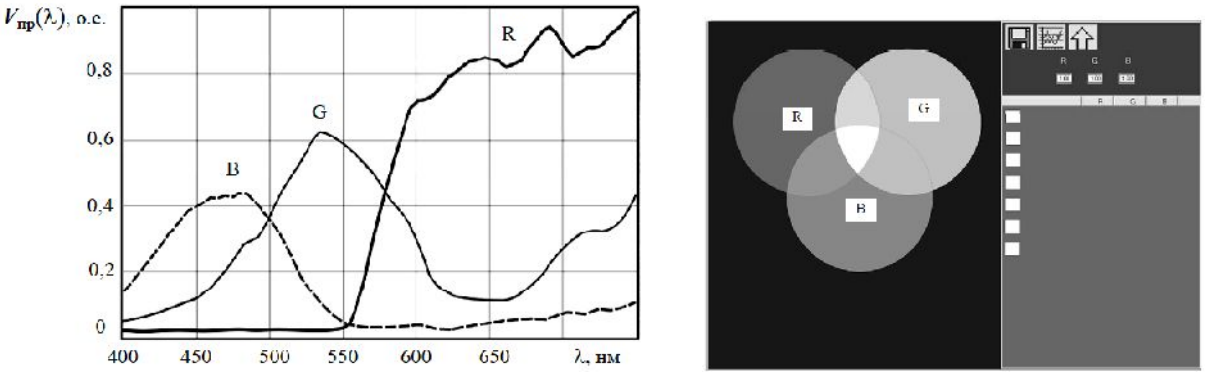



Рис. 1.1. Структурна схема колориметричного фотосенсора [22]

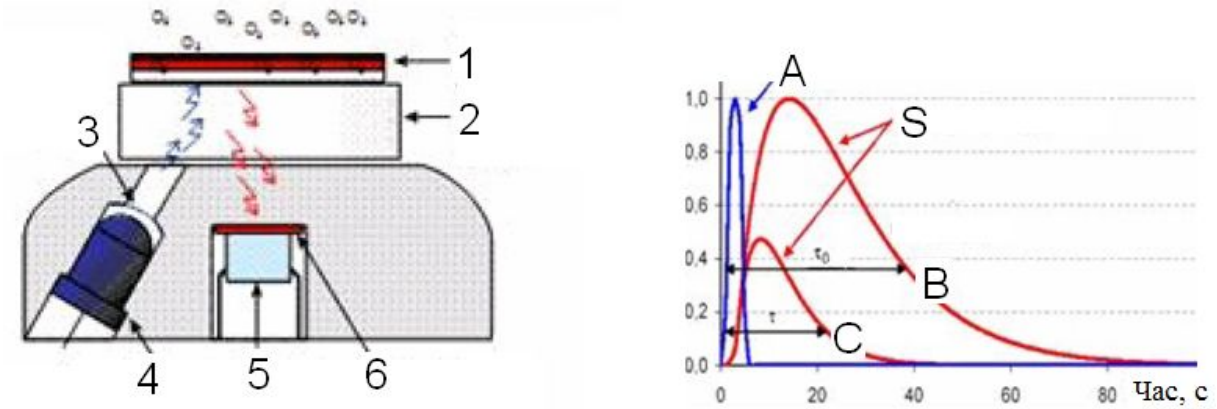



а) б)

Рис. 1.2. Спектральні характеристики (а) та програмне забезпечення (б) колориметричного фотосенсора [22]

В основі функціонування оптичних сенсорів кисню найчастіше лежить явище гасіння люмінесценції люмінофора молекулами кисню. Це явище отримало назву "dynamic fluorescence quenching" - гасіння динамічної флуоресценції [94]. Сучасні кисневі сенсори типу LDO (Luminescence Dissolved Oxygen) базуються на вимірюванні інтервалу часу вищезгаданої флуоресценції. Інтенсивність флуоресценції описується алгоритмом Штерн-Волмер.

Для прикладу, на рис. 1.3, а наведено конструкцію головки LDO сенсора кисню 4500 фірми AANDERAA Data Instruments, де: 1 – чутлива плівка, 2 – оптичне вікно, 3 – синій фільтр, 4 – синій світлодіод, 5 – фотодіод, 6 – червоний фотофільтр. Синій світлодіод опромінює люмінофор, який починає випромінювати в червоній області спектра. Під дією молекул кисню інтенсивність свічення люмінофора зменшується. Характерні форми сигналів у таких сенсорах наведено на рис. 1.3, б, де: A – імпульс збудження люмінофора, S – імпульси люмінесцентного свічення без присутності (B) та за присутності (C) кисню.




а) б)

Рис. 1.3. Структура (а) та форма сигналів (б) оптичного сенсора кисню [94]

Для реалізації біосенсорів, як це показано на рис. 1.4, використовують рецепторний шар, який взаємодіє з досліджуваною речовиною. Детектування міжмолекулярної взаємодії, ґрунтується переважно на реєстрації зміни показника заломлення середовища при утворенні комплексу білка, іммобілізованого на резонансному шарі. Використовують явище

плазмонного резонансу [18].

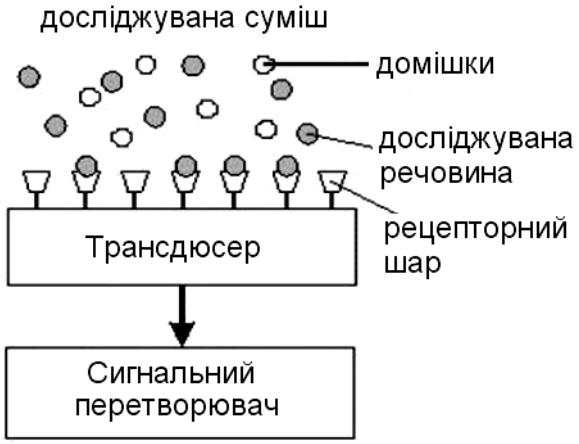
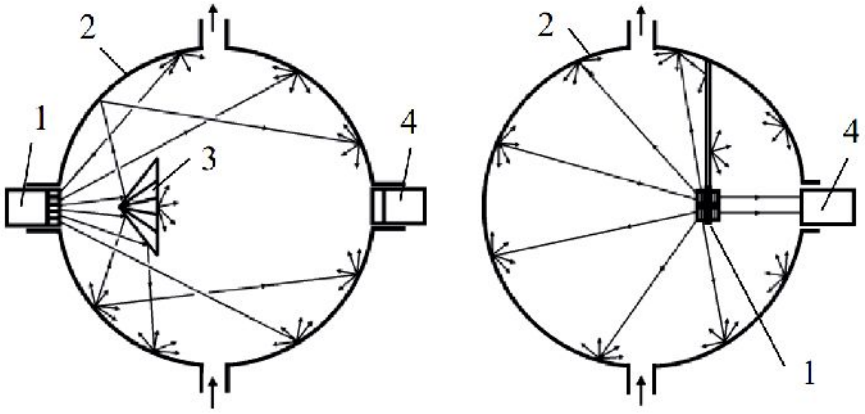



Рис. 1.4. Структура оптичного біосенсора [18]

Для мінімізації впливу стороннього світла оптичні сенсори здебільшого реалізують із використанням затемнених камер, приклад яких наведено на рис. 1.5 [14], де: 1 – джерело випромінювання, 2 – сфера з внутрішньою дифузійно розсіювальною поверхнею, 3 – світловідбивний екран, 4 – фотоприймач.




а) б)

Рис. 1.5. Конструкції оптичних сенсорів газу із затемненою камерою [14]

Однак в розглянутих оптичних сенсорах не розглянуті питання, які відносятьсядо завадостійкості від стороннього оптичного випромінювання та електромагнітного. Хоча в ряді існуючих оптичних сенсорів питання завадостійкостй від зовнішньогооптичного випромінювання вирішується шляхом створення закритих систем.

## 1.3 Рідкокристалічні оптичні сенсори

Одним із перспективних активних середовищ сенсорів є рідкі кристали. Класифікація сенсорів на основі РК наведена на рис.1.6. [73].

Оскільки рідкі кристали є рідиною, застосування їх у якості оптично активного середовища сенсорів вимагає використання обмежувальних поверхонь для запобігання їх витіканню. У табл.1 наведено варіанти обмежувальних поверхонь та галузі їх застосування.

Для візуалізації теплових полів, електромагнітних випромінювань, акустичних і НВЧ-полів, детектування малих кількостей пари хімічних речовин в атмосфері часто застосовуються холестеричні рідкі кристали. Найбільшого поширення набула індикація температур і візуалізація теплових полів, яка застосовується в медичній діагностиці, матеріалознавстві, електроніці, машинобудуванні й аеродинамічних випробуваннях. ХРК дають змогу одержувати кольорове панорамне (двовимірне) зображення температурного поля досліджуваної поверхні, при цьому спотворення поля температур переважно вказує на наявність неоднорідностей у матеріалі чи дефектів у вигляді тріщин, раковин і включень. Вони уможливлюють візуалізацію дефектів за аномальним тепловиділенням. В основі термографічного методу контролю лежить аномально великий термооптичний ефект у ХРК. Він пов’язаний з деформацією холестеричної спіралі в тепловому полі, тобто із залежністю її кроку від температури [74].

Завдяки закрученій структурі ХРК виникає решітка з періодом, що має порядок світлової хвилі. Тому світло взаємодіє з нею як із дифракційними ґратками. За способом вивчення теплового поля за допомогою ХРК термографія ділиться на контактну та дистанційну. Під час реєстрації нестаціонарного поля температур необхідно враховувати, що стала часу ХРК термоіндикаторів становить 0,1–0,3 с.

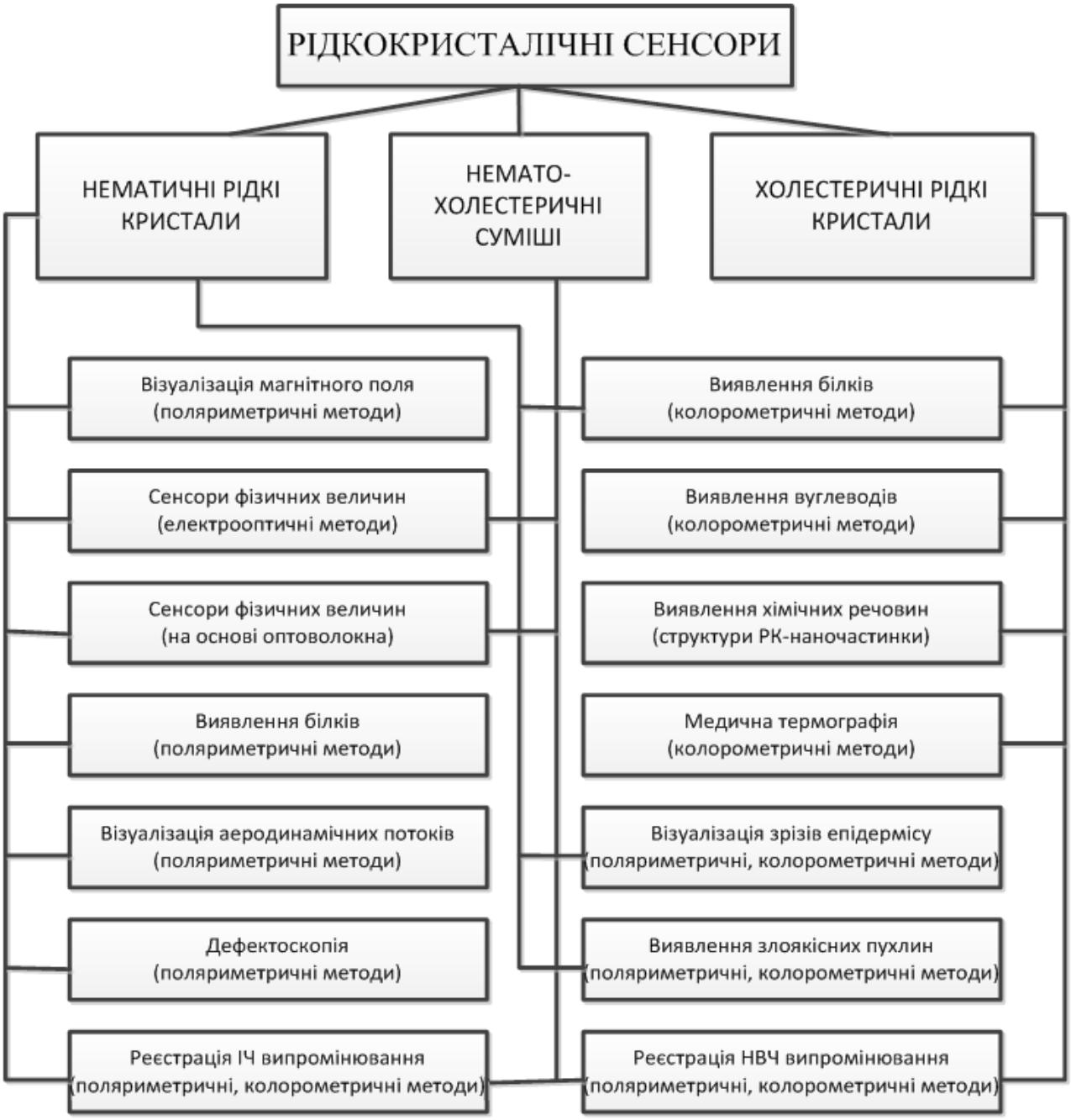



Рис. 1.6.Класифікація застосування рідкокристалічних сенсорів

Враховуючи високу чутливість зорового сприйняття в жовто-зеленій частині видимого спектра, точність вимірювання температур за допомогою ХРК може досягати ±0,2–0,3 °С. Точність вимірювань можна підвищити за рахунок використання вузькосмугових світлофільтрів, що дають змогу одержувати під час реєстрації ізотерми у вигляді ізотермічних ліній. Чим вужчий температурний діапазон використаної ХРК композиції, тим вища енергетична та просторова роздільна здатність методу.

Таблиця 1.1.

Галузі застосування РК сенсорів

| Галузь застосування | Вид базової структури сенсора | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | необмежений шар на досліджуваній поверхні | необмежений шар на функціалізованій поверхні | комірка типу сандвіч | РК в пористих матрицях | Полімер-диспергові РК (PDLC) |
| дефектоскопія | + | | | | |
| термографія | | | | | + |
| вимірювання фізичних величин | | | + | | + |
| виявлення шкідливих речовин | | | | + | + |
| виявлення біологічних об’єктів | + | + | | | |

Поєднання рідких кристалів зі світловодами уможливило створення багатофункціональних сенсорів для реєстрації тиску, температури, вологості, хімічного складу речовини, електричних або магнітних полів та інших фізичних величин [75]. Так, конструкція [75] являє собою багатофункціональний сенсор з використанням нетермочутливих волоконних світловодів (ВС), призначений для визначення тиску, температури, електричного, магнітного полів.

Моніторинг тиску можна здійснювати за допомогою світловодів із керованим подвійним променезаломленням, утвореним внаслідок введення рідкокристалічного матеріалу до внутрішньої порожнини витравленого ВС [76,77,78]. Внаслідок цього утворюється анізотропна структура ВС, яка складається з рідкокристалічної серцевини, оточеної скляною оболонкою.

Іншим випадком може бути введення рідкого кристала до порожнини, витравленої в оболонці, тобто у світловод з двозаломленнням типу side-hole. Впорядковані молекули рідкокристалічної серцевини змінюють своє положення внаслідок зовнішнього впливу. В цьому разі отримано ВС з двозаломленнням, яке керується зовнішнім впливом; причому, двозаломлення, індуковане в рідкокристалічному ВС, значно перевищує аналогічний показник у ВС з кварцовим склом.

Якщо в такому волокні видалити фрагмент оболонки, оголивши серцевину з показником заломлення $n_1$, і в це місце ввести інше середовище з показником заломлення $n_2$, то за умови $n_1 > n_2$ відбуватиметься повне внутрішнє відбивання, але загасаюче внаслідок зміни показника заломлення абсорбенту під впливом зовнішнього поля. Аналіз оптичних схем електрооптичних комірок показує, що найдоцільнішою є гомеотропна орієнтація молекул РК у плоскопаралельній комірці (за відсутності електричного поля молекули орієнтуються паралельно до площин комірки й осі ВС), через яку проходить оголений світловод. У початковому стані за відсутності поля ($U=0$) показник заломлення $n=n_{\perp}$. Поворот молекул рідкого кристала на кут $\alpha$ під дією зовнішнього поля призводить до збільшення показника заломлення згідно з формулою:

$$n = n_{\perp} n_{\parallel} / \sqrt{(n^2{}_{\parallel} \cos^2 \alpha + n_{\perp}{}^2 \sin^2 \alpha)} .$$

Конструкція сенсора на рідкокристалічній комірці з ВС показана в перерізі на рис. 1.7. Комірка завтовшки 25 мкм складається з двох скляних пластин 1 із нанесеними на них електродами 2.

По центру через рідкокристалічне середовище 3 прокладено ВС з оголеною серцевиною 5 в межах комірки, заповненої індукованим холестериком [79].

Отже, змінюючи напруженість прикладеного електричного поля, можна змінювати показник заломлення рідкокристалічного середовища, який є функцією координат, що, своєю чергою, призводить до порушення умов поширення світла серцевиною світловода, оскільки за відсутності поля

показник заломлення РК сумірний (або більший) з показником заломлення видаленої оболонки, а після накладання зовнішнього поля відбувається вихід променів зі світловода внаслідок зменшення $n_{PK}$.

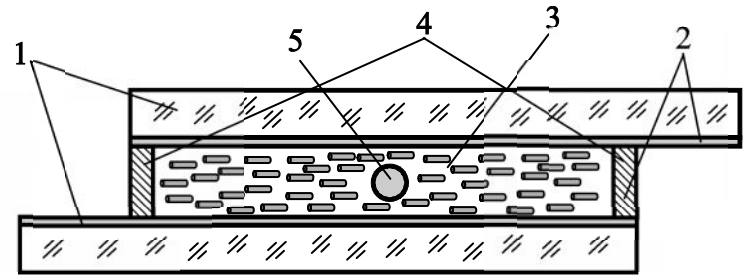



Рис.1.7. Рідкокристалічна комірка з оголеною серцевиною волоконного світловода: 1– скляні пластини; 2– прозорі електроди; 3 – молекули рідкого кристала; 4 – діелектричні прокладки; 5 – серцевина волоконного світловода [79]

У сумішах холестерилолеїлкарбонату і холестерилхлориду в планарній структурі при всебічному стисканні гідростатичним тиском Р спостерігається істотна зміна довжини хвилі селективного відбивання $\lambda_0$, яка відбувається лише при значеннях тиску понад 500 атм., при цьому значення $\lambda_0$ збільшуються, прямуючи до нескінченності, тобто крок спіралі росте. Факт зближення центрів мас молекул із підвищенням тиску $P$ в ХРК при цьому, здається, не має значення, інакше крок спіралі повинен буде зменшуватись.

У біомедицині використовуються сенсори механічних напружень на основі холестеричних полімерів. Такий сенсор містить шар холестеричного полімеру, колір якого, початково однорідний, залежить від характеристик селективного відбивання світла матеріалом і змінюється зі зміною механічних напружень, температури тощо. Просторовий розподіл цих параметрів ілюструється сукупністю ізохроматичних кривих. Для сенсора використовується шар каліброваної товщини, який не містить дефектів [80].

Принцип роботи сенсора зсуву на основі рідкокристалічного матеріалу як чутливого елемента сенсора зображено на рис. 1.8. На дослідну поверхню наносять шар холестеричного рідкого кристала аерозольним методом. Біле

світло, скероване променем 3 від джерела випромінювання 1 на шар рідкого кристала 2, відбивається від нього, утворюючи спектр 6, показаний на рис. 1.8 у вигляді чотирьох відбитих смуг 4, 5, 7, 10. Скануюча камера випромінювання аналізує відбитий від поверхні спектр. Внаслідок зсуву відбувається зміщення спектра випромінювання в тому чи іншому напрямку, як показано на рис. 1.8, *а* і *б* [81]. Напрямок і величина зсуву є визначальними факторами зміни спектральних характеристик РК шару. За допомогою калібрувальної кривої можна визначити ці дві величини.

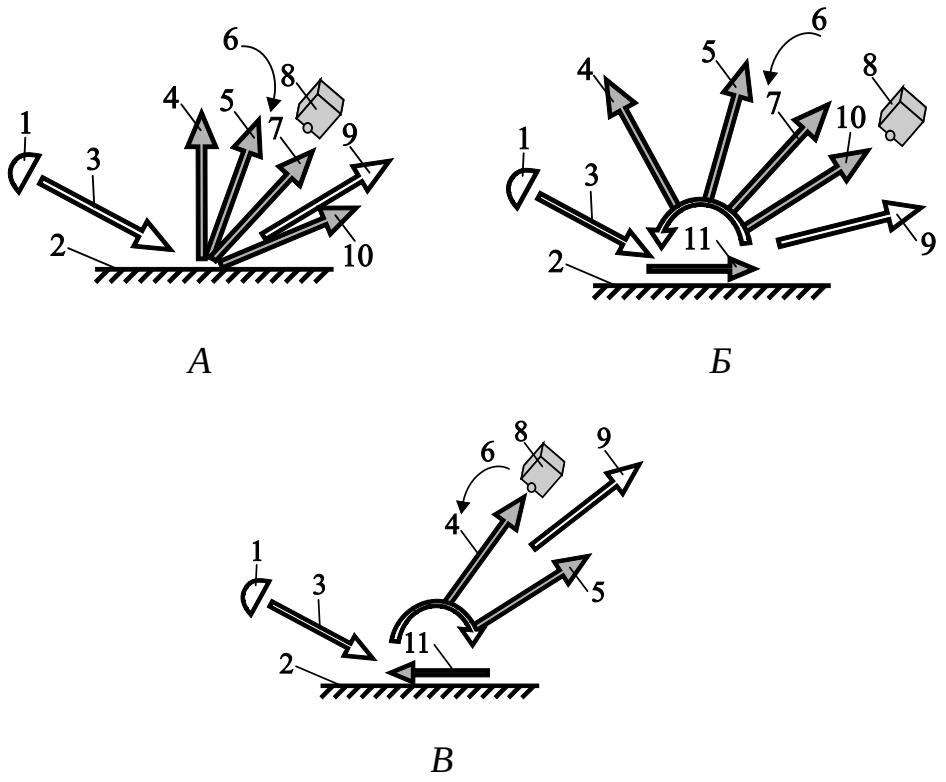



Рис.1.8. Принцип роботи сенсора зсуву на основі холестеричного рідкого кристала: 1 – джерело випромінювання; 2 – рідкокристалічний шар; 3 – біле світло; 4, 5, 7, 10 - червона, жовта, зелена та синя смуги відповідно; 6 – відбитий спектр; 8 – скануюча камера випромінювання; 11 – зсув [81]

Рідкокристалічний сенсор тиску схематично показано на рис. 1.9. До рідкокристалічної комірки, що складається зі скляної підкладки та гнучкої плівки з нанесеними на них прозорими електродами, між якими міститься шар нематичного рідкого кристала та діелектричні прокладки, подається напруга.

Під дією тиску гнучка прокладка прогинається, що, своєю чергою, приводить до зростання напруженості електричного поля та переорієнтації молекул, яку реєструє аналізатор.

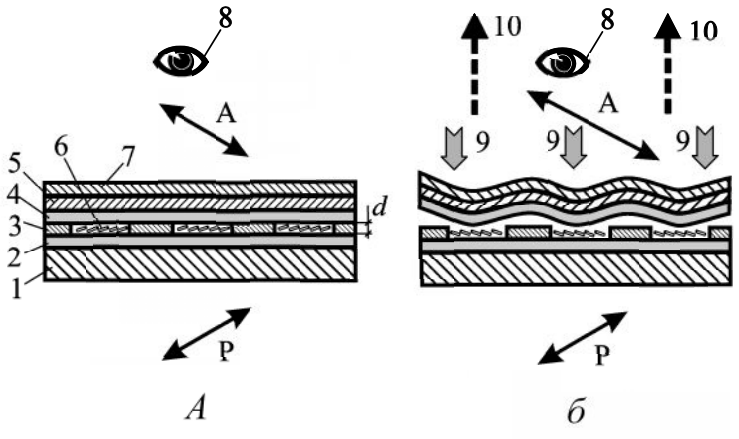



Рис.1.9. Конструкція та принцип роботи рідкокристалічного сенсора тиску: 1 – скляна підкладка; 2 , 4 – провідне покриття; 3 – діелектричні прокладки; 5,7 – гнучка плівка; 6 – рідкий кристал; 8 – спостерігач; 9 – тиск; 10 – світло, що пройшло[79]

Розглянемо конструкцію багатофункціонального сенсора (рис. 1.10). Перевага цієї конструкції над існуючими полягає у використанні планарного світловода. Це дає можливість створити стійку планарну розсіювальну текстуру холестеричного рідкого кристала [79-81].

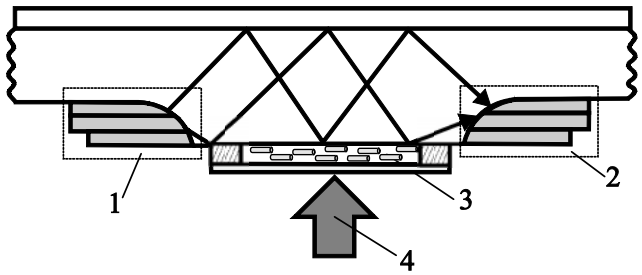



Рис.1.10. Конструкція сенсора на основі планарного хвилеводу та комірки з індукованим холестериком: 1 – джерело випромінювання; 2 – приймач випромінювання; 3– рідкокристалічна комірка; 4 – вплив зовнішнього фактора [79]

Відомо, що середній показник заломлення матеріалу становить 1,5. Для функціонування сенсора необхідно забезпечити виконання таких вимог:

сумірність довжини хвилі випромінювання, що поширюється ВС, та кроку індукованої спіралі, а саме, $P = \lambda/n$, початкову планарну текстуру та вибір матеріалу серцевини з показником заломлення меншим, ніж показник заломлення індукованого холестерика (для прикладу, напівпровідникова серцевина $ZnO/Al_2O_3$). При цьому, за відсутності впливу зовнішнього фактора мав би спостерігатися вихід променів на ділянці оточення серцевини рідким кристалом, однак наявність селективного відбивання повертає промінь назад у ВС. Зовнішній вплив призводить до зміни кроку індукованої спіралі, що, своєю чергою, порушує умову селективного відбивання $\lambda = n \cdot P$, внаслідок чого відбувається вихід світла за межі скловолокна. Зовнішнім фактором, що змінює крок індукованої спіралі $P$, може бути тиск, температура, вологість, НВЧ та електромагнітні поля тощо. Зміна інтенсивності випромінювання, поданого у світловод, є визначальним фактором реєстрації величини зовнішнього впливу. Для реєстрації тиску необхідно створити мембрану на місці покривної пластини.

Існує два способи реєстрації температури за допомогою сенсора з рідким кристалом у якості активного матеріалу.

Перший спосіб полягає в безпосередній зміні оптичних характеристик рідкокристалічних матеріалів, зокрема показника заломлення зі зміною температури. У цьому разі змінними параметрами є крок індукованої спіралі в немато-холестеричних сумішах та комплексний показник заломлення в нематичних матрицях.

Вимірювання кроку індукованої спіралі підтверджує можливість використання ефекту зміни кроку індукованої спіралі як інформаційного параметра сенсора [80]. Якщо джерело світла має довжину хвилі, сумірну з кроком індукованої спіралі, реєстрацію температури можна проводити за зміною оптичного пропускання системи світловод – рідкокристалічний матеріал.

Другий спосіб полягає у використанні напруги холестерико-нематичного переходу як параметра, що істотно залежить від температури [81].

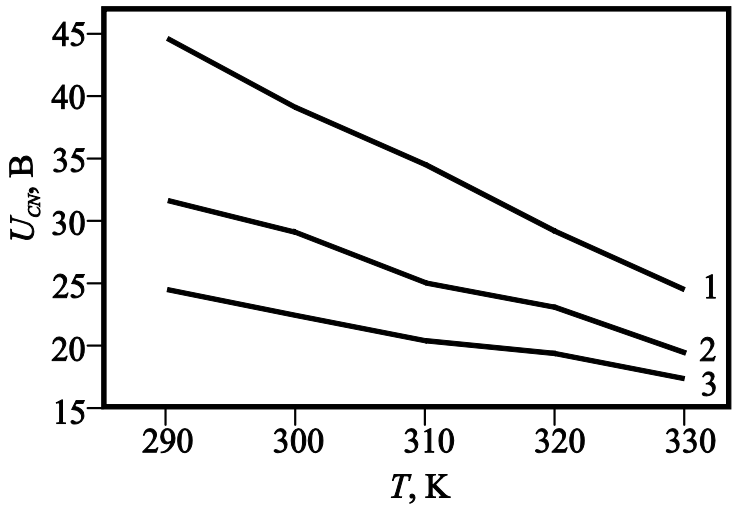



Рис.1.11. Температурні залежності величини $U_{cn}$ для холестерико-нематичних сумішей: 1 – СЖК-1+5% бороксан+1,2% ВІХН-3; 2 – СЖК-1+1,5% ВІХН-3; 3 – СЖК-1+2% ВІХН-3 [81]

Як видно з залежностей (рис.1.11), зростання температури призводить до значного зменшення величини $U_{CN}$. Найбільший перепад напруги (20 В) у діапазоні температур 290–330 К отримано для суміші з концентрацією ОАД ВІХН-3 1,2 % та 5 % бороксан. На основі цих результатів створено пороговий сенсор температури. Принцип дії такого сенсора базується на зміні прозорості РК комірки під дією температури при сталій напрузі. Так, якщо напруга на комірці становить 35 В (залежність 1), поріг спрацьовування такого сенсора припадає на температуру 310 К. Величина порогу спрацьовування задається значенням керуючої напруги. Фактично такий сенсор може реєструвати температури в діапазоні 270–340 К, а сама ширина діапазону визначається діапазоном існування мезофази оптично активного середовища.

Проведені експериментальні дослідження показують доцільність використання ефекту ХНП для створення порогових сенсорів внаслідок простоти конструкції та технології виготовлення в поєднанні з високою надійністю таких пристроїв.

Наведені вище результати показують можливість використання РК речовин як активного середовища сенсорів та індикаторів фізичних величин, у

яких як інформативний параметр використовують інтенсивність оптичного випромінювання. Однак такі сенсори не забезпечують високої точності вимірювань Для створення прецизійних сенсорів фізичних величин потрібно провести поглиблене дослідження впливу детектованих величин на такі параметри РК матеріалів як діелектрична анізотропія, константи пружності, крок надмолекулярної спіральної структури, в'язкість тощо.

На сьогодні рідкі кристали в оптичних сенсорах використовуються як чутливі елементи для реєстрації різноманітних речовин. Специфіка РК полягає в тому, що вони, з одного боку, є впорядкованою структурою, а з іншого – середовищем із винятково високою чутливістю до зміни цієї впорядкованості під впливом зовнішніх чинників, що через велику оптичну анізотропію середовища легко реєструється оптично. Вихідна структура РК може змінюватися дуже слабкими зовнішніми факторами різної природи: температурним, електричним, магнітним полями, випромінюванням із різною довжиною хвилі, міжмолекулярною взаємодією з підкладкою, механічними та хімічними чинниками, що призводять до зміни оптичних параметрів [82].

Тонкі плівки рідких кристалів добре поглинають гази та пару з оточуючого середовища. Адсорбуючись на поверхні, гази та пара істотно змінюють оптичні властивості плівок холестеричних рідких кристалів, насамперед їхнє селективне відбивання. Наприклад, спостерігалося, що поглинання газів, які виділяються з епоксидної смоли, що використовується для герметизації РК комірок з холестериками, призводить до повного зникнення селективного відбивання холестерилолеїл-карбонату [83,84]. Цікаві результати були одержані в перших якісних дослідах впливу пари органічних речовин на селективне відбивання в сумішах холестерилхлориду, холестерилпеларгонату та холестерилолеату різного складу. Дослідження такої потрійної системи показали, що пара полярних речовин зсуває максимум селективного відбивання в червону область спектра, а речовини неполярних розчинів – у синю. Із багатьох розчинників тільки пара гексану не впливає на спектр селективного відбивання.

Зсув довжини хвилі селективного відбивання залежить також від складу рідкокристалічної суміші. Так, після додавання до потрійного розчину холестерилхлорид-холестерилолеїлкарбонат-холестерилпеларгонату суміші 10 % холестерилолеілкарбонату та холестерилпеларгонату довжина селективного відбивання зміщується в короткохвильову область відповідно на 29 і 66 нм, а в разі додавання такої самої кількості холестерилхлориду – в довгохвильову область на 25 нм. Використовуючи стандартні спектрофотометри, можна легко визначати десяті та тисячні частки міліграма таких речовин, як ацетон або аміномеркаптан [85].

На рис.1.12, 1.13 (крива 1) показано спектр ЖК-ВИН9 з концентрацією хіральної домішки N-ариліденпохідні S-α-фенілетиламіну 12 %.

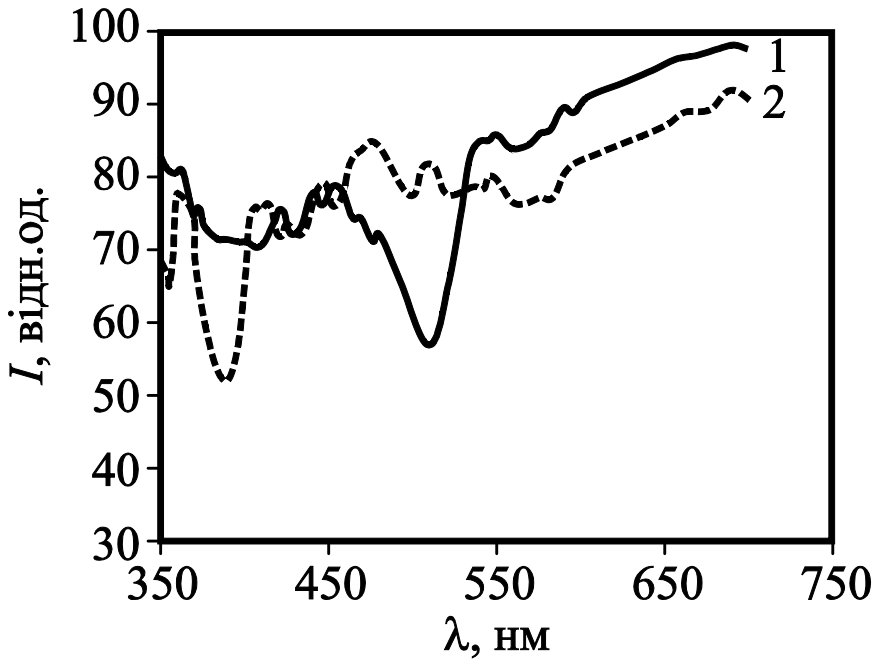



Рис.1.12. Спектр пропускання ЖК-ВИН9 з концентрацією хіральної домішки 12 % – 1. Спектр пропускання після перебування зразка в парі етанолу 2 хв – 2 [86]

На рис. 1.14 і 1.15 наведено схематичне зображення сенсорів речовин на основі холестеричного рідкого кристала.

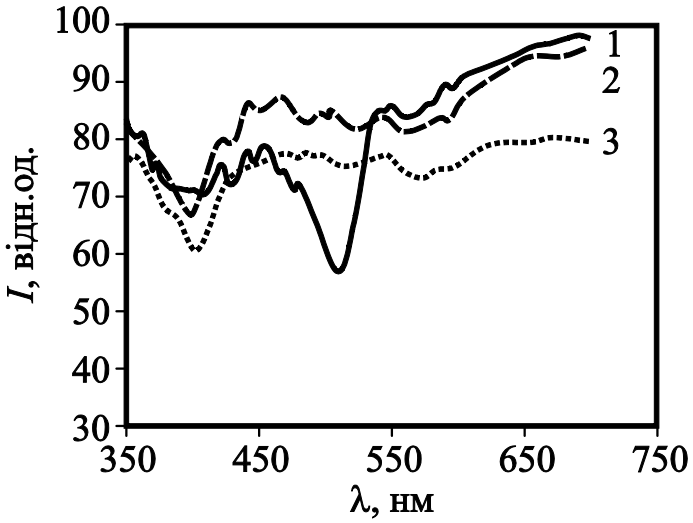



Рис.1.13 Спектр пропускання ЖК-ВИН9 з концентрацією хіральної домішки 12 % – 1. Спектр пропускання після перебування зразка в парі ацетону 2 хв – 2 і 5 хв – 3[86]

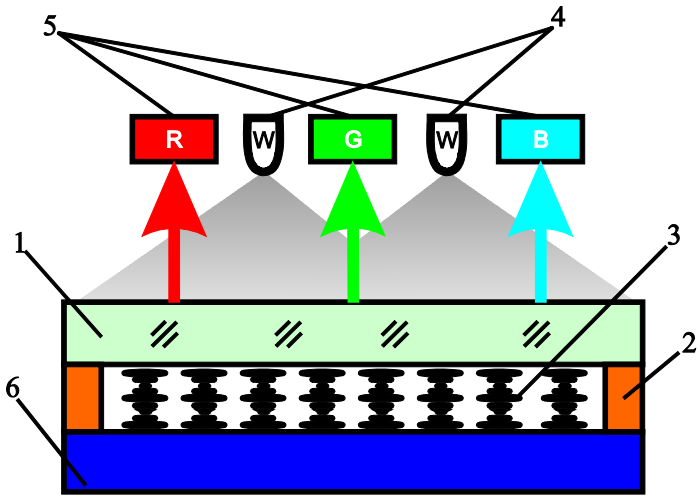



Рис.1.14. Схематичне зображення сенсора речовин на основі холестеричного рідкого кристала: 1 – скляні пластини; 2 – спейсер; 3 – холестеричний рідкий кристал; 4 – світлодіоди білого світла; 5 – RGB-фотодіоди (червоний-зелений-синій); 6 – пориста підкладка [87]

Після перебування зразка в парі органічних речовин протягом певного часу досліджувалися залежності спектральних характеристик зразків, що зазнавали впливу пари речовин.

Результати спектрів пропускання для зразків після дії на них пари етанолу показано на рис. 1.12 (крива 2). Як видно з рис. 1.12, після перебування

зразка в парі етанолу протягом 2 хвилин спостерігається дрейф фотонної забороненої зони (ФЗЗ) у блакитну область спектра На рис. 1.13 показано спектри пропускання для зразка, який зазнав впливу пари ацетону.

Після контактування зразка з парою ацетону спостерігаємо зміщення ФЗЗ в короткохвильову область на 115–125 мкм (рис.1.13). При цьому, збільшення часу перебування зразка в парі ацетону до 5 хв. приводить до зменшення коефіцієнта відбиття та знебарвлення зразка [86]. Молекулярна структура плівок ХРК істотно змінюється після дії на них невеликої кількості різних хімічних речовин, які перебувають як у газоподібному, так і в крапельно-рідкому станах. Це викликає зміну оптичних властивостей ХРК.

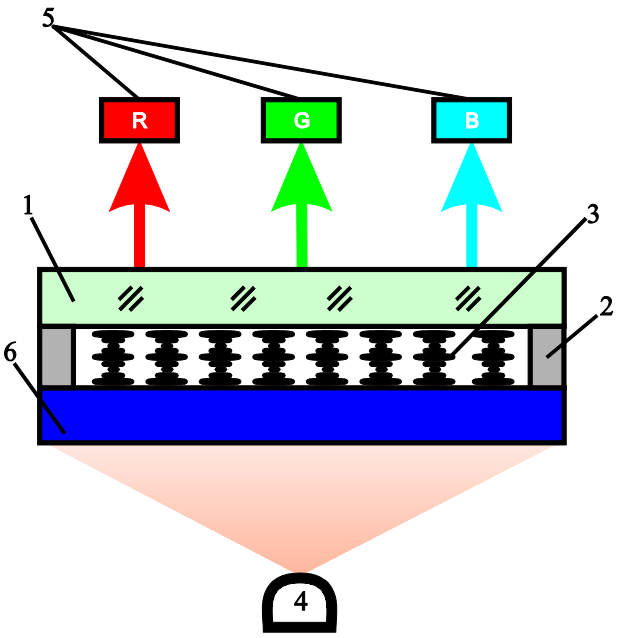



Рис.1.15. Схематичне зображення сенсора речовин на основі лазера на холестеричному рідкому кристалі: 1 – скляні пластини; 2 – спейсер; 3 – суміш холестеричного рідкого кристала з барвником; 4 – джерело накачки; 5 – RGB-фотодіоди (червоний-зелений-синій); 6 – пориста підкладка[87]

Адсорбція пари речовин приводить до зменшення констант пружності нематико-холестеричної суміші [86].

Це, своєю чергою, зумовлює збільшення закручувальної здатності оптично активної домішки і, відповідно, зменшення кроку холестеричної спіралі.

На рис. 1.16 показано температурні залежності величини кроку спіралі та показника заломлення ($\Delta n$). Оскільки ширина смуги відбивання холестерика пропорційна до $P\Delta n$, фотонна заборонена зона зменшується зі збільшенням температури. Час впливу речовин становив 20–40 с. Залежність від температури кроку ХРК, що зазнавали впливу пари речовин (ацетон, аміак, етанол), показано на рис. 1.17. Як видно з рис. 1.17, взаємодія зразка з парою ацетону чи етанолу призводить до зменшення кроку спіралі при постійній температурі, що супроводжується зміщенням ФЗЗ в короткохвильову область.

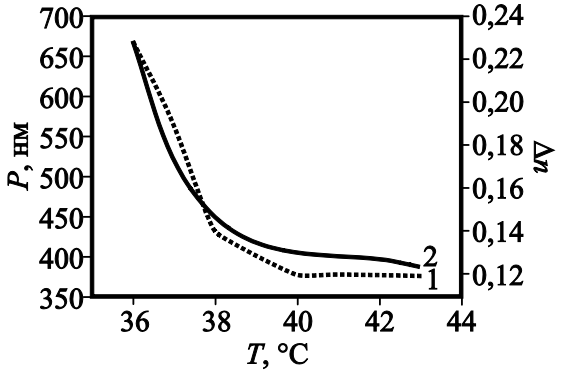



Рис.1.16. Залежність кроку спіралі– 1 та показниика заломлення – 2 від температури [88]

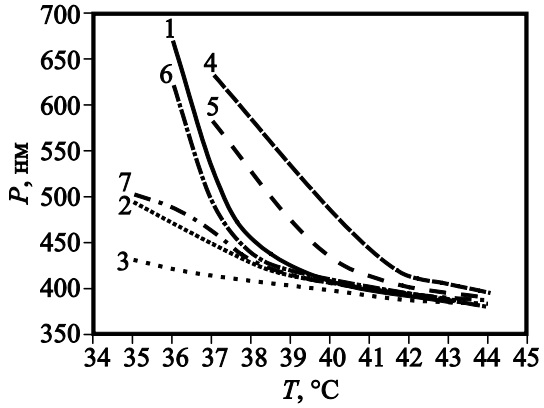



Рис.1.17. Залежність кроку спіралі від температури – 1 і при перебуванні зразка в парі деяких речовин: 2, 3 – ацетон; 4, 5 – аміак; 6, 7 – етанол [88]

Контактування зразка з парою аміаку призводить до зміщення ФЗЗ в довгохвильову область. Зі збільшенням температури для всіх зразків спостерігається зменшення кроку ХРК і звуження фотонної забороненої

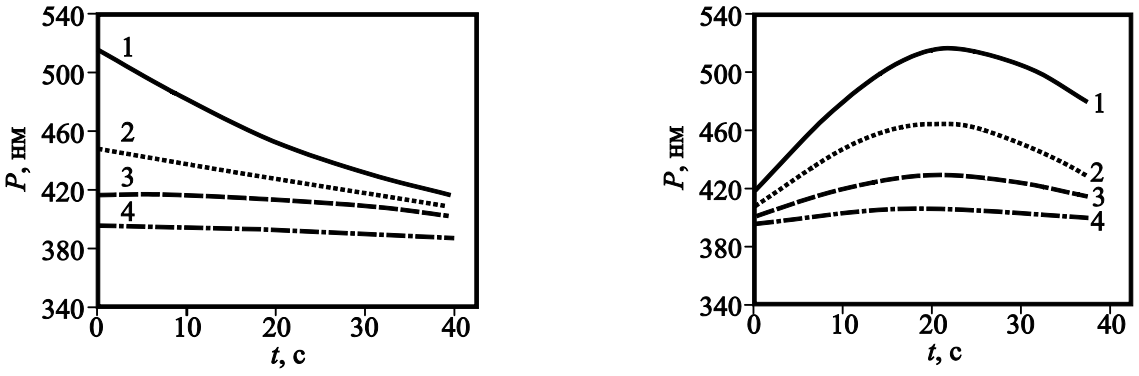
зони [87,88]. Отже, довжина хвилі лазерної генерації буде визначатися лише положенням ФЗЗ.

Часові характеристики впливу пари речовин на холестеричний зразок наведено на рис. 1.18. Як видно з рис. 1.18, збільшення часу контактування зразків із парою речовин переважно зумовлює зменшення кроку спіралі. Проте для пари аміаку перебування зразків у парі до 20 с викликає збільшення кроку спіралі, а подальше збільшення часу експозиції веде до зменшення кроку ХРК [89,90].

Для багаторазового використання сенсорів органічних речовин на базі запропонованого принципу дії доцільно передбачити два температурні режими роботи:

– робочий температурний режим, у якому температура середовища визначається переважно матеріалом сенсора та необхідним ступенем селективності його роботи;

– режим відновлення, значення температури в якому значно більше, ніж у робочому режимі, та визначається мінімально необхідним часом готовності приладу до наступного вимірювання.




*А* *Б*

Рис.1.18. Залежність кроку спіралі ХРК від часу перебування зразка в парі:

а – ацетону, і б – аміаку для різних температур: 1 – 37 °С;

2 – 38 °С;3 – 40 °С;4 – 42 °С [89]

Проведені дослідження дали змогу знайти закони зміни довжин хвиль селективного відбивання зі зміною концентрації адсорбованої пари. На

рис. 1.19 показано залежність кроку холестеричної спіралі від концентрації пари ацетону, етанолу й аміаку, які перебувають у контакті з холестеричним рідким кристалом. У всіх випадках знайдено лінійний зсув довжини хвилі селективного відбивання з ростом концентрації пари органічних речовин, причому цей зсув може бути як у короткохвильову, так і в довгохвильову область**.** Як видно з рис. 1.18, найбільша чутливість матеріалу спостерігається до пари аміаку $S$ = 1,14, тоді як для пари ацетону та етанолу $S$ = 0,31 і $S$ = 0,16 відповідно. Однак для малих концентрацій газів виявлено незначне зміщення кроку спіральної надмолекулярної структури при експозиції зразка 20 с.

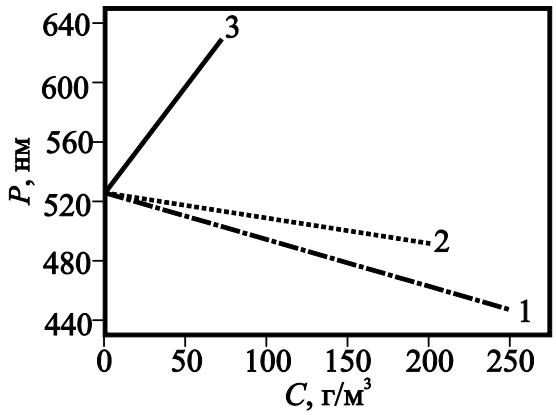



Рис.1.19. Залежність кроку спіралі від концентрації газів, які контактують із холестериком: 1 – ацетон; 2 – етанол; 3 – аміак. Час контактування зразка з парою речовин 20 с, температура 37 $^{o}$C[90]

Для збільшення чутливості сенсора під час моніторингу малих концентрацій газів у діапазоні граничнодопустимих концентрацій запропоновано збільшити час експозиції до 3 хв.

Зміна оптичного пропускання та кроку спіралі ХРК в газових середовищах різного типу – парі органічних розчинників (етанолу, ацетону), а також у газовому аміачному середовищі може бути зумовлена різними чинниками. Перш за все, це наявність фізико-хімічної взаємодії розташованих у поверхневому шарі функціональних груп ХРК з молекулами газів, що адсорбуються. При цьому типи взаємодії можуть бути різними, від слабких сил Ван-дер-Ваальса до водневих зв’язків, ймовірність утворення яких дуже висока

через наявність у структурі ХРК електронегативних атомів кисню та “донорних” властивостей газів, що адсорбуються. Адсорбційний характер такої взаємодії підтверджується як температурною, так і часовою залежністю кроку спіралі, виміряного в атмосфері досліджуваних газоподібних речовин. Як видно з рис. 1.19, з підвищенням температури вплив газів на крок спіралі стає все меншим, що зумовлюється підвищенням швидкості десорбції молекул етанолу, ацетону, аміаку з поверхні ХРК. Це приводить до зсуву адсорбційно-десорбційної рівноваги та повністю нівелює дію газів при температурах понад 42–43 °С. Процес десорбції газів повільніший ніж процес адсорбції та триває приблизно 20 хвилин для температури 37 °С. Однак тривалість десорбції істотно залежить від температури матеріалу сенсора, тому підвищення температури матеріалу може значно зменшити час релаксації. На підставі часової залежності кроку ХРК можна зауважити, що збільшення тривалості взаємодії РК з ацетоном чи етанолом приводить до зменшення кроку спіралі, тоді, як під дією аміаку крок спочатку частково зростає, проходячи через максимум, особливо виражений у разі адсорбції аміаку за температури 39 °С, і при тривалих експозиціях знову зменшується. Такий хід залежності підтверджує складний характер адсорбційно-десорбційної взаємодії газів із поверхнею ХРК. Ймовірно, що в разі адсорбції аміаку можливе утворення донорно-акцепторних комплексів із поверхневими функціональними групами ХРК, яке посилюється з часом і має протилежний вплив на крок спіралі ХРК. Однак характер утворених комплексів, на нашу думку, істотно залежатиме від концентрації абсорбованої речовини. При малих концентраціях існує велика ймовірність утворення комплексів, що складаються з абсорбованого аміаку та двох і більше молекул ХРК. Утворення такого асоціату з великими лінійними розмірами порівняно з окремою молекулою ХРК приводить до зростання кроку надмолекулярної структури. Подальше збільшення концентрації аміаку може привести до утворення більшої кількості комплексів з меншими лінійними розмірами, що на тлі зменшення пружних властивостей ХРК внаслідок

зростання концентрації розчинника приводить до зменшення кроку надмолекулярної спіральної структури.

Проведені нами дослідження показали, що вплив досліджуваних речовин на рідкокристалічні суміші призводить не лише до зміни кроку холестеричної спіралі, а й до температурного дрейфу фотонної забороненої зони. Дія різних речовин по-різному впливає на характер поведінки температурної ФЗЗ. Тому застосування для реєстрації речовин двох параметрів (крок ХРК і температура чутливого середовища) дає змогу підвищити селективність сенсорів на спіральних структурах. Отже, в разі застосування ХРК термоіндикаторів РТІ “П” як сенсорів необхідно використовувати робочі температури 36–40 °С, при цьому час експозиції вибирати індивідуально для кожного газу на підставі максимальної чутливості відгуку (зміни кроку спіралі).

Для багаторазового застосування сенсора необхідне забезпечення додаткового температурного режиму, відмінного від температурного режиму реєстрації. Така необхідність викликана значним зменшенням часу релаксації при збільшенні температури зразка до 45°. Наявність додаткового температурного режиму дає змогу істотно скоротити час вимірювання за рахунок зменшення підготовчого періоду. Робочі температури сенсора переважно визначаються типом ХРК матеріалу та органічних речовин, які потрібно реєструвати.

Встановлено, що взаємодія холестеричного рідкого кристала з парою досліджуваних речовин приводить до зміщення смуги селективного відбивання і, відповідно, до зміни частоти генерації лазера з розподіленим зворотним зв’язком. Отже, РЗЗ-лазер можна використовувати як сенсор шкідливих речовин. Розглянемо режим роботи сенсора шкідливих речовин на основі холестеричного рідкого кристала: рідкокристалічна комірка з холестеричним рідким кристалом освітлюється білим світлом світлодіодів, внаслідок ефекту селективного відбивання в напрямку фоточутливих елементів поширюється випромінювання, довжина хвилі якого безпосередньо пов’язана з кроком холестеричної спіралі. Максимуми спектра чутливості реєструючих фотодіодів

розташовані відповідно в синій, зеленій і червоній областях спектра. Тому величини відгуку фотодіодів дають змогу визначити довжину хвилі падаючого випромінювання, зміна якого несе інформацію про наявність шкідливих речовин.

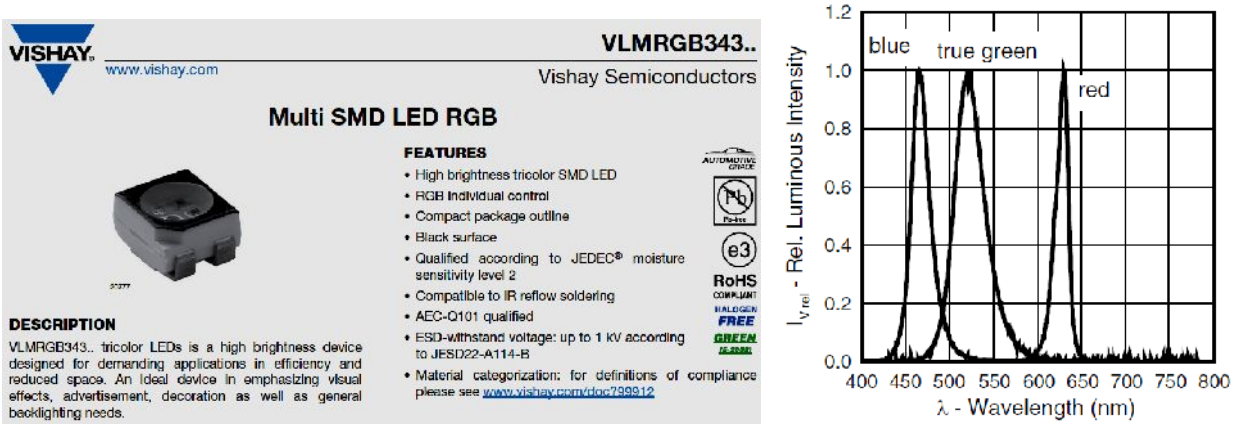
У сенсорі шкідливих речовин такий параметр РК, як величина кроку спіралі, безпосередньо залежить від концентрації пари шкідливих речовин. Зміна концентрації пари шкідливих речовин приводить до зміни кроку спіралі, що викликає зсув краю ФЗЗ і, як наслідок цих процесів, відбувається зміна довжини хвилі генерації. Для застосування хірального фотонного кристала як чутливого елемента сенсора шкідливих речовин необхідно помістити його між скляною підкладкою та селективною мембраною. Газ або летка речовина, дифундуючи через мембрану, адсорбується тонким рідкокристалічним шаром, що зумовлює зміну оптичних властивостей рідкого кристала. Селективність мембрани базується на її здатності пропускати чи не пропускати частинки відповідно до їхніх розмірів та інших властивостей. Мембрани – це плівки, пластини, трубки чи порожнисті нитки, виготовлені зі скла, металу, кераміки, полімерів. Існують такі види мембран: монолітні (суцільні, дифузійні), проникність яких пов’язана з дифузією газів або рідин в об’ємі мембрани (пори відсутні); пористі з системою наскрізних пор сталого розміру; асиметричні (двошарові, анізотропні), що складаються з пористого шару високої проникності (підкладки) та тонкого селективного шару – дрібнопористого чи монолітного (товщина його може дорівнювати майже 0,25% від загальної товщини мембрани).

Для монолітних мембран характерна дифузійна проникність, для пористих – фазова (тобто через пори проходить речовина у вигляді газоподібної чи рідкої фази). Монолітні мембрани одержують формуванням із розчинів (сухим методом) або розплавів полімерів, а також пресуванням полімерних матеріалів і металевих порошків.

## 1.4. Елементна база та сигнальні перетворювачі оптичних сенсорів

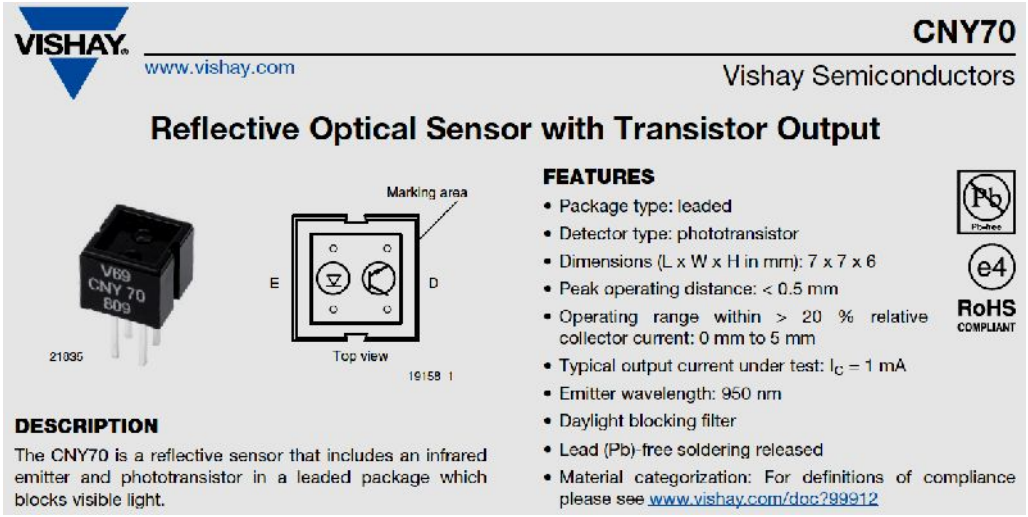
Для реалізації оптичних сенсорів провідними електронними компаніями світу серійно випускається широкий асортимент елементів – світло- та фотодіоди, фототранзистори, оптопари, оптичні волокона, пристрої на явищі плазмонного резонансу тощо. Це, зокрема, світло- та фотодіоди ІЧ випромінювання та електронні вузли на їх основі компанії Mid Infrared Optoelectronics (рис. 1.20), інтегровані RGB світлодіоди VLMRGB343 (рис. 1.21) та оптопари з транзисторним виходом CNY70 (рис. 1.22, рис. 1.23) компанії Vishay, пристрої оптоволоконної техніки промислової групи «Сенсор»[94], сенсор хімічного та біохімічного аналізу на явищі плазмонного резонансу Spreeta-R TSPR2KXY-R компанії Texas Instruments [95].


Рис. 1.20. Фрагмент веб-сторінки Mid Infrared Optoelectronics (а) та анотація фотодіода PD24-01-HS (б) [91]




а) б)

Рис. 1.21. Анотація інтегрованих RGB світлодіодів VLMRGB343 Vishay (а) та їхні спектральні характеристики (б) [92]



VISHAY
www.vishay.com
CNY70
Vishay Semiconductors

Reflective Optical Sensor with Transistor Output



FEATURES
- Package type: leaded
- Detector type: phototransistor
- Dimensions (L x W x H in mm): 7 x 7 x 6
- Peak operating distance: < 0.5 mm
- Operating range within > 20 % relative collector current: 0 mm to 5 mm
- Typical output current under test: $I_C$ = 1 mA
- Emitter wavelength: 950 nm
- Daylight blocking filter
- Lead (Pb)-free soldering released
- Material categorization: For definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912

Pb Pb-free
e4
RoHS COMPLIANT

DESCRIPTION
The CNY70 is a reflective sensor that includes an infrared emitter and phototransistor in a leaded package which blocks visible light.

Рис. 1.22. Анотація оптопари з транзисторним виходом CNY70 [93]

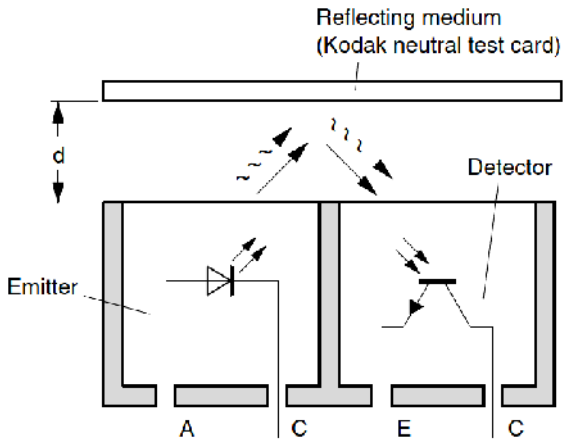



Рис. 1.23. Структура фотосенсора на парі світлодіод-фототранзистор [93]

Визначальну роль у процесі розроблення сигнальних перетворювачів сенсорних пристроїв відіграє елементна база – інтегральні схеми операційних підсилювачів, стабілізаторів, комутаторів, аналого-цифрових перетворювачів, керованих драйверів потужних світлодіодів тощо. Характерною ознакою сучасних інтегральних схем сигнального перетворення є низьке енергоспоживання та малі (до 3 В) напруги живлення. За останні роки найбільшого прогресу тут досягнуто структурно-схемними рішеннями вузлів аналогового перетворення сигналів із розширенням розмаху вхідних та вихідних напруг до величин напруг живлення – низьковольтних Rail-toRail операційних підсилювачів, комутаторів, аналого-цифрових перетворювачів [96-106].

Характерними прикладами сучасних інтегральних схем сигнального перетворення, інтегрованих вузлів і драйверів є: інтегральна схема драйвера світлодіодів TLC5971 Texas Instruments (рис. 1.24), інтегрований вузол ІЧ фотодіода та сигнального підсилювача AMP24-10 Mid Infrared Optoelectronics (рис. 1.25, рис. 1.26), вузли комп'ютерних і мережевих інтерфейсів SICK Sensor Intelligence (рис. 1.27).

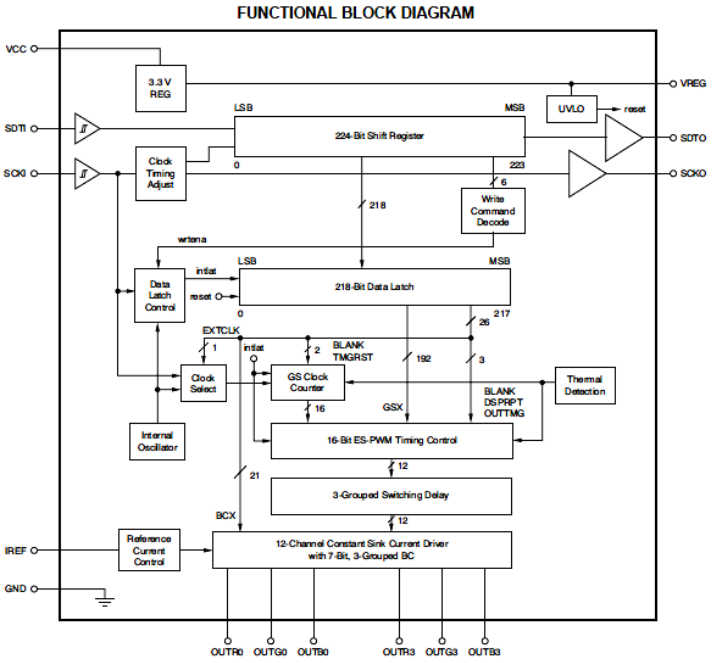



Рис. 1.24.Блок-схема драйвера світлодіодів TLC5971 [107]

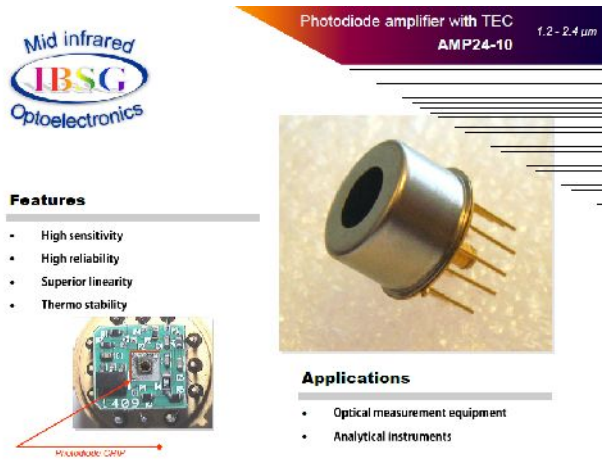
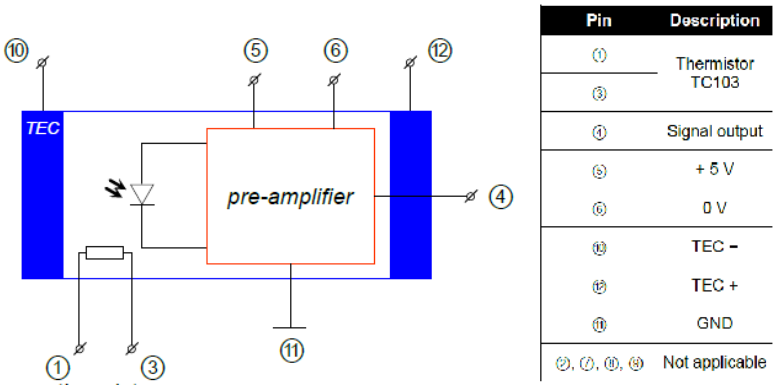



Рис. 1.25. Анотація інтегрованого вузла ІЧ фотодіода та сигнального підсилювача AMP24-10 [108]




| Pin | Description |
|---|---|
| ① | Thermistor TC103 |
| ③ | |
| ④ | Signal output |
| ⑤ | + 5 V |
| ⑥ | 0 V |
| ⑩ | TEC – |
| ⑫ | TEC + |
| ⑪ | GND |
| ②, ⑦, ⑨, ⑧ | Not applicable |

Рис. 1.26. Інтегрований вузол підсилювача AMP24-10 з фотодіодом TEC [108]


а) б)

Рис. 1.27. Фрагмент веб-сторінки SICK Sensor Intelligence (а) та USB фотосенсорний пристрій з ноутбуком (б) [109]

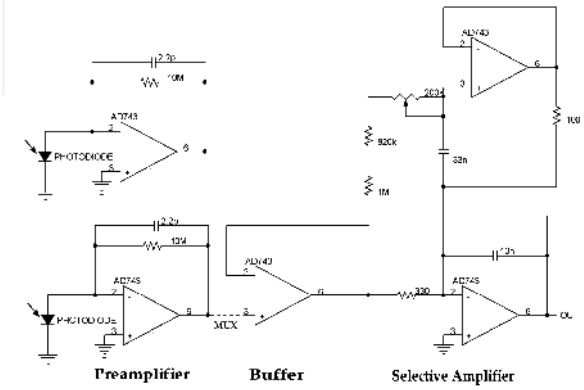
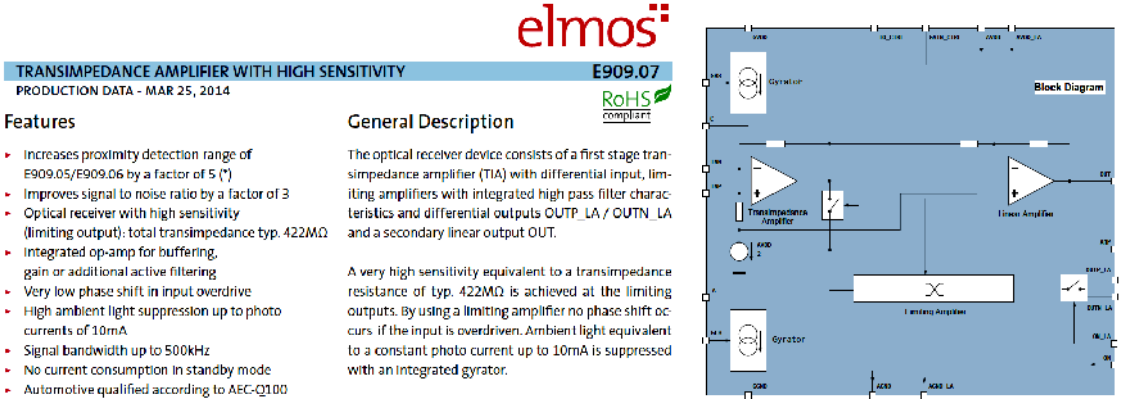



Рис. 1.28. Вхідні кола сигнального перетворювача фотосенсора [8]

Важливими з погляду вирішуваних у цій дисертаційній роботі проблем є сучасні рішення сигнального перетворення фотосенсорних пристроїв на основі трансімпедансних підсилювачів та конвертерів імпедансу [98-103]. На відміну від традиційних схем вхідних кіл, зокрема на основі операційних підсилювачів (рис. 1.28), схеми на основі трансімпедансних підсилювачів уможливлюють

значне зменшення паразитного впливу стороннього (неінформативного) світлового випромінювання (рис. 1.29, 1.30).


elmos

TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER WITH HIGH SENSITIVITY E909.07

PRODUCTION DATA - MAR 25, 2014

RoHS compliant

Features

- Increases proximity detection range of E909.05/E909.06 by a factor of 5 (*)
- Improves signal to noise ratio by a factor of 3
- Optical receiver with high sensitivity (limiting output): total transimpedance typ. 422MΩ
- Integrated op-amp for buffering, gain or additional active filtering
- Very low phase shift in input overdrive
- High ambient light suppression up to photo currents of 10mA
- Signal bandwidth up to 500kHz
- No current consumption in standby mode
- Automotive qualified according to AEC-Q100

General Description

The optical receiver device consists of a first stage transimpedance amplifier (TIA) with differential input, limiting amplifiers with integrated high pass filter characteristics and differential outputs OUTP_LA / OUTN_LA and a secondary linear output OUT.

A very high sensitivity equivalent to a transimpedance resistance of typ. 422MΩ is achieved at the limiting outputs. By using a limiting amplifier no phase shift occurs, if the input is overdriven. Ambient light equivalent to a constant photo current up to 10mA is suppressed with an integrated gyrator.

Block Diagram

Gyrator

Transimpedance Amplifier

Linear Amplifier

Limiting Amplifier

Gyrator

Рис. 1.29. Анотація трансімпедансного підсилювача E909.07 ELMOS [110]

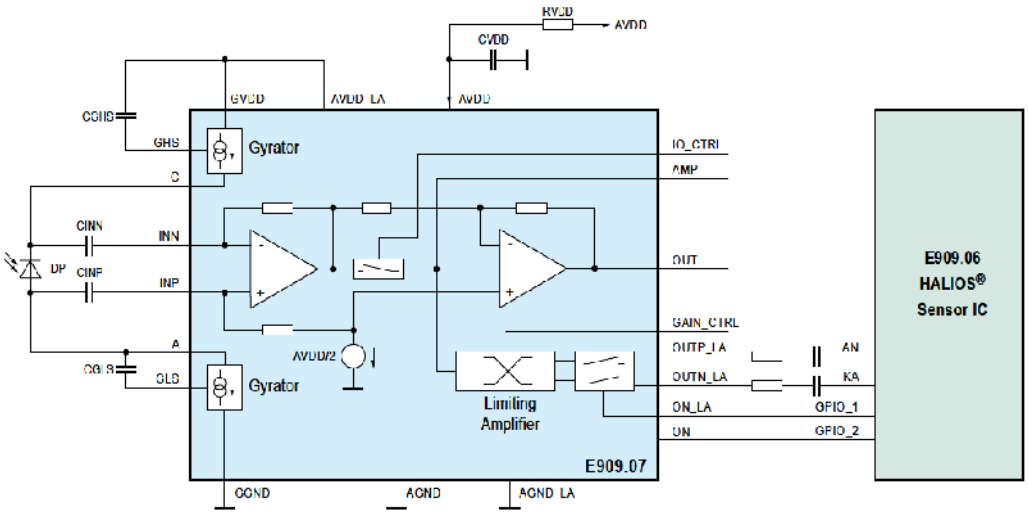



Рис. 1.30. Блок-схема та використання E909.07 ELMOS [110]

## Висновки до розділу I

1. Встановлено, що розроблення нових модифікованих рідкокристалічних структур, які служать активною речовиною первинних перетворювачів оптичних сенсорів, є актуальною задачею, оскільки напрямок у створенні оптичних сенсорів, інформативним сигналом яких є довжина хвилі, останнім часом привертає все більше уваги і має значні перспективи розвитку.

2. У сучасній сенсорній техніці, а саме, пристроях для дослідження хімічного складу газів, хімічних та біохімчних сполук, широке застосування знаходять оптичні методи формування інформативного сигналу.

3. Сучасний рівень технології та інтегральної схемотехніки дозволяє створювати оптичні сенсори зі спеціалізованими та здебільшого інтегрованими, вузлами сигнального перетворення. Значну роль у процесі розроблення сигнальних перетворювачів сенсорних пристроїв відігріє елементна база, яка включає в себе інтегральні схеми операційних підсилювачів, стабілізаторів, комутаторів, аналого-цифрових перетворювачів, керованих драйверів, потужних світлодіодів.

4. Конкретизована проблема та сформульована мета подальшого підвищення технічних характеристик сигнальних перетворювачів. Основною проблемою сигнального перетворення оптоелектронних сенсорних пристроїв є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Важливими з погляду вирішуваних у дисертаційній роботі проблем є сучасні рішення сигнального перетворення фотосенсорних пристроїв на основі трансімпедансних підсилювачів та конвертерів імпедансу. На відміну від традиційних схем вхідних кіл, зокрема на основі операційних підсилювачів , схеми на основі трансімпедансних підсилювачів уможливлюють значне зменшення паразитного впливу стороннього (неінформативного) світлового випромінювання.

# РОЗДІЛ 2 МОДИФІКАЦІЯ РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ

## 2.1. Аналіз, обґрунтування та вибір рідкокристалічних матеріалів для нових РК структур оптичних сенсорів

Для дослідження використовувались суміші: СЖК-1 з ефірами холестерину (концентрація ефірів – до 2%) і закручуюча домішка ВІХН-3.

Базовими речовинами для отримання немато-холестеричних сумішей було вибрано сильнополярний нематичний рідкий кристал типу 5 СВ (4-n-пентил-4-ціанобіфеніл) з молекулами завдовжки 19,22 Å з такими параметрами $\Delta\varepsilon$=+13,1 ( при 288 К); $\eta$ = 26 спз; $T_{пл.}$ = 295 К; $T_{пр}$ = 308,3 К, а також суміш гомологів ряду ціанобіфенілів та оксиціанобіфенілів типу РК-1289 з такими параметрами: $\Delta\varepsilon$=+9,8 ( при 288 К); $T_{пл.}$ = 253 К; $T_{пр}$ = 355 К

Вибрані речовини характеризуються порівняно високою додатною діелектричною анізотропією, що зумовлює невисокі порогові напруги, водночас відсутність у цих речовинах смектичної фази істотно впливає на стабільність робочих характеристик сумішей, що використовуються в активному середовищі первинного перетворювача.

Для отримання спіральної структури до нематичного рідкого кристалу вводили оптично активну домішку (ОАД): хіральну домішку (ХД) ХДН-1 та СВ15 у відповідних вагових концентраціях. Створення на їх основі РК композицій здійснювали нагріванням та перемішуванням у термостаті до температури 330 К, що є дещо вищою за температуру просвітлення нематичної матриці. Виявлено, що гомонізація проходила при проведенні процесу впродовж 46 годин з періодичним перемішуванням зразків.

Для дослідження отримано немато-холестеричні суміші на основі названих вище нематичних матриць із відсотковим вмістом ЇДН-1 та СВ15 від 1,97 % до 6,04 %.

5 СВ (98,03 %) + ХДН-1 (1,97 %); РК-1289 (98,03 %) + ХДН-1 (1,97 %);РК-1289 (98,00 %) + СВ15 (2,00 %); 5 СВ (96,36 %) + ХДН-1

(3,64 %);РК-1289 (96,36 %) + ХДН-1 (3,64 %);РК-1289 (96,36 %) + СВ15 (3,64 %); 5 СВ (95 %) + ХДН-1 (5 %); 1289 (95 %) + ХДН-1 (5 %); 1289 (95 %) + СВ15 (5 %); 5 СВ (93,96 %) + ХДН-1 (6,04 %); 1289 (93,96 %) + ХДН-1 (6,04 %);РК-1289 (93,96 %) + СВ15 (6,04 %)

Дослідження електрооптичних характеристик ХНП проводились у технологічних комірках типу «сандвіч». Товщина міжелектродного проміжку становила 25-100 мкм.

Планарна початкова орієнтація зразків досягалася за рахунок попереднього натирання підкладок комірки з прозорими електродами ворсистою тканиною в напрямку, паралельному до довшої сторони комірки, після збирання комірки через неї прокачувалися в тому самому напрямку хлороформ та ацетон. Визначення електрооптичних і часових параметрів [111] усіх синтезованих сумішей проводилося в одній експериментальній комірці. Це дало змогу звести до систематичної похибку експерименту, пов’язану з відмінністю між конструктивними параметрами та умовами початкової орієнтації різних комірок.

Концентрація сильнополярної компоненти в суміші становила 9,5; 22,3 та 30,5 ваг % і, відповідно, НРК-1, НРК-2, НРК-3. Добавка ефіру холестерину становила 0,2…2 ваг %.

НРК-1 –інтервал існування мезофази 291…357 К, $\Delta\varepsilon$=3,83.

НРК-2 –інтервал існування мезофази 291…357 К, $\Delta\varepsilon$=5,07.

Для дослідження впливу наночастинок на фізичні параметри холестеричних рідких кристалів [112] та індукованих холестеричних рідких кристалів було використано:

1. Нанотрубки нітриду алюмінію AlN. Довжина нанотрубок становила 10,2 нм, а діаметр – 4 нм. Нанотрубки AlN були синтезовані з використанням електричного вибуху алюмінієвої дротини в атмосфері аміаку.Пористий оксид алюмінію характеризується простотою отримання,можливістю керування розмірами пор та відстанню між ними шляхом вибору режиму травлення, що в свою чергу дозволяє його використовувати в якості

твердотілої матриці. Ці матриці характеризуються впорядкованою системою пор з поверхневою густиною $10^9$ -$10^{10}$ $см^{-2}$,завдяки чому вони мають високу адсорбційну здатність.

2. Дрібнозернистий магнетит- $Fe_3O_4$ . Середній розмір зерен становить 7,5 нм (розміри зерен розраховувались за даними рентгеноструктурного аналізу). Для стабілізації наночастинок використовували олеат натрію OlNa, при цьому розміри зерен збільшувалися до 8,9 нм. Магнетиту характерна висока чутливість до монооксиду вуглецю і тому наночастинки магнетиту взаємодіють з молекулами монооксиду вуглецю.

3. Наночастинки $Fe_2O_3$ сферичної форми діаметром 7,9 нм. Наночастинки магнетиту взаємодіють з молекулами монооксиду вуглецю.

Їх вибір обумовлений не тіільки використанням цієї сполуки у напівпровідникових сенсорах монооксиду вуглецю, але й ще певною аналогією із біологічним об’єктом, а саме складником крові – гемоглобіном, який містить хімічний елемент залізо – гем.

У якості холестеричних рідких кристалів використовували суміші рідких кристалів CLC2101L та CLC2103L (фірма Hoffmann-La Rosh).

## 2.2. Гістерезисні властивості холестерико-нематичного фазового переходу

Гістеризисні властивості холестерико-нематичного фазового переходу (ХНП) було покладено в основу створення оптичних сенсорів температури.

Для оцінювання гістерезисних властивостей холестерико-нематичного фазового переходу (ХНП) використовуємо величину *dU* [113,114]:

$$dU = \frac{\Delta U}{U_{cN}} = \frac{U_{CN} - U_{NC}}{U_{cN}}, \qquad (2.1)$$

де $U_{CN}$, $U_{NC}$ – порогові напруги прямого та оберненого переходів.

Електрооптичні характеристики ХНП залежать від ряду параметрів і відношення $d/P_0$, де $d$ – товщина шару РК; $P_0$ – недеформований крок спіралі;

$\gamma = \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{33}}}$; $K_{22}$ і $K_{33}$ – пружні константи; $\Delta\varepsilon$ – анізотропія діелектричної проникності.

У тонких зразках, коли $d/P_0 \approx 1$, необхідно враховувати вплив поверхні на порогові поля ХНП. Вплив поверхні на порогові поля враховується через густину поверхневої вільної енергії [115].

Густину вільної енергії для різних станів, які виникають під час ХНП, і перехід із плоскої текстури холестеричного рідкого кристала до гомеотропної текстури нематика можна врахувати у вигляді

$$F_C^{'} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \Delta\varepsilon E^2 + 2\frac{F_{SC}}{d}, \tag{2.2}$$

$$F_C = \frac{1}{4}\varepsilon_0 \Delta\varepsilon E^2 + 2\frac{F_{SC}}{d}, \tag{2.3}$$

$$F_N = \frac{1}{2}K_{22}\left(\frac{2\pi}{P_0}\right)^2 + 2\frac{F_{SN}}{d}, \tag{2.4}$$

де $F_{SC'}; F_{SC}; F_{SN}$ – густини поверхневої вільної енергії в станах $c'$; $c$; $N$ (рис. 2.1), де для планарних граничних умов величина $F_{sc'} = 0$.

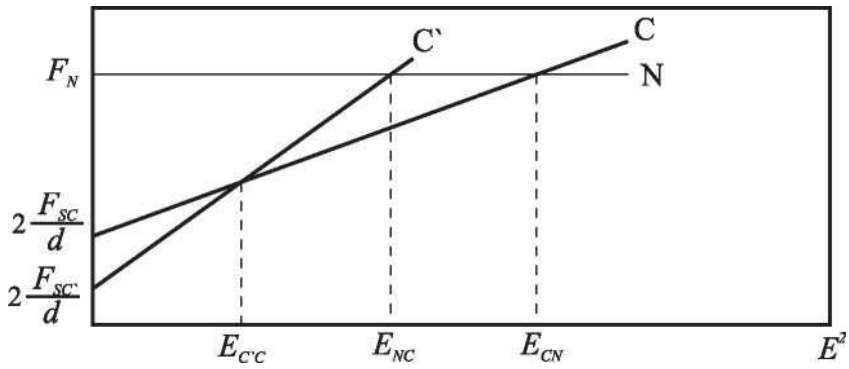



Рис.2.1. Густини поверхневої вільної енергії $F_{SC'}$, $F_{SC}$, $F_{SN}$ в станах $c'$; $c$; [116]

Використовуючи цей вираз, можна розрахувати порогові напруги полів для переходів з одного стану в інший, а саме, для порогового поля переходу холестерик-нематик $F_{cN}$ отримаємо

$$E_{CN} = 2\sqrt{2}\left[\left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \frac{K_{22}}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon} + \frac{F_{SN} - F_{SC}}{d\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}\right]^{1/2}. \tag{2.5}$$

Розрахунок величини порогового поля оберненого ХНП з наведених виразів є некоректним, тому використовуємо вираз Греубела [116] з урахуванням тільки густини поверхневої енергії нематичного стану $F_{SN}$. За умови, що $2K_{22} > \frac{P_0}{d} K_{33}$, ми отримаємо

$$E_{NC} = 2\sqrt{2}\left[\left(\frac{\pi}{d}\right)^2\left(4K_{22} - K_{33}\frac{P_0}{d}\right)/\varepsilon_0\Delta\varepsilon K_{33} + \frac{4F_{SN}}{\varepsilon_0\Delta\varepsilon d}\right]^{1/2}. \quad (2.6)$$

Переходячи з $E_{cN}$ до $U_{cN}$ і підставивши цей вираз в (2.1), маємо

$$dU = 1 - \frac{1}{2\sqrt{2}}\sqrt{\frac{\pi^2 K_{22}\left(\frac{4\gamma^2 d}{P_o} - \frac{1}{\gamma^2 d}\right) + 4F_{SN}}{\frac{\pi^2 K_{22} d}{P_o^2} + (F_{SN} - F_{SC})}}, \quad (2.7)$$

Отже, відносну величину гістерезисної петлі визначають відношенням $d/P_0$; $\gamma$ і величиною поверхневої енергії в різних станах. На рис. 2.2 наведено залежність $dU=f(d/P_0)$ для різних значень $\gamma$ і для фіксованих значень поверхневої енергії, розраховану згідно з (2.7). Якщо $\gamma=1$, величина відносної петлі гістерезису не залежить від $d/P_0$, при зменшенні величини $\gamma$ спостерігається сильна залежність $dU$ від $d/P_0$ в інтервалі $1<d/P_0<10$.

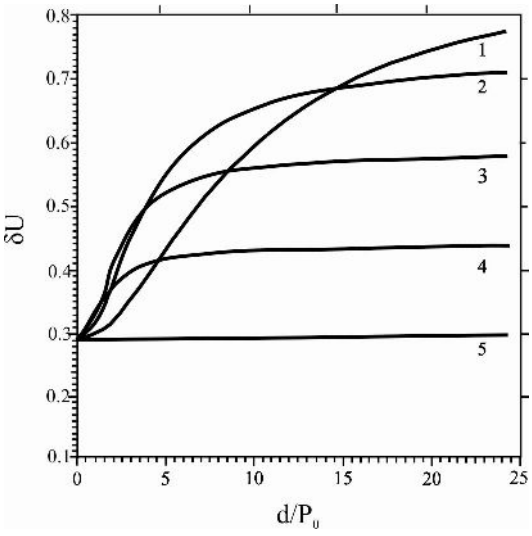



Рис. 2.2. Залежність $dU=f(d/P_0)$ для різних значень γ: γ=0,2 (1), 0,4(2), 0,6(3); 0,8(4); 1(5). $F_{SN}=4\cdot10^{-5}$ Дж/м$^2$; $F_{SC}=5\cdot10^{-6}$ Дж/м$^2$ [117]

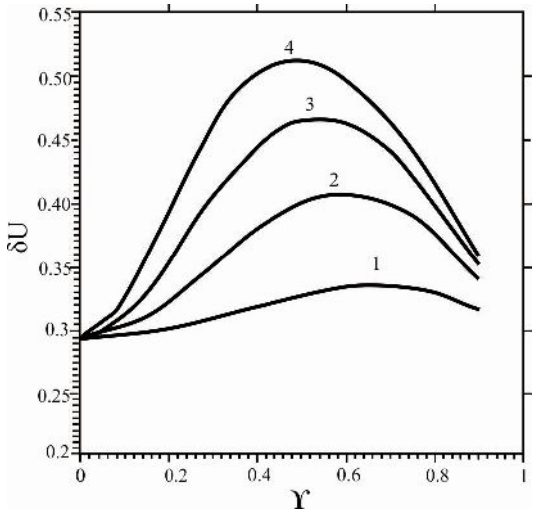



Рис.2.3. Залежність $dU=f(\gamma)$ для різних значень $d/P_0$: $d/P_0$=1(1), 2(2), 3(3), 4(4). $F_{SN}=4\cdot10^{-5}$ Дж/м$^2$; $F_{SC}=5\cdot10^{-6}$ Дж/м$^2$ [117]

Залежність $dU=f(\gamma)$ для різних значеннях $d/P_0$ наведена на рис. 2.3. Зі збільшенням відношення $d/P_0$ максимум залежності зміщується в напрямку менших значень $\gamma$, а відносна величина гістерезисної петлі зменшується слабше. І нарешті, змінюючи значення поверхневої енергії, можна в широких межах змінити відносну величину гістерезисної петлі від додатних до від'ємних значень.

На рис. 2.4 показано залежності величини dU від $d/P_0$ для різних сумішей. Для всіх досліджуваних сумішей в області $0,2<d/P_0<4,5$ спостерігається критична залежність відносної величини петлі від співвідношення $d/P_0$, а з подальшим збільшенням $d/P_0$ величина $dU$ залишається постійною. Отже, теорія задовільно описує експеримент.

Виявлено, що в діапазоні концентрації 0,2…2 ваг. % ефірів холестерину в нематичній матриці константи пружності $K_{22}$ і $K_{33}$ залишаються постійними. Величина їх відрізняється для різних ефірів.

Отже, наведені на рис. 2.4 залежності $dU=f(d/P_0)$ відповідають різним значенням $\gamma$, а саме, $\gamma_1< \gamma_2< \gamma_3$. Залежність $dU=f(d/P_0)$ для сумішей НРК-1 з добавками ефірів має такий самий характер [117].

Залежність $dU=f(d/P_0)$ для суміші НРК-2 з холестерилпропіонатом (1) лежить правіше ніж аналогічна залежність для суміші з холестерилпальмітатом. Якщо б для величини з трьох сумішей виконувалась умова $\gamma_1< \gamma_2< \gamma_3$, то експеримент підтверджував би висновки теорії. Експеримент показав, що для сумішей на основі НРК-3 з добавками ефірів холестерину в константах пружності та відповідно величинах $\gamma$ спостерігається обернена залежність. Значення $\gamma$ для сумішей з холестерилпропіонатом є меншим ніж для сумішей з холестерилпропіонатом і $\gamma_1> \gamma_2> \gamma_3$.

Ця особливість у поведінці констант пружності пов'язана зі структурною організацією суміші на основі сильно- та слабополярних сумішей, а саме, з виникненням флуктуаційних зародків смектичної фази в нематику.

Отже, експериментально встановлено, що величина критичного співвідношення $d/P_0$ зі збільшенням $\gamma$ зміщується в бік великих енергій. Це

заперечує висновкам прийнятої теоретичної моделі. З погляду фізики наявність критичної точки на залежності $dU=f(d/P_0)$ розділяє її на дві ділянки, на яких баланс двох енергій зміщується в різні боки. З одного боку, це вільна енергія рідкого кристала, а з іншого – поверхнева вільна енергія. Різке зростання $d\sigma U=f(d/P_0)$ на першій ділянці свідчить про те, що баланс енергії зміщується в бік вільної енергії поверхні. Ця енергія відіграє переважаючу роль. Після переходу через критичну точку визначальною є вільна енергія рідкого кристала. Ми використовували суміші з різною структурною впорядкованістю мезогенних молекул.

Молекули нематичних рідких кристалів, утворених полярними ціанопохідними, формують асоціати з антипаралельним пакуванням диполів [117]. Зі збільшенням концентрації слабополярних азоксисполук характер взаємодії змінюється в бік руйнування асоціатів, утворених молекулами ціанопохідних, хоча не виключається утворення асоціатів між молекулами ціанопохідних і молекулами азоксисполук. Тому критична точка для різних нематичних матриць з добавкою одного і того самого ефіру має різні значення $\gamma$. Так, для сумішей НРК-2 з холестерилпропіонатом критичній точці відповідає співвідношення $d/P_0=2$, а для суміші НРК-3, $d/P_0=4$. Якщо $d/P_0$ має більші значення ніж вказані величини, то впливом поверхні на гістерезисні властивості можна знехтувати.

На рис. 2.5 наведено залежність $dU=f(\gamma)$ при $d/P_0= const$. Ця залежність для визначених величин $\gamma$ має максимум, величина якого зростає під час переходу від сумішей НРК-1 до НРК-3.

Проаналізуємо експериментальні залежності величини петлі польового гістерезису від відношення $d/P_0$ і $\gamma$ для немато-холестеричних сумішей NLC-1, NLC-2, та NLC-3.

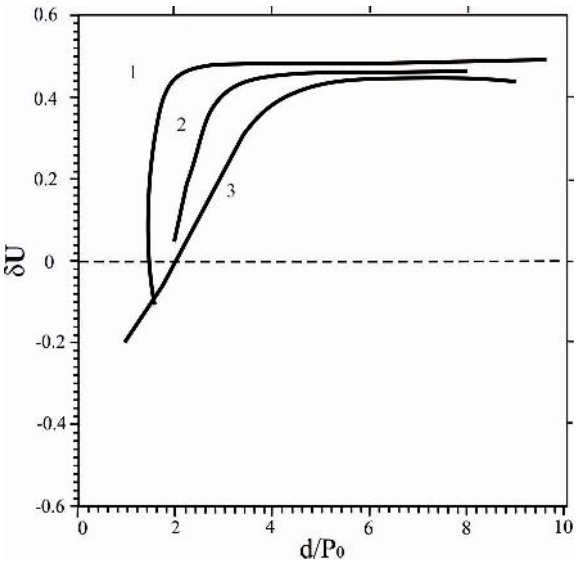



Рис.2.4 . Залежність величини петлі гістерезису від відношення $d/P_0$ для сумішей на основі нематичної матриці NLC-2, допованої ефірами холестерину: 1 – пропіонат; 2 – ундецилат; 3 – пальмітат [117]

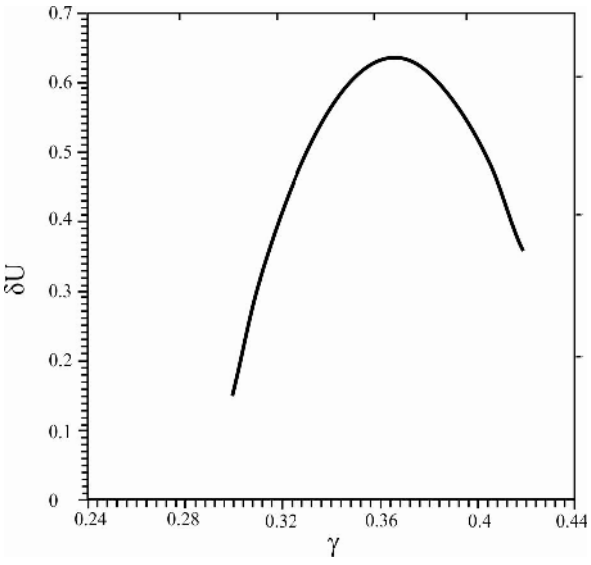



Рис.2.5 . Залежність $dU=f(\gamma)$ для сумішей на основі нематичної матриці NLC-3 для $d/P_0$ =2 та температури $T$=303 K [117]

Аналіз отриманих експериментальних результатів по залежності відносної величини петлі $dU$ від співвідношення $d/P_0$ і $\gamma = \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{33}}}$ з фіксованим значенням поверхневих енергій для немато-холестеричних сумішей з малим процентним вмістом оптично активної домішки дає можливість зробити такі висновки:

– для всіх сумішей величина $\sigma U$ різко зростає зі збільшенням $d/P_0$ до деякої критичної точки, положення якої залежить від значення $\gamma$;

– після критичної точки з подальшим збільшенням $d/P_0$ величина петлі гістерезису залишається сталою;

– залежність $dU$ від $\gamma$ має максимум, причому він залежить від структурної організації нематичної матриці.

Аналіз експериментальних даних температурної залежності відносної величини гістерезису для немато-холестеричних сумішей показує, що:

– для сумішей, матриця яких має смектичну фазу, спостерігається аномальне зростання $\sigma U$ при низьких температурах;

– для сумішей, у яких смектична фаза не спостерігається, відбувається монотонне зростання $\sigma U$ зі зниженням температури;

– змінюючи відсоткову концентрацію холестерину в суміші в інтервалі від 0,2…2 ваг%, можна змінити величину кроку та $dU$, константи пружності $K_{22}$ і $K_{33}$ залишаються постійними;

– для забезпечення стабільності $dU$ в широкому температурному інтервалі необхідно використовувати нематичні матриці з упорядкованою структурою, в якій смектична флуктуація незначна, особливо при низьких температурах.

## 2.3.Розроблення методики розрахунку констант пружності в нематико-холестеричних сумішах

Гістерезисні властивості (ХНП) визначаються константами пружності, тому необхідно звернутись до розрахунку тих констант.

Розрахунок констант пружності $K_{22}$ і $K_{33}$ проводиться в такий спосіб:

У випадку, коли дослідної суміші РК небагато і велика точність для визначення констант пружності непотрібна, в першому наближенні можна вважати, що за незначних змін концентрації ОАД (в межах 3%) значення констант пружності залишаються практично незмінними. Такий висновок підтверджується результатами дослідження впорядкованості структури ХРК методом малокутового рентгенівського розсіювання.

У цьому разі вирази для критичних електричних полів текстурного ($E_{C'C}$), фазового ($E_{CN}$) ХНП і зворотного нематико-холестеричного переходу ($E_{NC}$) з урахуванням поверхні взаємодії мають вигляд:

$$E_{C'C} = 2\sqrt{2}\left[\frac{F_{SN} - F_{SC'}}{d\varepsilon_0\Delta\varepsilon}\right]^{1/2} \qquad (2.8)$$

$$E_{CN} = 2\sqrt{2}\left[\left[\frac{\pi}{P_o}\right]^2\left(\frac{K_{22}}{\varepsilon_o \Delta\varepsilon}\right) + \frac{F_{SN} - F_{SC}}{d\varepsilon_o \Delta\varepsilon}\right]^{1/2} \quad (2.9)$$

$$E_{NC} = \left[\left(\frac{\pi}{P_0}\right)^2 \frac{\left(4K_{22} - K_{33}\frac{P_0}{d}\right)^2}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon K_{33}} + \frac{4F_{SN}}{d\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}\right]^{1/2} \quad (2.10)$$

де $d$ – товщина шару РК; $P_o$ – крок індукованої спіралі; $\Delta\varepsilon$ – анізотропія діелектричної проникності; $K_{22}$, $K_{33}$ – константи пружності Франка; $F_{SC}$‘, $F_{SN}$, $F_{SN}$ – густини поверхневої вільної енергії в планарному, конфокальному і нематичному станах.

Провівши експериментальні дослідження порогових напруг ХНП, кроку індукованої спіралі та діелектричних параметрів у діапазоні температур існування мезофази, можна визначити температурні залежності констант пружності НХП $K_{22}$ і $K_{33}$, а також оцінити вплив поверхні на електрооптичні параметри ХНП [118].

Температурна залежність констант пружності Франка $K_{22}$ і $K_{33}$ наведена в роботах [114,119]. Якщо не брати до уваги аномалії цих залежностей в передперехідних областях, то залежність $K_{22}$ і $K_{33}$ від температури має лінійний характер (рис.2.6, 2.7).

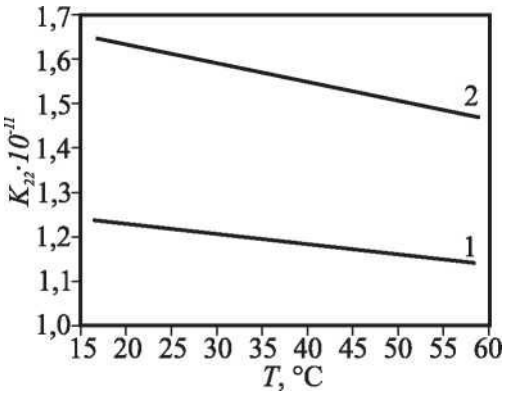



Рис.2.6.Температурна залежність констант пружності $K_{22}$ для сумішей: 1 – СЖК-654+15% холестерилолеату; 2 – СЖК-654+37% холестерилолеату

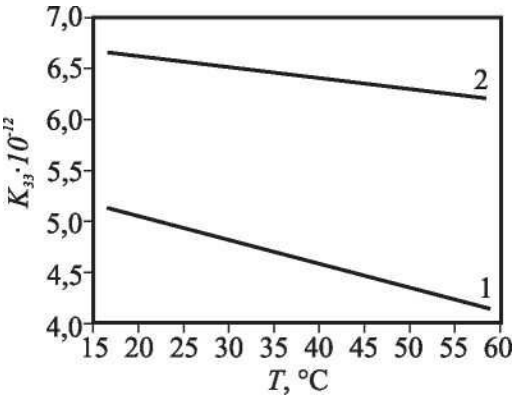



Рис.2.7.Температурна залежність констант пружності $K_{33}$ для сумішей: 1 – СЖК-654+15% холестерилолеату; 2– СЖК-654+37% холестерилолеату

Очевидно, що аномалії в температурній залежності констант пружності поблизу фазового переходу холестерик-смектик зумовлені зростанням ролі флуктуацій смектичного параметру порядку при наближенні до точки фазового переходу. В загальному випадку вираз для констант пружності $K_{22}$ і $K_{33}$ містить поруч з власним нематичним членом $K_{22}^{''}$ доданок, зумовлений смектичними флуктуаціями $K_{22}^{S}$, тобто

$$K_{22} = K_{22}^{''} + K_{22}^{S}$$
$$K_{33} = K_{33}^{''} + K_{33}^{S}$$

Величини $K_{22}^{S}$ і $K_{33}^{S}$ пропорційні до поздовжніх кореляційних довжин $K_{22}\sim\xi_{11}; K_{33}\sim\xi_{11}$. Отже, з погляду фізики, причина аномальної поведінки констант пружності $K_{22}$ і $K_{33}$ з наближенні до точки фазового переходу одна і та сама, а саме, ріст смектичних флуктуацій.

## 2.4. Залежність величини петлі польового гістерезисну від констант пружності, концентрації ефірів холестерину в індукованих холестериках, кроку індукованої спіралі та діелектричної анізотропії

Величина петлі польового гістерезису залежить від відношення констант пружності $K_{22}$ і $K_{33}$. Розглянемо залежності констант пружності різних немато-холестеричних сумішей з домішками ефірів холестерину. На рис.2.8, 2.9, 2.10, 2.11 наведено залежності констант пружності від довжини молекул ефірів холестерину при фіксованій температурі для різних немато-холестеричних сумішей. Загальний аналіз одержаних залежностей показує, що в усіх розглянутих сумішах найбільше змінюється константа пружності $K_{33}$, зростаючи зі збільшенням довжини молекули (номера ефіру в гомологічному ряді). Водночас константа $K_{22}$ майже не змінюється. Зважаючи на те, що $\gamma = \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{33}}}$, можна стверджувати, що зі збільшенням довжини молекули ефіру $\gamma$ зменшується [120].

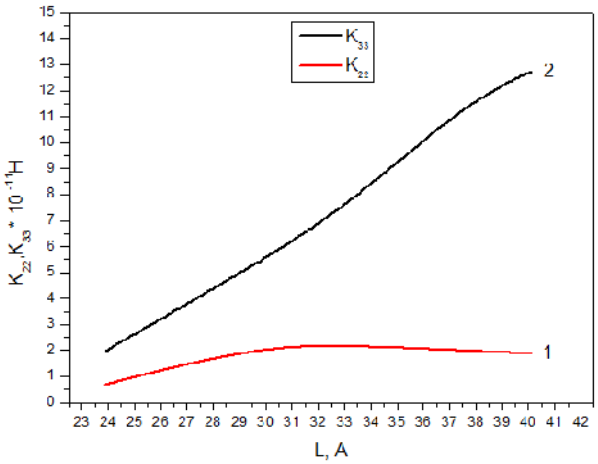



Рис.2.8 Залежність констант пружності $K_{22}$ (1) та $K_{33}$ (2) від довжини молекули ефірів холестерину для нематичної матриці N-1

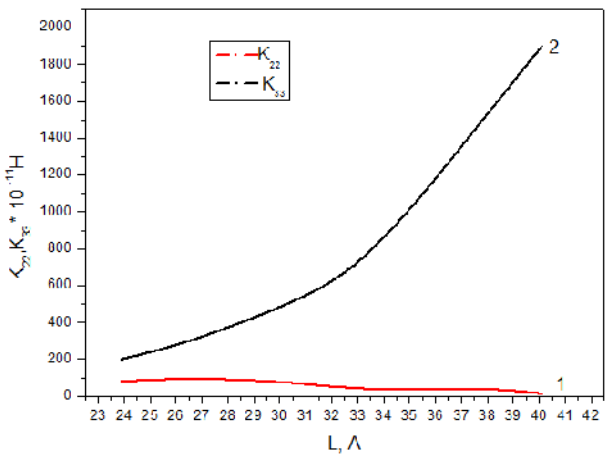



Рис.2.9. Залежність констант пружності $K_{22}$ (1) та $K_{33}$ (2) від довжини молекули ефірів холестерину для нематичної матриці N-2

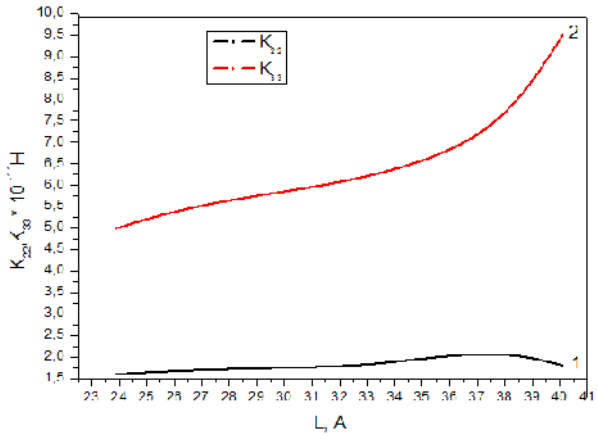



Рис. 2.10. Залежність констант пружності $K_{22}$ (1) та $K_{33}$ (2) від довжини молекули ефірів холестерину для нематичної матриці ЖК-440 (90,5%) і ЖК-839 (9,5%)

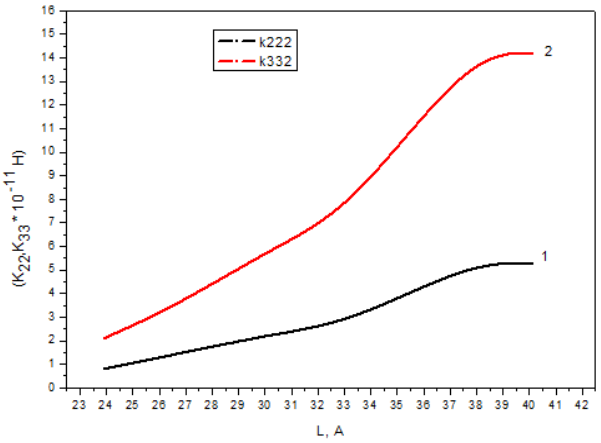



Рис. 2.11. Залежність констант пружності $K_{22}$ (1) та $K_{33}$ (2) від довжини молекули ефірів холестерину для нематичної матриці ЖК-440 (77,7%) і ЖК-839 (23,3%) при температурі 298 К

Проаналізуємо залежності петлі польового гістерезису від концентрації ефірів холестерину в сумішах (рис.2.12, 2.13). На рис. 2.12 і 2.13 наведено залежність величини петлі польового гістерезису від концентрації холестерилпропіонату в суміші для різних температур. Характерною

особливістю цих залежностей є наявність максимуму при певних концентраціях холестеричної речовини, причому його значення залежить від температури, а саме, зі зменшенням температури його величина зростає. Загальний аналіз рис. 2.12 і рис.2.13 свідчить, що критична концентрація холестеричної речовини в суміші залежить від порядкового номера ефіру холестерину в суміші, а саме, зі збільшенням порядкового номера ефіру холестерину в гомологічному ряді максимум зміщується в область більших концентрацій ефіру[118].

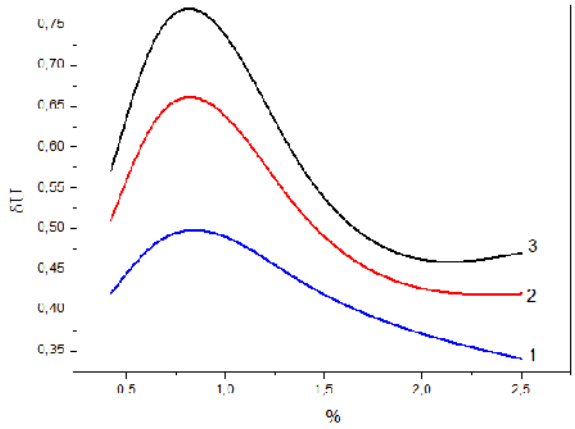



Рис.2.12. Залежність величини петлі польового гістерезису (δU) від концентрації холестерилпропіонату в суміші для різних температур: 1 – 325 K, 2 – 310 K, 3 – 300 K

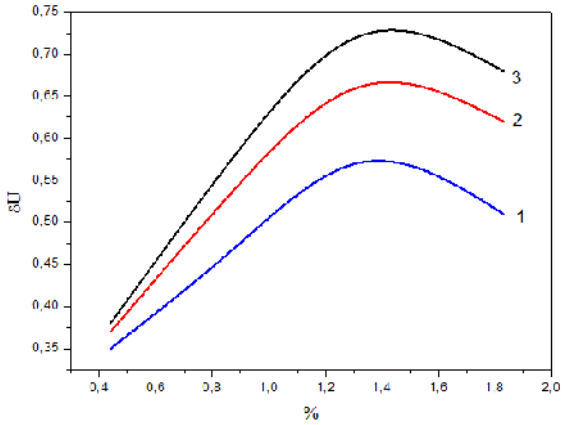



Рис.2.13. Залежність величини петлі польового гістерезису (δU) від концентрації холестерилміристату в суміші для різних температур: 1 – 325 K, 2 – 310 K, 3 – 300 K

На рис.2.14 показано аналогічну залежність від концентрації холестеричної домішки ВІХН-3. Особливістю цієї залежності є те, що максимум на ній не спостерігається, однак загальний хід характеристики дозволяє припустити, що він існує при малих концентраціях домішки. Домішка ВІХН-3 має високу закручувальну здатність, тому крок утвореної суміші набагато менший ніж у домішок ефірів холестерину. Водночас у ряді ефірів холестерину закручувальна здатність холестерилпропіонату більша ніж у холестерилміристату, тому можна стверджувати, що чим більша закручувальна здатність домішки в суміші, тим при менших концентраціях спостерігається максимальне значення величини петлі гістерезису.

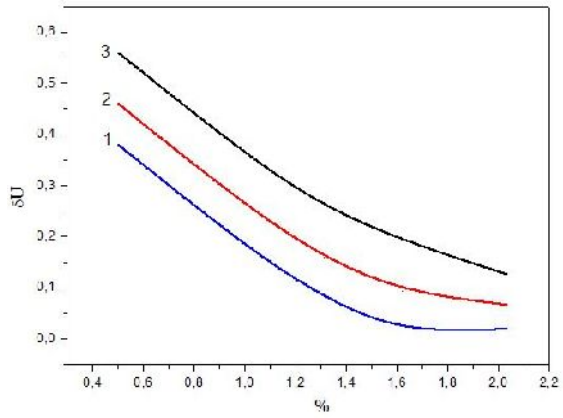



Рис.2.14. Залежність величини петлі польового гістерезису (δU) від концентрації ВІХН-3 в суміші для різних температур: 1 – 325 К, 2 – 310 К, 3 – 300К

Ці найбільш загальні закономірності в зміні пружних констант і кроку індукованої спіралі з температурою лежать в основі росту температурної залежності відносної величини петлі гістерезису [114,117].

Проаналізуємо одержані результати. На рис. 2.15 показано залежність $\sigma U=f(T)$ для випадку, коли константи Франка $K_{22}$ і $K_{33}$ лінійно збільшуються з температурою, а крок індукованої спіралі змінюється з температурою по експоненті (1, 2) або залишається в указаному інтервалі постійним.

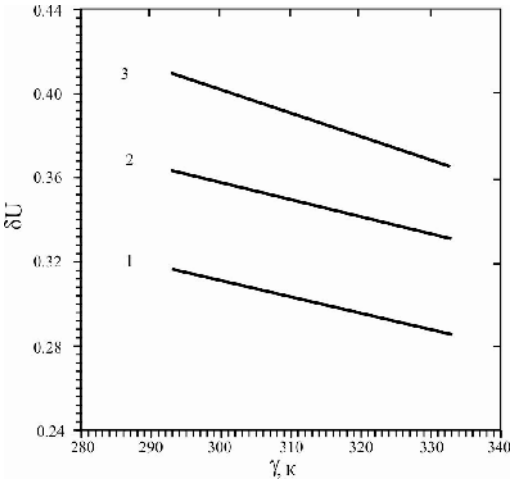



Рис.2.15. Залежність *dU=f(T)*для суміші NLC-2 з домішкою холестерилпропіонату в різній концентрації: 1 – 1,2%, 2 – 0,8%, 3 – 0,6% [117]

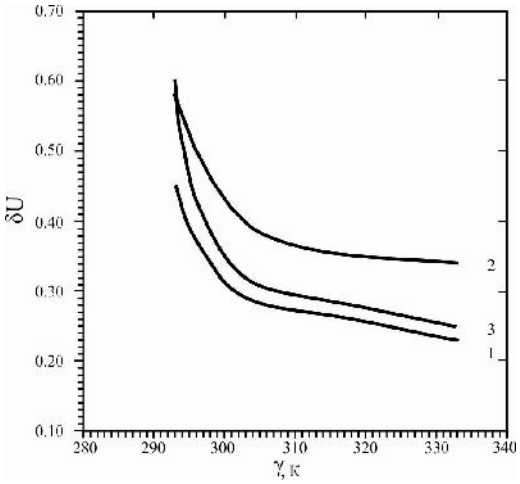



Рис.2.16. Залежність *dU=f(T)*для суміші NLC-3 з домішкою холестерилпропіонату в різній концентрації: 1 – 1,2%, 2 – 0,8%, 3 – 0,6% [117]

Відносна величина петлі гістерезису в цьому разі або зменшується зі зростанням температури (1, 2), або не залежить від неї. З погляду практичного застосування гістерезису холестерико-нематичного переходу залежність (3) є більш вагомою.

На рис. 2.16 показано залежність $dU=f(T)$ для випадку, коли врахування передперехідних явищ приводить до експоненціальної залежності констант пружності $K_{22}$ і $K_{33}$. Зміна кроку з температурою аналогічна попередньому випадку. Якщо крок індукованої спіралі або зменшується (1), або збільшується (2) з температурою по експоненті, в кривих залежності $dU=f(T)$ спостерігається якісне зменшення, яке полягає в тому, що зі зменшенням температури відбувається аномальний ріст величини $dU$, тобто врахування передперехідних

явищ і аномалій у залежностях констант пружності при низьких температурах приводить до істотної зміни при низьких температурах.

Набагато слабше аномалії проявляються у випадку (3), коли крок не змінюється з температурою. Однак слід мати на увазі, що фізична інтерпретація температурної залежності $K_{22}$ і $P$ має загальну основу і тому формула (2.3) є фізичним обґрунтуванням.

## 2.5. Моделювання впливу поверхні на характеристики холестеричних рідких кристалів для РК сенсорів

Характер впорядкованості рідкокристалічного матеріалу визначається поверхневими умовами [121]. Це справедливо для поведінки РК у зовнішніх полях для випадків повністю обмеженого та односторонньо обмеженого шару. Односторонньо обмежена структура часто використовується для реєстрації органічних речовин за допомогою РК. Однак, внаслідок багатофакторності процесів, що відбуваються в таких системах, проведення експериментальних досліджень та інтерпретація результатів часто бувають доволі складними. Внаслідок цього перед початком експерименту доцільно провести попереднє моделювання процесів за допомогою методів молекулярної динаміки (МД).

Нами було виконане комп’ютерне моделювання зміни напрямку директора молекул рідкого кристала під впливом зовнішніх факторів, зокрема

електричного поля та температури, для зразків із планарною та гомеотропною орієнтацію в приповерхневій області.

Для комп'ютерного моделювання молекулярних моделей була використана програма GBMOLDD, розроблена в Інституті фізики конденсованих систем НАН України Ільницьким Я.М. Для написання програми застосовувалися програмні продукти та теоретичні підходи, описані в роботах [122-126].

Доволі ефективним засобом пришвидшення процесу комп'ютерної симуляції є паралелізація обчислень. Загалом, МД дуже добре надається до паралелізації. Наприклад, маючи координати та орієнтації (для несферичних частинок) усіх частинок в час *t*, можна обчислити сили та моменти сил, які діють на кожну частинку. Така операція легко паралелізується розподілом обчислень між процесорами, оскільки координати в цей момент зафіксовано. Після обчислення сил можна виконати інтегрування рівнянь руху для знаходження координат (та орієнтацій) у момент часу $t+\Delta t$, що теж легко паралелізувати через фіксацію обчислених сил.

Для систем із наявністю дисперсійних сил найефективнішим є метод просторового розбиття. МД комірку розбивають на домени-паралелепіпеди, по одному на кожний процесор (рис.2.17). Розмір домену в кожному напрямку не може бути меншим за максимальний радіус обрізання $r_c$ (переважно радіус обрізання для потенціалу Гей-Берне).

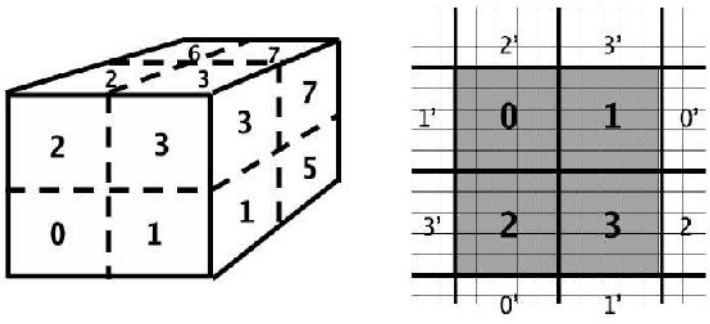



Рис.2.17. Розбиття комірки на просторові домени

На початку запуску програми після зчитування файлу кожний процесор

будує на його основі всю похідну службову інформацію, пов’язану з топологією молекул, потрібною для виконання симуляцій. Після цього здійснюється зчитування координат і швидкостей (а для $GB$ псевдоатомів, крім цього, орієнтацій і похідних від орієнтацій).

Кожний процесор при цьому записує дані тільки деякої кількості $i_{res}$ атомів-резидентів у його просторовому домені, поміщаючи їх у виділені локальні масиви в порядку зчитування. Внаслідок цього виникає локальний індекс idx, під яким у цих масивах записано координати псевдоатома. Крім цього, кожний псевдоатом має “абсолютний” номер, за яким він ідентифікується в системі, $N_i$. Крім координат і швидкостей у локальних масивах зберігаються деякі інші дані для кожного з $i_{res}$ атомів, зокрема абсолютний номер $N_i$, тип псевдоатома $(LJ$ чи $GB)$, індекс молекули $i_m$, тип топології молекули $i_t$, внутрішній індекс псевдоатома в молекулі $n_i$, маса $m_i$ момент інерції $I_I$ (тільки для $GB$ псевдоатомів), координати $\vec{r}$, швидкість $\vec{v}$, орієнтація $\vec{e}$ та похідні від орієнтації $\vec{u}$ (останні два лише для $GB$ псевдоатомів). Кожний процесор, крім інформації про свої, резидентні псевдоатоми, мусить володіти інформацією про псевдоатоми, які перебувають у прилеглому шарі завтовшки не меншому ніж радіус обрізання потенціалу. З цією метою процесори насамперед обмінюються між собою інформацією про псевдоатоми з цих шарів (рис. 2.18).

Для зменшення об’єму комунікації між процесорами (основного фактора, що впливає на ефективність паралелізації) у ході експорту-імпорту передається тільки абсолютний номер псевдоатома $N_i$ та його координати, швидкості (плюс орієнтація та похідна за орієнтацією для $GB$ псевдоатомів), а решта інформації (зокрема стосовно молекулярної топології) відновлюється процесором на місці. Усі параметри імпортованих псевдоатомів дописуються в ті самі масиви, де перебувають дані про резидентні атоми, тобто за індексами $i_{res} + 1$.

Найзатратнішим є обчислення незв’язних сил, які для наших моделей взаємодіють через Леннард-Джоунсівський, Гей-Берне та змішаний потенціали.

Комірки, на які розбивається кожний домен для застосування першого алгоритму, вибираються на кожній осі та мають радіус, не менший ніж радіус відповідної взаємодії. На основі пар комірок, перебраних за списком, створюють списки найближчих сусідів для всіх резидентних у домені псевдоатомів. При цьому використовуються абсолютні номери *N*, оскільки це робить такий список сусідів універбальним, коли псевдоатом переходить із одного домену в інший. Список сусідів здебільшого будується по сфері відстаней, дещо більших за радіус обрізання, наприклад, $r\epsilon[0, r_c + \delta_r]$. Величина $\delta_r$ залежить від параметрів системи за умови найвищої швидкодії симуляції.

Розглянемо тепер зв’язувальні взаємодії. Якщо застосовувати метод просторового розбиття до (макро) молекулярних систем, то одна молекула, в принципі, може бути розкинута по кількох доменах.

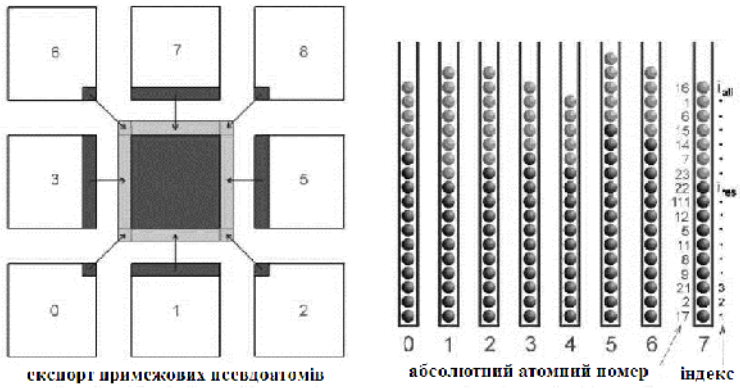



Рис. 2.18. Заповнення локальних масивів даних після операцій експорту-імпорту псевдоатомів, резиденти псевдоатоми – темні, імпортовані – сірі кульки.

У такій молекулі псевдоатоми будуть розпорошені по доменах залежно від їхнього просторового розміщення, а не від особливостей топологічного зв’язку в молекулі, отже, метод просторового розбиття більш атомно-орієнтований, ніж молекулярно-орієнтований. У GBMOLDD для кожного атома записується його "портфель зв’язності” (сусіди за зв’язками, кутами, торсійними кутами) замість збереження даних у формі: всі зв’язки, всі кути, всі

торсійні кути тощо. Ця інформація статична та заповнюється лише один раз на старті програми. Цикли обчислення зв’язувальних взаємодій виконуються тільки за резидентними атомами цього процесора, а не за зв’язками, кутами, торсійними кутами, адже в цьому разі потрібно було б "визбирувати” необхідні атоми в сусідніх процесорах. Для кожного такого атома зчитується його "портфель зв’язності”, за яким відтворюються номери інших атомів, з якими існує взаємодія. Зазначимо, що радіус обрізання навіть найбільш короткодіючої, Леннард-Джоунсової незв’язної взаємодії становить приблизно $10\mathring{A}$ за максимально можливої відстані між крайніми атомами в торсійній взаємодії. Отже, атоми, необхідні для обчислення енергій зв’язків, кутів та торсійних кутів завжди присутні серед імпортованих від прилеглих процесорів. Щоб уникнути подвоєння обчислення потенціалів і сил за такого алгоритму введено відповідні правила, пов’язані з порядковими номерами частинок.

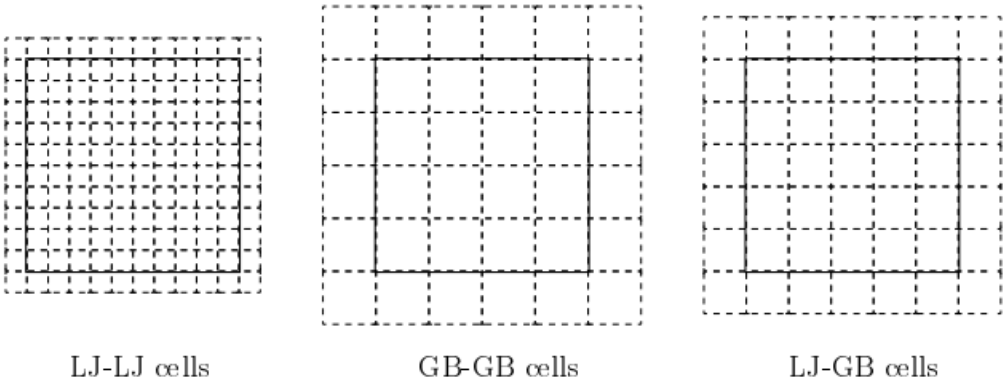



Рис. 2.19. Розбиття комірки на підкомірки для кожного типу незв’язних взаємодій з метою ефективного перебирання взаємодіючих пар частинок

Для обчислення кожним процесором сил, які діють на його резидентні атоми, використовується звичайний послідовний код, модифікація циклів при цьому непотрібна. Паралелізація виконується на іншому рівні – просторовому розбитті системи на домени (рис.2.19). Одночасно з обчисленням сил визначаються парціальні потенціальні та кінетичні енергії, тиск, деякі інші термодинамічні характеристики в кожному домені. Наприкінці обчислення сил вони додаються внаслідок взаємного обміну між процесорами (операція

глобальної суми). У результаті кожний процесор має сумарні значення цих характеристик.

Після обчислення сил проводиться інтегрування рівнянь руху, які виконуються кожним процесором на своєму домені. Нами було використано алгоритм т. зв. жаб'ячого скоку (leap-frog) та алгоритм Верле у швидкісній формі (velocity Verlet). Процедура інтегрування порівняно дешева з погляду витрат комп'ютерного часу та виконується на кожному процесорі за допомогою скалярного коду. Внаслідок інтегрування рівнянь руху деякі псевдоатоми можуть виявитись поза межею домену і повинні бути передислоковані до суміжного процесора за допомогою обміну процесорів повідомленнями. У повідомлення вкладається ідентифікатор нового процесора-резидента та список псевдоатомів, які передаються, разом зі списками їхніх сусідів для незв'язних взаємодій.

Оскільки ці списки, як було сказано вище, побудовані на основі абсолютних номерів, то вони є універсальними і не залежать від місця дислокації псевдоатома. Інформація стосовно атомної зв'язності не передається, оскільки вона швидко заповнюється по місцю прибуття нового псевдоатома. У кінці операції передислокації шукається відхід координат кожного псевдоатома від часу останнього оновлення списків сусідів. Якщо хоч один із них відійшов на відстань $\geq \delta_r/2$, список сусідів для незв'язних взаємодій оновлюється на наступній ітерації МД.

Молекулярні моделі розглядаються на класично-механічному рівні та описуються за допомогою силових полів. Зв'язувальні взаємодії в молекулі можна записати у вигляді:

$$E_m^{\mathrm{bon}} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{b}}} \frac{1}{2} k_i^{(\mathrm{b})} (l_i - l_i^{(0)})^2 + \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{a}}} \frac{1}{2} k_i^{(\mathrm{a})} (\theta_i - \theta_i^{(0)})^2 + \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{z}}} \frac{1}{2} k_i^{(\mathrm{z})} (\zeta_i - \zeta_i^{(0)})^2 + \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{t}}} U_i^{(\mathrm{tors})}.$$

де, $n_b$ – кількість зв’язків; $n_a$ – кількість кутів; а $n_z$ – кількість додаткових кінцевих кутів у місцях приєднання мезогенів у молекулі $m$; $l_i$, $\theta_i$, $\zeta_i$ – відповідно поточні індекси цих величин, а $l_i^{(0)}$, $\theta_i^{(0)}$, $\zeta_i^{(0)}$ – їхні рівноважні значення. Коефіцієнти пружності відповідних гармонічних сил $k_i^{(b)}$, $k_i^{(a)}$ і $k_i^{(z)}$. $\zeta_i$ вимірюються як кут між довгою віссю мезогена та зв’язком між його центром і сусіднім *LJ* псевдоатомом.

Торсійні взаємодії враховуються у формі Ріккерта-Беллмана.

$$U_i^{(\mathrm{tors1})} = \sum_{n=1}^{5} c_i^{(n)} \cos^n \phi_i,$$

або у формі обірваних рядів Фур’є

$$U_i^{(\mathrm{tors2})} = \frac{1}{2}[V_i^{(1)}(1+\cos\phi_i) + V_i^{(2)}(1-\cos 2\phi_i) + V_i^{(3)}(1+\cos 3\phi_i)].$$

Усі інші пари взаємодіють за допомогою незв’язних потенціалів залежно від типу псевдоатомів. Пара *LJ* атомів взаємодіє через факторизований потенціал Леннард-Джонса:

$$U_{ij}^{(\mathrm{LJ})} = \left[\frac{A_i^{(\mathrm{LJ})} A_j^{(\mathrm{LJ})}}{r_{ij}}\right]^{12} - \left[\frac{C_i^{(\mathrm{LJ})} C_j^{(\mathrm{LJ})}}{r_{ij}}\right]^{6}$$

Аналогічно пара GB псевдоатомів взаємодіє через потенціал Гей-Берне.

Змішаний потенціал між *LJ* та *GB* частинками отримують із узагальненого потенціалу Гей-Берне

$$U_{ij}^{(\mathrm{LJGB})} = \epsilon_{ij}^{(\mathrm{LJGB})} \left[\left(\rho_{ij}^{(\mathrm{LJGB})}\right)^{12} - \left(\rho_{ij}^{(\mathrm{LJGB})}\right)^{6}\right]$$

де $i$ – псевдоатом *LJ* типу, а $j$ – псевдоатом *GB* типу.

Отже, повний вираз для потенціальної енергії можна записати у вигляді.

$$E_{\text{total}} = \sum_{m=1}^{N_{\text{mol}}} E_m^{\text{bon}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{LJ}}} \sum_{j>i}^{N_{\text{LJ}}} U_{ij}^{(\text{LJ})} + \sum_{i=1}^{N_{\text{GB}}} \sum_{j>i}^{N_{\text{GB}}} U_{ij}^{(\text{GB})} + \sum_{i=1}^{N_{\text{LJ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{GB}}} U_{ij}^{(\text{LJGB})}$$

де $N_{mol}$, $N_{LJ}$ і $N_{GB}$ – сумарна кількість молекул, *LJ* та *GB* псевдоатомів комірки, що моделюється.

Вплив поверхні описується виразом $V = f_{sl}\left(\bar{e} \cdot \bar{S}\right)^2 e^{-\frac{Z}{l_d}}$ де $\bar{e}$ – вектор початкової орієнтації; $\bar{S}$ – вектор повороту щодо нормалі; $Z$ – товщина шару; $l_d$ – параметр далекодії.

Програма GBMOLDD уможливлює отримання розподілу напрямку директора в комірці, а відповідно і величини параметра порядку, безпосередньо пов’язаного зі значенням показника заломлення у псевдошарі.

Базовими вхідними даними для програми GBMOLDD є:

$n_x$, $n_y$, $n_z$ – кількість молекул, відповідно, по осі x, y та z;

*srf_fstr* – значення сили зчеплення приповерхневих шарів;

*T* – температура моделювання;

*axis* – напрямок орієнтації молекул у приповерхневій області;

*fld_str* – величина поля, що діє на молекули РК в одному з напрямків x, y або z.

Результати програми записуються у файли двох типів: *.coord та *.lst.

Файли типу *.coord уможливлюють візуальне відображення переорієнтації молекул у шарі РК, а відповідно і напряму директора молекул. Файли *.lst дають змогу отримати числові значення розподілу директора, які потім обробляються для отримання зміни показника заломлення в шарі РК під впливом електричного поля.

Було використано програмний продукт RasMol для візуального відображення розміщення молекул у шарі РК. Спеціалізована програма візуалізації молекул «RasMol V2.7.5 Molecular Visualisation Program», дає змогу відтворити на екрані складні органічні структури, зокрема РК, молекули ДНК тощо [122].

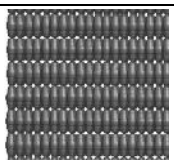
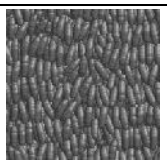
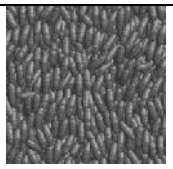
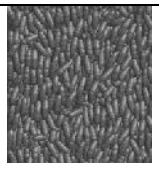
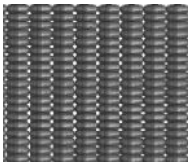
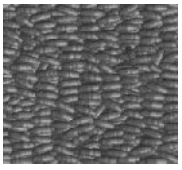
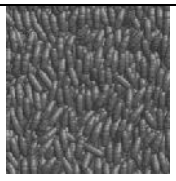
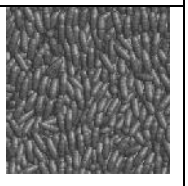
У ході обчислень використовувалася також підпрограма Ord_Profile.exe, яка входить до програмного засобу GBMOLDD. Вона була застосована для отримання числових значень розподілу напрямку директора в шарі ХРК на основі отриманих *.coord файлів (змодельованих картин). Моделювання виконувалось для випадку односторонньо обмеженого об’єму РК, а поверхневі умови та величина діелектричної анізотропії вибирались так, щоб забезпечити переорієнтацію молекул РК.

Кожна ітерація системи вимагає значних комп’ютерних ресурсів. Тому, перш ніж почати моделювання, потрібно було визначити зміну значення параметра порядку від кількості ітерацій, тобто модельного часу існування системи.

Проведений аналіз показав, що за незмінного зовнішнього впливу в діапазоні 0–10000 ітерацій відбувається різке зменшення параметра порядку від 1 (ідеальне розміщення молекул) до 0.6 (нематична мезофаза). Подальше зростання кількості ітерацій не приводить до значної зміни параметра порядку. Отже, можна стверджувати, що для вибраних вихідних параметрів модельного рідкого кристала достатньо 20000 ітерацій для встановлення рівноваги системи.

Таблиця 2.1.

Картина змодельованих текстур

| | S=1 | S=0,82 | S=0,6 | S=0,7 | S=0,2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Гомеотропна орієнтація |  |  |  |  |  |
| Планарна орієнтація |  |  |  |  | |
| | а | б | в | г | д |

а) початкове розташування молекул об’єкта моделювання; б) текстура смектика при S=0,82; в) початкова текстура нематичної фази при S=0,6; г) початкова текстура нематичної фази при S=0,6, S=0,7; д) ізотропна фаза, S=0,2.

У табл. 2.1 представлено результати моделювання з використанням наведеної програми. Початкова гомеотропна та планарна текстури нематика, з якої починається моделювання, наведена на рис.а.

На рис.б показано розташування молекул у смектичній А-фазі, де спостерігаємо пошарове розташування молекул, як у примежових областях так і в середній області. Параметр порядку для такої структури S=0,82. Наведені результати отримані без урахування впливу зовнішніх полів.

Зі зростанням температури (рис.в) відбувається розупорядкування смектичної фази внаслідок виходу молекул із шарів. З подальшим збільшенням температури (рис.г) молекули, розташовані близько до обмежуючих поверхонь, зберігають гомеотропний стан, а з віддаленням від поверхні починається розупорядкування молекул, зумовлюючи перехід у нематичну фазу. Параметр порядку при цьому зменшується і дорівнює S=0,6. Після фазового переходу в ізотропну рідину (рис.д) відбувається повне розупорядкування в розташуванні молекул. Параметр порядку при цьому дорівнює S=0,2.

На рис. 2.20 показано початкову конфігурацію молекул рідкого кристала, для якої здійснюється моделювання та розподіл директора молекул РК такої системи.

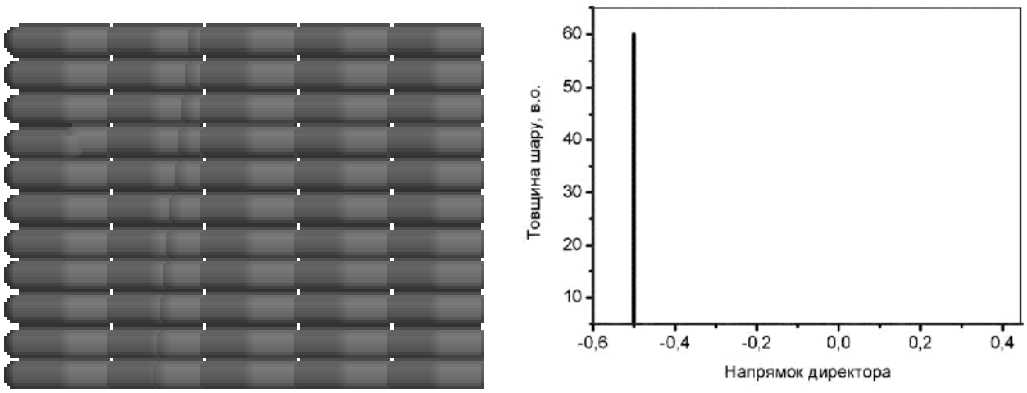
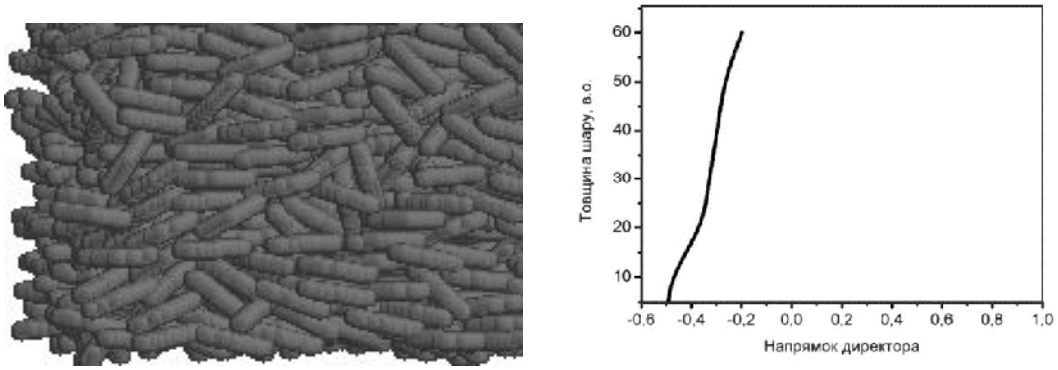
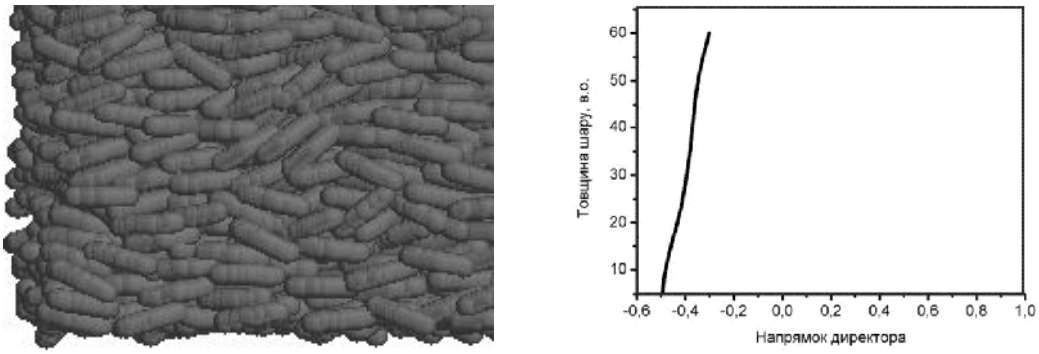



Рис. 2.20. Змодельована планарна текстура та відповідний розподіл напрямку директора в шарі ХРК




а)

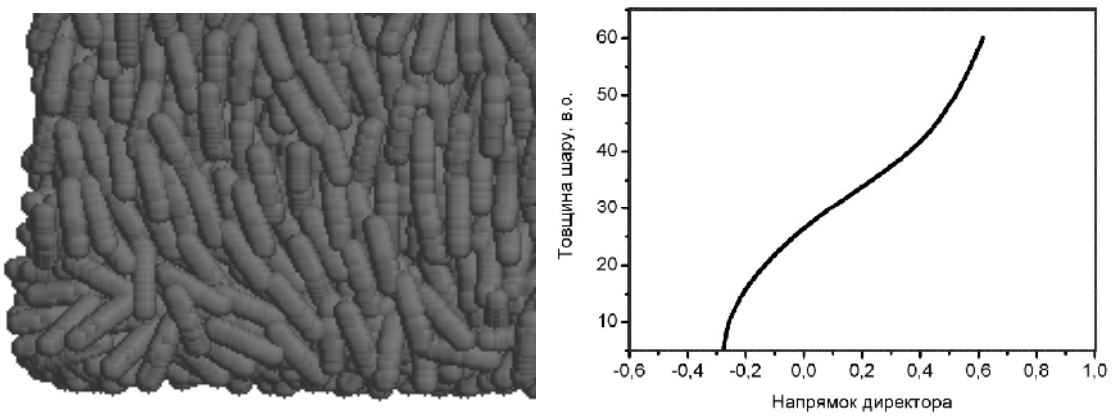



б)

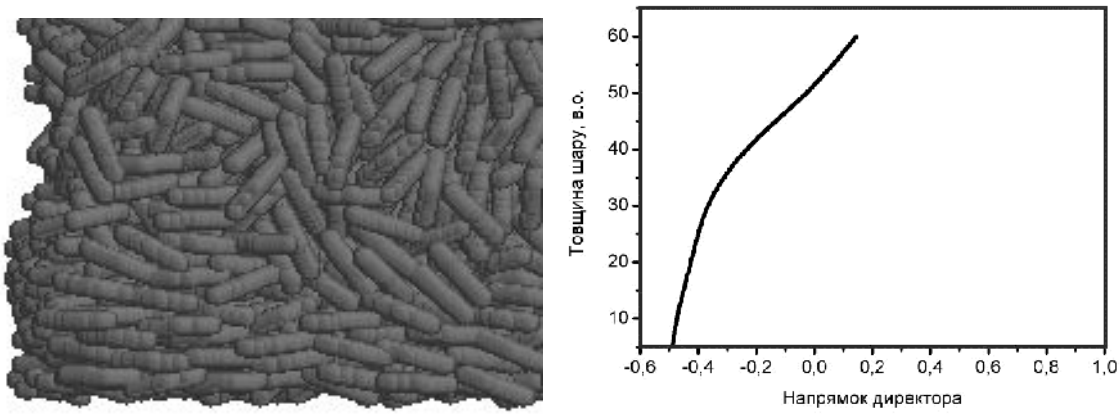
Рис.2.21. Змодельовані текстури приповерхневого шару ХРК та розподіл напрямку директора, отримані за результатами комп’ютерного моделювання для зразків: а - без орієнтуючого шару; б - з орієнтуючим шаром. Час дії електричного поля 20 мс

У цій моделі напрямок директора може набувати значення від 1 (гомеотропна орієнтація) до -0,5 (планарна орієнтація). Рисунки 2.21-2.23 відображають результати моделювання з використанням наведеного програмного засобу GBMOLDD, що відображені у програмі RasMol, та відповідні значення розподілу напрямку директора, обчислені за допомогою підпрограми Ord_Profile.exe.

Рисунки відображають модельні картини зміни напрямку орієнтації молекул рідкого кристала під впливом зовнішнього модельного електричного поля для випадків з орієнтуючим шаром та без нього. Величина модельного електричного поля для обох випадків постійна і дорівнює модельному значенню 1, напрямок дії поля перпендикулярний до поверхні.



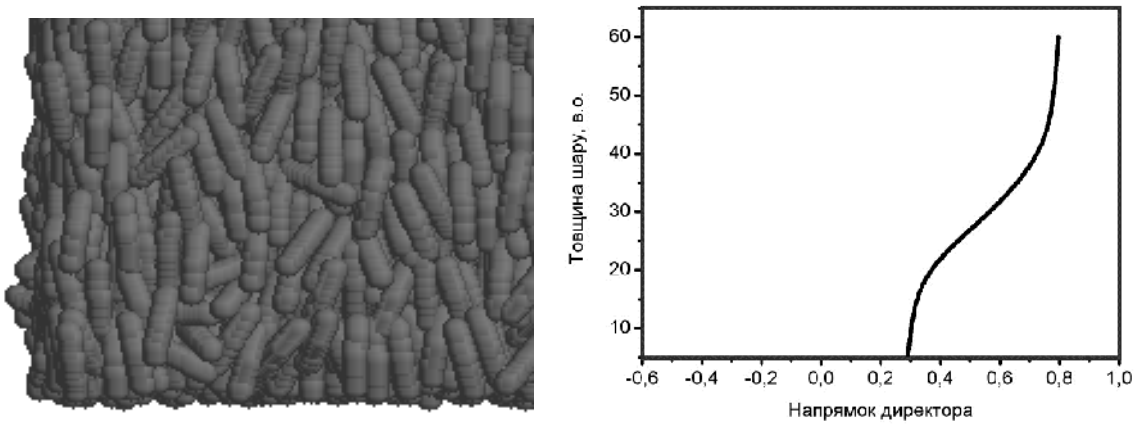

а)



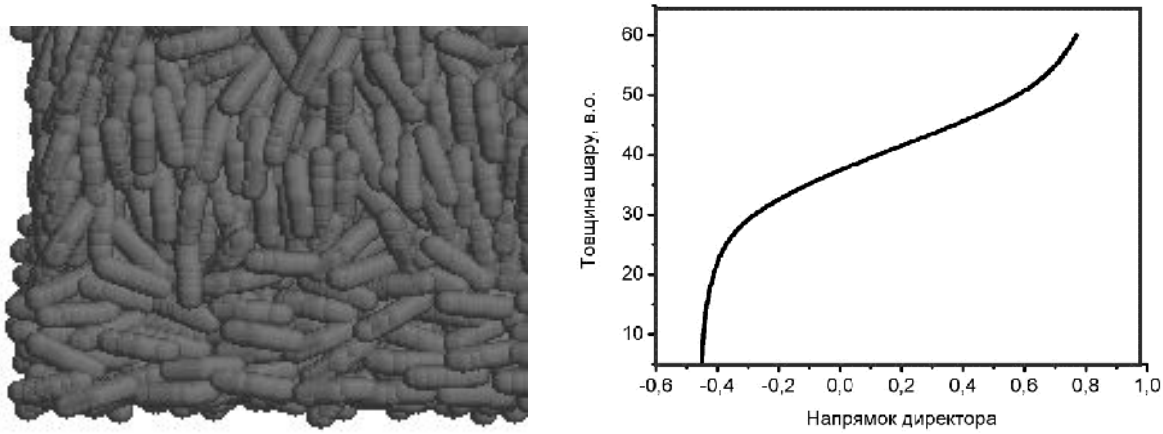

б)

Рис.2.22. Змодельовані текстури приповерхневого шару ХРК та розподіл напрямку директора, отримані за результатами комп’ютерного моделювання для зразків: а - без орієнтуючого шару; б - з орієнтуючим шаром. Час дії електричного поля 100 мс

Після прикладення до РК матеріалу електричного поля процес переорієнтації молекул починається зі збурення початкової планарної текстури. В подальшому спостерігається переорієнтація центральної частини шару РК для обох випадків. У результаті через певний проміжок часу відбувається переорієнтація більшості молекул РК в напрямку дії поля.




а)




б)

Рис.2.23. Змодельовані текстури приповерхневого шару ХРК та розподіл напрямку директора, отримані за результатами комп'ютерного моделювання для зразків: а - без орієнтуючого шару; б - з орієнтуючим шаром. Час дії електричного поля 160 мс

З отриманих рисунків видно, що для випадків з орієнтуючим шаром спостерігається повільніша зміна напрямку орієнтації молекул у приповерхневій області, що підтверджується як змодельованими картинами, так і відповідними числовими значеннями профілю параметра порядку. Для повної переорієнтації молекул приповерхневого шару час дії зовнішнього модельного електричного поля повинен бути більшим.

На рис. 2.24. наведено початкову конфігурацію молекул рідкого кристала, для якої здійснюється моделювання та розподіл директора молекул РК такої системи.

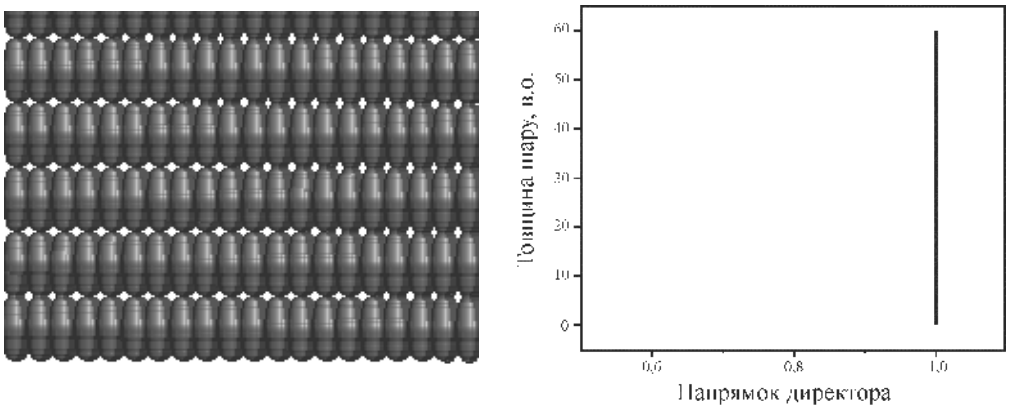



Рис. 2.24. Змодельована початкова ідеальна гомеотропна текстура та відповідний розподіл напрямку директора в шарі ХРК

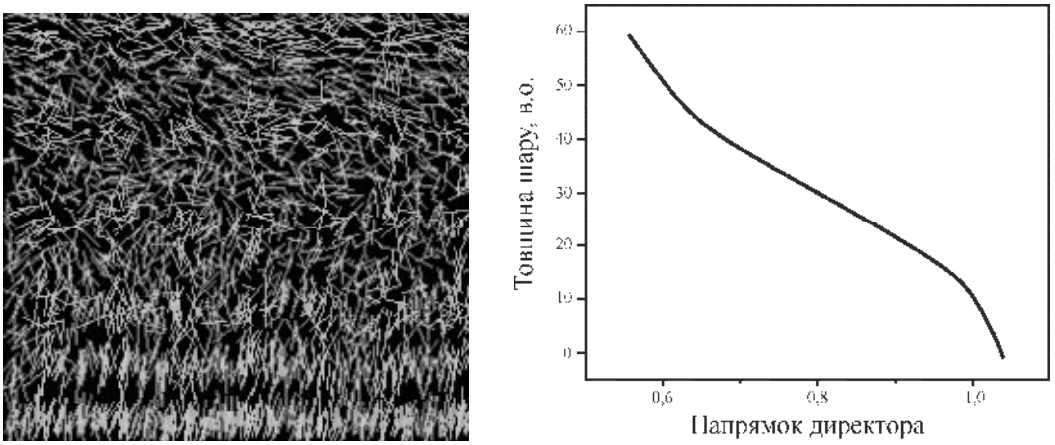



Рис.2.25 Змодельована текстура приповерхневого шару РК та розподіл напрямку директора, отримані за результатами комп’ютерного моделювання для зразка з величиною попереднього нахилу початкової текстури $15^{o}$. Величина прикладеного поля становить 0.2

Прикладення до такої структури зовнішнього поля (для випадку від’ємної діелектричної анізотропії) приводить до переорієнтації молекул РК (рис.2.25, 2.26).

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що для всіх змодельованих випадків вплив зовнішніх факторів не приводить до переорієнтації приповерхневих шарів.

Перевірка модельного експерименту проводилася за допомогою коноскопічних досліджень [127,128]. Об’єктом коноскопічних досліджень був

рідкокристалічний матеріал МББА. Дослідження проводились у комірці типу сандвіч із шаром РК завтовшки 50 мкм, початкова гомеотропна орієнтація задавалась за допомогою нанесення полімерного орієнтуючого шару PI 2555, а також введенням в РК лецитину. Як джерело випромінювання нами був використаний He-Ne лазер із довжиною хвилі випромінювання λ=0,63 мкм.

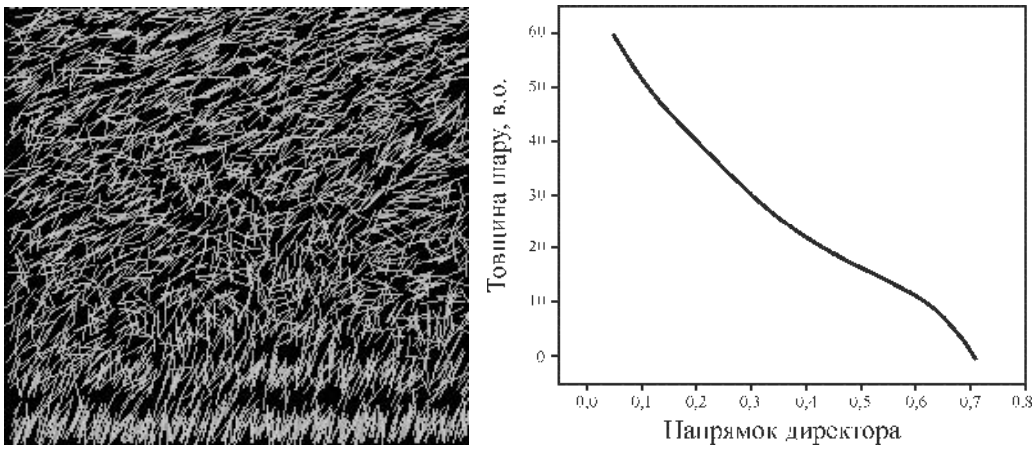



Рис.2.26 Змодельована текстура приповерхневого шару РК та розподіл напрямку директора, отримані за результатами комп'ютерного моделювання для зразка з величиною попереднього нахилу початкової текстури 30°. Величина прикладеного поля становить 0.2

Дослідження динамічних характеристик проводились методом реєстрації зміни коноскопічних картин [125]. Блок-схему експерименту показано на рис.2.27.

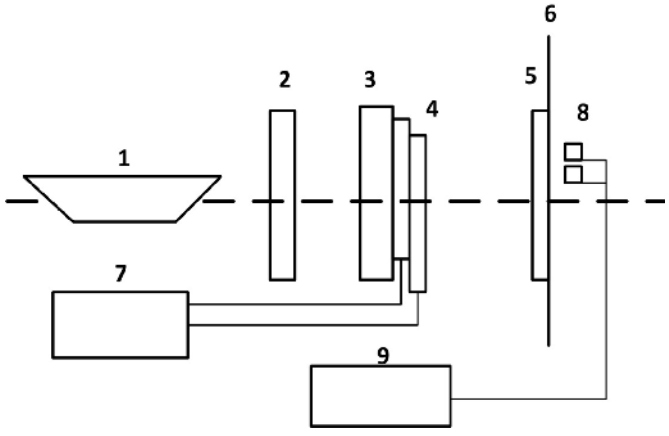



Рис.2.27. Блок-схема реєстрації коноскопічних картин 1 – лазер, 2-поляризатор, 3 – розсіювальна пластина, 4 – РК комірка, 5 – аналізатор, 6 – екран, 7 – блок живлення , 8 – система фотодіодів, 9 – ПК

Особливістю використовуваного РК матеріалу є додатна анізотропія показника заломлення в поєднанні з від’ємною анізотропією діелектричної проникності. Такі параметри нематичного РК призводять до того, що прикладення зовнішнього електричного поля за початкової планарної орієнтації зумовлює переорієнтацію довгих осей молекули РК в напрямку, паралельному до підкладок, що призводить до утворення планарної текстури.

Переорієнтація довгих осей молекул у центральній ділянці шару РК (для малих значень керуючої напруги) призводить до зміни інтерференційної картини, а саме, до зміщення хреста з центру поля огляду в напрямку переорієнтації довгих осей молекул нематика. Подальше розширення планарно орієнтованої зони в об’ємі РК супроводжується збільшенням відстані між ізохромними дугами коноскопічної картини та їх деформацією. Наступним етапом зміни картини є утворення ізохром гіперболічного виду з подальшим утворенням коноскопічної картини, характерної для планарної орієнтації нематика. Однак відсутність симетрії кінцевої коноскопічної картини щодо осі поширення випромінювання свідчить про наявність у зразку тонких приповерхневих гомеотропно орієнтованих шарів (рис.2.28). Проведені експериментальні дослідження показали збереження приповерхневих не переорієнтованих шарів при напругах, які значно перевищують критичні значення переорієнтації всього об’єму зразка.

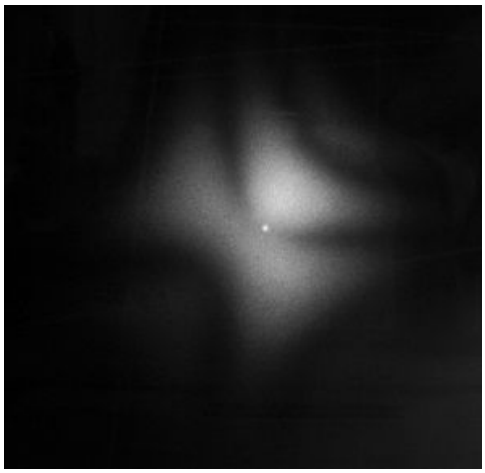


Рис. 2.28 Коноскопічна картина, отримана для РК МББА при прикладенні напруги 50В

Аналогічна ситуація спостерігається для РК матеріалів із додатною величиною діелектричної анізотропії. На рис.2.29 наведено коноскопічну картину, отриману для нематичного РК 5ЦБ в зовнішньому електричному полі.

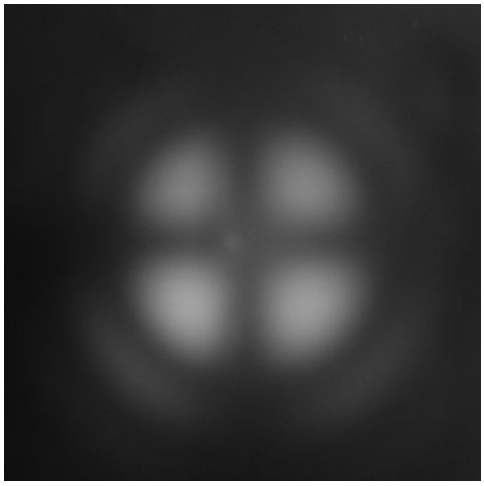


Рис.2.29. Коноскопічна картина, отримана для РК 5СВ d=50 мкм при напрузі 10 В.

Для випадку холестерико-нематичних сумішей із додатною величиною діелектричної анізотропії аналогічна коноскопічна картина спостерігається при напругах, вищих від порогового значення холестерико-нематичного переходу (рис.2.30).

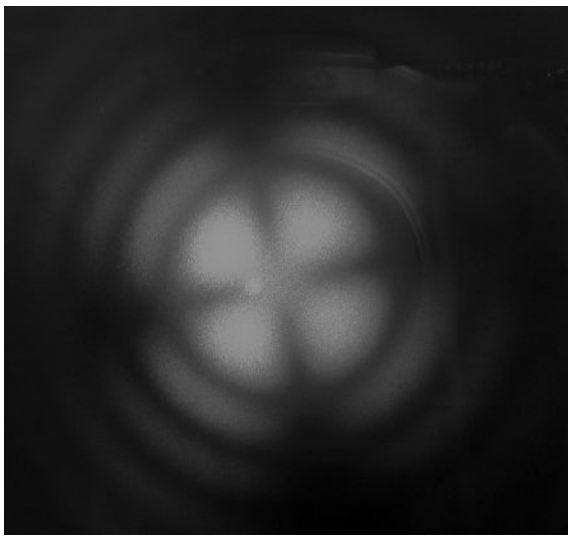


Рис.2.30. Коноскопічна картина отримана для холестерико-нематичної суміші 5СВ+6,04% хіральної домішки, d=50 мкм при напрузі $U_{сп}$

## 2.6. Розроблення низькочастотного рідкокристалічного автогенератора для сенсорів фізичних величин.

Відомі на сьогодні численні принципи реєстрації фізичних величин та сенсори на їх основі не вирішують проблеми захисту інформаційного сигналу, особливо в середовищах із високим рівнем електромагнітних шумів. Основними напрямками вирішення цього питання є використання в якості інформаційного параметра оптичного сигналу чи значення частоти електричного сигналу. Безумовно, оптичний сигнал має ряд переваг, однак більшість існуючих сучасних діагностичних систем базується саме на реєстрації електричних імпульсів. Розділ присвячено створенню сенсорів фізичних величин на основі оптичного рідкокристалічного автогенератора, де такі параметри РК комірки, як напруга переходу та величина гістерезису, є частотозадаючими параметрами і, відповідно, дають змогу провести реєстрацію фізичних величин.

Для створення первинних перетворювачів сенсорів фізичних величин на основі електрооптичного генератора зі змінною частотою було проведено ряд досліджень впливу зовнішніх факторів на параметри РК матеріалів. Оскільки принцип дії запропонованих сенсорів базується на електрооптичних ефектах у рідких кристалах, було досліджено такі параметри РК комірок, як напруги холестерико-нематичного ($U_{cn}$) та немато-холестеричного ($U_{nc}$) переходів, залежності часів реакції та релаксації. Для досліджень було використано HeNe лазер з довжиною хвилі 0.63 мкм. На рис.2.31-2.33 наведено залежності часу реакції (ефект ХНП) дослідної комірки з немато-холестеричною сумішшю.

Як видно з залежностей, для всіх досліджених випадків спостерігається загальна тенденція зростання часу реакції зі зменшенням напруги керуючого імпульсу. Окремі аномальні ділянки можуть бути викликані локальним впливом дифракційної складової розсіювання світла на конфокальній текстурі холестерика. Їх виникнення обумовлене певними співвідношеннями між довжиною хвилі випромінювання та кроком надмолекулярної спіральної структури.

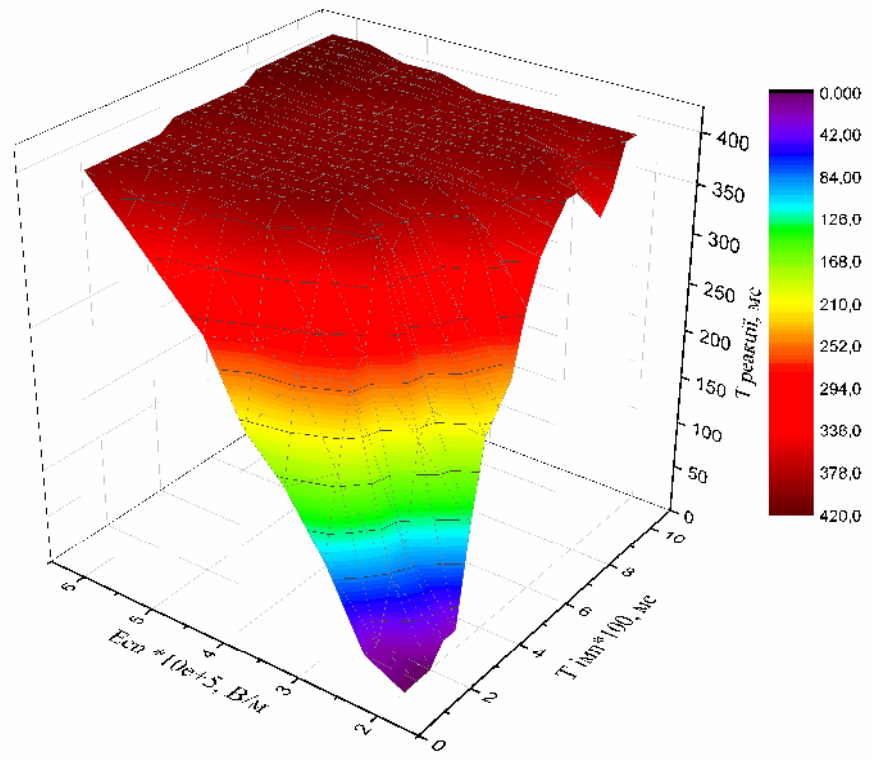



Рис. 2.31. Залежність часу реакції суміші СЖК-1 + 0,5 % ВІХН-3 від напруженості поля та тривалості керуючого імпульсу

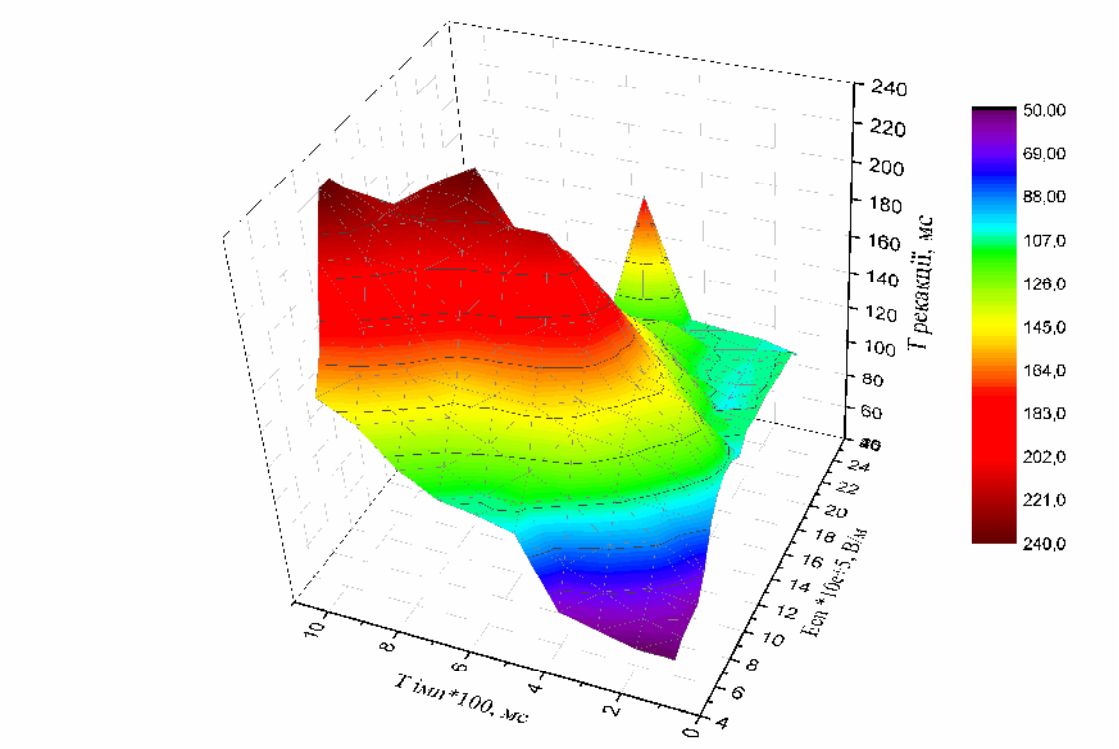



Рис. 2.32. Залежність часу реакції суміші СЖК-1 + 1,0 % ВІХН-3 від напруженості поля та тривалості керуючого імпульсу

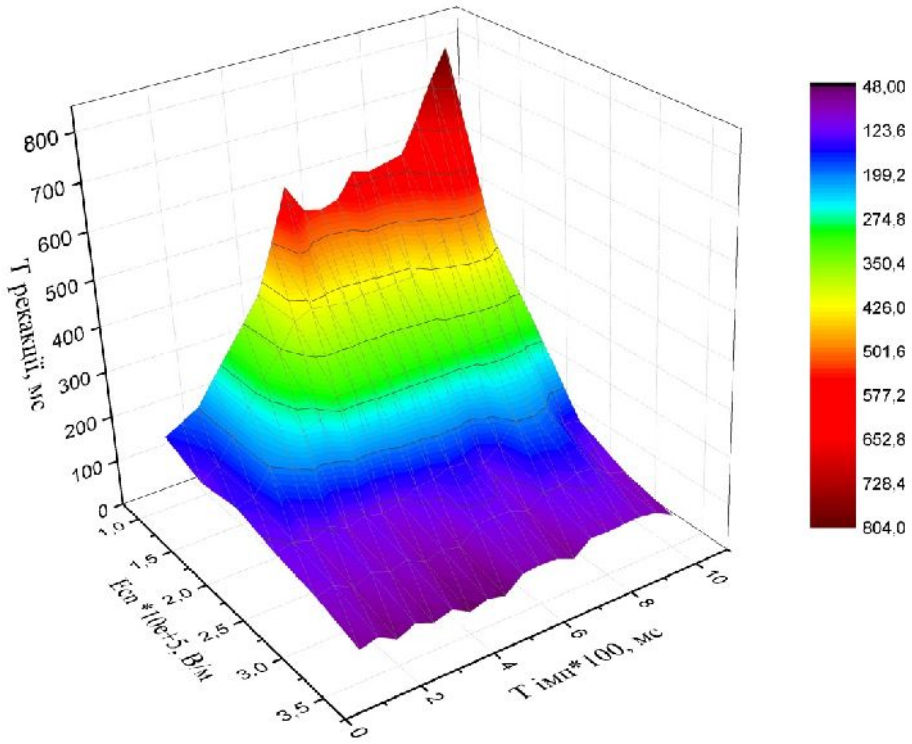



Рис. 2.33. Залежність часу реакції суміші СЖК-1 + 2,0 % ВІХН-3 від напруженості поля та тривалості керуючого імпульсу

На рис. 2.34 зображено результати досліджень частотно-модуляційних характеристик (ЧМХ) досліджених зразків. Як видно з залежностей, зростання величини керуючого імпульсу приводить до зростання глибини модуляції. Така залежність пояснюється більшою інтенсивністю випромінювання, яке пройшло крізь дослідну комірку з нематичною текстурою. Вплив тривалості керуючого імпульсу на ЧМХ спостерігається лише тоді, коли його величина менша за час реакції зразка, що приводить до неповного відкривання РК комірки та, як наслідок, до зменшення глибини модуляції.

Аналіз результатів показав, що зростання температури при постійному значенні тривалості керуючого імпульсу приводить до зростання глибини модуляції. Такий характер залежності викликаний зменшенням часів реакції та релаксації шару РК з ростом температури.

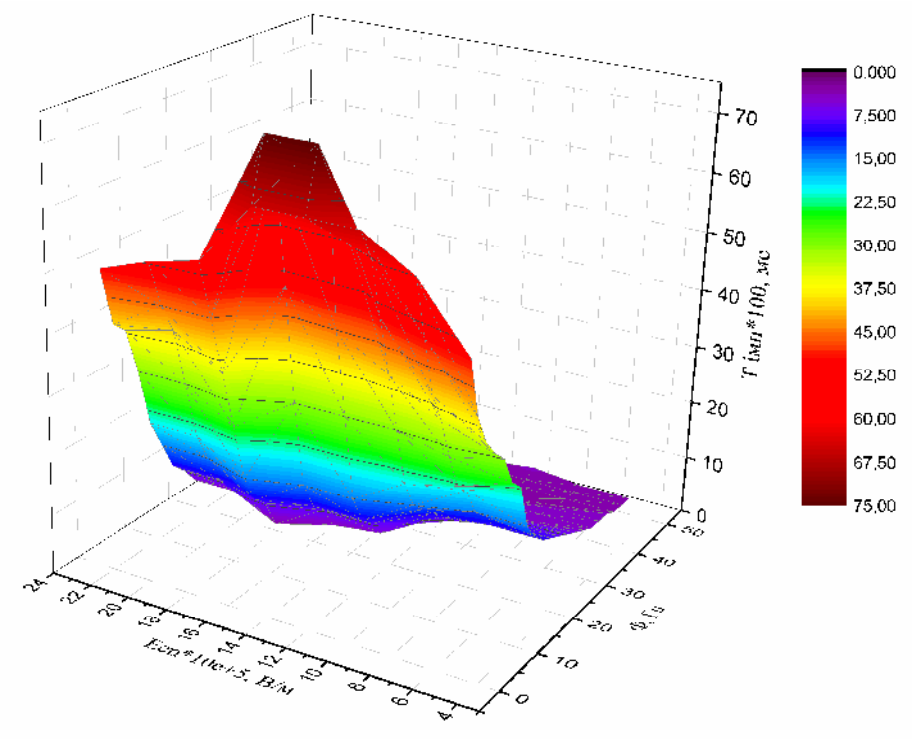



Рис. 2.34. ЧМХ суміші СЖК-1 + 1,0 % ВІХН-3 при різних значеннях напруженості поля ХНП

На рис. 2.35-показано температурні залежності ЧМХ.

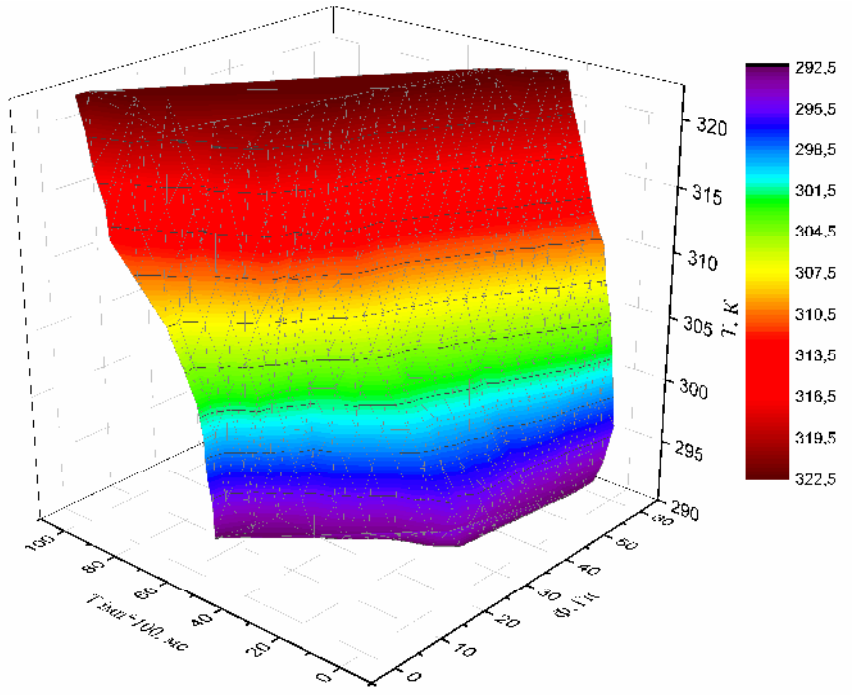



Рис. 2.35. ЧМХ суміші СЖК-1 + 2,0 % ВІХН-3 при різних температурах.

Ми пропонуємо використати температурну зміну властивостей РК суміші як частотозадавальну характеристику автогенератора [129]. Переорієнтація

молекул РК внаслідок зміни напруги, прикладеної до РК комірки, є більш інерційною порівняно з процесом зміни керуючої напруги. Тому оптичний відгук дещо запізнюється порівняно зі зміною напруги, що викликано наявністю польового гістерезису ефекту ХНП. Чим швидше змінюється напруга на РК комірці, тим більше це запізнення. Було розглянуто залежність швидкодії індукованих холестериків від параметрів керуючого сигналу [129,130]. Доведено, що її значення змінюється в дуже широких межах, що дає змогу створювати оптичні генератори з різними частотами генерації. Отже, створивши від'ємний зворотний зв'язок (оптичний відгук – електричний сигнал керування), можна використати динамічний гістерезис ефекту ХНП як частотозадаючий параметр автогенератора.

Блок-схема сенсора на основі низькочастотного оптичного автогенератора наведена на рис. 2.36 [132]. Низькочастотний оптичний автогенератор складається з оптопари як джерела та приймача оптичного випромінювання, РК комірки (основний виконавчий і частотозадаючий пристрій) та електронної схеми керування.

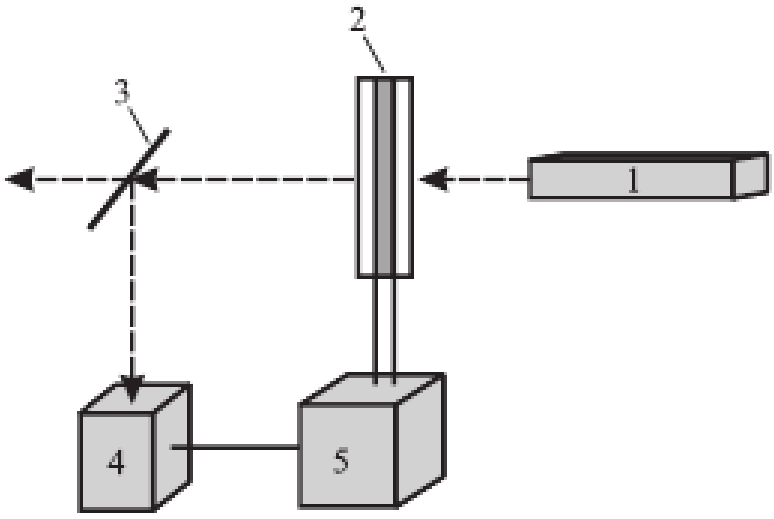



Рис. 2.36. Блок-схема низькочастотного автогенератора з РК модулятором: 1 – He-Ne лазер; 2 – РК модулятор; 3 – розгалужувач випромінювання; 4 – фотоприймач; 5 − електронна схема керування [132]

Розглянемо принцип роботи сенсора на основі низькочастотного оптичного автогенератора. У початковому стані (за відсутності напруги живлення) РК модулятор перебуває в непрозорому стані та розсіює падаюче на нього випромінювання; освітлення фотодіода оптопари мінімальне. Вмикається напруга живлення, яку через електроннну схему керування подають на РК модулятор і переводять його у прозорий стан. Випромінювання, проходячи крізь увімкнений модулятор, потрапляє на фотоприймач, що призводить до перемикання електронної схеми керування та різкого падіння напруги на РК модуляторі. РК модулятор переходить у непрозорий стан, розсіюючи випромінювання, освітленість фотоприймача падає і спрацьовує схема керування, до якої входить РК модулятор – процес повторюється. Отже, електронна схема керування працює в ключовому режимі, залежно від освітленості фотоприймача, та здійснює логічну операцію НІ. Однак перемикання РК модулятора відбувається набагато повільніше, ніж перемикання електронної схеми. Пристрій перетворює постійне оптичне випромінювання на змінний електричний сигнал.

Вплив фізичного параметра (наприклад, температури) [133] приводить до зміни таких параметрів РК комірки, як напруга прямого, зворотного холестерико-нематичного переходу та його польового гістерезису. Це викликає зміну робочої частоти автогенератора, яка й уможливлює реєстрацію фізичних величин. Додатковою перевагою запропонованої конструкції є наявність оптичного зворотного зв’язку який забезпечує високу стабільність робочого сигналу.

Рідкокристалічні комірки використовувались нами як частотозадаючі ланки сенсора під час розроблення ряду пристроїв для визначення різних фізичних величин. Відмінність між ними полягає в конструкції частотозадаючого елемента. Наприклад, для створення сенсора тиску одна з обмежуючих шар РК поверхонь виконується у вигляді мембрани. Це дає змогу, в залежності від тиску, змінювати товщину шару РК і, як наслідок, величину

петлі гістерезису, що приводить до зміни частоти автогенератора та реєстрації тиску.

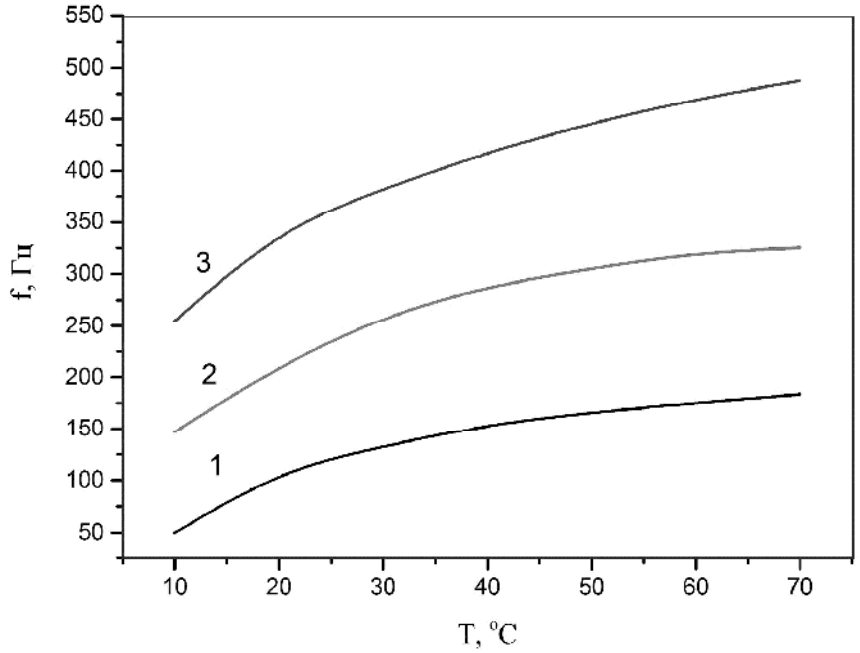



Рис.2.37. Залежність частоти автогенератора від температури для суміші СЖК-1 + 2,0 % ВІХН-3 при значенні керуючої напруги: 1-10В; 2-20В; 3- 30В.

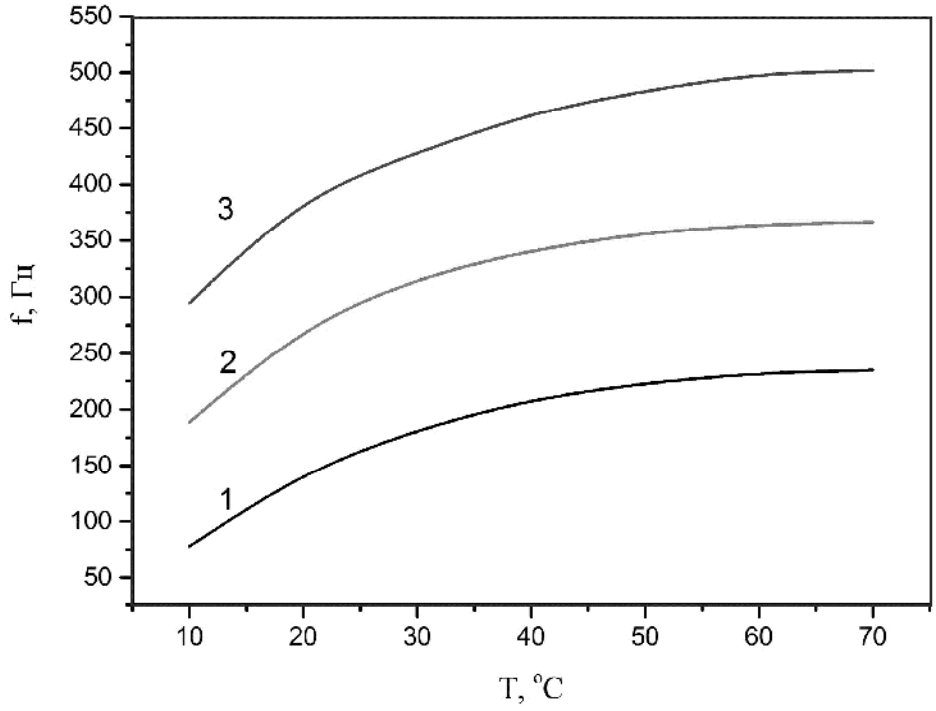



Рис.2.38. Залежність частоти автогенератора від температури для суміші СЖК-1 + 1,0 % ВІХН-3 при значенні керуючої напруги: 1-10В; 2-20В; 3- 30В.

На рис. 2.37, 2.38 зображено залежності частоти оптичного автогенератора від температури для різних значень керуючої напруги. Як видно з залежностей, зростання температури приводить до збільшення частоти генерації для всіх досліджених зразків. Для суміші з меншим вмістом оптично активної домішки (ОАД) спостерігаються більші значення частот, що пояснюється меншим часом реакції комірки. Однак для зразків з меншою кількістю ОАД характерні менші значення глибини модуляції.

Встановлено, що максимальна чутливість сенсора температури на основі РК автогенератора становить біля 0.1 $^{o}$С/Гц. В розробленому автогенераторі в якості сигнального перетворювача ми пропонуємо використати, стандартні частотні перетворювачі.

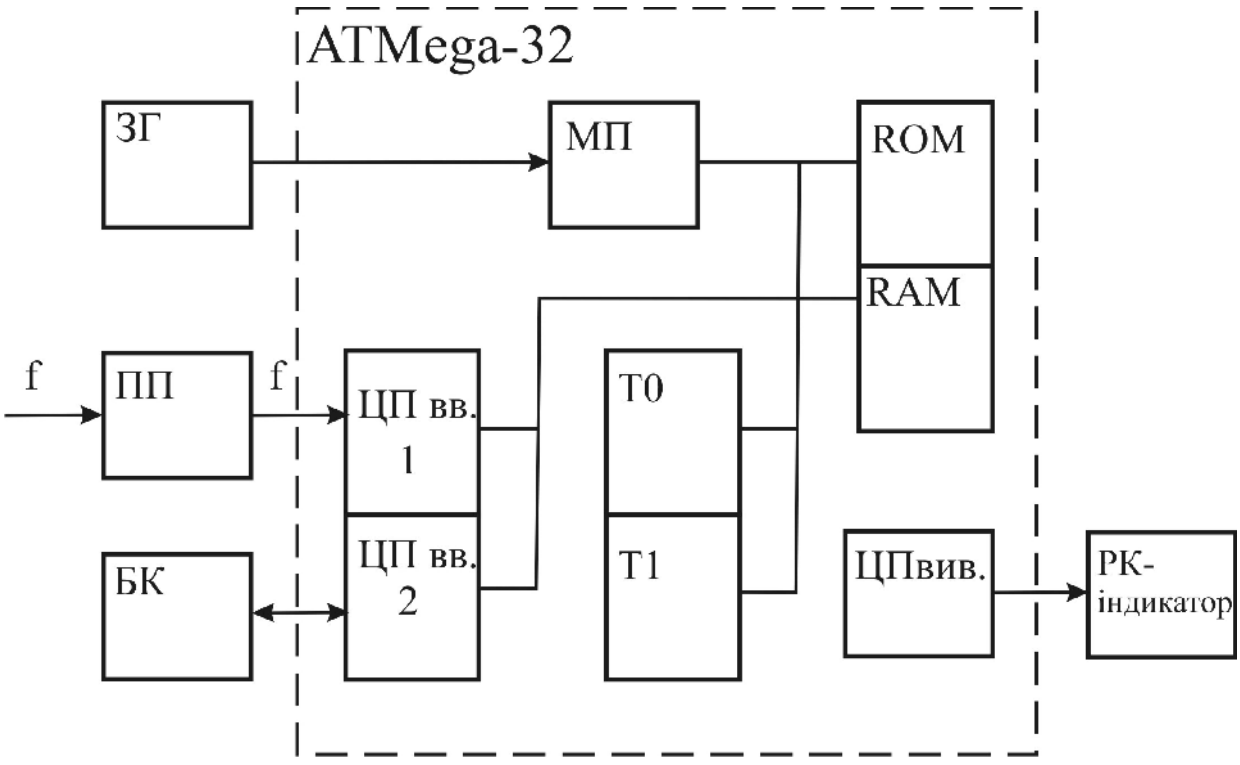



Рис.2.39. Функціональна блок-схема сигнального перетворювача частоти.

У відповідності до вихідних параметрів автогенераторапера сенсора фізичних величин (тиск, температура, концентрація газу), які визначаються зміною частоти, розроблено функціональну схему сигнального перетворювача частоти (рис. 2.39). Як видно з рис. 2.39, схема сигнального перетворювача частоти складається з мікроконтролера, центральним елементом якого є

мікропроцесор (МП), до складу якого входять два програмовані таймери (Т0, Т1), цифрові порти вводу (ЦП вводу), пам’ять програм (ROM), та пам’ять даних (RAM). Крім цього, до складу схеми входить зовнішній задаючий генератор (ЗГ), блок керування (БК) та блок відображення інформації (РК індикатор). Режими роботи мікропроцесора задаються блоком керування, частотні параметри визначаються зовнішнім генератором ЗГ. Відображення отриманих результатів вимірювання, отриманих із цифрового порту виводу (ЦП виводу), здійснюється за допомогою РК індикатора.

Мікропроцесор здійснює обробку вхідної інформації, яка надходить через цифрові порти вводу відповідно до вибраного режиму, який, своєю чергою, задається блоком керування. Алгоритм обробки та аналізу інформації реалізовано у вигляді програмного коду, який зберігається у внутрішній пам’яті програм. Для зберігання проміжних результатів обчислень використовується вбудована пам’ять даних. Отримані значення частоти відображаються на РК індикаторі, інформація на який надходить від мікропроцесора через порти виводу.

Структурна схема уможливлює реалізацію режиму вимірювання, режиму калібрування та режиму тестування. У режимі вимірювання вхідний інформаційний сигнал аналізується мікропроцесором і результати вимірювання відображаються на РК індикаторі. У режимі калібрування мікропроцесор видає на цифрові порти виводу контрольні частоти, значення яких відображається на РК індикаторі. У режимі тестування відбувається перевірка блоку керування та блоку індикації.

Запропонований підхід до побудови зручно реалізувати на основі сучасних мікроконтролерів, переважна більшість яких містить у своїй структурі необхідні функціональні елементи. Проведена практична реалізація такого сигнального перетворювача на основі мікроконтролера фірми ATMEL ATMega32.

**Висновки до розділу 2**

1. Експериментально встановлено, що для всіх немато-холестеричних сумішей з малим процентним вмістом оптично активної домішки величина *dU* різко зростає зі збільшенням *d/Po* до деякої критичної точки, положення якої залежить від значення $\gamma = \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{33}}}$.Після критичної точки з подальшим збільшенням *d/Po* величина петлі гістерезису залишається сталою.

2. Встановлено, що максимум залежності $dU = f(\gamma)$ залежить від структури організації нематичної матриці.

3. Показано, що для немато-холестеричних сумішей, матриця яких має смектичну фазу, спостерігається аномальне зростання *dU* при низьких температурах, а для сумішей, без смектичної фази відбувається монотонне зростання *dU* зі зниженням температури.

4. Експериментально встановлено, що, шляхом зміни відсоткової концентрації холестерину в суміші в інтервалі 0,2…2 ваг%, можна змінити величину кроку та *dU*, причому константи пружності $K_{22}$ і $K_{33}$ при цьому залишаються постійними.

5. Для забезпечення стабільності *dU* в широкому температурному інтервалі рекомендовано використовувати нематичні матриці з упорядкованою структурою, із незначною смектичною флуктуаціє при низьких температурах..

6. Показано, що без врахування аномалій залежностей констант пружності Франка $K_{22}$ і $K_{33}$ в передперехідних областях залежність $K_{22}$ і $K_{33}$ від температури має лінійний характер. Ймовірно, аномалії зумовлені зростанням ролі флуктуацій смектичного параметра порядку з наближенням до точки фазового переходу.

7. Експериментально встановлено, що значення $\gamma = \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{33}}}$ зменшується для всіх розглянутих сумішей. зі збільшенням довжини молекули ефіру.

8. Встановлено, що критична концентрація холестеричної речовини в суміші залежить від порядкового номера ефіру холестерину в ній, а саме, зі збільшенням порядкового номера ефіру холестерину в гомологічному ряді максимум зміщується в область більших концентрацій ефіру.

9. Показано, що при збільшенні або зменшенні кроку індукованої спіралі з температурою по експоненті, в кривих залежностей $dU=f(T)$ спостерігається якісне зменшення, що обумовлено аномальним ростом $dU$ зі зменшенням температури. Отже, врахування передперехідних явищ і аномалій в залежності констант пружності при низьких темературах приводить до істотної зміни при низьких температурах.

10. Проведено комп'ютерне моделювання впливу поверхні в приповерхневій області з використанням орієнтуючих полімерних шарів на електрофізичні характеристики рідких кристалів

11. Проведені коноскопічні дослідження підтвердили наявність у зразку тонких приповерхневих гомеотропно орієнтованих шарів, що встановлено результатами комп'ютерного моделювання.

12. Отримані результати дають змогу прогнозувати поведінку вільних шарів РК під час створення сенсорних структур.

13. Експериментально показано можливість використання рідкокристалічної комірки як елемента задання частоти.

14. Розроблено сенсор температури на основі оптичного РК автогенератора, що забезпечцє визначення температури в діапазоні існування мезофази (-10…+70$^{o}$C) з чутливістю0,1$^{o}$C/Гц.

# РОЗДІЛ 3. СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОКОМПОЗИТІВ ЯК АКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ

Оптичні сенсори газів характеризуються чутливістю, селективністю та стабільністю роботи. Вхідний сигнал оптичних сенсорів формується на основі джерел світла (лазери, світлодіоди, системи RGB-світлодіодів) та фотоприймачів (фотодіоди, фототранзистори, системи RGB-фотодіодів тощо). Активні середовища, розташовані між джерелом світла та фотоприймачем, змінюють свої спектральні характеристики під впливом різних факторів, впливаючи в такий спосіб на вихідний сигнал фотоприймача. Отже, інформативним сигналом оптичних сенсорів є струм фотоприймача, який підлягає подальшій обробці в схемі сигнальних перетворювачів.

На основі проведених досліджень ми пропонуємо новий підхід до створення оптичних сенсорів монооксиду вуглецю. Підхід ґрунтується на визначенні оптичних властивостей холестеричних рідких кристалів, легованих сполуками заліза – наночастинками магнетиту. Такий газовий сенсор може виявити оптичний сигнал у видимій області спектра, оскільки оптичне відбивання спіральної структури холестеричного рідкого кристала лежить у видимому діапазоні [134,135].

Для розроблення газового сенсора була використана висока чутливість магнетиту до монооксиду вуглецю, яка пояснюється присутністю атомів заліза в степені окислення +2 і +3, як і в молекулі гемоглобіну. Відомо, що легування РК нанорозмірними домішками $Fe_3O_4$ та $Fe_2O_3$ дає змогу керувати магнітними та електричними властивостями РК, їхньою орієнтацією в зовнішніх електричному та магнітному полях [136, 137]. При цьому наночастинки магнетиту відіграють важливу роль у структурних переходах рідких кристалів. Виявлено значний вплив $Fe_3O_4$ на енергію зчеплення нематичних РК. Однак вплив наночастинок $Fe_3O_4$ на оптичні характеристики холестеричних рідких кристалів під дією монооксиду вуглецю залишається недостатньо вивченим. Також не виявлено впливу концентрації та валентності нанорозмірних домішок

магнетиту на оптичні властивості холестеричних рідких кристалів, а отже, на ефективність виявлення токсичної дії монооксиду вуглецю.

Робота сенсора базується на реєстрації зміни довжини хвилі мінімуму пропускання у спектрі холестеричного рідкого кристала [132]. Реєстрація зміни у спектрі пропускання холестеричного рідкого кристала здійснюється у видимій області спектра. Інформативним сигналом у таких сенсорах є довжина хвилі селективного відбивання. Величина зміщення у спектрі є пропорційною до концентрації монооксиду вуглецю в повітрі. Як відомо, CO вдихається разом із повітрям і надходить у кров, де конкурує з киснем за молекули гемоглобіну. Гемоглобін є складним білком класу хромопротеїнів, що містять простетичну пігментну групу – гем (рис. 3.1). Гемоглобін є тетрамером, тобто складається з чотирьох субодиниць. Головна функція гемоглобіну полягає у транспорті дихальних газів. У капілярах легенів в умовах надлишку кисню останній з'єднується з гемоглобіном [139]. Потоком крові еритроцити, що містять молекули гемоглобіну зі зв'язаним киснем, доставляються до органів і тканин, де кисню мало, що необхідно для протікання окислювальних процесів.

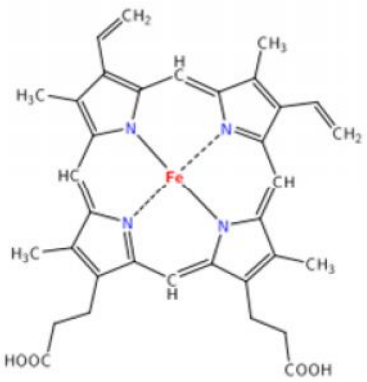



Рис. 3.1. Гем − простетична група гемоглобіну.

Під час дихання монооксид вуглецю потрапляє в кров, розчиняючись у плазмі крові, проникає в еритроцити та вступає в необоротний зв'язок із гемоглобіном, зв'язуючись із ним в 200-500 разів швидше, ніж кисень. При цьому утворюється комплекс (карбоксигемоглобін) що спричинює дефіцит кисню, незворотні пошкодження головного мозку, легенів і серця.

## 3.1.Дослідження спектральних характеристик нанокомпозитів на основі холестеричних рідких кристалів, інтеркальованих нанорозмірними частинками

Бінарні системи для первинних перетворювачів оптичних сенсорів, наприклад, рідкий кристал–наночастинка, дають змогу створювати ефективні активні середовища, в яких наночастинка, взаємодіючи з досліджуваною речовиною, забезпечує модуляцію спектральних характеристик рідкого кристала [140].

Розглянемо особливості функціонування таких систем на прикладі нанокомпозитів на основі холестеричних рідких кристалів з домішками наночастинок $Fe_2O_3$, $Fe_3O_4$ в якості чутливого матеріалу первинного перетворювача оптоелектронного сенсора монооксиду вуглецю. Наночастинки $Fe_2O_3$, $Fe_3O_4$ вибрані як елементи, які сорбують монооксид вуглецю. Механізм сорбції наночастинками монооксиду вуглецю розглянуто в роботі [141]. Методики створення нанокомпозитів на основі холестеричних рідких кристалів, допованих наночастинками, та дослідження спектральних характеристик і обробки експериментальних результатів описані в роботах [138, 139, 142, 143]. Для отримання однорідної суспензії наночастинки поміщались у РК, що перебував в ізотропній фазі, з подальшим перемішуванням в ультразвуковій ванні. Саме в ізотропній фазі РК спостерігалось ефективне перемішування наночастинок у шарі ХРК. У такий спосіб отримано однорідні суміші з низьким ступенем коагуляції в шарі рідкого кристала, а також виключено вплив стороннього матеріалу на чистоту створених суспензій. Для забезпечення однорідності суміші та уникнення утворення коагулятів необхідно забезпечити час перемішування в ультразвуковій ванні до 180 хв., за потужності ультразвуку до 70 Вт. У якості нанорозмірних частинок магнетиту було вибрано $Fe_2O_3$ та $Fe_3O_4$, які характеризуються різним ступенем окислення (+2 та +3). Метод допування нанорозмірних частинок магнетиту описаний у роботі [138]. Концентрація магнетиту $Fe_2O_3$ змінюється в інтервалі 0,7-3%. Перевищення концентрації

магнетиту $Fe_2O_3$ понад 3 % у ХРК матриці приводить до утворення коагулятів та різкого зменшення інтенсивності пропускання. Для отримання монооксиду вуглецю використовувалась хімічна реакція розкладання мурашиної кислоти (HCOOH) у присутності концентрованої сірчаної кислоти. Молекули концентрованої сірчаної кислоти відбирають молекули води з HCOOH з утворенням хімічно стабільних гідратів. Загальна схема реакції має вигляд:

$$HCOOH \xrightarrow{(H_2SO_4)_{конц.}} CO + H_2O;$$

Дослідження впливу шкідливих газів на нанокомпозити проводилось на розробленій установці [138].

Спектральні дослідження холестеричних рідких кристалів, легованих наночастинками магнетиту, здійснювались у діапазоні довжин хвиль 200-1200 нм, при кімнатних температурах і концентрації монооксиду вуглецю від 20 до 150 мг/м$^3$ (0 – 130,98 ppm). Ці концентрації CO вибиралися відповідно до гранично допустимих концентрацій (у відповідності з гігієнічними нормативами ГН 2.2.5.1313-03 (Україна), а саме, 20 мг/м$^3$ (17,5 ppm) відповідає гранично допустимій концентрації в робочій зоні та 150 мг/м$^3$ (130,98 ppm) – максимально допустимій концентрації на один подих). У дослідженнях використовували зразок (скляна підкладка з орієнтантом чи без нього, на яку наносили нанокомпозит), який поміщався в експериментальну камеру (об’єм $0{,}5\cdot10^{-3}$ м$^3$), до якої подавали моноксид вуглецю. Сорбційні властивості оцінювали за допомогою коефіцієнта спектральної чутливості S , який визначається зі співвідношення:

$$S = \Delta\lambda / \Delta C$$

де $\Delta\lambda$ – інтервал зміни довжини хвилі мінімуму пропускання РК суміші під дією газу, нм, $\Delta C$ – інтервал зміни концентрації газу, %.

Холестеричний рідкий кристал ЕЕ1 із додатною діелектричною анізотропією ($\Delta\varepsilon > 0$) був використаний як рідкокристалічна матриця. Цей ХРК термостабільний в області існування мезофази (15-50 °C) та хімічно інертний.

Аналіз спектрів пропускання ХРК, допованих $Fe_2O_3$ у вказаній концентрації, показує, що мінімум пропускання не змінює свого положення.

Проведено дослідження спектральних залежностей чистого ХРК ЕЕ1 під дією монооксиду вуглецю. На рис. 3.2 приведено спектри пропускання чистого ХРК після взаємодії з монооксидом вуглецю. Як видно з цих залежностей, положення мінімуму пропускання не змінюється зі зміною концентрації монооксиду вуглецю.

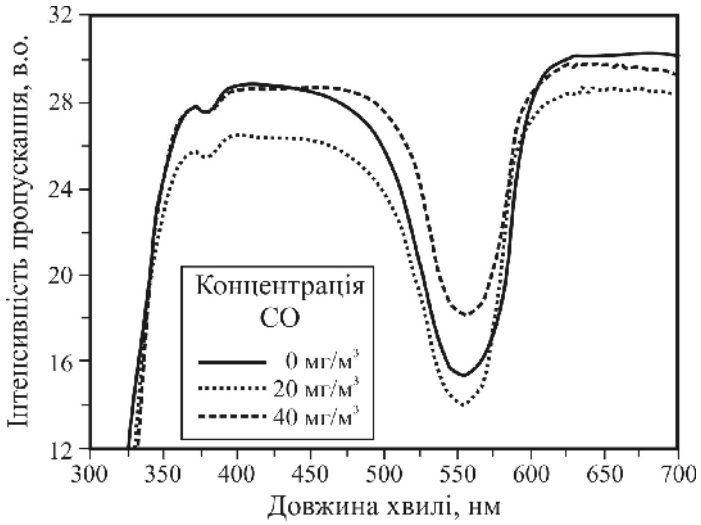



Рис. 3.2. Спектр пропускання рідкокристалічної суміші ЕЕ1 після взаємодії з монооксидом вуглецю [136]

Розглянемо зміну спектрів пропускання для нанокомпозиту на основі ХРК ЕЕ1, допованого магнетитом $Fe_2O_3$ [136], під впливом монооксиду вуглецю. На рис. 3.3. показано залежність зміни мінімуму довжини хвилі пропускання нанокомпозиту на основі ХРК ЕЕ1, допованого $Fe_2O_3$, від концентрації монооксиду вуглецю.

Аналізуючи отримані результати (рис. 3.3), можна стверджувати, що збільшення концентрації приводить до зміщення мінімуму пропускання в довгохвильову область, причому чим вища концентрація нанодомішки $Fe_2O_3$ у ХРК, тим більшою є зміна довжини хвилі пропускання. Якщо концентрація монооксиду вуглецю перевищує 30 %, крутизна розглянутих характеристик значно зменшується.

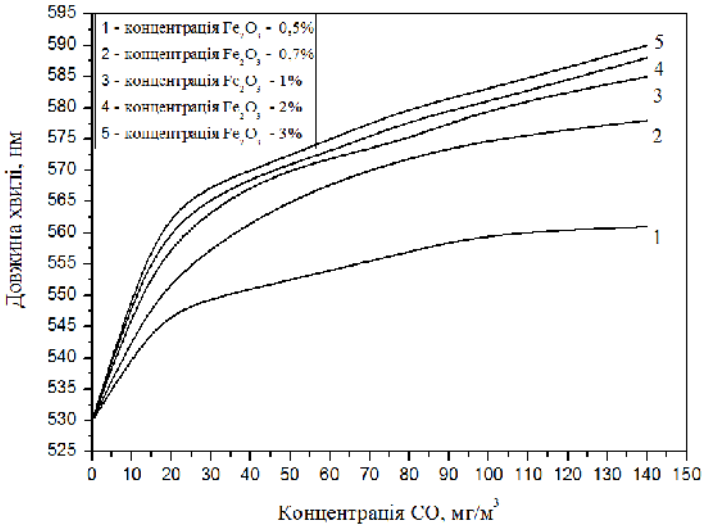



Рис. 3.3. Залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації монооксиду вуглецю для нанокомпозиту на основі холестеричного рідкого кристала ЕЕ1 для різних концентрацій магнетиту $Fe_2O_3$

На рис. 3.4 показано залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту $Fe_2O_3$ в нанокомпозиті.

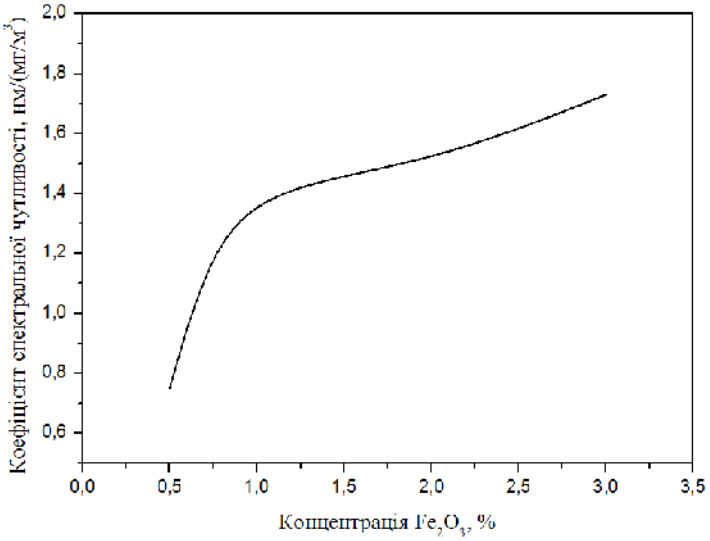



Рис. 3.4. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту $Fe_2O_3$ в ХРК ЕЕ1

Як видно з графічної залежності (рис. 3.4), зі збільшенням концентрації магнетиту $Fe_2O_3$ в нанокомпозиті коефіцієнт спектральної чутливості зростає. Це пов’язано зі збільшенням питомої поверхні магнетиту $Fe_2O_3$ внаслідок зростання його концентрації в ХРК матриці.

Розглянемо зміну спектральних характеристик для нанокомпозиту на основі ХРК матриці ЕЕ1 із наночастинками магнетиту $Fe_3O_4$ під впливом на цей нанокомпозит монооксиду вуглецю. Було синтезовано нанокомпозити на основі ХРК ЕЕ1 із концентрацією $Fe_3O_4$ від 0,17 до 1 %. Гранична концентрація магнетиту $Fe_3O_4$ обумовлена тим, що подальше збільшення її приводить до утворення коагулятів у нанокомпозиті. Аналіз спектральних характеристик нанокомпозитів на основі ЕЕ1, допованих $Fe_3O_4$ у вказаній концентрації, показує, що мінімум пропускання не змінює свого положення.

На рис. 3.5 показано залежності мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації монооксиду вуглецю (0-150 мг/м$^3$) для різних концентрацій магнетиту $Fe_3O_4$.

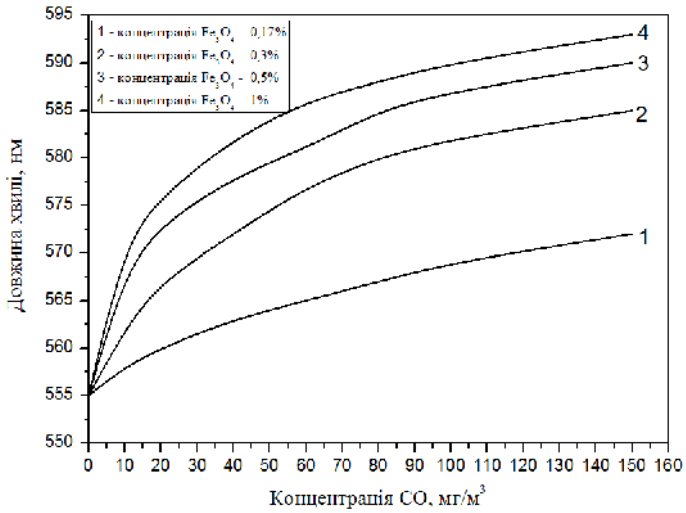



Рис. 3.5 Залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації монооксиду вуглецю для різних концентрацій магнетиту $Fe_3O_4$ у ХРК матриці ЕЕ1

Як видно із залежностей (рис.3.5), криві для $Fe_3O_4$ нагадують аналогічні криві для $Fe_2O_3$ і також характеризуються зміщенням мінімуму пропускання в довгохвильову область, причому чим вища концентрація нанодомішки $Fe_3O_4$ у ХРК, тим більше змінюється довжина хвилі мінімуму пропускання.

На рис. 3.6 показано залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту $Fe_3O_4$ в нанокомпозиті на основі ХРК матриці ЕЕ1.

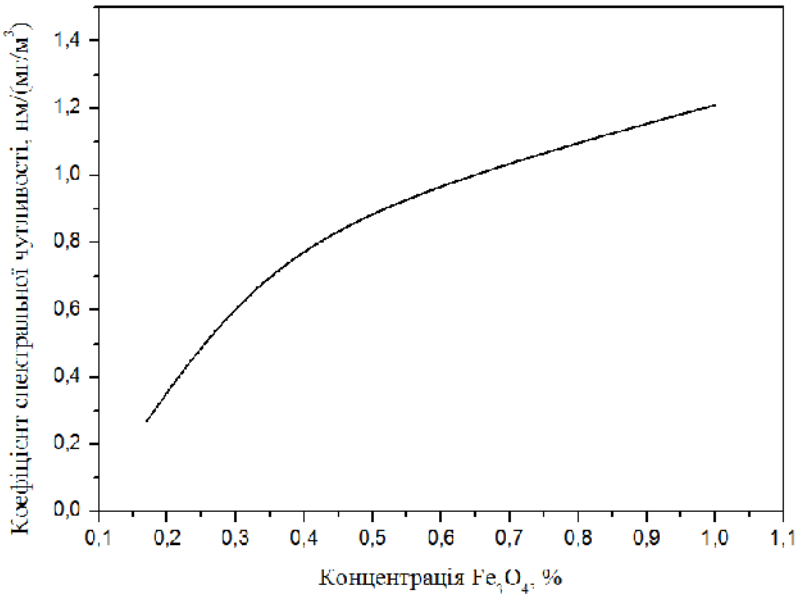



Рис. 3.6. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту $Fe_3O_4$ в ХРК ЕЕ1

Як видно з графічної залежності (рис. 3.6), аналогічно до випадку з $Fe_2O_3$, зі збільшенням концентрації магнетиту $Fe_3O_4$ в нанокомпозиті на основі ХРК матриці ЕЕ1 коефіцієнт спектральної чутливості зростає. Це пов'язано зі збільшенням питомої поверхні магнетиту $Fe_3O_4$ внаслідок зростання його концентрації в ХРК матриці. Аналіз отриманих залежностей коефіцієнта спектральної чутливості для нанокомпозитів на основі магнетиту $Fe_2O_3$ і $Fe_3O_4$ показує, що:

– незалежно від типу магнетиту збільшення його концентрації в ХРК матриці приводить до збільшення коефіцієнта спектральної чутливості;
– можна досягнути вищої концентрації $Fe_2O_3$ в холестеричній матриці без утворення коагулятів. Тому використання $Fe_2O_3$ дає можливість отримати вищий коефіцієнт спектральної чутливості.

Створено нанокомпозит на основі термостабільної холестеричної суміші CLC-2103L, легованої наночастинками магнетиту $Fe_3O_4$ з концентрацією 0,30-2 % [141]. Тонкодисперсний магнетит синтезований нами з використанням методу лужного гідролізу солей заліза (II) та заліза (III) та стабілізований олеатом натрію (OlNa), як описано в [137]. За даними рентгеноструктурного аналізу (ДРОН-2М, FeKα-випромінювання), отриманий магнетит

характеризується розширеними дифракційними піками, притаманними напіваморфним зразкам $Fe_3O_4$. Рентгенівський аналіз підтвердив існування кубічної фази зі структурою типу шпінелі, *Fd-3m* просторову групу, а також параметр решітки для наночастинок $Fe_3O_4$, що становить $a$ = 8,3490 Å. Середній розмір доменів дорівнює 75,5 (± 7,3) Å, він був розрахований із використанням рентгеноструктурного аналізу. Стабілізація наночастинок за допомогою OlNa викликає збільшення розміру доменів $Fe_3O_4$ до 89,4 (± 5,7) Å. ТЕМ світлину наночастинок $Fe_3O_4$, стабілізованих олеатом натрію, показано на рис. 3.7.

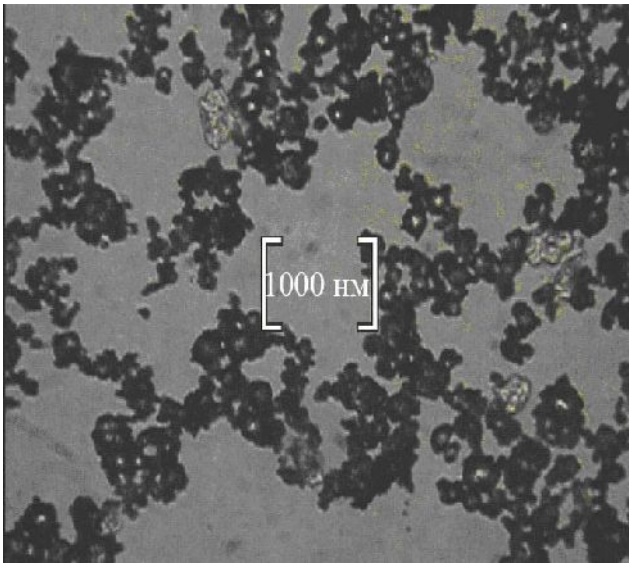



Рис.3.7. ТЕМ світлина наночастинок $Fe_3O_4$, стабілізованих олеатом натрію

Спектр оптичного пропускання рідкого кристала CLC-2103L характеризується інтенсивною смугою з мінімумом пропускання 597 нм. Під час легування ХРК магнетитом спостерігається зсув положення мінімуму в короткохвильову область. Крім того, величина зсуву зростає зі збільшенням концентрації магнетиту в РК. Таке зміщення можна пояснити існуванням адсорбційної взаємодії між РК і магнетитом.

На рис.3.8 показано оптичні спектри пропускання холестеричного рідкого кристала CLC-2103L (1) і холестеричного рідкого кристала CLC-2103L, легованого 0,63% (2) і 0,30% (3) магнетитом $Fe_3O_4$. Видно, що збільшення

концентрації магнетиту $Fe_3O_4$ в рідкому кристалі не приводить до зміщення мінімуму довжин хвилі пропускання.

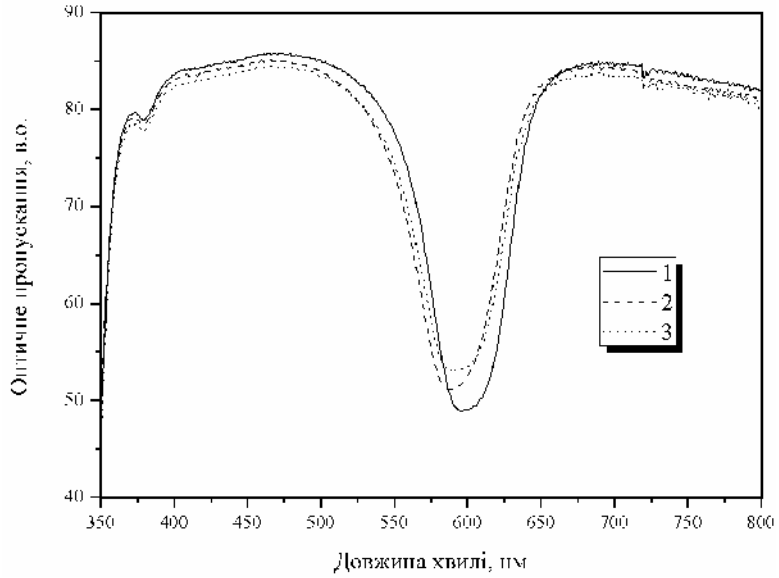



Рис. 3.8. Оптичні спектри пропускання холестеричного рідкого кристала CLC-2103L (1) і CLC-2103L холестеричного рідкого кристала, легованого 0,63% (2) і 0,30% (3) магнетитом $Fe_3O_4$ [138].

Розглянемо зміну спектральних характеристик для нанокомпозиту на основі ХРК матриці CLC-2103L із наночастинками магнетиту $Fe_3O_4$ під впливом на цей нанокомпозит монооксиду вуглецю.

На рис. 3.9 наведено залежності мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації монооксиду вуглецю (0-150 мг/м$^3$) для різних концентрацій наночастинок магнетиту $Fe_3O_4$ в ХРК матриці CLC-2103L.

Як видно із залежностей (рис. 3.9), криві для $Fe_3O_4$ характеризуються зміщенням мінімуму пропускання в короткохвильову область, причому чим вища концентрація нанодомішки $Fe_3O_4$ у ХРК, тим більшою є зміна довжини хвилі пропускання. Такий хід залежностей пояснюється різним характером утворення надмолекулярної спіральної структури.

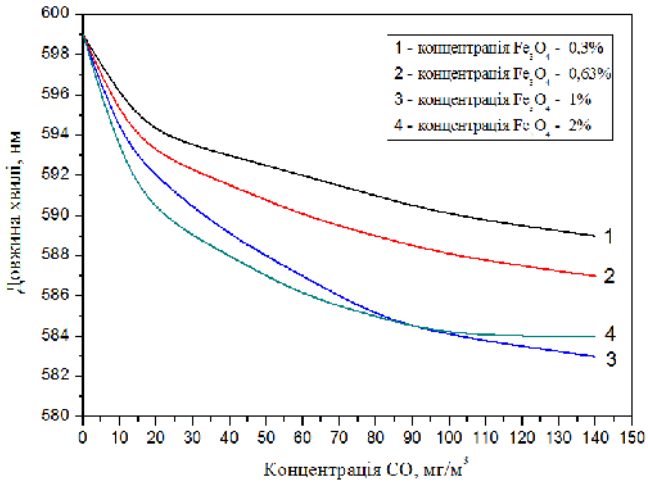



Рис. 3.9. Залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації монооксиду вуглецю для різних концентрацій магнетиту $Fe_3O_4$ у ХРК матриці CLC-2103L

На рис. 3.10 показано залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту $Fe_3O_4$ в ХРК CLC-2103L.

Як бачимо, збільшення концентрації $Fe_3O_4$ в ХРК CLC-2103L приводить до зростання коефіцієнта спектральної чутливості.

Отже, встановлено, що в нанокомпозитах на основі холестеричних рідких кристалів, легованих магнетитом, під впливом монооксиду вуглецю спостерігаються зміни в оптичних спектрах пропускання. Ці зміни можна пояснити взаємодією наночастинок магнетиту з молекулами монооксиду вуглецю. Водночас форма та симетрія наночастинок магнетиту можуть впливати на їхні електронні властивості та, відповідно, на механізм взаємодії з монооксидом вуглецю [138, 141, 144].

Магнетит (або оксид заліза (II, III)) вступає в активну реакцію з молекулами монооксиду вуглецю, в ході якої оксид заліза відновлюється до чистого заліза, що супроводжується формуванням діоксиду вуглецю відповідно до реакції:

$$Fe_3O_4 + 4CO \rightarrow 3Fe + 4CO_2$$

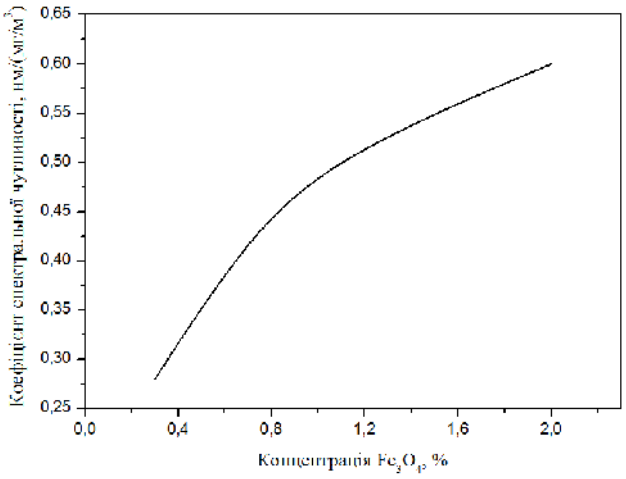



Рис. 3.10. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту $Fe_3O_4$ в ХРК CLC-2103L при концентрації CO від 0 до 20мг/м$^3$

Проте в наночастинках магнетиту, оточених рідким кристалом, перебіг цієї реакції з утворенням кінцевого продукту є нереальним. Можна припустити, що молекули CO, конкуруючи з молекулами рідкого кристала за адсорбцію на поверхні наночастинок магнетиту, можуть утворювати порівняно стабільні координаційні зв'язки з поверхнею магнетиту, а також із функціональними групами РК. Це призводить до порушення впорядкування холестеричного рідкого кристала, що спричиняє зміни спектра пропускання нанокомпозиту РК – магнетит, які тим більші, чим вища концентрація CO.

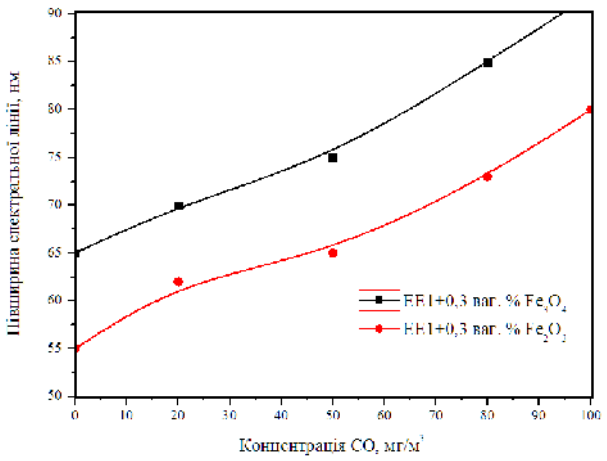



Рис. 3.11. Залежність півширини спектральної лінії від концентрації CO (0-87,32 ppm) для сумішей на основі холестеричної матриці ЕЕ1 із вмістом 0,3 ваг. % $Fe_3O_4$ та 0,3 ваг. % $Fe_2O_3$.

На рис. 3.11 наведено залежності півширини спектральної лінії від концентрації монооксиду вуглецю. Незалежно від типу магнетиту, зі збільшенням концентрації CO півширина спектральної лінії збільшується, причому значення півширини для магнетиту $Fe_3O_4$ є більшим.

## 3.2. Дослідження спектральних характеристик нанокомпозитів на основі холестеричних рідких кристалів, інтеркальованих у пористі матриці

Використання розроблених матеріалів як активного середовища оптичних сенсорів ускладнюється через їхній рідинний стан. Вирішенням цієї проблеми є інтеркаляція нанокомпозитів у наноструктуровану пористу матрицю. Таке рішення дає змогу значно підвищити технологічність первинних перетворювачів та розширити галузі їх можливого застосування [145].

Яскравим прикладом таких пористих систем є оксид кремнію, оксид алюмінію, фосфід галію тощо. Важливими характеристиками пористих матеріалів є пористість, розмір і форма пор, відстань між порами, характер просторового впорядкування та морфологія, а також анізотропія показника заломлення. Саме ці характеристики визначають фізичні властивості пористих матеріалів та істотно впливають на характеристики наноструктур. Важливе місце займає пористий оксид алюмінію, який відрізняється насамперед простотою отримання. Можливість керування розмірами пор і відстанню між ними за допомогою режиму травлення роблять цей матеріал унікальним з погляду його використання в якості твердотільної матриці. Як правило, ці матриці характеризуються впорядкованою системою пор із поверхневою густиною $10^9$-$10^{10}$ $см^{-2}$, завдяки чому вони мають високу адсорбційну здатність. Технологія отримання пористого оксиду алюмінію дозволяє змінювати як розміри пор, так і відстань між ними від десятків до сотень нанометрів [146]. Це відкриває широкі області його застосування в якості матриці для створення наноструктур.

Наноструктури на основі пористих матриць з інтеркальованими в пори феромагнетиками, п’єзо- та сегнетоелектриками, оптично активними

матеріалами є перспективним матеріалом у зв'язку з подальшим розвитком нанотехнологій [141, 147-149]. Із великої кількості мезопористих матриць матриці на основі оксиду алюмінію вирізняються, насамперед, простотою отримання [150].

У пори оксиду алюмінію вводився холестеричний рідкий кристал ЕЕ1 з температурою переходу в ізотропний стан 301 К. Як нанопористу матрицю використано $Al_2O_3$ із різним діаметром пор, а саме, 20, 25, 35, 40, 50 та 60 нм [150]. Спектроскопічні дослідження суміші рідкого кристала з магнетитом $Fe_3O_4$ показали, що введення до складу РК матриці магнетиту концентрацією 0,3 % не приводить до зсуву максимуму в їхньому спектрі пропускання. Введення рідкого кристала в мезопористу матрицю $Al_2O_3$ здійснювалося методом прямої інтеркаляції РК в пори матриці. Зразок $Al_2O_3$ занурювали в РК речовину, де витримували впродовж доби при кімнатній температурі. Нанопориста матриця характеризується високою абсорбційною здатністю, тому перед впровадженням допованого ХРК в матрицю її витримували протягом 24 годин у вакуумі $10^{-5}$ Па при кімнатній температурі [145].

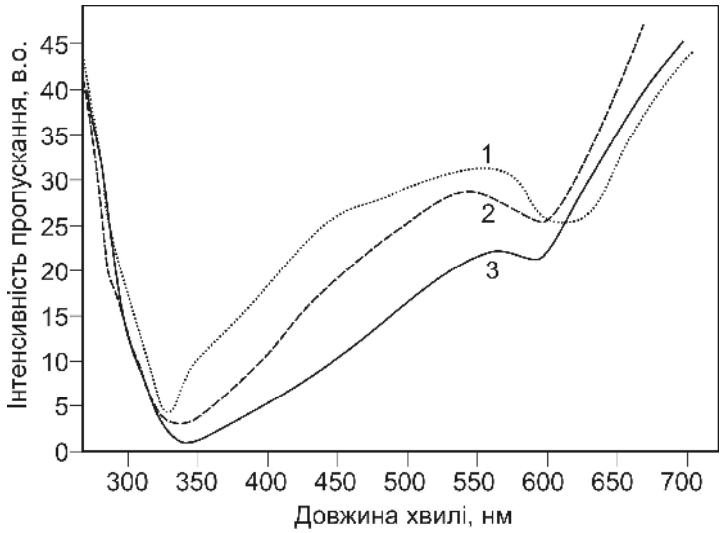



Рис. 3.12. Залежність інтенсивності пропускання від довжини хвилі для нанокомпозиту на основі ХРК ЕЕ1 із магнетитом $Fe_3O_4$, інтеркальованого в пористу матрицю $Al_2O_3$ із діаметром пор: 1 – 25 нм, 2 – 40 нм, 3 –60 нм [145].

Під час приготування зразків не проводились додаткові маніпуляції для усунення залишкового шару РК з поверхні оксиду алюмінію.

Перейдемо до аналізу отриманих результатів. Мезопориста матриця прозора в усьому видимому діапазоні. На спектральній характеристиці холестеричного РК спостерігається яскраво виражений мінімум на довжині хвилі 560 нм. Причиною його виникнення є ефект селективного відбивання світла, викликаний наявністю в шарі рідкого кристала просторової періодичної надмолекулярної структури.

На рис. 3.12 показано типову спектральну характеристику наноструктури, на якій спостерігаємо два мінімуми пропускання, один з яких відповідає довжині хвилі пропускання рідкокристалічної речовини на поверхні, а другий – РК, розташованого в порах. На рис. 3.13, 3.14 наведено залежність мінімуму пропускання наноструктур з РК у порах і на поверхні плівки від діаметра пор [145].

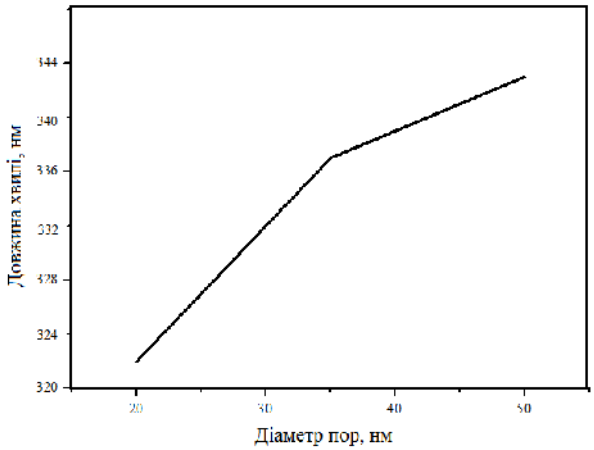



Рис. 3.13. Залежність мінімуму пропускання наноструктур з РК у порах плівки від діаметра пор

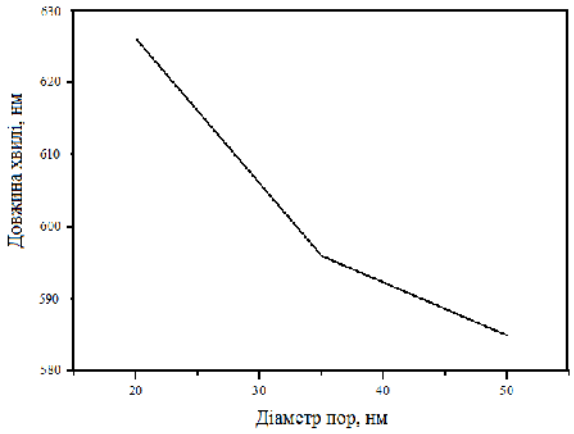



Рис.3.14. Залежність мінімуму пропускання наноструктур з РК на поверхні плівки від діаметра пор

Як видно із залежності (рис. 3.13), зростання діаметра пор оксиду алюмінію приводить до збільшення кроку спіралі інтеркальованого ХРК, тобто крок прямує до свого рівноважного стану. А для ХРК, який міститься на поверхні плівки (рис. 3.14), збільшення діаметра пор приводить до зменшення кроку спіралі. Отримані залежності свідчать, що деформація кроку холестеричної спіралі значною мірою залежить від розміру обмежувальної

поверхні (пор). Проаналізуємо характер сил, які діють на крок спіралі в умовах обмеженої геометрії.

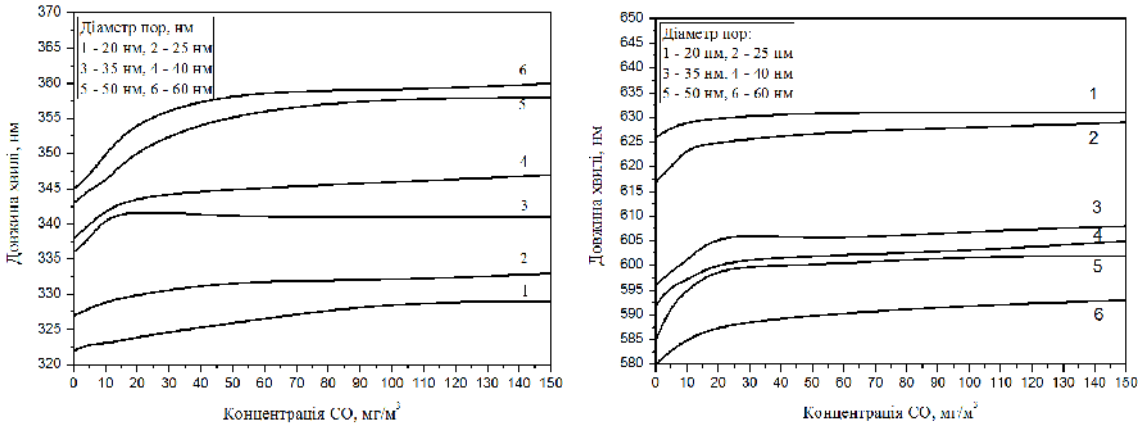
Розглянемо основні фактори, що приводять до зміни кроку спіралі холестеричного рідкого кристала, який міститься на поверхні та в порах оксиду алюмінію. Показано, що після впровадження сегнетоелектрика в пористі матриці спостерігається зміщення температур фазових переходів [149,150]. Одна з причин цього явища полягає в тому, що коефіцієнти теплового розширення пористої матриці та сегнетоелектрика є різними. Термопружні напруження, виникнення яких є наслідком такої різниці коефіцієнтів, можуть приводити до зміни фізичних властивостей матеріалів, введених у пори [150]. У нашому випадку зміну кроку холестеричної спіралі в порах матриці також можуть спричиняти термопружні напруження, які виникають внаслідок різних коефіцієнтів теплового розширення оксиду алюмінію та холестеричного рідкого кристала. Зміщення температур фазових переходів є наслідком зміни параметра порядку, а відповідно і кроку.

Розглянемо характер зміни кроку плівки, яка міситься на поверхні оксиду алюмінію. На плівку в цьому напрямку діють як поверхневі, так і капілярні сили, внаслідок чого відбувається зменшення величини кроку, причому, чим більший діаметр пор, тим менший крок.

Розглянемо залежності зміни мінімуму пропускання від концентрації CO в порах і на поверхні пористої структури (рис.3.15).

Під впливом монооксиду вуглецю на композит РК–магнетит відбувається конкурентна взаємодія між молекулами монооксиду вуглецю та молекулами РК на адсорбуючій поверхні наночастинки $Fe_3O_4$. Можна припустити, що молекули CO, конкуруючи з молекулами рідких кристалів внаслідок поглинання на поверхні наночастинок магнетиту, можуть утворювати порівняно стабільні координаційні зв’язки з поверхнею магнетиту, а також із функціональними групами РК. Це призводить до порушення впорядкування холестеричного рідкого кристала, що зумовлює зміну спектра пропускання композиту РК–магнетит. Для прикладу, найінтенсивніше взаємодія з

монооксидом вуглецю відбувається в наноструктурах з діаметром пор 35 і 50 нм до концентрації 10 мг/м$^3$ (8,73 ppm). Саме на цій ділянці спостерігається максимальна чутливість магнетиту до CO.




а) б)

Рис. 3.15. Залежність зміни мінімуму пропускання від концентрації CO в порах (а) та на поверхні пористої структури (б)

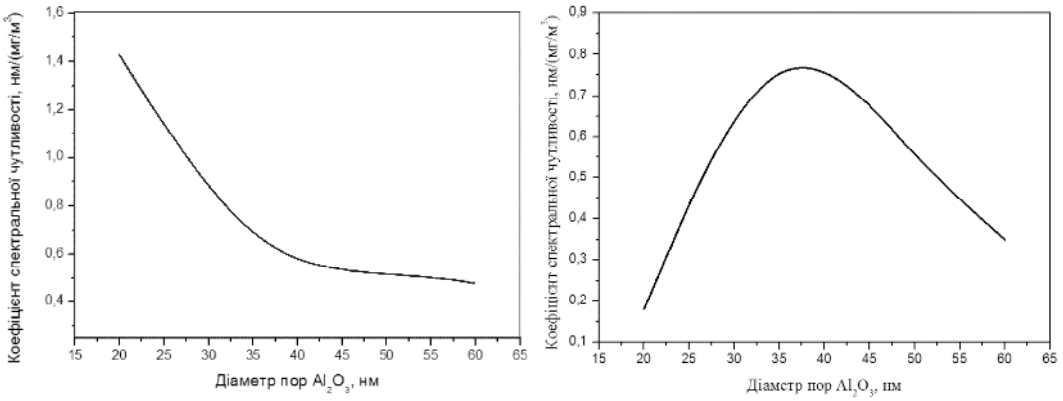
Розглянемо також характер залежності зміни довжини хвилі мінімуму пропускання від концентрації CO в наноструктурах із різними порами для плівок на поверхні. Максимальна чутливість спостерігається до концентрації CO, що становить 20 мг/м$^3$ (17,46 ppm), незалежно від діаметра пор. У разі подальшого зростання концентрації монооксиду вуглецю спостерігається вихід кривих на насичення. Таку поведінку можна пояснити завершенням конкуруючої взаємодії між молекулами монооксиду вуглецю та рідкого кристала внаслідок обмеження поверхні наночастинки $Fe_3O_4$, покритої поверхнево-активною речовиною (ПАР). Отже, взаємодія композиту РК–магнетит із монооксидом вуглецю проходить за два етапи: перший – це взаємодія $Fe_3O_4$ з монооксидом вуглецю, що є переважаючим процесом; другий – зміна дальнього орієнтаційного порядку, а отже, впорядкування холестеричного рідкого кристала та зміни у спектрі пропускання.

Дещо інший характер зміни довжини хвилі від концентрації CO в різних наноструктурах спостерігається в плівці, яка перебуває на поверхні. Найінтенсивніше зміщення максимуму відбувається до концентрації 20 мг/м$^3$

(17,46 ppm), а подальше збільшення концентрації CO не впливає на його положення [150].

На рис. 3.16 а, б показано залежності коефіцієнта спектральної чутливості від діаметра пор $Al_2O_3$ для нанокомпозиту на основі ХРК ЕЕ1 із 0,3 % магнетиту $Fe_3O_4$.

Розглянемо основні закономірності у зміні спектральних характеристик, якщо в якості матриці використано пористий діоксид кремнію, в пори якого вводять термостабільний холестеричний рідкий кристал ЕЕ1, допований наночастинками магнетиту $Fe_3O_4$ з концентрацією 0,17, 0,3 % [138].




а) б)

Рис. 3.16. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від діаметра пор $Al_2O_3$ для нанокомпозиту на основі ХРК ЕЕ1 із 0,3 % магнетиту $Fe_3O_4$ : а - в порах ; б - на поверхні пористої структури (концентрація монооксиду вуглецю становить 0-20 мг/м$^3$)

Спектроскопічні дослідження суміші рідкого кристала з магнетитом $Fe_3O_4$ показали, що введення магнетиту в рідкий кристал не приводить до зміщення мінімуму пропускання ХРК.

Спектроскопічні дослідження отриманого нанокомпозиту показали, що мінімум пропускання зміщується в короткохвильову область і становить 366 нм. Введення холестеричного рідкого кристала, допованого магнетитом, у пори матриці зумовлює деформацію кроку спіралі, внаслідок чого мінімум пропускання нанокомпозиту зміщується в короткохвильову область. Як відомо, поверхня має великий вплив на орієнтацію та впорядкованість РК молекул. У

випадку «обмеженої геометрії» (розмір пори є порівнянним із лінійними розмірами молекул РК) відбувається зростання впорядкованості РК, яке приводить до зміщення фазових переходів у напрямку вищих температур. Цей процес супроводжується дрейфом інших макропараметрів РК, зокрема кроку спіралі.

На рис. 3.17 наведено залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації монооксиду вуглецю для нанокомпозиту на основі пористого оксиду кремнію з холестеричним рідким кристалом ЕЕ1 із 0,3 % магнетиту $Fe_3O_4$.

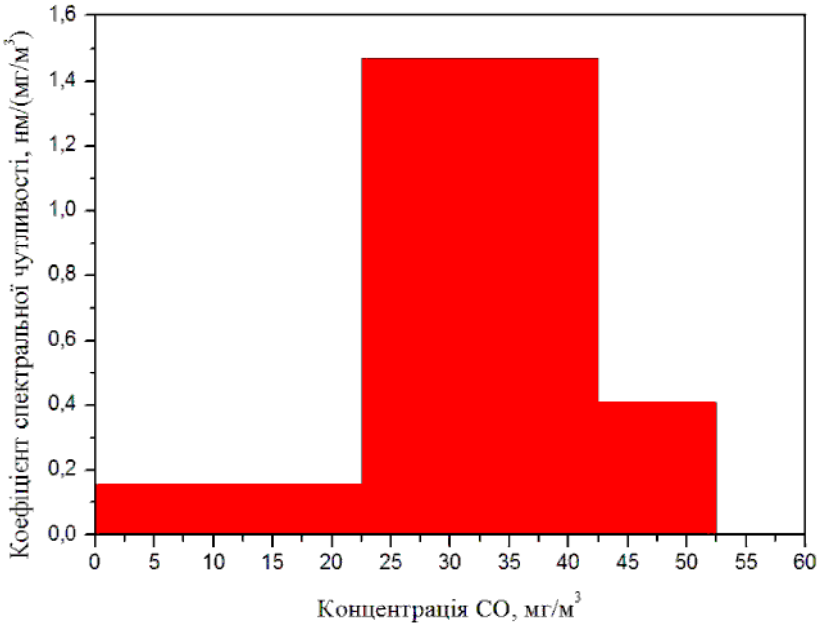



Рис. 3.17. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації монооксиду вуглецю для нанокомпозиту на основі пористого оксиду кремнію з холестеричним рідким кристалом ЕЕ1 із 0,3 % магнетиту $Fe_3O_4$.

Аналіз отриманої залежності показує, що максимального свого значення (1,47 нм/(мг/м$^3$)) коефіцієнт спектральної чутливості досягає в діапазоні концентрацій монооксиду вуглецю 22,5–42,4 мг/м$^3$.

Проведено дослідження нанокомпозиту на основі холестерико-нематичної суміші, допованої нанотрубками нітриду алюмінію (AlN), в якості активного середовища первинного перетворювача оптичного сенсора діоксиду сірки [151].

Нами було використано холестерико-нематичну суміш на основі холестеричного рідкого кристала CLC2101L, у який вводили нематичний рідкий кристал 5CB із концентрацією 0–40 ваг. %. Суміш нагрівали до температури, на 5–7 °C вищої від температури фазового переходу в ізотропний стан, та підтримували цю температуру протягом 1 год. Запропоновано також використання нанотрубок нітриду алюмінію, який є широкосмуговим напівпровідником, отриманим із використанням аерозольного методу. Середня довжина та діаметр наночастинок нітриду алюмінію становили відповідно 10,2 нм і 4 нм, співвідношення довжини до діаметра дорівнювало 2,55. До холестерико-нематичної суміші, яка перебувала в ізотропному стані, вводили нанотрубки нітриду алюмінію з концентрацією 0,15, 0,29 та 0,46 ваг. %. Отримані нанокомпозити обробляли впродовж 30 хвилин в ультразвуковій ванні Ya Xun YX 2100 з робочою частотою 42 кГц та потужністю 50 Вт. Оптимальна концентрація складників у композиті визначалась експериментально шляхом зміни складу компонент у суміші.

За результатами спектральних досліджень термостабільного холестеричного рідкого кристала CLC2101L в інтервалі температур 22–30 °C було виявлено мінімум пропускання на довжині хвилі $\lambda$=486 нм. Додавання до холестерика CLC2101L нематичного РК 5CB з концентрацією 0–40 ваг. % спричинило зміщення мінімуму пропускання довжини хвилі в довгохвильову область, крива 1 (рис. 3.18). Після внесення нанотрубок нітриду алюмінію з концентраціями 0,15, 0,29 та 0,46 ваг. % спостерігається зсув мінімуму пропускання в довгохвильову область, крива 2 (рис. 3.18). Як видно з кривої 2 (рис. 3.18), при концентрації 5CB 22 ваг. % мінімум пропускання становить 739 нм.

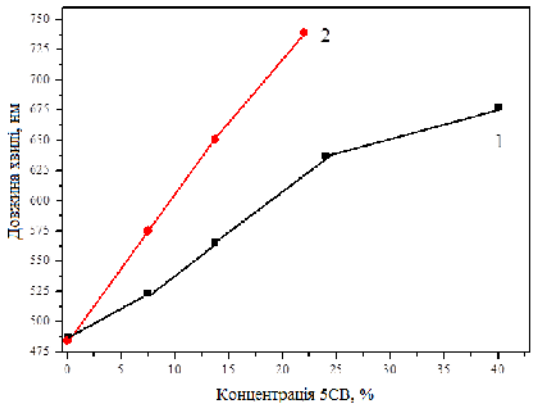



Рис. 3.18. Спектральна залежність зміни мінімуму пропускання в залежності від концентрації 5CB для холестерико-нематичної суміші до (1) та після (2) внесення нанотрубок нітриду алюмінію [151]

Подальше збільшення концентрації нематичного РК приводить до зміщення мінімуму пропускання в ІЧ область спектра.

Дослідження нанокомпозитів на основі холестерико-нематичної суміші з нанотрубками AlN з концентраціями 0–0,46 ваг. % показали, що для концентрації нанодомішки AlN 0,29 ваг. % зсув довжини хвилі мінімуму пропускання є максимальним. Для створення матеріалу чутливого елемента для первинного перетворювача газового сенсора діоксиду сірки досліджували вплив діоксиду сірки з концентраціями 0-400 мг/м$^3$ на композит на основі холестерико-нематичної суміші з нанотрубками нітриду алюмінію 0,29 ваг. %. Спектральні залежності показано на рис. 3.19.

На рис. 3.20 показано залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації $SO_2$ для різних концентрацій AlN у матриці CLC2101L+5CB 14%.

Як видно з рис. 3.20, під впливом мінімальної концентрації $SO_2$ відбувається значний зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область спектра. Однак зі збільшенням концентрації $SO_2$ подальшого значного зміщення мінімуму пропускання не відбувається, а на залежності спостерігається стан насичення.

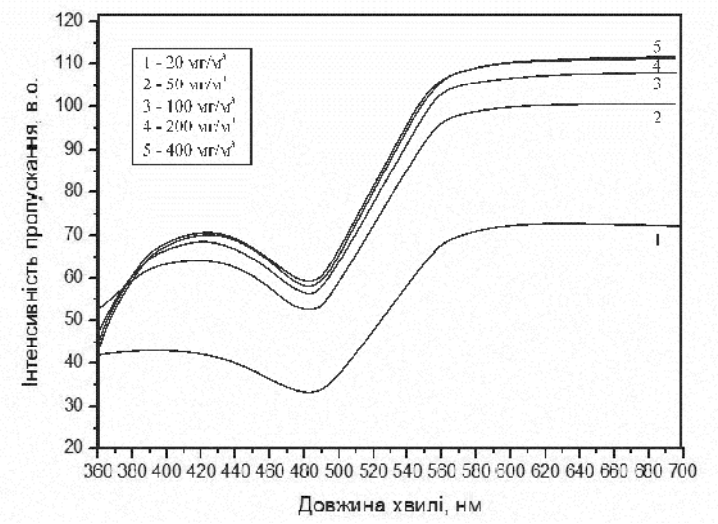



Рис. 3.19. Залежність інтенсивності пропускання від довжини хвилі для нанокомпозиту на основі CLC2101L+14% 5CB+0,29% AlN час реакції 5 хв для різних концентрацій $SO_2$

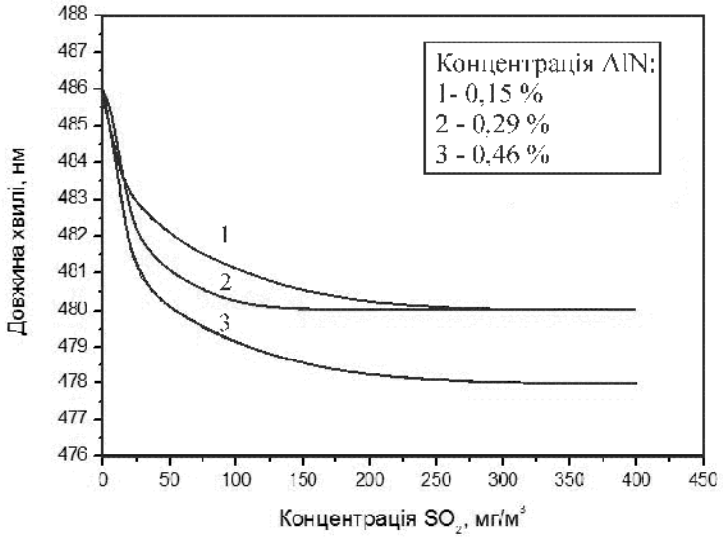



Рис.3.20. Залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації $SO_2$ при різних концентраціях AlN для CLC2101L + 14% 5CB

На рис. 3.21 показано залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації AlN у матриці CLC2101L+5CB14%, визначеного для різних концентрацій $SO_2$. Максимальне значення коефіцієнта спектральної чутливості досягається у діапазоні значень 25-75 мг/м$^3$.

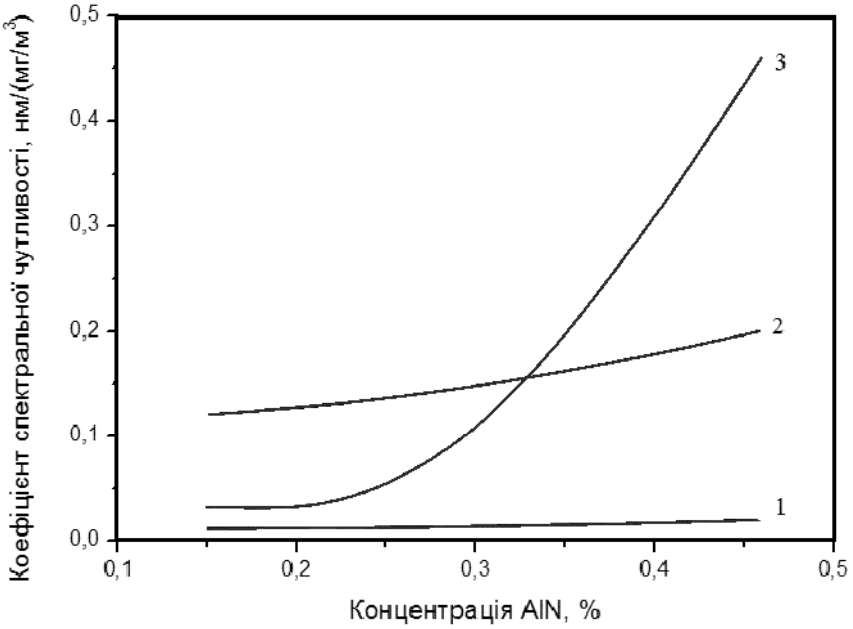



Рис. 3.21. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації AlN для CLC2101L+14% 5CB ( концентрація $SO_2$: 1–75-150мг/м$^3$; 2 – 0-25мг/м$^3$ ; 3–25-75 мг/м$^3$

Проведені нами дослідження показують, що досягти максимального оптичного відгуку нанокомпозиту, який проявляється у зміні положення мінімуму пропускання в присутності аналіту, можна, змінюючи концентрацію компонентів у холестерико-нематичній суміші.

## 3.3. Розроблення полімердиспергованого рідкокристалічного матеріалу як активного середовища оптичного сенсора

Якщо об’єктом детектування є не хімічна речовина, а фізична величина, немає необхідності в безпосередньому контакті оптично активного матеріалу з оточуючим середовищем, відпадає необхідність у наноструктурованих пористих матрицях. Їх можна замінити на полімерні матеріали з впровадженим у них чутливим матеріалом.

Для отримання активного середовища первинного перетворювача оптоелектронного сенсора використано полімердиспергований холестеричний рідкий кристал [152]. Концентрація холестеричних рідких кристалів KET90600 та KET90700 у полімерній матриці «Формат ФВ-72» становила 30, 40 ваг. %.

Фотополімерна матриця була виготовлена згідно з технічними умовами «Композиція фотополімеризаційна «Формат ФВ-72». Основна вимога до вибраних матеріалів полягає в усуненні взаємної нерозчинності полімеру та рідкого кристала, яка зумовлює утворення крапель РК в шарі полімеру під час перемішування. Ця наноструктура отримувалась внаслідок механічного перемішування протягом 30 с при 50 об/хв. Експериментально підібрані умови перемішування дають можливість мінімізувати розкид розмірів крапель РК (30-50 мкм). Максимальна швидкість обертання обмежується процесом утворення повітряних пухирців. Емульсія мономер-ХРК розміщувалась між двома скляними пластинками. Товщина шару емульсії задавалась спейсерами та становила 100-200 мкм. Отриманий зразок опромінювався ультрафіолетовим світлом з довжиною хвилі 320 нм протягом 20 хв. Така тривалість опромінення забезпечувала повну полімеризацію зразка.

На рис. 3.22 наведено залежності мінімуму пропускання від температури для чистого KET90600 і KET90700, диспергованого в полімерну матрицю.

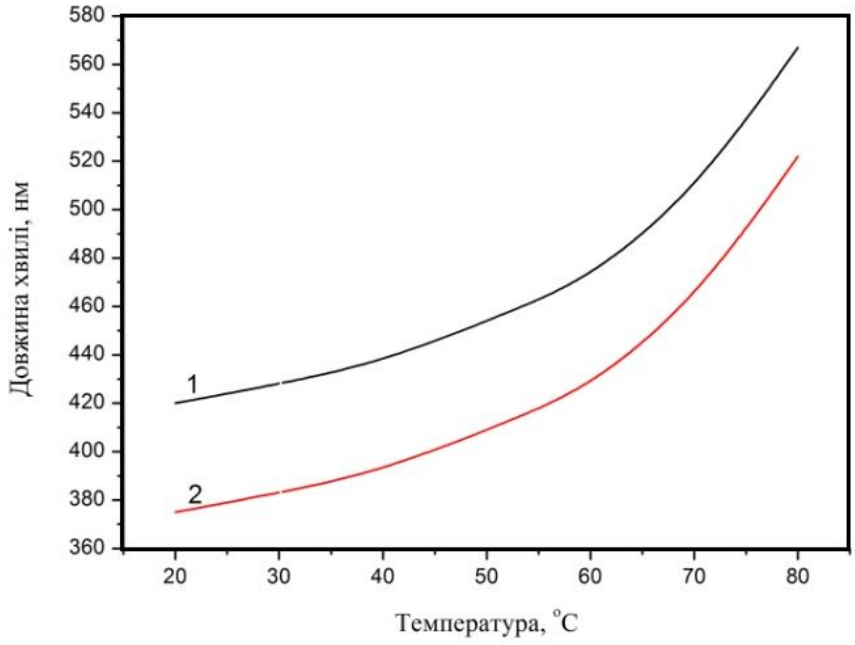



Рис. 3.22. Залежність мінімуму пропускання від температури для KET90600: 1– чистий ХРК; 2 – ПДРК.

На рис. 3.23 показано залежності мінімуму пропускання від температури для чистого KET90700 і  KET90700, диспергованого в полімерну матрицю.

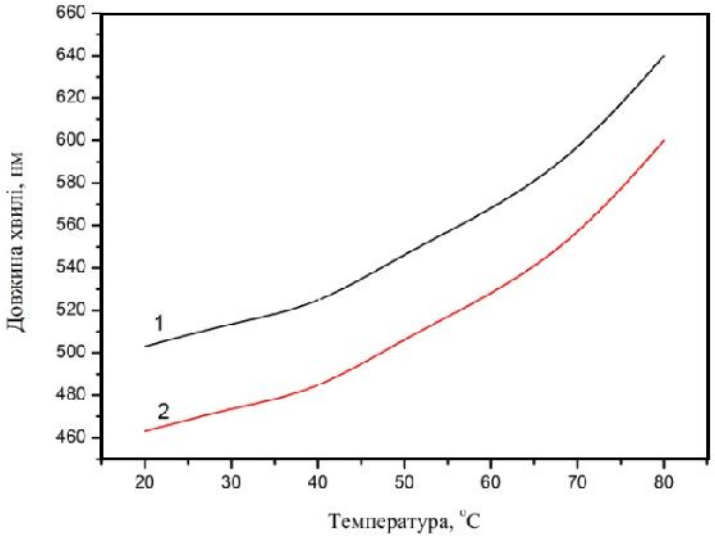



Рис. 3.23. Залежність мінімуму пропускання від температури для КЕТ90700: 1– чистий ХРК; 2 – ПДРК.

Таку наноструктуру можна використовувати як активне середовище оптоелектронного сенсора температури.

## 3.4. Дослідження нелінійних явищ в холестеричних рідких кристалах з інтеркальованими золотими наночастинками для підвищення чутливості оптичних сенсорів

Металеві наночастинки широко використовуються в сучасній технології матеріалів електронної техніки, оскільки введення їх у матеріали уможливлює істотну зміну їхніх фізико-хімічних властивостей [153].

Наночастинки золота викликають особливий інтерес, зокрема в ряді робіт описано синтез золотих наночастинок та досліджено їхні фізичні властивості [154-156], використання їх для хімічного та біологічного зондування [154-159], лікування раку [154,160], каталізу [161], в якості маркерів для трансмісійної електронної мікроскопії (TEM) та скануючої електронної мікроскопії (SEM). Особливий інтерес викликає застосування композитів різних матеріалів з домішками золотих наночастинок в елементах і приладах фотоніки та наноелектроніки [154,162-165].

Взаємодія світла з речовиною, що містить наночастинки, незмінно включає розсіювання та поглинання, причому обидва ці явища викликають

ослаблення інтенсивності пучка, який проходить крізь середовище. Розсіювання виникає на неоднорідностях у системі, зумовлених розташуванням наночастинок у рідині чи газі.

Світловий пучок, що проходить крізь колоїдну дисперсію металевих наночастинок, послаблюється внаслідок поглинання та розсіювання, відповідно до виразу:

$$I(z) = I_0 \cdot e^{(-N_0 \cdot C_{ext} \cdot z)},$$

де $I_0$ – інтенсивність падаючого випромінювання; $I(z)$ – інтенсивність випромінювання, яке пройшло крізь зразок; $z$ – товщина зразка; $N_0$ – концентрація частинок; $C_{\text{ext}} = C_{\text{abs}} + C_{\text{sca}}$ – переріз послаблення (екстинкції) однієї частинки, який є сумою перерізу поглинання та розсіювання. Добуток $N_0 \cdot C_{ext}$ називається коефіцієнтом екстинкції ($g$) та вимірюється в одиницях оберненої довжини.

Розглянемо явище поверхневого плазмонного резонансу (ЛППР) у наночастинках благородних металів. Це явище виникає, коли електромагнітне поле взаємодіє з електронами наночастинок, викликаючи їхнє когерентне коливання. У результаті з’являється сильна смуга поглинання в певній області електромагнітного спектра в залежності від розміру наночастинки. Довжина хвилі, на якій виникає резонанс, залежить від діелектричних властивостей як металевої наночастинки, так і оточуючого її середовища. Оскільки умова резонансу та результуючого підсилення поля напряму корелюється з формою та розміром наночастинки, загальне розуміння цього взаємозв’язку є вирішальним для його широкого використання [165].

У тонких плівках на межі між металом і діелектриком електромагнітне поле може поєднуватися з коливаннями плазми електронів зони провідності, утворюючи поверхневі плазмонні поляритони. Ці поверхневі плазмонні поляритони поширюють електромагнітні збурення, вздовж межі розділу. У перпендикулярному напрямку ці збурення швидко загасають..

Контролюючи розміри, форму матеріалу нанорозмірної частинки та діелектричне середовище, що її оточує, можна контролювати умови

виникнення резонансу в усьому видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні [156]. Це можна використати в роботі сенсорів [155,158].

Золоті наночастинки можна легко синтезувати в різних органічних розчинниках із прецизійним контролем їхнього розміру, форми та поверхневого покриття, тому вони є ідеальною моделлю нанодомішки для оптоелектронних досліджень [161].

Золоті наночастинки використовуються як активні наноматеріали для біомедичних сенсорів. Як було зазначено, вони мають смугу поглинання, що лежить у видимій та ближній інфрачервоній області електромагнітного спектра. Зміни розсіювання наночастинками внаслідок їхньої агрегації широко використовуються для детектування.

Динамічні характеристики золотих наночастинок значною мірою впливають на динамічні властивості матеріалів, до яких вводять ці наночастинки. Ми досліджували нелінійну зміну показника заломлення золотих наночастинок під дією електромагнітного випромінювання.

Проведено синтез золотих нанострижнів із використанням зародково-посередницького (seed-mediated) методу. Отримано золоті нанострижні з різним співвідношенням діаметра до довжини *l*/*d*. Розмір наночастинок визначався двома методами: 1) із використанням трансмісійного електронного мікроскопа (TEM-2010); 2) з отриманих спектрів поглинання з використанням формули Ганса (3.1):

$$\frac{\gamma}{N_p \cdot V} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_m^{3/2}}{3 \cdot \lambda} \cdot \sum_{j=A}^{c} \frac{\left(\frac{1}{P_j^2}\right) \cdot \varepsilon^2}{\left[\varepsilon_1 + \left(\frac{\left(1-P_j\right)}{P_j}\right) \cdot \varepsilon_m\right]^2 + \varepsilon_2^2}, \qquad (3.1)$$

де $\gamma$ – коефіцієнт загасання; $N_p$ – концентрація наночастинок; $V$ – об’єм окремої наночастинки; $\lambda$ – довжина хвилі; $\varepsilon_m$ – діелектрична стала середовища, яке оточує наночастинку; $\varepsilon_1$ – дійсна ($n_2$ – $k_2$) та $\varepsilon_2$ – уявна ($2nk$) частини комплексної діелектричної функції наночастинок; $n_2$ – коефіцієнт відбивання; $k_2$

– коефіцієнт поглинання; $P_j$ – геометричний фактор для видовжених еліпсоїдів вздовж $A$ і $B$/$C$ осей відповідно визначається:

$$P_A = \frac{1-e^2}{e^2}\cdot\left[\frac{1}{2\cdot e}\cdot\ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right)-1\right], \qquad P_B = P_C = \frac{1-P_A}{2}, \qquad e = \left(\frac{l^2-d^2}{l^2}\right)^{1/2}, \qquad (3.2)$$

де $l$ – довжина еліпсоподібної наночастинки; $d$ – діаметр еліпсоподібної наночастинки.

Для визначення нелінійних оптичних властивостей золотих наночастинок було застосовано метод $z$-сканування з використанням неперервного випромінювання He-Ne лазера, інтенсивність якого перебуває в межах від $4{,}40\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ до $1{,}3\cdot10^{-3}$ Вт/м$^2$, та отримано значення нелінійного показника заломлення для синтезованих золотих наночастинок [153].

Схематичне зображення експериментальної установки для $z$-сканування подано на рис. 3.24 За допомогою лінзи лазерний промінь фокусується на $z = 0$ площині, і пропускання нелінійного середовища через діафрагму, коли $z = +d_0$ (де $d_0$ – відстань між фокусом і діафрагмою), вимірюється як функція позиції зразка на осі $z$. У більшості робіт для досліджень золотих наночастинок у якості джерела лазерного випромінювання було використано випромінювання лазерів, які працюють у нано- та пікосекундному імпульсному режимі. Це пояснюється зменшенням впливу теплових ефектів на нелінійні оптичні вимірювання. Нами запропоновано використання випромінювання неперервного малопотужного He-Ne лазера (0,63 мкм) для досліджень нелінійних оптичних параметрів золотих нанострижнів.

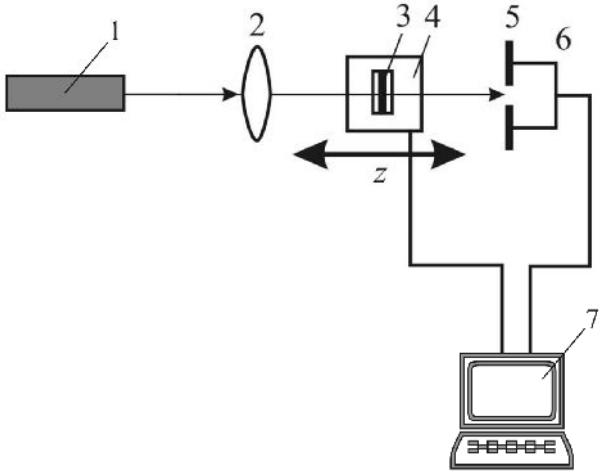


Рис. 3.24. Схема експериментальної установки для вимірювання методом *z*-сканування: 1 – He-Ne лазер; 2 – збиральна лінза; 3 – зразок, 4 – столик переміщення, 5 – діафрагма, 6 – фотодіод, 7 – комп’ютер [153]

Для дослідження динаміки протікання нелінійного явища, а саме, нелінійної зміни показника заломлення, нами було розроблено експериментальну установку, показану на рис. 3.25.

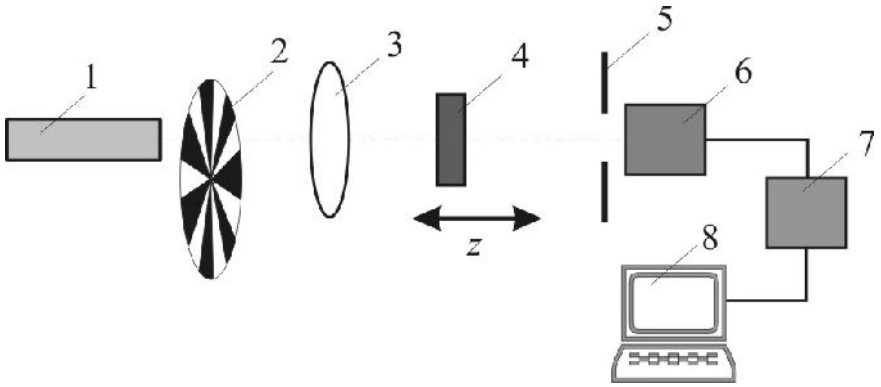



Рис. 3.25. Схема експериментальної установки для дослідження динамічних властивостей золотих наночастинок під час нелінійного явища: 1 – лазер; 2 – модулятор світла; 3 – збиральна лінза; 4 – зразок; 5 – діафрагма; 6 – фотоприймач; 7 – аналогово-цифровий перетворювач; 8 – комп’ютер [166].

У якості зразка для дослідження було використано золоті наночастинки стрижнеподібної форми. Синтезовані наночастинки мають діаметр 20 нм та довжину 40,5 нм, співвідношення діаметра до їхньої довжини становить 2,02. На рис. 3.26 показано спектральні залежності синтезованих золотих нанострижнів із різним відношенням довжини до діаметра.

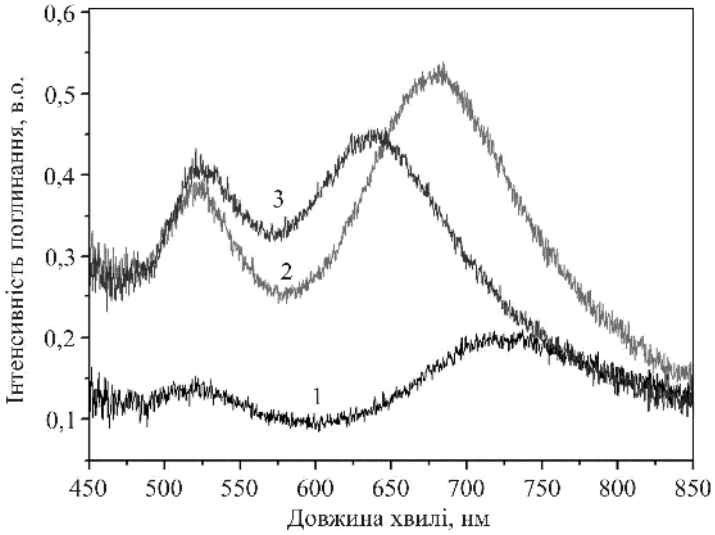



Рис. 3.26. Експериментальні спектри поглинання синтезованих золотих наностржнів із різним *l*/*d*: 1 – 3,0; 2 – 2,4; 3 – 2,0[166]

Вимірювання проводились із використанням низькоінтенсивного лазерного випромінювання He-Ne лазера (0,63 мкм) з максимальною інтенсивністю $4{,}4\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$. Дослідження проводились на частоті оптичного модулятора 25 Гц (рис. 3.27).

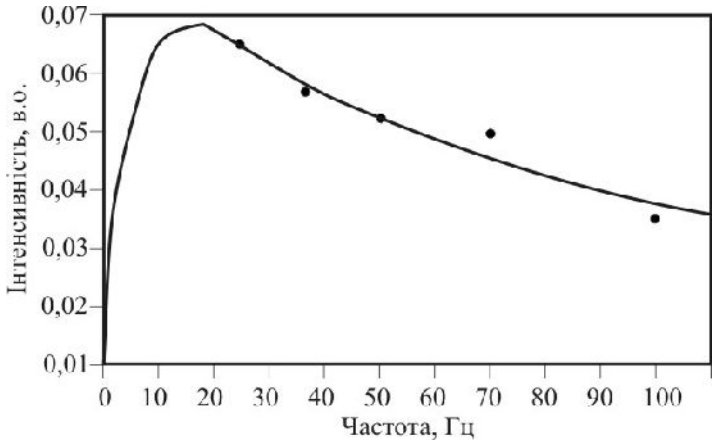



Рис. 3.27. Залежність нелінійного оптичного відгуку від частоти вхідного сигналу.

Для визначення часу ввімкнення було використано формулу:

$$I = \left(I_i - I_f\right)\cdot e^{-t/\tau} + I_f\,, \tag{3.3}$$

де $I_i$ – початкова інтенсивність лазерного променя; $I_f$ – інтенсивність лазерного променя у фокусі лінзи; $\tau$ – час увімкнення; $t$ – поточний час.

Як відомо, теплові процеси характеризуються значенням часів увімкнення понад ~25 мс, тому, підібравши необхідну частоту оптичного модулятора, можна відокремити їхній вплив на нелінійні процеси у нанорозмірних матеріалах і визначити часи, що характеризують їх протікання.

Під впливом прямокутного імпульсу отримано залежності сигналу відгуку при переміщенні в напрямку *z*. На рис. 3.28 показано залежності інтенсивності пропускання від часу для різних відстаней від фокуса лінзи рис. 3.28, а – 7 см від фокуса збиральної лінзи, рис. 3.28, б – 4 см від фокуса збиральної лінзи, рис. 3.28, в – 2,5 см від фокуса збиральної лінзи.

Як зазначалось у роботі [153], особливістю протікання нелінійного явища є наявність термооптичного ефекту. Визначення часу ввімкнення проводилося з урахуванням того, що вплив термооптичного ефекту мінімальний. Цей стан можливий за наявності в залежностях *z*-сканування симетричних ділянок.

Часи ввімкнення вимірювались під час сканування лазерного променя в напрямку *z*-осі. Було встановлено, що при використанні низькоінтенсивного лазерного випромінювання неперервної дії He-Ne лазера відбувається зміна часів увімкнення. Безпосередньо у фокусі збиральної лінзи відбувається зменшення часу ввімкнення порівняно з часом увімкнення, виміряним перед фокусом та після нього. Час увімкнення нелінійного явища змінюється від 12 до 18 мс.

Під час нелінійного процесу було проведено дослідження динамічних властивостей у залежності від інтенсивності лазерного випромінювання, оскільки протікання цього процесу залежить від інтенсивності, а при певній інтенсивності спостерігається зміна знака нелінійних коефіцієнтів на протилежний. Дослідження проводилися в діапазоні інтенсивності лазерного випромінювання від $1{,}3\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ до $4{,}4\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ та частоти оптичного модулятора від 5-100 Гц.

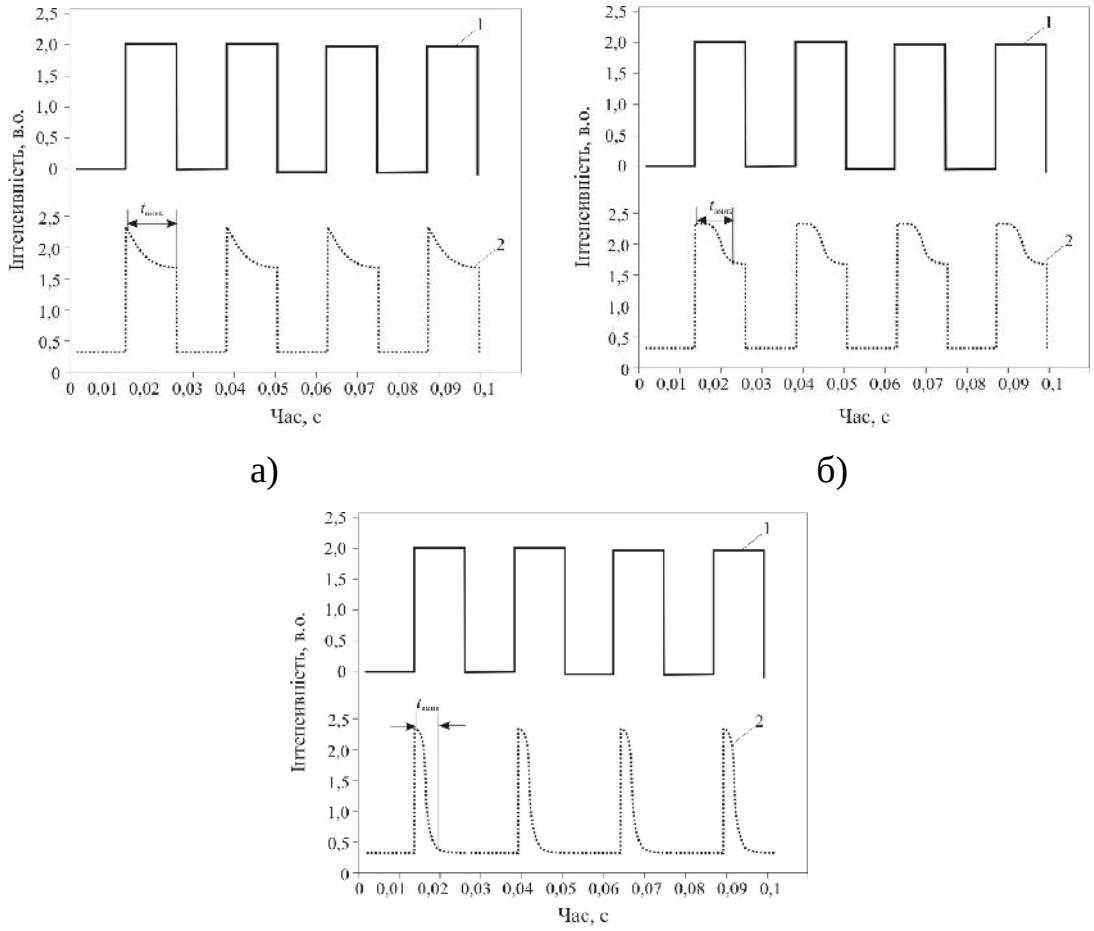



Рис. 3.28. Залежність інтенсивності пропускання від часу на частоті оптичного модулятора 50 Гц для різних відстаней від фокуса лінзи: а – 7 см, б – 4 см; в – 2,5 см

На рис. 3.29 показано залежність інтенсивності лазерного випромінювання від положення $x=z_0/z$. Залежності отримано з використанням методики *z*-сканування.

Показник заломлення описують через лінійний коефіцієнт заломлення $n_0$ та нелінійний коефіцієнт заломлення $n_2$ виразом:

$$n = n_0 + \frac{n_2}{2} \cdot |E|^2 = n_0 + n_2 \cdot l ,$$

де $E$ – пікове (максимальне) значення електричного поля; $I = \frac{1}{2} \cdot n_0 \cdot c \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2$ – інтенсивність лазерного променя в межах зразка.

Використовуючи гауссівське розкладання, отримаємо розподіл поля, а з нього – розподіл інтенсивності біля діафрагми. Для суто нелінійного процесу заломлення:

$$E_\alpha(z,r,t) = E(z,r=0,t)\cdot e^{-\frac{\alpha\cdot L}{2}}\cdot\sum_{m=0}^{\infty}\frac{\left(i\cdot\Delta\phi_0(z,t)\right)^m}{m!}\cdot\frac{w_{m_0}}{w_m}\cdot$$

$$\cdot\exp\left(-\frac{r^2}{w_m^2}-\frac{j\cdot k\cdot r^2}{2\cdot R_m}-i\cdot\theta_m\right),$$

де $d = d_0 - z$ відстань від зразка до діафрагми; $d_0$ – відстань між фокусом і діафрагмою; $L_{eff} = 1 - e^{-\alpha_0\cdot L/e_0}$ – ефективна товщина зразка; $L$ – товщина зразка; $\Delta\Phi_0(t) = k\cdot L_{eff}\cdot I_0(t)$ – фазовий зсув на осі у фокусі, коли $I_0(t)$ – інтенсивність на осі у фокусі.

Для малого нелінійного фазового зсуву $(\Delta\Phi_0 < 1)$ та малої діафрагми $(A \le 0{,}1)$ вираз для нормованої інтенсивності пропускання має вигляд:

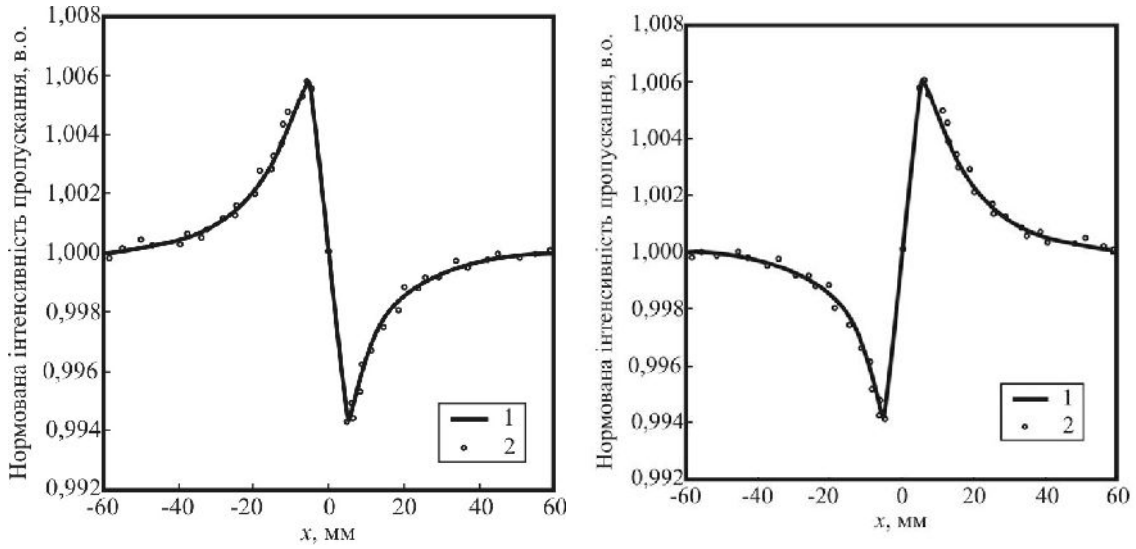
$$T_N(z) \cong 1 + \frac{4\cdot x}{\left(1+x^2\right)\cdot\left(9+x^2\right)}\cdot\Delta\Phi_0, \qquad (3.4)$$

де $x = z/z_0$. Завдяки простоті цей вираз корисний для корекції даних і визначення величини $n_2$.

Коефіцієнт нелінійного поглинання $\beta$ можна визначити за допомогою $z$-сканування у випадку відкритої діафрагми. Інтенсивність нормованого пропускання визначається:

$$T_N(z, A=1) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\cdot q_0(z,0)}\cdot\int_{-\infty}^{+\infty}\ln\left(1+q_0(z,0)\cdot e^{-r^2}\right)dr, \qquad (3.5)$$

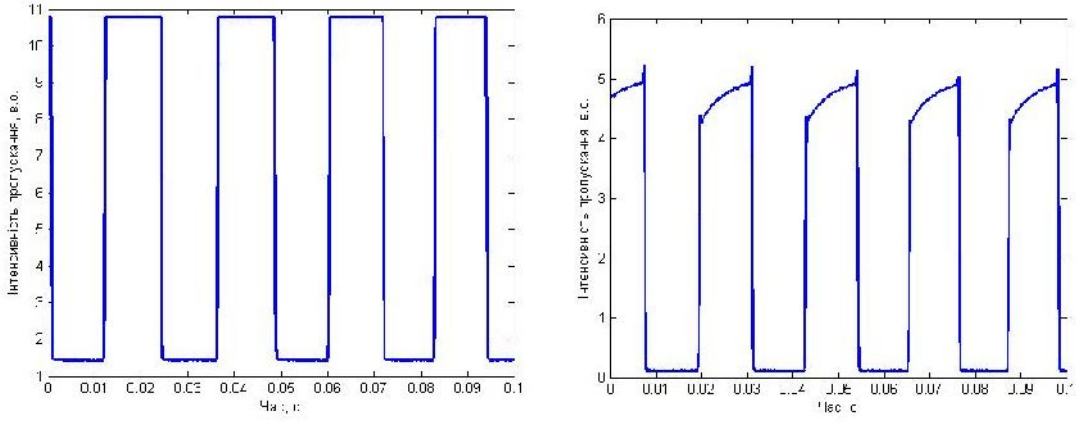
де $q_0(z,t) = \dfrac{q_0(t)}{1+\dfrac{z^2}{z_0^2}}$ і $q_0(t) = \beta\cdot I_0(t)\cdot\dfrac{\left(1-e^{-\alpha L}\right)}{\alpha}$.




а) б)

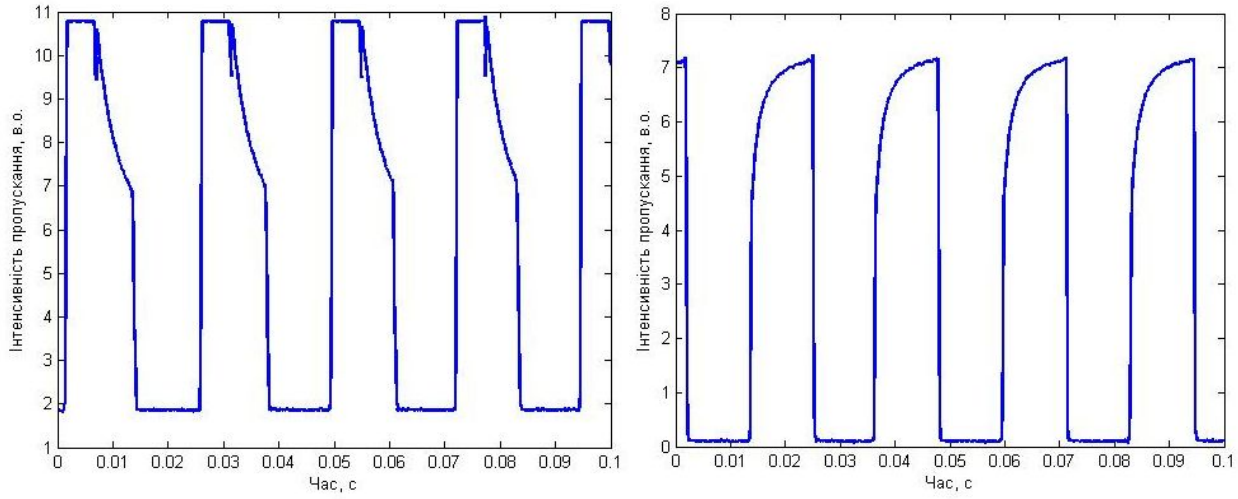
Рис. 3.29. Залежності нормованої інтенсивності пропускання від положення $x = z_0/z$ у випадку закритої діафрагми для золотих наностріжнів зі співвідношенням діаметра до довжини 2,4 та інтенсивності лазерного випромінювання а) – $4{,}4\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ та б) – $1{,}3\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$.

На рис. 3.30 – 3.35 показано динамічні залежності, виміряні при інтенсивності лазерного випромінювання $1{,}3\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ і $4{,}4\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ на частоті модулятора 50 Гц. [166].



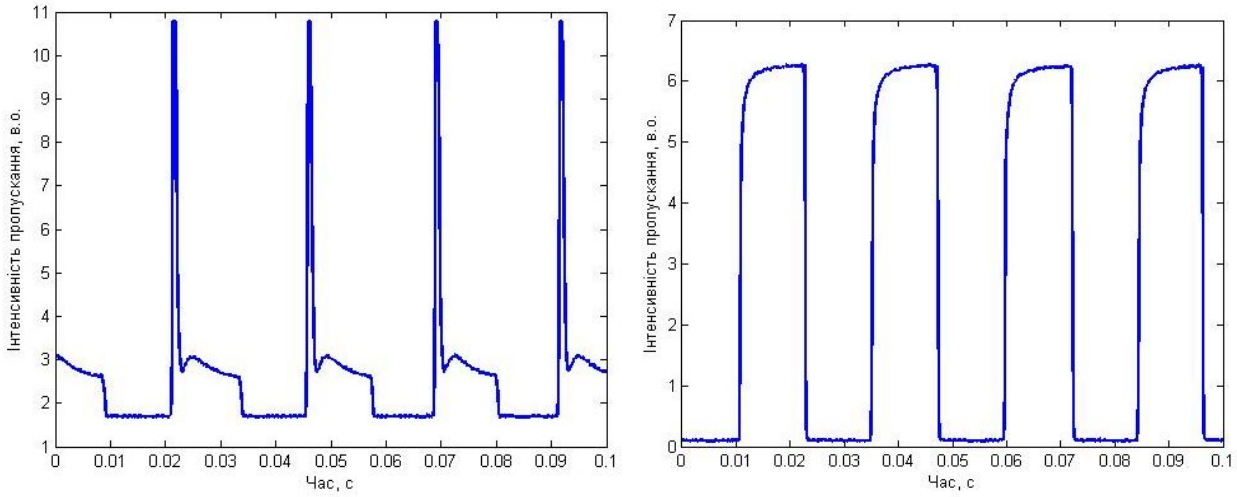

а) б)

Рис. 3.30. Залежність інтенсивності пропускання від часу на частоті оптичного модулятора 50 Гц для інтенсивності лазерного випромінювання: а) $-4{,}4\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ та б) – $1{,}3\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ на відстані 3,5 см від лінзи [166].



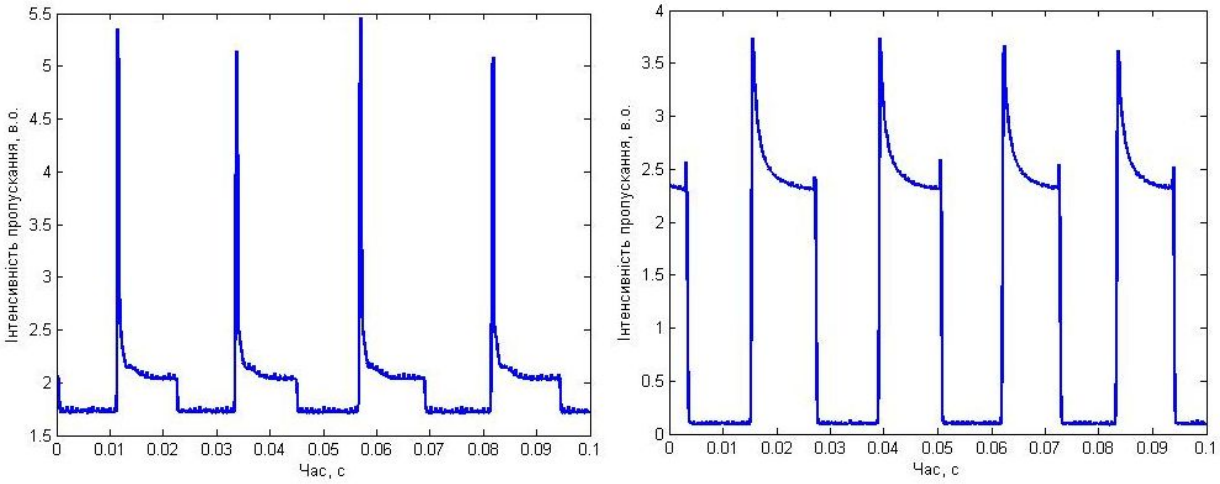

а) б)

Рис. 3.31. Залежність інтенсивності пропускання від часу на частоті оптичного модулятора 50 Гц для інтенсивності лазерного випромінювання: а) –4,4·10$^{-4}$ Вт/м$^2$ та б) – 1,3·10$^{-4}$ Вт/м$^2$ на відстані 5 см від лінзи [166].



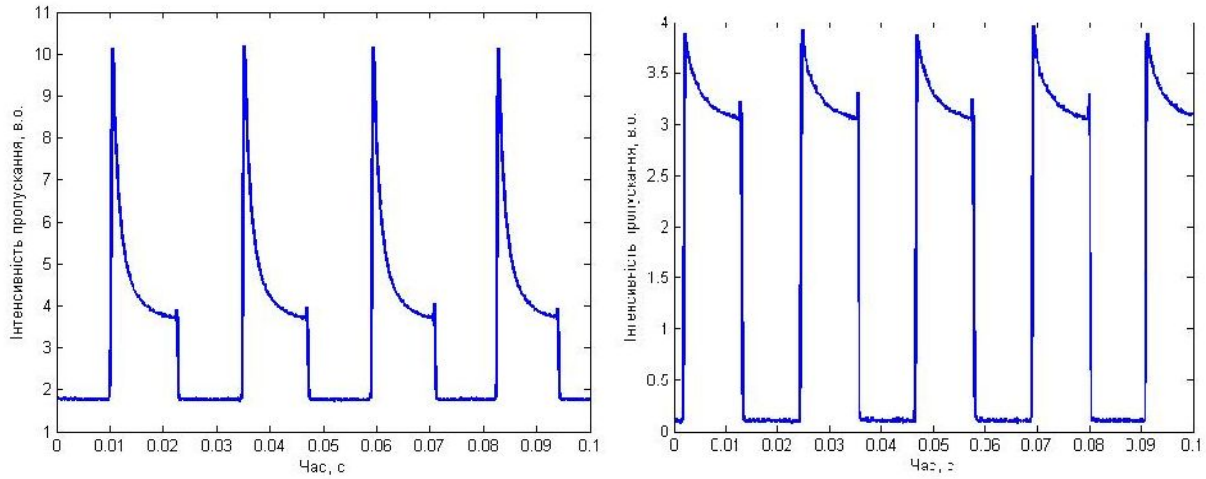

а) б)

Рис. 3.32. Залежність інтенсивності пропускання від часу на частоті оптичного модулятора 50 Гц для інтенсивності лазерного випромінювання: а) –4,4·10$^{-4}$ Вт/м$^2$ та б) – 1,3·10$^{-4}$ Вт/м$^2$ на відстані 6 см від лінзи [166].




а) б)

Рис. 3.33. Залежність інтенсивності пропускання від часу на частоті оптичного модулятора 50 Гц для інтенсивності лазерного випромінювання: а) – $4{,}4\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ та б) – $1{,}3\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ на відстані 7 см від лінзи [166].




а) б)

Рис. 3.34. Залежність інтенсивності пропускання від часу на частоті оптичного модулятора 50 Гц для інтенсивності лазерного випромінювання: а) $-4{,}4\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ та б) – $1{,}3\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ на відстані 8 см від лінзи [166].

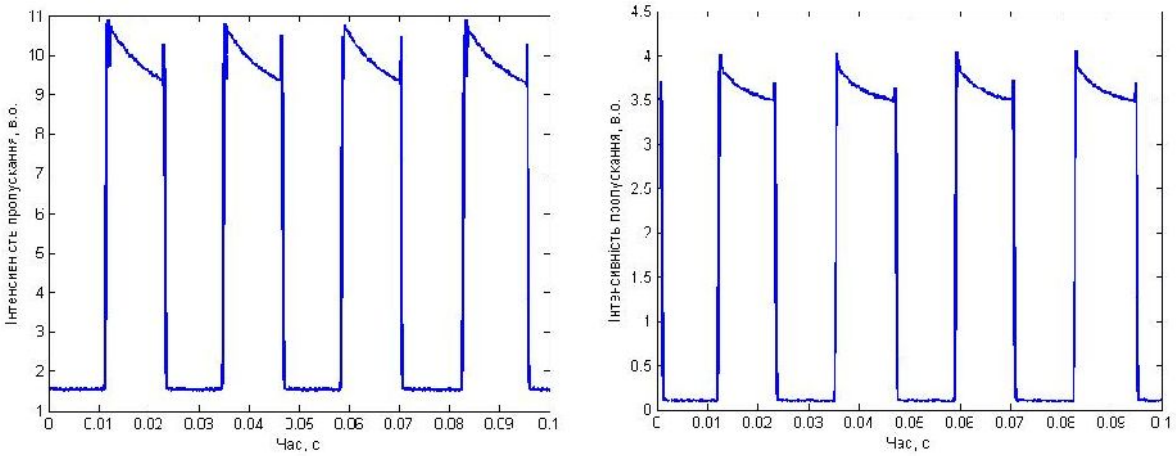



Рис. 3.35. Залежність інтенсивності пропускання від часу на частоті оптичного модулятора 50 Гц для інтенсивності лазерного випромінювання: а) $–4{,}4\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ та б) $– 1{,}3\cdot10^{-4}$ Вт/м$^2$ на відстані 9 см від лінзи [166].

Як видно з вищенаведених рисунків, хід динамічних залежностей під час нелінійного явища відрізняється. Такий вигляд цих залежностей пояснюється зміною інтенсивності лазерного випромінювання під час *z*-сканування, що спостерігається на вищенаведених залежностях.

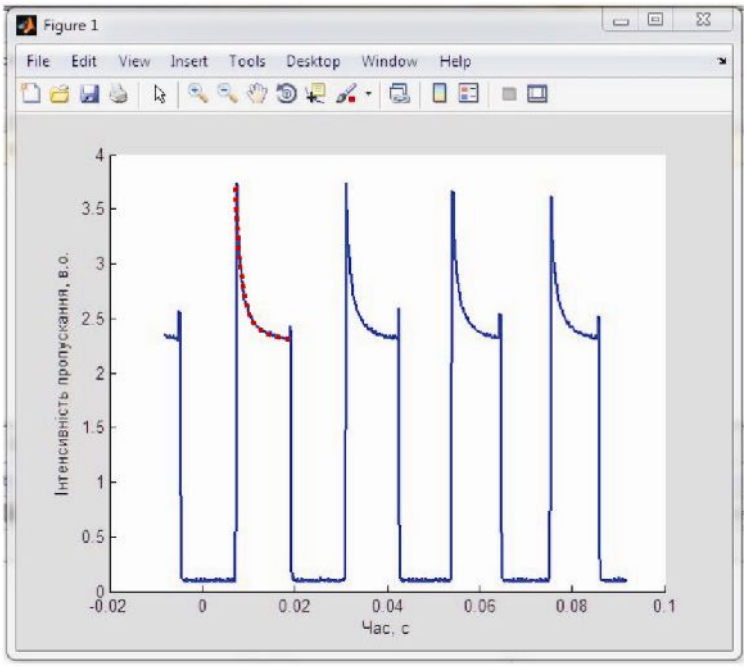



Рис. 3.36. Вікно програми MathLab для проведення обробки експериментальних (суцільна лінія) результатів динамічних залежностей та їх апроксимація (пунктирна лінія)

У результаті проведених досліджень визначено значення часів виникнення нелінійного явища в залежності від положення фокуса та різної інтенсивності лазерного випромінювання. Проводилась інтерполяція експериментальних даних та визначення часів увімкнення з використанням програмного середовища MathLab.

На рис. 3.36. подано вікно програми MathLab для проведення обробки експериментальних результатів та їх апроксимація. Із використанням формули (3) проведено апроксимацію експериментальних результатів для часів виникнення нелінійного явища.

**Висновки до розділу 3**

1. На основі рідкокристалічних речовин, допованих наночастинками, розроблено нанокомпозити, які, внаслідок взаємодії з досліджуваною речовиною, змінюють свої спектральні характеристики, що можна використовувати для створення активних середовищ оптичних сенсорів.
2. Створено нанокомпозити на основі холестеричних рідких кристалів EE1 та CLC-2103L з домішками $Fe_2O_3$ та $Fe_3O_4$, які сорбують монооксид вуглецю, та досліджено їхні спектральні характеристики.
3. Виявлено, що максимальна концентрація магнетиту в нанокомпозитах на основі EE1, необхідна для забезпечення оптичної прозорості у видимому діапазоні довжин хвиль, становить 3% для $Fe_2O_3$ і 1% для $Fe_3O_4$.
4. Встановлено основні закономірності зміни спектральних характеристик нанокомпозитів під впливом монооксиду вуглецю. Показано, що зі збільшенням концентрації CO мінімум пропускання на спектральних характеристиках зміщується в коротко- або довгохвильову область.
5. Показано, що максимальні зміни в положенні мінімуму пропускання на спектральних характеристиках для нанокомпозиту на основі EE1 спостерігаються до досягнення концентрації монооксиду вуглецю 20 мг/м$^3$. Саме в цьому діапазоні досягнуто максимальне значення коефіцієнта спектральної чутливості. Зі збільшенням концентрації $Fe_2O_3$

від 0,5% до 3% коефіцієнт спектральної чутливості зростає від 0,67 нм/мг/м$^3$ до 1,71 нм/мг/м$^3$, а для $Fe_3O_4$ збільшення концентрації від 0,17% до 1% зумовлює зміну коефіцієнта спектральної чутливості від 0,28 нм/мг/м$^3$ до 1,2 нм/мг/м$^3$. У разі використання нанокомпозиту на основі CLC-2103L збільшення концентрації $Fe_3O_4$ від 0,25% до 2% приводить до зростання коефіцієнта спектральної чутливості від 0,28 нм/мг/м$^3$ до 0,6 нм/мг/м$^3$.

6. Для створення твердотільного активного середовища оптичних сенсорів запропоновано використати наноструктуру, отриману внаслідок введення нанокомпозиту в наноструктуровані пористі матриці на основі $SiO_2$ та $Al_2O_3$.
7. Встановлено, що під дією монооксиду вуглецю на наноструктуру найбільші зміни в спектральних характеристиках відбуваються до досягнення концентрацією CO значення 20 мг/м$^3$. З подальшим збільшенням концентрації монооксиду вуглецю до 150 мг/м$^3$ система переходить у стан насичення.
8. Встановлено, що коефіцієнт спектральної чутливості залежить від діаметра пор, зменшуючись зі збільшенням цього діаметра.
9. Коефіцієнт спектральної чутливості набуває максимального значення до концентрації монооксиду вуглецю 20 мг/м$^3$ для матриці на основі $Al_2O_3$ та в інтервалі 25–55 мг/м$^3$ для матриці на $SiO_2$.
10. Показано, що максимальні зміни в положенні мінімуму пропускання на спектральних характеристиках для нанокомпозиту на основі CLC-2101L+5CB спостерігаються до досягнення концентрації $SO_2$ 20 мг/м$^3$. Коефіцієнт спектральної чутливості зростає зі збільшенням концентрації AlN у нанокомпозиті. Максимальне його значення, яке становить 0,47 нм/мг/м$^3$ перебуває в діапазоні концентрацій $SiO_2$ 25–75мг/м$^3$ для нанокомпозиту CLC-2101L+5CB з домішкою 0,45% AlN.
11. Розроблено методику приготування наноструктури на онові полімердиспергованого рідкокристалічного матеріалу, яка ґрунтується на

механічному перемішуванні протягом 30с при 50 об/хв, з наступним опроміненням отриманого зразка ультрафіолетовим світлом з довжиною хвилі 320 нм протягом 20 хв. Така структура використовувалась як активне середовище первинного перетворювача оптоелектронного сенсора температури.

12. У результаті дослідження нелінійного оптичного відгуку для золотих наночастинок із використанням низькоінтенсивного лазерного випромінювання встановлено закономірності протікання нелінійного явища та визначено оптимальне значення частоти для отримання максимального оптичного відгуку, яка становить 25 Гц. Тривалість максимального оптичного відгуку змінювалася від 12 до 18мс.

# РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ РІДКОКРИСТАЛІЧНОГО АКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА -СЕНСОРІВ БІОЛОГІЧНИХ РЕЧОВИН

## 4.1. Принципи побудови сенсорів біологічних речовин.

Створення оптичних сенсорів із високою чутливістю та селективністю для детектування та кількісного аналізу біологічних речовин є актуальною задачею, яка пов’язана з необхідністю контролю біологічних процесів, аналізу ефективності лікарських засобів та моніторингу довкілля.

Рідкі кристали використовуються для створення сенсорів хімічних речовин. Наявність у газовій фазі хімічних речовин та їхню кількість, які визначаються за допомогою РК, можна поділити на 5 груп: (I) органофосфати (ОФ), які лежать в основі багатьох нервово-паралітичних речовин і пестицидів; (II) аміак і хлор, які є репрезентативними для широкого спектра токсичних промислових хімікатів (TICs); (III) для хімічних речовин, виявлених у видихуваному повітрі, які пов’язані зі здоров’ям пацієнта, зокрема оксид азоту для лікування астми та кетонів для діабету; (IV) органоаміни, які вказують на свіжість продуктів; (V) небезпечні гази, на робочих місцях, такі як альдегіди та леткі органічні сполуки (VOCs) [167]. У рідкій фазі особливий інтерес викликають системи реєстрації органічних речовин, пов’язаних із функціонуванням живих організмів – білки, вуглеводи, ензими та безпосередньо самі біосистеми, зокрема клітини, віруси тощо. Найбільш перспективним конструктивним рішенням для створення таких сенсорів є застосування функціоналізованих поверхонь.

Принцип роботи поверхневого РК сенсора для реєстрації газофазних хімічних речовин показано на рис.4.1 [168]. Сенсор складається з РК плівки завтовшки кілька мікрон, яка підтримується на хімічно функціоналізованій твердій поверхні. Під впливом газу (наприклад, повітря), який містить газову фазу детектованої речовини, вона дифундує через РК плівку та зв’язується хімічно з функціоналізованою твердою поверхнею, що призводить до зміни в

орієнтації РК на твердій поверхні (рис. 4.1А). Важливою умовою функціонування такого сенсора є забезпечення контрольованої орієнтації РК на поверхні. У базових газових РК сенсорах принципи проектування ґрунтуються на інженерії конкурентних взаємодій між хімічними функціональними групами мезогенів і парою аналіту для твердої поверхні. Отже, маніпуляції з хімічно функціоналізованою твердою поверхнею можуть бути використані для зміни оптичної селективності сенсора на основі РК [168-171]. У прикладах, наведених на рис. 4.1, хімічно функціоналізована тверда поверхня вибрана для утворення гомеотропної орієнтації РК (рис. 4.1Б) або планарної (рис. 4.1Д) за відсутності аналіту. Внаслідок зв’язування визначуваної речовини з хімічно функціоналізованою поверхнею взаємодія між твердою поверхнею та РК збурюється. Цей обмін молекулярної взаємодії (тобто конкурентне зв’язування РК та цільового аналіту на поверхні) призводить до зміни орієнтації молекул РК вздовж (рис. 4.1С) або впоперек (рис. 4.1Д) рельєфу підкладки, сигналізуючи в такий спосіб про присутність парів досліджуваної речовини [168].

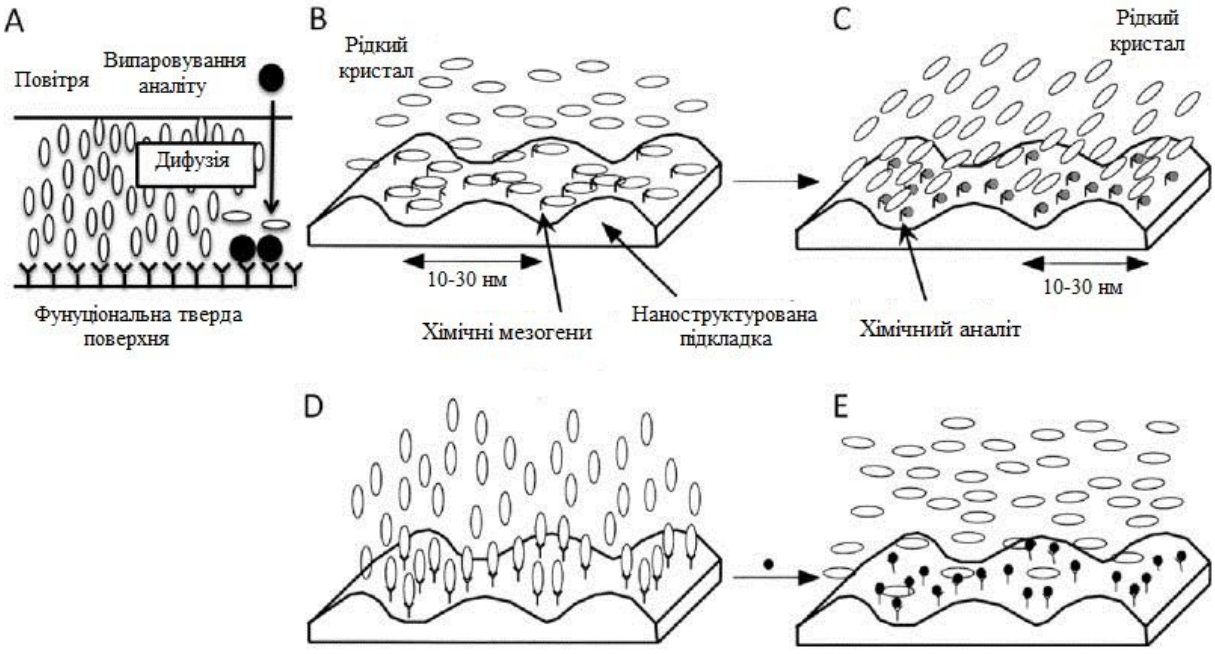



Рис.4.1. Схема поверхневого РК сенсора для реєстрації газофазних хімічних речовин[168]

Як зазначалося вище, принципи проектування базових газових РК сенсорів базуються на ефекті конкурентних взаємодій між хімічними функціональними групами мезогенів і парою аналіту на твердій поверхні. Отже, маніпуляції з хімічно функціоналізованою твердою поверхнею можуть бути використані для забезпечення селективності сенсора на основі РК [168-171]. Цей підхід використовувався для розробки сенсорів на основі РК, які можуть виявити органофосфатні сполуки [168, 172], органоаміни [173], альдегіди [174] та органосульфатні [175] сполуки. Нижче розглянемо особливості газових сенсорів на основі РК для реєстрації різного роду сполук біологічного походження.

Другий клас сенсорів на основі РК, які розглядаються в цьому розділі, спрямований на визначення присутності біологічних молекул, зокрема білків, олігопептидів і нуклеїнових кислот, що з’являються на поверхнях твердих тіл. Існуючі підходи зазвичай припускають використання складних приладів (наприклад, мас-спектроскопії та загасаючих оптичних методів, таких як поверхневий плазмонний резонанс) або схем, які передбачають маркування молекул флуоресцентом, редокс-активними чи радіоактивними мітками. Для виявлення біомолекул на поверхні твердих тіл із застосуванням РК розроблено методи з ретельно підібраною хімічною функціональністю та наноскопічною топографією. Після вловлювання цільових видів молекул на твердій поверхні (як правило, через конкретний зв’язувальний елемент), поверхня контактує з РК. Поверхня має такі властивості, що реагує на біомолекулярні зміни енергії взаємодії РК з поверхнею. Нижче описано кілька досліджень, які ілюструють потенційну корисність РК для візуалізації поверхонь, на які нанесені білки, олігопептиди чи ДНК.

РК структури використовують також для виявлення присутності та стану малих біологічних молекул, що перебувають на поверхні. Детальний опис методів фіксування РК на поверхні, яка вкрита олігопептидами IYGEFKKKC (які є основою SRC-кіназа), можна знайти в [176]; далі розглянемо результати досліджень орієнтацій РК на поверхнях, покритих дипептидами з різною

хіральністю (l-C-l-Y vs. l-C-d-Y vs. d-C-d-Y) [177]. Важливим результатом є те, що орієнтування нематичних РК 5CB і TL205 на поверхнях, покритих дипептидами, значною мірою залежить від хіральності дипептидів (рис. 4.2).

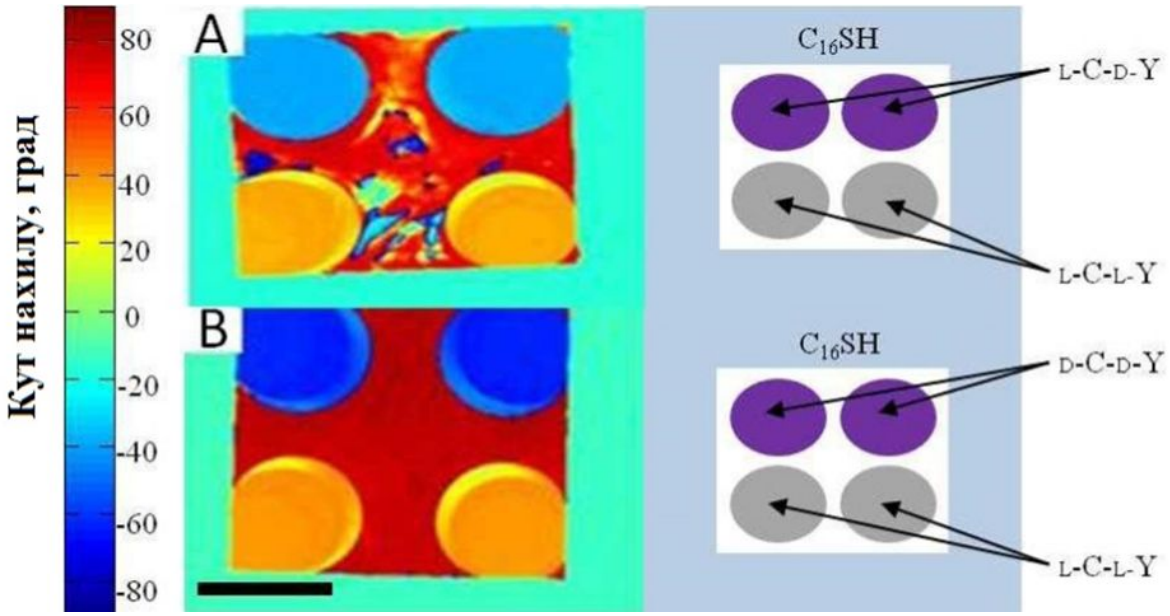



Рис. 4.2. (A) Карта розташування кутів скручування 5CB на золотих плівках покритих моношарами l-C-d-Y l-C-l-Y. (B) Карта розташування кутів скручування 5CB на золотих плівках, покритих моношарами d-C-d-Y or l-C-l-Y. Масштаб 2 мм[177].

Третій клас біомолекул, які досліджувались на поверхнях за допомогою РК, – це ДНК, чутливі до їхнього орієнтаційного та конфігураційного стану. РК були успішно використані для детектування та вимірювння вмісту ДНК на твердій поверхні [178-180].

Узгодження орієнтаційних властивостей нематичного РК з ізольованими ДНК молекулами, зафіксованими на поверхні, уможливлюють їх оцінювання. Знайдено, що РК орієнтується в нпарямку ssDNA, тоді як dsDNA спричиняє орієнтування під деяким кутом (рис. 4.3). РК можуть бути використані для візуалізації ДНК молекул на поверхнях з екстремально низькою густиною (частина поверхні зразка, зайнята ДНК, становить $10^{-06}$); орієнтація РК може сформувати базис для чутливих сенсорів гібридизації ДНК (тобто сенсори, які показують, чи є dsDNA чи ssDNA на поверхні).

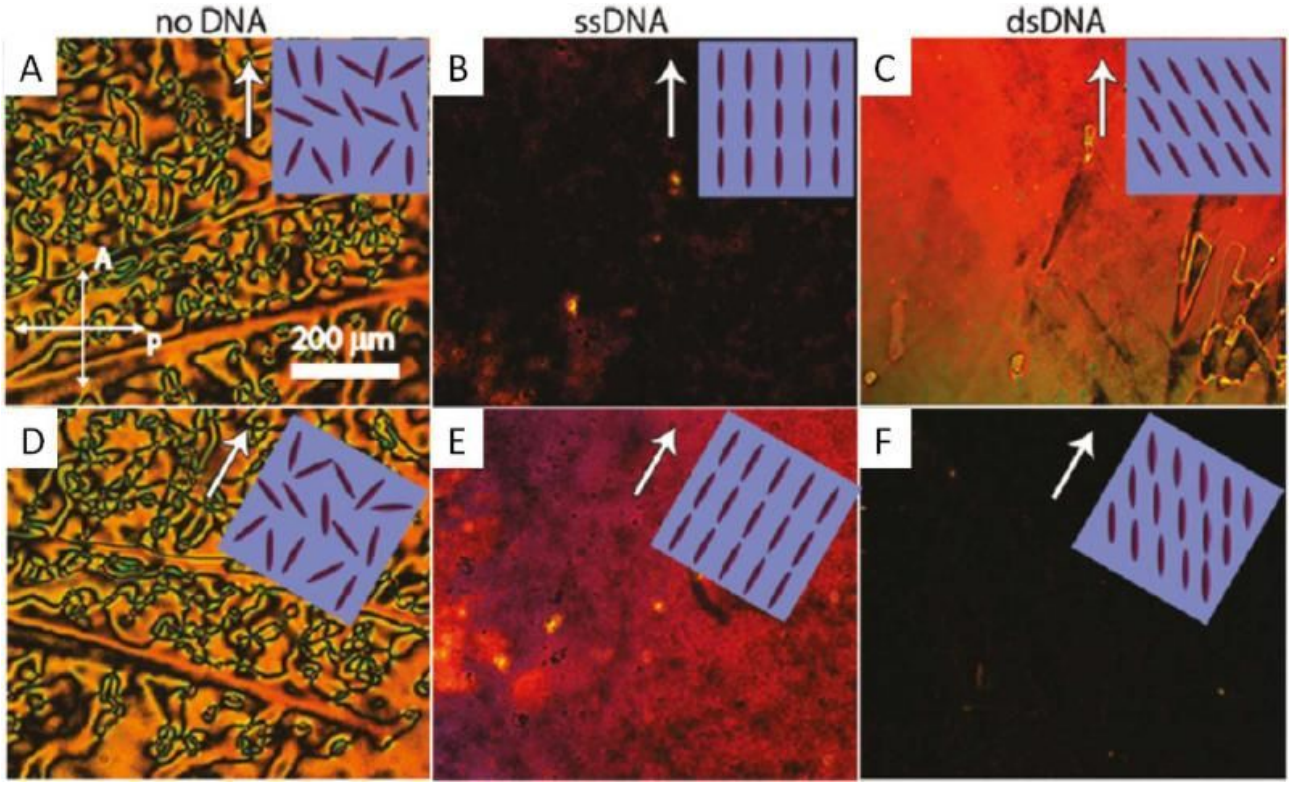



Рис 4.3. Мікрофотографії в поляризованому світлі РК (як для 5CB, так і MBBA, які мають одинакову приблизно орієнтацію поверхні) на поверхнях з ДНК [178].

РК можна використовувати для реєстрації білків, захоплених на твердих поверхнях специфічними малими білковими молекулами або внаслідок білок-білкової взаємодії. Крім того, РК також можна використати для реєстрації білків, нанесених на поверхню шляхом неспецифічної адсорбції в контексті аналітичних схем, що ґрунтуються на спорідненості контактного друку (з просторовою роздільною здатністю десятки мікрометрів). Ці результати показують, що РК можуть стати базою для високомультиплексних методів аналізу білків [181, 183-185].

Вперше про застосування хімічних функціональних поверхонь для виявлення білка на основі РК було згадано в [182]. Зокрема, було показано, що нематичний РК можна використати для підсилення та перетворення опосередкованого рецептором зв’язування білків на поверхні, що можна легко реєструвати за допомогою оптичних ефектів. Організовані моношари (так звані self-assembled monolayers SAM, тобто шари, що самоорганізовуються) лігандів,

здатних зв’язувати білки, що реєструються, були сформовані на поверхнях похило напилених плівок золота. Зазвичай такі плівки створюють рівномірну азимутальну орієнтацію РК. Антитіла авидину чи анти-біотину (IgG), отримані на SAM, є зв’язувальною групою, що називається біотином. Наявність таких груп на поверхні похило напилених золотих плівок приводить до неоднорідної орієнтації шару РК, яку можна реєструвати оптично. Крім того, автори показали, що можна налаштовувати топографії поверхні плівок золота (за рахунок зміни кута осадження золота з газоподібної фази) в такий спосіб, що захоплення антитіл поверхнею з іммобілізованим білком приводить до зміни орієнтації шару РК, яку можна зареєструвати [182].

Показано можливість визначення кількості білка за зміною кількісних характеристик оптичних ефектів у РК (зміни частки поляризованого світла, що пройшло через РК)[183]. Оптична реакція (градієнт яскравості сірого) спостерігається як неперервна функція, яка залежить від кількості зв’язаного білка [184].

Використання рідких кристалів для візуалізації біомолекул на поверхні дає можливість дослідження структури біомолекул. Така властивість розглядається в роботі [186], де досліджено зв’язування рибонуклеази А з білковим інгібітором рибонуклеази (RI). Показано, що орієнтаційні стани білків, іммобілізованих на поверхні, можна виділити, аналізуючи зміну оптичного відгуку РК [186].

Перевагою методу реєстрації білків за допомогою молекул РК є його універсальність, оскільки вид реєстрованого білка визначається не матеріалом РК, а хімічною структурою зв’язувальних центрів на поверхні підкладки. Наприклад, у [187] досліджено орієнтацію 5CB в контакті з поверхнями, на які було нанесено олігопептиди для зв’язування певних білків. Вивчалися, зокрема, поверхні зі сформованими олігопептидними ділянками для реєстрації протеїнкінази Src та її синтетичного еквівалента (p-Src) . Показано, що час, необхідний для набуття гометотропної орієнтації шару 5CB, зростає зі збільшенням поверхневої густини іммобілізованих пептидів. Крім того,

показано, що утворення зв’язку між антифосфотирозиновим IgG та нанесеним на поверхню фосфопептидом (п-Src) сповільнює переорієнтацію РК так, що система не досягає рівномірної орієнтації впродовж експерименту . Отже, вимірювання густини лінійних дефектів та часів релаксації РК можна використовувати як метод кількісного оцінювання поверхневої густини розташованих на поверхні пептидів, а також для реєстрації процесу зв’язування білків з такими поверхнями [187].

Описані вище дослідження показують можливість застосування орієнтаційних ефектів у РК для реєстрації білкових сполук, розташованих на досліджуваній поверхні. Однак у роботі [181] для цього запропоновано метод, який базується на реєстрації величини енергії зчеплення РК з поверхнею, покритою олігопептидами. Показано, що цей метод забезпечує більшу точність вимірювань кількості білка порівняно з оптичними методами. Наявність зв’язувального антитіла викликає систематичне зменшення енергії зчеплення 5СВ з 4,4 до 1,4 мкДж/м$^2$, тоді як концентрація антитіл збільшується з 10 рМ до 100 nM. Зазначимо, що в цьому діапазоні концентрацій еліпсометричні методи є недостатньо чутливими для реєстрації захоплених антитіл [181].

Отже, РК можуть використовуватись для визначення присутності білків, захоплених на поверхнях. У роботах [188, 189] показано можливість застосування описаних вище методик для інших комбінацій SAM та білків. Чутливість методу уможливлює реєстрацію білків з концентрацією 30-40 пг/мм$^2$.

## 4.2.Загальна характеристика білків та вуглеводів

Під час вибору об’єктів досліджень враховувались такі фактори, як досконаліть і стабільність методів їх отримання (для забезпечення відтворюваності отриманих результатів), поширеність цих речовин у біологічних організмах та їхнє функціональне призначення. Тому особлива увага в дослідженнях приділялась білкам. Так, наприклад, незначне відхилення концентрації білків-маркерів у плазмі крові може свідчити про наявність різного роду захворювань. Тому створення біосенсорів для експрес-аналізу кількісного визначення білків крові є актуальною задачею. У якості об’єктів для дослідження були використані водні розчини альбуміну з людської сироватки, глобуліну крові й альбуміну ліофізованого, які є найбільш широко представлені в біологічних системах і виконують ряд важливих фізіологічних функцій.

Нижче наведена коротка характеристика вибраних нами біологічних об’єктів досліджень.

Першу групу дослідних речовин складали білки тваринного походження.

Альбуміни – гетерогенна суміш білкових молекул, які дуже поширені в природі. Альбуміни – це найбільш гомогенна фракція білків, що синтезуються в печінці та відіграють важливу роль у підтриманні колоїдно-осмотичного (онкотичного) тиску, у транспорті багатьох ендогенних і екзогенних речовин.

Альбумін із людської сироватки – основний протеїн плазми крові, становить 40-60 % від загальної кількості білка плазми . Молекулярна маса близько 65000 Да.

Бичачий сироватковий альбумін (БСА) – протеїн плазми крові великої рогатої худоби з молекулярною масою 69000 Да, одноланцюговий, складається з 607 амінокислотних залишків .

Аналіз концентрацій найпоширеніших вуглеводів в організмі людини, продуктах харчування, лікарських формах є актуальною проблемою як у медицині для визначення патологій, так і в дієтотерапії для визначення

вуглеводів у продуктах харчування. До найпоширеніших вуглеводів належать глюкоза, фруктоза та лактоза. Просторова будова глюкози наведена на рис. 4.4.

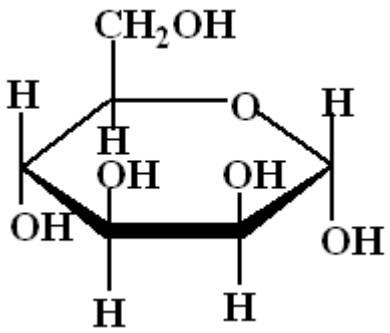



Рис. 4.4. Просторова будова молекули глюкози

Хімічні властивості глюкози аналогічні властивостям багатоатомних спиртів. Глюкоза широко використовується в медицині як універсальний антитоксичний засіб. Визначення концентрації глюкози в крові є необхідним для встановлення наявності та типу цукрового діабету в людини. Під час лікування цукрового діабету важливою є дієтотерапія, що полягає в різкому обмеженні споживання вуглеводів, насамперед глюкози. Тому контроль рівня глюкози в продуктах харчування є актуальною проблемою.

Просторова будова фруктози показана на рис. 4.5. Контроль рівня фруктози в крові та сечі проводиться для визначення характеру патологічних змін в організмі людини. Важливим є також контроль рівня фруктози в продуктах харчування, оскільки високий рівень фруктози сприяє розвитку серцевих захворювань і діабету.

Просторова будова лактози наведена на рис. 4.6. Контроль рівня лактози в продуктах харчування є важливою проблемою. Так, у Західній Європі 10-20 % населення, а в азіатських – до 90 % не може перетравлювати лактозу. Такі люди можуть вживати спеціально вироблені молочні продукти, до складу яких входить дуже мала кількість лактози. У молочній промисловості контроль вмісту лактози в молоці є важливим для процесу ферментації під час виробництва кисломолочних продуктів.

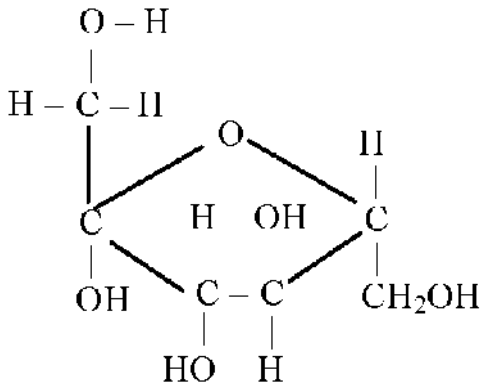


Рис.4.5. Просторова будова молекули фруктози

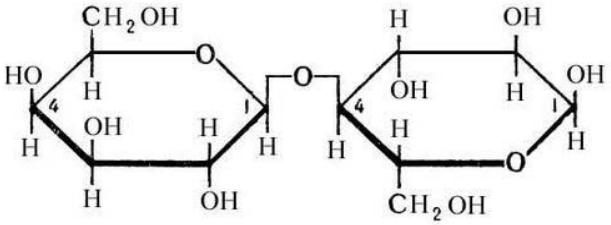


Рис.4.6. Просторова будова молекули лактози

На основі вищесказаного можна робити висновок, що контроль кількісного вмісту вуглеводів є надзвичайно важливим у медичній діагностиці, харчовій, біотехнологічній та фармацевтичній промисловості [190-192].

Детектування простих вуглеводів на сьогодні повністю не вирішене і в цьому напрямку ведуться інтенсивні дослідження. Сучасні методи визначення кількості вуглеводів вимагають наявності складного обладнання і, відповідно, кваліфікованого персоналу [193], тому розроблення сенсорів для експрес-аналізу рівня вуглеводів є актуальною проблемою.

Для визначення рівня вуглеводів широко розробляються біосенсори, переважна більшість яких є електрохімічними, а саме, амперметричними. В основі функціонування таких біосенсорів лежать ферментативні реакції. У роботах [194-197, 198] для підвищення чутливості біосенсорів використано одношарові та багатошарові вуглецеві нанотрубки. Такі біосенсори для контролю глюкози є високоселективними та мають діапазон визначення глюкози 4-24 мМ. Амперметричні біосенсори для визначення лактози

працюють у діапазоні 0,3-0,6 мМ, а біосенсори для визначення концентрації фруктози – в діапазоні 1-100 мМ [199].

Крім електрохімічного принципу дії, дослідження ведуться в напрямку створення оптичних систем, у яких детектування вуглеводів базується на зміні спектральних характеристик чутливого середовища. У роботі [200] як чутливий матеріал оптичного сенсора фруктози використано плівки на основі полістирен-b-полі (2-вінілпіридину) (ПС-b-П2ВП), функціоналізовані з 2- (бромметил) фенілборновою кислотою. Фрагмент борної кислоти, введений у шарувату матрицю, може оборотно зв’язуватися з фруктозою, надаючи фотонних властивостей плівці ПС-b-П2ВП. Плівки мають межу виявлення фруктози до 500 мМ у воді, викликаючи значну зміну кольору, від блакитного до помаранчевого.

Розглядається створення оптичних сенсорів цукру на основі фенілборної кислоти (ФБК) та її похідних у якості чутливих матеріалів [201]. Для розроблення чутливих елементів оптичних сенсорів на основі ФБК використовують різні хромофори та флуорофори в поєднанні з плівкою ФБК.

Показано можливість використання поверхневого плазмонного резонансу для створення сенсора фруктози [202]. У якості чутливого елемента використано плівку 3-амінофеніл борної кислоти та L-глутамінової кислоти (2,2,-2)-трихлоетилефіру. Взаємодія з фруктозою викликає зміщення в червону область максимуму поглинання поверхневого плазмонного резонансу. Отримана хороша кореляція між зсувом довжини хвилі та концентрацією фруктози, що вказує на можливість створення сенсора для кількісного вимірювання фруктози.

Розглянуто схему біосенсора для виявлення глюкози на основі модифікованих ензимами неорганічних/органічних прозорих плівок Prussian Blue (Берлінська лазур). Під дією глюкози відбувається зміна кольору плівок, що можна покласти в основу створення оптичних сенсорів[203].

У вищерозглянутих оптичних системах детектування є ряд невирішених проблем, викликаних або складністю реєстрації вибраного оптичного ефекту,

або складною багатошаровою структурою самого чутливого елемента. Такий стан речей ускладнює їх застосування переважно через високу собівартість.

Для усунення проблем, викликаних складністю реєстрації вибраного оптичного ефекту, складною багатошаровою структурою самого чутливого елемента, а також високою собівартістю матеріалу активного середовища, ми пропонуємо використати холестеричний рідкий кристал у якості матеріалу чутливого елемента оптичних сенсорів вуглеводів. Інформаційний сигнал у таких сенсорах формується за рахунок селективного відбивання (пропускання) світла в чутливому середовищі оптичних сенсорів [151].

## 4.3. Холестеричні рідкокристалічні матеріали як активне середовище сенсорів білків та вуглеводів.

Вище було розглянуто вплив органічних біомолекул на орієнтацію нематичних рідких кристалів. Зміна орієнтації нематичного РК може бути зафіксована оптичними методами, такими як зміна поляризації, інтенсивності тощо. Ця особливість поведінки нематичного РК, допованого біомолекулами, може бути покладена в основу створення чутливого елемента первинного перетворювача оптоелектронного сенсора білків. Близькість хімічної природи нематичних і холестеричних рідких кристалів дозволяє припустити ідентичність механізму їхньої взаємодії з біологічними речовинами, а наявність надмолекулярної спіральної структури розширює методи їх детектування.

Спіральна структура холестеричних рідких кристалів чутлива до впливу зовнішніх факторів, зокрема біологічних речовин. Ми пропонуємо використати холестеричний РК з наявною смугою селективного відбивання у видимій області як індикатор наявності білків та інших біологічних речовин.

Оптичні властивості ХРК сприяють їх застосуванню в якості чутливих елементів первинних перетворювачів біологічних сенсорів, які використовуються для якісного та кількісного визначення біологічних речовин. Внаслідок контакту з біооб’єктами відбувається зміна оптичних характеристик

ХРК, що значно розширює можливості виявлення ідентифікації і діагностики біооб’єктів.

Оптичні методи формування інформаційного сигналу широко використовуються в сучасних сенсорах. Такий сигнал обумовлений селективним пропусканням оптичного випромінювання від активного середовища, яке взаємодіє з газом, рідиною, твердим тілом [190]. Створення оптоелектронних біосенсорів для виявлення та кількісного аналізу біологічних речовин є завданням, пов’язаним із контролем біологічних процесів, аналізом ефективності дії лікарських препаратів тощо.

Вплив органічних біомолекул на орієнтацію нематичних рідких кристалів розглядається в ряді робіт [191-194]. Зміна орієнтації нематичного РК може бути зафіксована оптичними методами. Така зміна орієнтації зумовлює зміну поляризації світла, зміну його інтенсивності тощо. Ця особливість поведінки нематичного РК, допованого біомолекулами, може бути покладена в основу створення чутливого елемента первинного перетворювача оптоелектронного сенсора протеїнів. У роботі [195] для реєстрації протеїнових структур застосовано методику, що базується на визначенні енергії зчеплення рідкокристалічної речовини з поверхнею, покритою протеїном. Цей метод забезпечує більшу точність вимірювання кількості протеїну порівняно з оптичними методами.

Основою активного середовища первинного перетворювача є холестеричний рідкий кристал. Зміну оптичних властивостей холестеричних рідких кристалів внаслідок внесення в них розчинів протеїнів можна використати для якісного та кількісного визначення біологічних речовин у розчині. Контактуючи з біологічними речовинами, холестеричний рідкий кристал змінює оптичні характеристики (положення мінімуму пропускання та інтегральну ширину спектральної залежності), що можна покласти в основу створення чутливого елемента первинних перетворювачів сенсорів протеїнів. У роботі [192] показано можливість застосування орієнтаційних ефектів у рідких кристалів для реєстрації протеїнів. Концентрація білка у біологічних системах

змінюється в широких межах. У результаті розчинення білків у воді на поверхні білкової молекули утворюється гідратний шар, орієнтований у певному напрямку молекул води. Оскільки поверхня більшості білкових молекул заряджена негативно, дипольні молекули води притягуються до неї. Очевидно, що кількість таких шарів у гідратній оболонці залежатиме від гідрофільних властивостей білкової молекули, які, своєю чергою, залежать від кількості амінокислот із полярними групами. Важливо, що вода гідратної оболонки має специфічні властивості, оскільки вона не «вільна», а структурована та утворює з білковою молекулою спільну систему. Водночас гідратна оболонка перешкоджає з'єднанню білкових молекул між собою.

### 4.4. Дослідження спектральних характеристик білків

Використання холестеричних рідких кристалів, а також їх композитів із нанодомішками у якості активного середовища оптичних сенсорів шкідливих газів розглянуто в ряді робіт [136,145]. У якості чутливого елемента було використано термостабільний холестеричний рідкий кристал BLO-61 з максимумом селективного відбивання на довжині хвилі $\lambda$=437 нм при кімнатній температурі. До цього рідкого кристала додавали розчин білка в дистильованій воді (концентрація розчину становила 10-90 %). Для одержання спектральних характеристик досліджуваних матеріалів використовували спектрофотометр USB-2000, який забезпечує вимірювання в діапазоні 200-1000 нм. Результати експериментальних досліджень обробляли за допомогою програмного середовища Spectra Suite. На рис. 4.7 -4.9 наведено залежність зміни довжини хвилі мінімуму пропускання світла від концентрації білкового розчину в рідкому кристалі для всіх досліджуваних речовин.

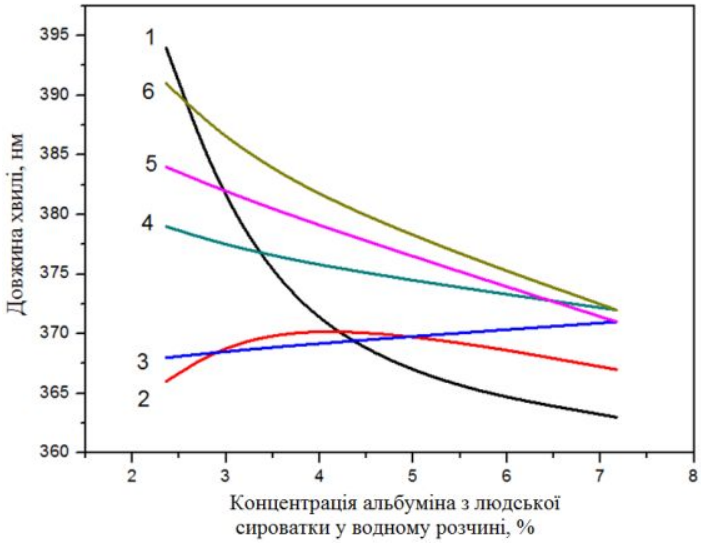



Рис.4.7 Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання композиту на основі водного розчину альбуміну з людської сироватки та холестеричного рідкого кристала: 1 – концентрація РК в білковому розчині 10 %; 2 – 20 %; 3 –30 %; 4 –50 %; 5 – 60 %.

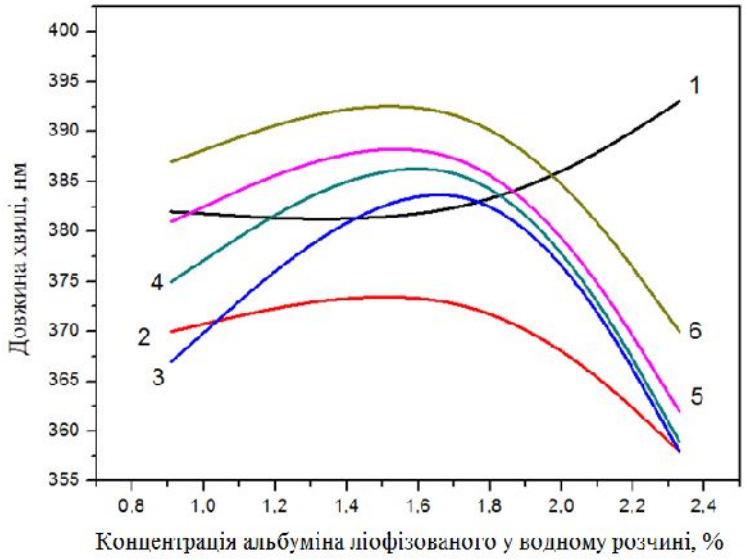



Рис. 4.8. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання композиту на основі водного розчину альбуміну ліофілізованого та холестеричного рідкого кристала: 1 – концентрація РК у білковому розчині 10 %; 2 – 20 %; 3 –30 %; 4 –50 %; 5 – 60 %.

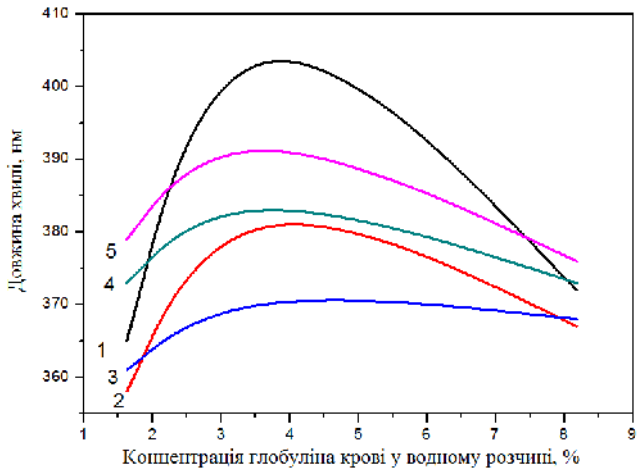



Рис. 4.9. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання композиту на основі водного розчину глобуліну крові та холестеричного рідкого кристала: 1 – концентрація РК у білковому розчині, 10 %; 2 –20 %; 3 – 30 %; 4 – 50 %; 5 – 60 %.

Проаналізуємо отримані результати [204]. Зі збільшенням концентрації білкового розчину в РК відбувається зміщення довжини хвилі мінімуму пропускання в короткохвильову область, що свідчить про деформацію стиску кроку спіралі структури, причому інтенсивність цього процесу залежить від концентрації білка в водному розчині. Чим більша концентрація білка, тим інтенсивніше проходить процес. Молекула білка має форму глобули, навколо якої сформована гідратна оболонка. Розмір білкової молекули становить 100-1000 нм. Ці великі білкові молекули, взаємодіючи між собою, приводять до стиснення спіральної структури ХРК, внаслідок чого вона деформується і крок зменшується. При певній концентрації білкового розчину в РК (70-85 %) мінімум пропускання зсувається в довгохвильову область, причому, інтенсивність процесу збільшується зі зростанням концентрації білкового розчину. Отже, при великих концентраціях білкового розчину в РК починається зворотний процес розкручування холестеричної спіралі, що свідчить про послаблення впливу білків у розчині на спіральну структуру.

Значна зміна характеристик оптичного пропускання холестеричного рідкого кристала під впливом альбуміну пов’язана, найімовірніше, з реакціями взаємодії білка з молекулою ХРК. Підставою для такого припущення є хімічна

будова РК, до складу якого входять ефір холестерину та жирна кислота. Однією з основних функцій альбуміну плазми крові є транспортування нерозчинних у воді речовин, зокрема жирних кислот Також протеїн зв’язує холестерин. Холестерин є обов’язковим компонентом переважної кількості тваринних клітин, а також крові та жовчі. У крові тільки третина холестерину існує у вигляді вільного спирту, тоді як 2/3 його етерифіковано, переважно ненасиченими жирними кислотами. Тому очікуваним явищем є утворення гомогенної суміші РК та розчину альбуміну.

Отже, існує велика ймовірність біохімічних реакцій між альбуміном і ХРК, в результаті якої молекули РК можуть змінювати свої просторові характеристики (структуру спіралі, орієнтацію, оптичну конформацію тощо). Такі зміни безпосередньо впливають на оптичне пропускання ХРК, а саме, на положення мінімуму пропускання світла. Відхилення цього мінімуму від початкового значення (100 % ХРК) перебуває у складній залежності від співвідношення реагуючих речовин (водний розчин альбуміну/ХРК). Загальна тенденція полягає у зменшенні $\lambda_{мін}$ від 435 до 360-370 нм при 20-30 % ХРК у водному розчині альбуміну та різкому збільшенні $\lambda_{мін}$ при менших концентраціях РК, що особливо помітно на прикладі ліофілізованого альбуміну.

### 4.5. Дослідження спектральних характеристик вуглеводів

Для отримання експериментальних зразків до холестеричної суміші додавали водні розчини вуглеводів, а саме найбільш широко представлених в біологічних системах: глюкози, лактози та фруктози у певній концентрації. Одержані суміші перемішували механічно протягом 5 хв.

Для вимірювання спектральних характеристик та їхньої зміни під впливом вуглеводів використовували спектрофотометр USB–2000 у діапазоні 200–1100 нм.

Обробка експериментальних результатів проводилася за допомогою програмного забезпечення OriginPro 8. Отримані спектральні залежності

апроксимувались функціями Гауса, що дало можливість визначати довжину хвилі положення мінімуму пропускання світла досліджуваних зразків.

Нижче наведено результати досліджень рідкокристалічних матеріалів із надмолекулярною спіральною структурою та водних розчинів вуглеводів різної концентрації, які, на нашу думку, можуть стати базою для створення дешевих оптичних систем реєстрації вмісту простих вуглеводів. Об’єктом дослідження була багатокомпонентна холестерична суміш BLO–61 виробництва EM Industries. Її особливістю є висока температурна стабільність оптичних характеристик. Концентрація простих вуглеводів у водному розчині змінювалася від 5 до 40 %. Загальний вміст розчину вуглеводів у рідкому кристалі становив 0–80 %.

На рис. 4.10 зображено залежність зміни довжини хвилі мінімуму пропускання світла від концентрації десятивідсоткового водного розчину глюкози, фруктози та лактози в рідкокристалічній речовині.

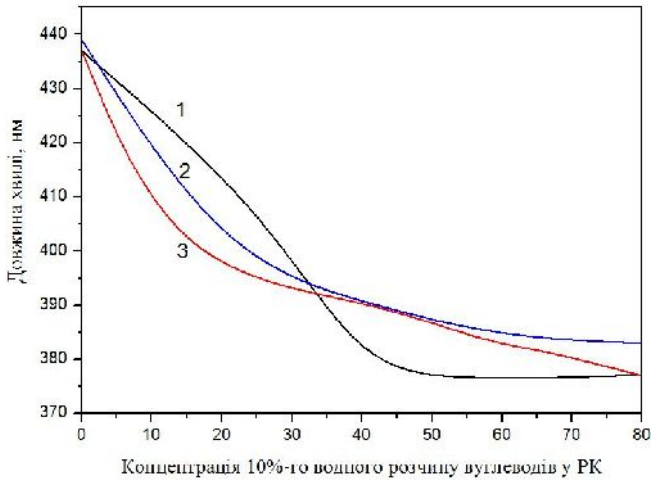



Рис. 4.10. Залежність зміни довжини хвилі мінімуму пропускання світла від концентрації 10 %–го водного розчину вуглеводів у РК: 1 – глюкоза; 2 – фруктоза; 3 – лактоза

На всіх трьох кривих можна виокремити дві характерні ділянки, а саме, ділянку низької концентрації водного розчину вуглеводів (25–45 %) та ділянку високої концентрації (понад 45 %). Для ділянки низької концентрації водних розчинів вуглеводів характерним є монотонне зменшення довжини хвилі

мінімуму пропускання, а відповідно, кроку спіралі з ростом концентрації водного розчину. Коефіцієнт спектральної чутливості холестеричної матриці відрізняється для водних розчинів різних вуглеводів. На рис. 4.11 наведено залежності коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації водного розчину вуглеводів. Максимальний коефіцієнт спектральної чутливості спостерігається для водних розчинів глюкози.

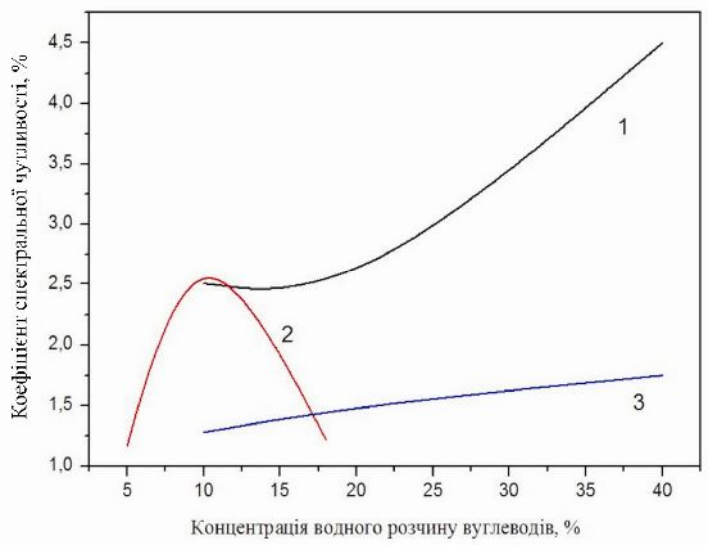



Рис. 4.11. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації водного розчину вуглеводів: 1 – фруктоза; 2 – лактоза; 3 – глюкоза

Чутливість холестеричної матриці до водного розчину глюкози становить 1,28 нм/%. Для ділянки високих концентрацій розчину глюкози спостерігається монотонне зростання кроку спіралі, причому динаміка росту становить 0,2 нм/% На рис. 4.12 наведено залежності довжини хвилі мінімуму пропускання системи РК-глюкоза для всіх досліджених концентрації. Як видно із залежностей, описаний вище характер зміни кроку спостерігається для всіх досліджених концентрацій.

Аналогічні результати, наведені на рис.4.13, отримано в результаті дослідження лактози. На залежності спостерігається монотонне зменшення кроку надмолекулярної спіральної структури з ростом концентрації водного розчину лактози зі спектральною чутливістю 2,5 нм/% до концентрації водного

розчину лактози 20 %. З подальшим зростанням концентрації водного розчину спектральна чутливість становить  1,5 нм/%.

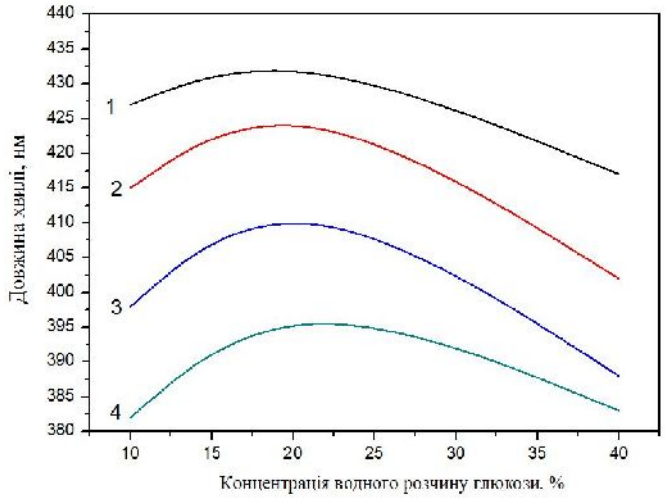



Рис. 4.12. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання розчину РК–глюкоза від концентрації водного розчину глюкози: 1 – концентрація розчину глюкози в РК 10 %; 2 – концентрація розчину глюкози в РК 20 %; 3 – концентрація розчину глюкози в РК 30 %; 4 – концентрація розчину глюкози в РК 40%.

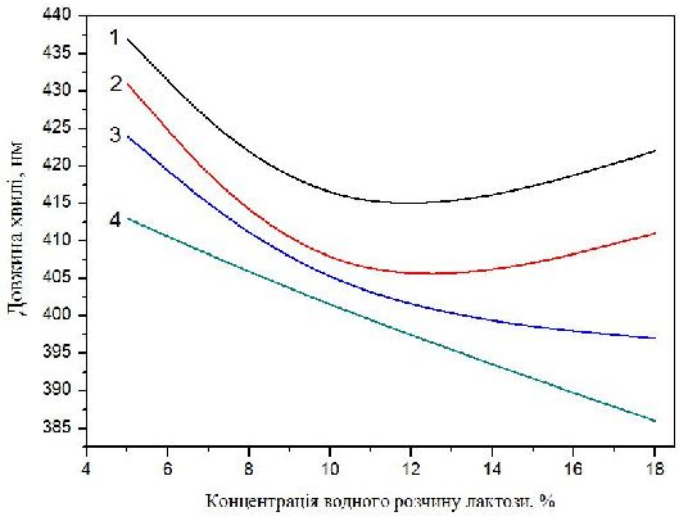



Рис. 4.13. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання розчину РК–лактоза від концентрації водного розчину лактози: 1 – концентрація розчину лактози в РК 10 %; 2 – концентрація розчину лактози в РК 20 %; 3 – концентрація розчину лактози в РК 30 %; 4 – концентрація розчину лактози в РК 40 %

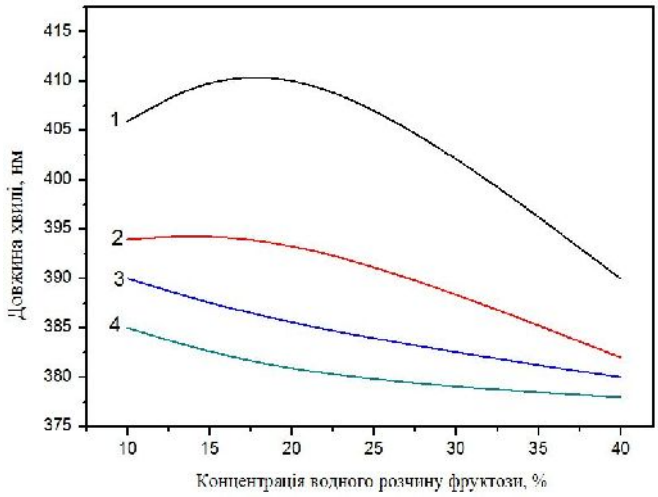



Рис. 4.14. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання розчину РК–фруктоза від концентрації водного розчину фруктози: 1 – концентрація розчину фруктози в РК 10 %; 2 – концентрація розчину фруктози в РК 20 %; 3 – концентрація розчину фруктози в РК 30 %; 4 – концентрація розчину фруктози в РК 40 %.

На рис. 4.14. зображено залежність зміни довжини хвилі мінімуму пропускання світла системи РК-фруктоза для всіх досліджуваних концентрацій. На графіку можна виокремити дві характерні ділянки, а саме, ділянку низької концентрації водного розчину фруктози (0-30%) та високої концентрації (понад 30 %).

На основі аналізу отриманих результатів запропоновано механізм взаємодії водного розчину простих вуглеводів і багатокомпонентної рідкокристалічної хіральної суміші [205]. Насамперед розглянемо особливості водних розчинів простих вуглеводів. У водних розчинах глюкози утворюється рівноважна суміш циклічної та відкритої форм, оскільки таутомерія відбувається лише у водних розчинах, тобто моносахариди вступають у реакції як у циклічній, так і в ланцюговій формі. При цьому, згідно з принципом Ле–Шательє, якщо тільки ланцюгова форма починає реагувати з якимось реагентом, таутомерна рівновага зсувається в бік відновлення концентрації сполук ланцюгової форми.

Фруктоза – моносахарид, як і глюкоза. У розчині вона існує також у вигляді рівноважної суміші (70 % фруктопіранози і близько 22 % фруктофуранози, а також невеликі кількості трьох інших форм) (рис. 4.15)

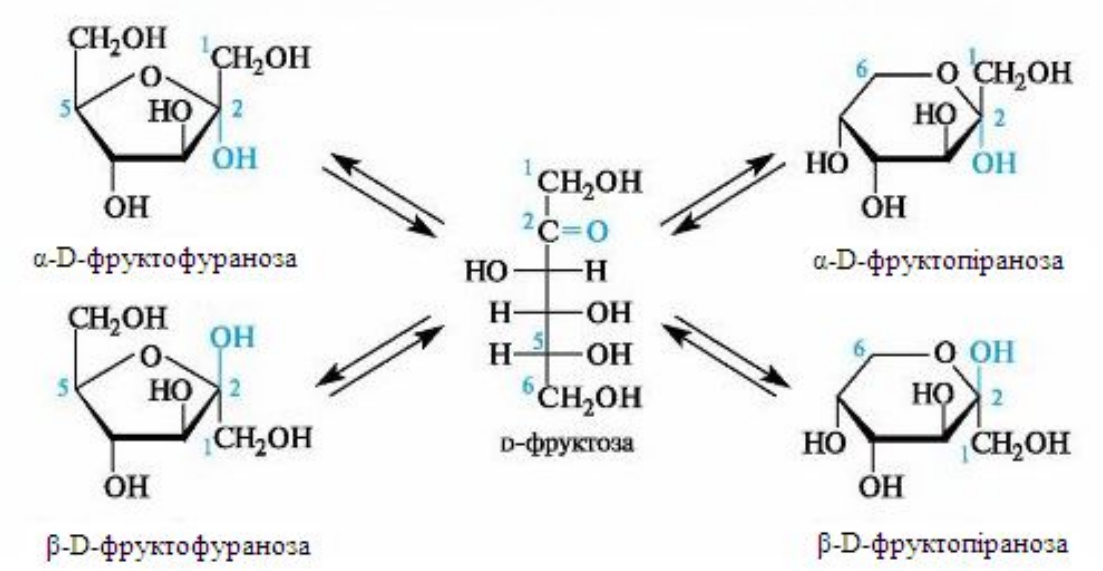



Рис. 4.15. Ізомерні форми існування фруктози у водному розчині

Лактоза – дисахарид, тобто побудована з двох залишків моносахаридів, сполучених глікозильним зв’язком, а саме, β–D–галактопіранози й α–D–глюкопіранози (рис. 4.16). Для виникнення кисневого містка в молекулі лактози використовується глікозидний гідроксил лише одного моносахариду. Тому лактоза – відновлювальний дисахарид, оскільки залишається глікозидна ОН–група другого моносахариду, яка здатна до цикло–ланцюгової таутомерії з одержанням альдегідної групи:

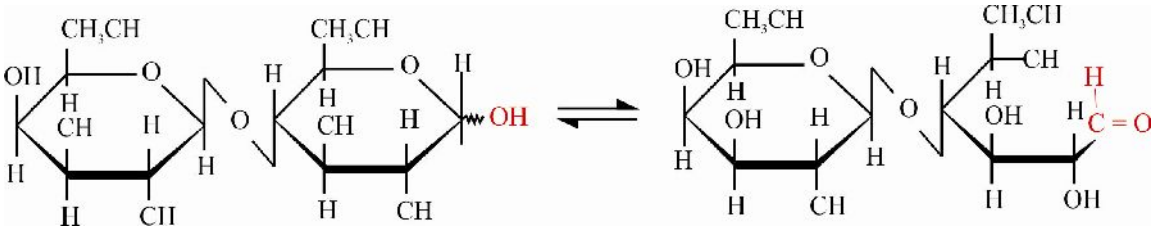


Рис. 4.16. Ізомерні форми існування лактози у водному розчині

Усі вуглеводи містять карбонільну групу (=C=O). Внаслідок полярності зв’язків C=O атом вуглецю набуває позитивного ефективного заряду (електрофільний центр), а кисень – негативного заряду (нуклеофільний центр).

Тому вуглець може бути атакований нуклеофілами (наприклад, негативно зарядженими іонами ціаніду) або негативно зарядженими частинами іншої молекули.

Оскільки окремі компоненти використаного рідкого кристала містять ціаногрупу (нітрильну групу), то, ймовірно, відбувається взаємодія між нею та оксогрупою простих вуглеводів з утворенням ціановодню.

Ціановодень – слабкий нуклеофіл, і в кислому середовищі реакція проходить надзвичайно повільно. Однак вищевикладене дозволяє припустити, що в системах водний розчин простих вуглеводів – рідкий кристал можливе утворення стійких асоціатів із молекул простих вуглеводів і сильнополярних компонент рідкокристалічної суміші як результат взаємодії між карбонільними групами вуглеводів і ціаногрупою в складі РК. Можна також припустити наявність певної асиметрії утвореного асоціату (наявність хіральної ділянки). Тому збільшення концентрації таких асоціатів приводить до зменшення кроку надмолекулярної спіральної структури системи, а відповідно, зменшення довжини хвилі мінімуму пропускання світла.

**Висновки до розділу 4.**

1. Встановлено основні закономірності спектральних характеристик холестеричних рідких кристалів після введення в них водних розчинів білків і вуглеводів.
2. Виявлено, що зі збільшенням концентрації водного розчину білків та вуглеводів у рідкому кристалі відбувається зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область на10-80нм. Спектральна чутливість лежить у межах від 0,54 до 2,11 нм/% для білків та від 1,17 до 4,5 нм/% для вуглеводів.
3. Встановлено, що зменшення кроку холестеричної спіралі, а відповідно, зсуву мінімуму пропускання в короткохвильову область,обумовлено біохімічною реакцією між білками та молекулами холестеричного рідкого кристала.
4. Запропоновано використання холестеричного рідкого кристалу із наявною смугою селективного відбивання у видимій області в якості індикатора

наявності білків та інших біологічних речовин. Внаслідок контакту з біооб’єктами відбувається зміна оптичних характеристик рідких кристалів, що значно розширює можливості виявлення ідентифікації та діагностики біооб’єктів.

5. Встановлено, що найбільше значення коефіцієнту спектральної чутливості від 2,5 до 4,5 нм/% спостерігається для водних розчинів фруктози.

# РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОХОДЖЕННЯ СВІТЛА В СИСТЕМІ НАНОСТРУКТУРОВАНА МАТРИЦЯ-ФОТОДІОД

## 5.1. Формування оптичного сигналу в системі наноструктурована матриця-фотодіод-світлодіод.

Розроблена нами наноструктура використовується як активне середовище оптичних сенсорів шкідливих речовин. Це обумовлено високою чутливістю таких систем та порівняною простотою отримання. Однак оптимізація конструктивних і технологічних рішень під час створення таких перетворювачів вимагає додаткових досліджень процесу проходження світла крізь них. Доволі висока ціна наноструктурованих матриць на сьогодні спонукає до попереднього комп'ютерного моделювання цього процесу [206]. Протягом моделювання з подальшими експериментальними дослідженнями було вирішено такі задачі:

- Виявлення критичної мінімальної товщини наноструктурованого шару для отримання ефекту селективного відбивання світла в холестеричних рідких кристалах.
- Дослідження впливу співвідношення показників заломлення елементів системи на величину інтенсивності ефективної складової випромінювання.
- Оптимізація параметрів джерела випромінювання.

На рис. 5.1 наведено розроблену модель ділянки системи наноструктурована матриця-РК, яка була використана для проведення моделювання. Очевидно, що в детектуванні буде брати участь лише та частина випромінювання, яка пройшла крізь пори матриці, заповнені холестеричним РК. Тому необхідним є введення такого параметра як коефіцієнт ефективності структури: $K_e = I_{рк} / I_c$, де $I_c$– сумарна інтенсивність випромінювання; $I_{рк}$– інтенсивність випромінювання, яке пройшло крізь пори.

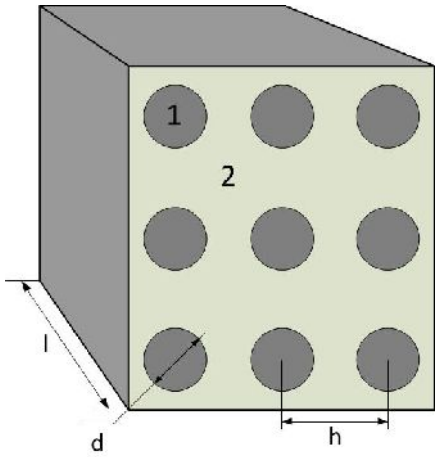



Рис.5.1 Модель ділянки системи наноструктурована матриця –РК, яка була використана для проведення моделювання: 1 – пора, заповнена холестеричним РК, 2 – структурована матриця, d – діаметр пори, h –крок структури, l – товщина.

У випадку рівномірного освітлення структури паралельним пучком світла, який падає перпендикулярно до поверхні структури, ця величина буде дорівнювати відношенню загальної площі всіх пор до площі структури.

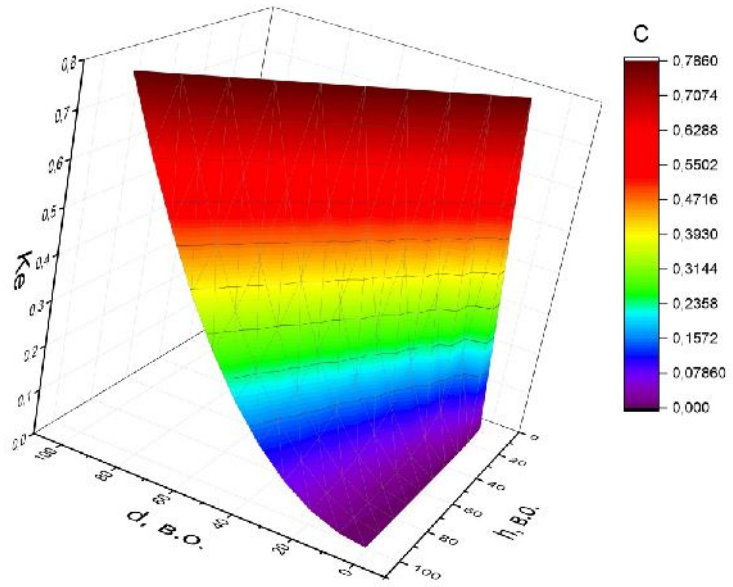



Рис.5.2. Залежність коефіцієнта ефективності від діаметра пор та кроку розташування для випадку нормального падіння однорідного променя.

Залежність $K_в$ від діаметра пор та кроку їх розташування наведена на рис. 5.2. Як видно з залежності, навіть в ідеальному випадку величина

паразитного випромінювання, параметри якого не модифікуються рідким кристалом, дорівнює приблизно 25 %. Оптимізація конструкції первинного перетворювача сенсора вимагає врахування показників заломлення окремих компонент структури та особливостей явища селективного відбивання. Більш детально аналіз цих параметрів наведено нижче.

## 5.2. Розроблення методу розрахунку коефіцієнта селективного відбиття активного середовища оптичних сенсорів

Мінімально допустима товщина матриці первинного перетворювача, необхідна для забезпечення ефективної взаємодії випромінювання з шаром ХРК, визначається особливостями селективного відбивання. Зазначимо, що селективне відбивання світла в порі та суцільному шарі практично не відрізняється.

Щоб пояснити виникнення кольорового забарвлення шару РК під час його освітлення білим світлом, можна розглядати шар ХРК як дифракційну ґратку, що складається з системи паралельних шарів завтовшки *P/2* та має середній показник заломлення *n*. Відповідно до умови Вульфа-Брегга, довжина хвилі світла, максимально інтенсивного під час інтерференції ($\lambda_{max}$), описується формулою:

$$\lambda_{max} = 2\, n\, d \sin\theta,$$

де $d = P/2$ – період ґратки, $\theta$– кут між падаючим променем та холестеричною площиною. Якщо світло падає під кутом $\theta = 90^{o}$, формула набуває вигляду:

$$\lambda. = 2n\, d = 2\, nP/2 = nP.$$

Отже, спіральна структура буде відбивати світло, довжина хвилі якого дорівнює її кроку [207]. Ширину смуги селективного відбивання (ССВ) можна записати у вигляді:

$$\Delta\lambda = \Delta nP,$$

де $\Delta n = n_e - n_o$– двозаломлення рідкого кристала; $n_o$ і $n_e$ — показники заломлення для звичайного та незвичайного променів відповідно.

У межах смуги селективного відбивання світло правої кругової поляризації відбивається від правосторонньої спіралі, а світло лівої кругової поляризації передається.

Зазначимо, що для деяких довжин хвиль світло лівої кругової поляризації відбивається від лівосторонньої спіралі, а світло з правосторонньою круговою поляризацією передається. За межами смуги селективного відбивання поляризація хвилі не має великого значення. Ширина смуги селективного відбивання не перевищує 100 нм для матеріалів з $n_o$~1,5 і $n_e$~1,7. Для забезпечення Брегівського відбивання необхідний деякий мінімальний шар холестерика. На рис.5.3 показано результат моделювання з використанням методу скінченних елементів [208].

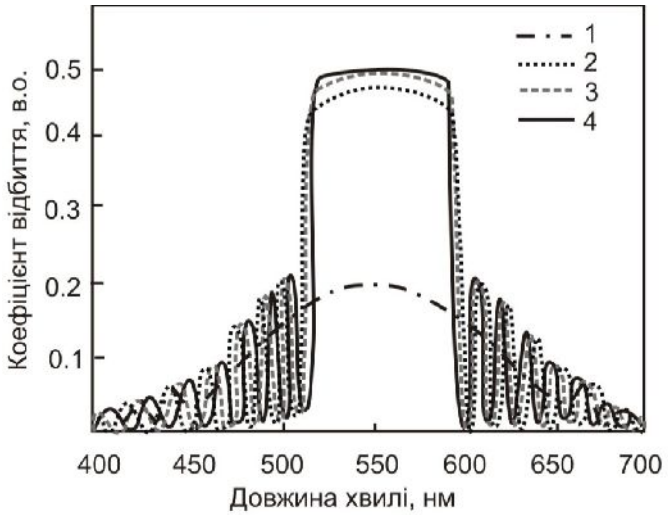



Рис.5.3. Спектр відбивання ХРК зі зміною товщини комірки: (1) 2P, (2) 8P, (3) 10P, (4) 16P. Δn = 0.4, $n_o$ = 1.6, P = 310 нм [208]

Аналіз спектра відбивання ХРК показує, що зі збільшенням товщини плівки від 2*P* до 16*P* коефіцієнт відбиття зростає в діапазоні 2*P*–10*P* до значення 0,5 і не змінюється з подальшим зростанням товщини. На рис. 5.4 наведено залежність ширини смуги відбивання для двох ХРК матеріалів з різними значеннями двозаломлення $\Delta n$ = 0,2 і $\Delta n$ = 0,6.

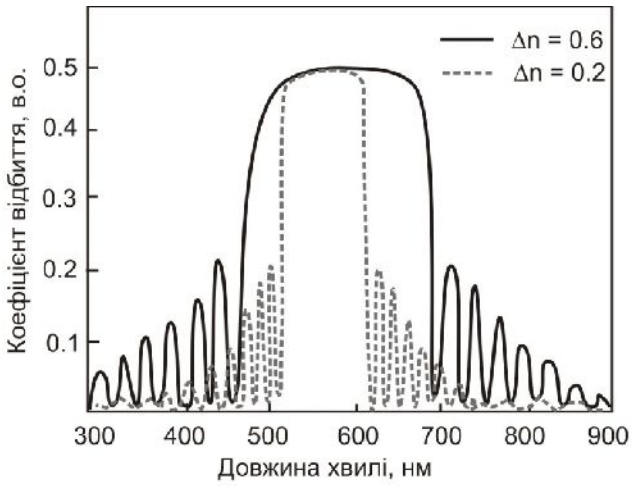



Рис.5.4. Залежність коефіцієнта відбиття від довжини хвилі для різного двозаломлення [208]

Як видно з рис. 5.4, ССВ збільшується зі збільшенням двозаломлення. Для моделювання було вибрано фіксовану товщину зразка ХРК $d$ = 16 $P_o$. Величина кроку підбиралась так, що центр ССВ дорівнює 550 нм. Таке моделювання дає низький коефіцієнт відбиття, всього 0,5. Використання методу матриці Джона [209] для відтворення звичайного падаючого світла в ХРК уможливлює отримання коефіцієнта відбиття R~1. У роботі показано, що для параметрів зразка ХРК $P$=0,35 мкм, $n_0$=1.5 і $n_e$=1.8, товщина повинна становити приблизно 10 кроків (рис. 5.5).

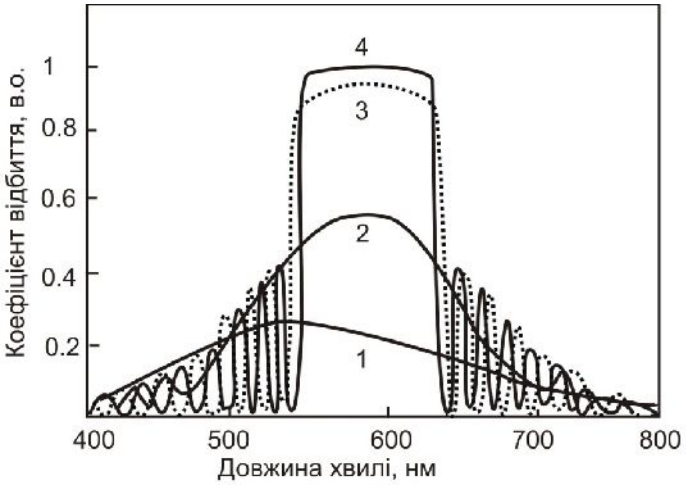



Рис.5.5. Спектр відбивання ХРК зі змінною товщиною комірки: (1) 1P, (2) 2P, (3) 5P, (4) 10P. Падаюче світло має правосторонню кругову поляризацію[209]

Коефіцієнт відбиття ХРК для нормального падіння світла можна одержати, розв’язуючи рівняння Максвела. Оптимальним для перпендикулярно падаючого світла є використання методу Бірімена [210].

На рис. 5.6 показано спектр відбивання РК з параметрами $P$=0,54 мкм, $n_o$= 1.516, $n_e$=1.744 та змінною товщиною комірки, одержаний із використанням методу Бірімена (Berreman). Падаюче світло при цьому має ту саму кругову поляризацію, що й РК, а сам рідкий кристал має досконалу планарну структуру без дефектів. Інтенсивне відбивання спостерігається, коли товщина комірки збільшується до 10 $P$.

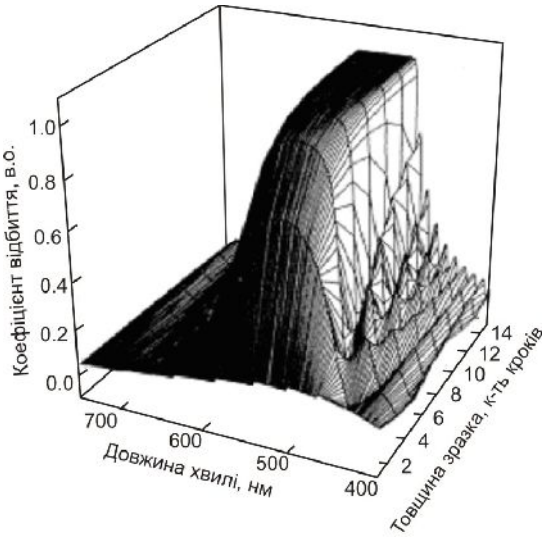



Рис.5.6. Спектри відбивання комірки з планарною текстурою ХРК в залежності від товщини комірки

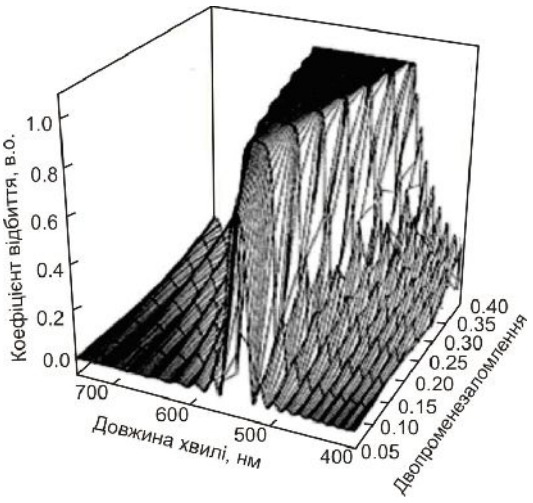



Рис.5.7. Спектри відбивання для різних значень двозаломлення P = 0.54 мкм, d=15P

На рис. 5.7. показано результати зміни двозаломлення для зразка завтовшки 15*P*. Як видно з рисунка, використання матеріалу з $\Delta n \approx 0{,}2$ може забезпечити коефіцієнт відбиття $R \approx 1$. Для отримання більшої ширини смуги селективного відбивання необхідно збільшувати $\Delta n$.

Для розрахунку коефіцієнта відбиття можна використовувати математичну модель, яка ґрунтується на розв'язанні рівнянь Максвелла [211]. Відповідно до цієї моделі, коефіцієнт відбиття падаючої хвилі в рідкому кристалі дорівнює квадрату відношення амплітуди відбитої хвилі $E_+^r$ до амплітуди падаючої хвилі $E_+^i$ (в цьому разі холестерична спіраль вважається правосторонньою):

$$R = \left|\frac{E_+^r}{E_+^i}\right|^2 = \frac{\chi^4 \delta^2 \sin^2 \beta_3 d}{\tau^2 \beta_3^2 + \chi^4 \delta^2 \sin^2 \beta_3 d} \qquad (1)$$

де $\tau = \frac{4\pi}{p}$, $\chi = \sqrt{\frac{\omega^2 \varepsilon}{c^2}}$, $c = \frac{2\omega\sqrt{\varepsilon}}{\tau}$, $\beta_3^2 = \chi^2 + (\tau^2/4) - \chi\sqrt{\tau^2 + \chi^2 \delta^2}$, ω – частота, δ – анізотропія діелектричної проникності, d – товщина зразка.

Якщо виконується умова $|\chi^2 - \tau^2/4| < \chi^2\delta$, величина $\beta_3$ стає уявною і в рівнянні (1) $\sin \beta_3 d$ змінюється на $i\mathrm{sh}|\beta_3|d$, тобто світло правої кругової поляризації зазнає повного селективного відбивання. В межах смуги селективного відбивання спостерігається аналогічна поведінка параметра $\beta_3$. З віддаленням частоти від області селективного відбивання інтенсивність відбитого світла зменшується не плавно, а осцилюючи, внаслідок дифракції світла в обмеженому об'ємі. В експерименті ці осциляції не спостерігаються через недосконаліть зразків. Якщо шар РК тонкий (d=2P), інтенсивність відбитого світла пропорційна до $\delta^2$,а крива відбивання сильно розширена. Результати обчислень показано на рис.5.8. Для рідкого кристала завтовшки 10P коефіцієнт відбиття становить R~0,99 і спостерігається повне селективне відбивання світла правої кругової поляризації. За межами смуги селективного відбивання інтенсивність відбитого світла зменшується з віддаленням частоти від області сильного відбивання. Для тонких зразків завтовшки приблизно 2P

крива відбивання дуже розширена, а коефіцієнт відбиття малий. Отже, для отримання достатнього коефіцієнта відбиття товщина зразка повинна бути не меншою ніж 10Р,що узгоджується з результатами моделювання,отриманими в [212].

$$R = \frac{k^4 \delta^2 \sin^2(\beta d)}{4q_0^2 \beta^2 + k^4 \delta^2 \sin^2(\beta d)},$$

де $k = \pi \frac{(n_0 + n_e)}{\lambda}$, $\delta = \frac{(n_e^2 - n_0^2)}{n_e^2 + n_0^2}$, $q_0 = 2 \cdot \frac{\pi}{p}$, $\beta = \sqrt{k^2 + q_0^2 - k\sqrt{4 \cdot q_0^2 - k^2 \cdot \delta^2}}$, $d$ – товщина зразка.

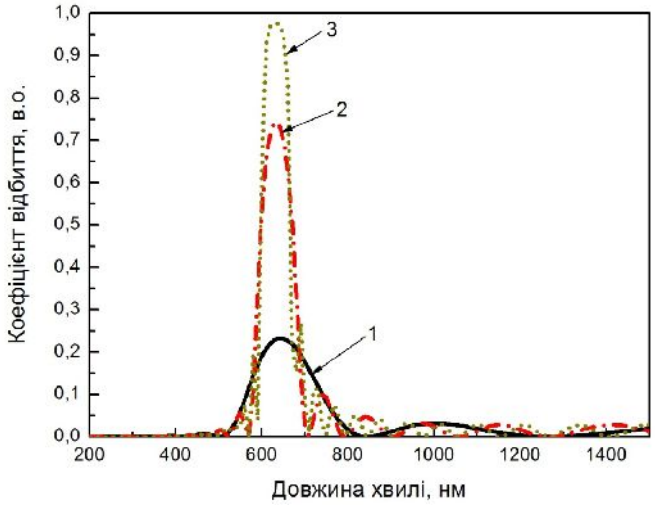



Рис.5.8. Обчислені спектри селективного відбивання ХРК в залежності від товщини зразка (1) d=2P, (2) d=5P, (3) d=10P з використанням математичної моделі

Було проведено моделювання спектрів відбивання ХРК для комірок різної товщини [206]. На рис. 5.9 показано результати розрахунків для комірок завтовшки від d=1P до d=10P. Видно, що зі збільшенням товщини комірки коефіцієнт відбиття зростає. Найбільшого коефіцієнта відбиття R~0,99 можна досягти, використовуючи комірку завтовшки 10P. Однак подальше збільшення товщини зразка не призводить до зміни кривої селективного відбивання, вона переходить у стан насичення. Якщо товщина шару ХРК збільшується до 100P, це пприводить до помилок у розрахунках смуги відбивання[209,213] .

Порівняння спектрів відбивання, обчислених двома різними методами (рис. 5.8, 5.9), показує, що:

– збільшення товщини рідкого кристала до 10P дає схожий результат для обох методів, а коефіцієнт відбиття може досягти значення R~0,99;

– максимуми довжини хвилі селективного відбивання дещо відрізняються, в другому випадку зміщення максимуму довжини хвилі становить λ~0.98 мкм.

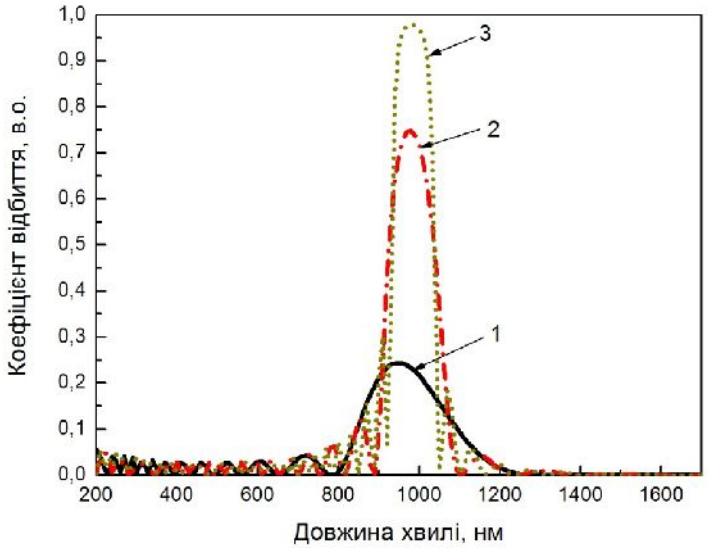



Рис.5.9. Обчислені спектри селективного відбивання ХРК в залежності від товщини зразка (1) d=2P, (2) d=5P, (3) d=10P з використанням математичної моделі

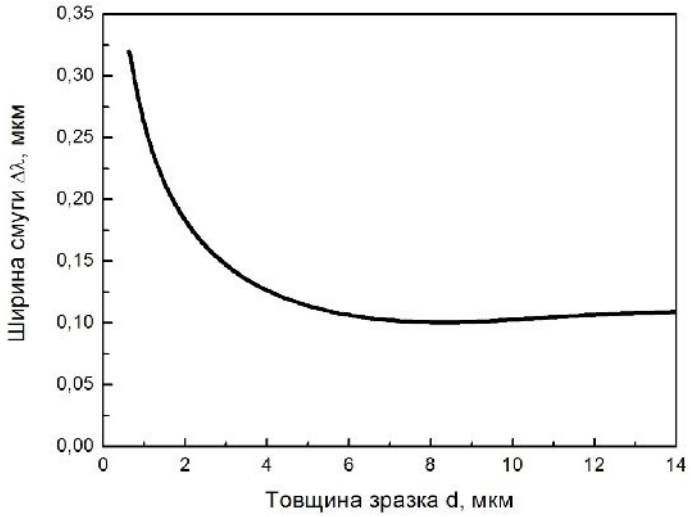



Рис.5. 10. Залежність ширини смуги селективного відбивання від товщини зразка

Результати розрахунків показують, що коефіцієнт відбиття залежить від товщини рідкокристалічного зразка. Однак зменшення товщини РК є вигідним з погляду оптимізації динаміки перемикання. Теоретично показано, правда, що товщину можна зменшувати лише до деякої межі. На рис. 5.10 наведено результати моделювання ширини смуги селективного відбивання в залежності від товщини зразка. Селективне відбивання можна отримати, коли товщина зразка не менша ніж 10P. Обчислення було проведено для різних значень Δn (0,2; 0,3; 0,4), оскільки товщина зразка РК, за якої відбувається насичення максимуму селективного відбивання, пов'язана з двозаломленням Δn. На рис.5.11 показано розраховану залежність коефіцієнта відбиття від товщини РК для різних значень двозаломлення. Видно, що для типових значень P=0,63 мкм і Δn = 0.2 потрібен робочий шар РК завтовшки не менше ніж 3 мкм. Якщо Δn змінюється від 0,1 до 0,4, товщина шару РК повинна збільшуватися від 5P до 15P для досягнення значення коефіцієнта відбиття R~1. Отже, можна використовувати зразки меншої товщини, однак при цьому потрібно збільшувати коефіцієнт двозаломлення, щоб отримати коефіцієнт відбиття майже 0,99.

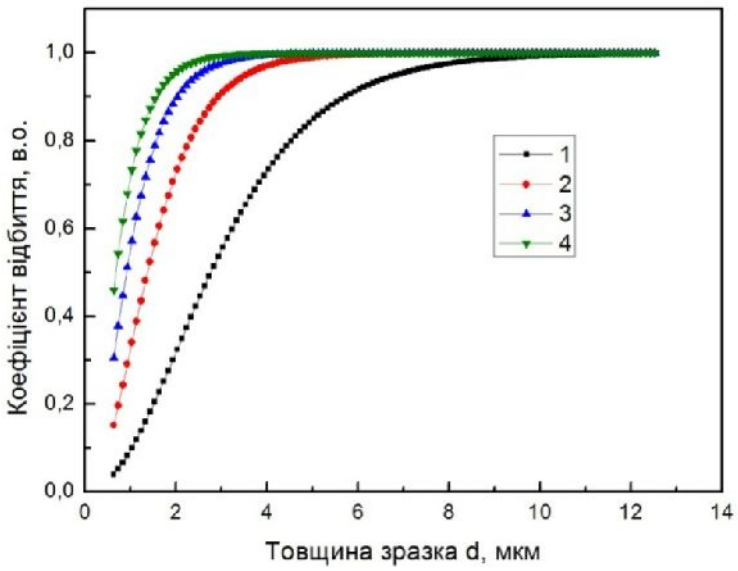



Рис.5.11. Залежність коефіцієнта відбиття від товщини РК зразка для різних значень двозаломлення: Δn=0.1 (1), Δn=0.2 (2), Δn=0.3 (3), Δn=0.4 (4)

Ширина смуги селективного відбивання Δλ залежить від двозаломлення Δn [208]. Для вивчення залежності Δλ = f(Δn) ми обчислили коефіцієнт відбиття для різних значень двозаломлення (рис. 5.12). Моделювання проводилося для фіксованих значень товщини зразка ХРК (d=10P) та кроку спіралі (P=0,63). Як показують розрахунки, двозаломлення не впливає на коефіцієнт відбиття, однак змінює ширину смуги селективного відбивання. Отже, ширину смуги селективного відбивання можна збільшувати, збільшуючи двозаломлення. Характерною особливістю ХРК є те, що зміна кроку спіралі P приводить до зміни максимальної довжини хвилі селективного відбивання. Ця властивість покладена в основу перетворювачів сенсорів шкідливих газів.

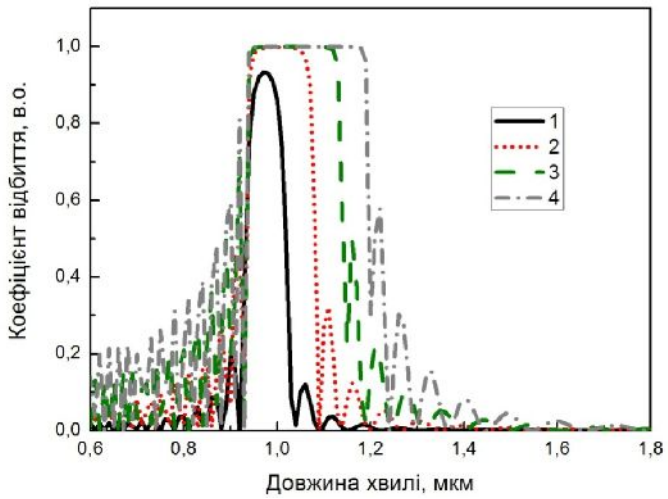



Рис.5.12. Обчислені спектри селективного відбивання ХРК при зміні двозаломлення Δn=0.1 (1), Δn=0.2 (2), Δn=0.3 (3), Δn=0.4 (4)

Результати розрахунку коефіцієнта відбиття для різних значень кроку P (0.3, 0.63, 1.2) показано на рис. 5.13. Товщина зразка становила d=20 мкм. Як бачимо, змінюючи величину кроку ХРК,можна змінювати ширину та положення смуги селективного відбивання.

Для встановлення залежності коефіцієнта відбиття від товщини РК було проведено дослідження рідкокристалічної суміші на основі нематичних матриць з концентрацією 36,6 % холестерилолеату. Цією речовиною стала суміш СЖК-654 (Δε=6,8) з концентрацією 63,4% та кроком спіральної структури P=0,6 мкм(рис.5.14).

Як видно з рисунка, зі збільшенням товщини зразка коефіцієнт відбивання збільшується.

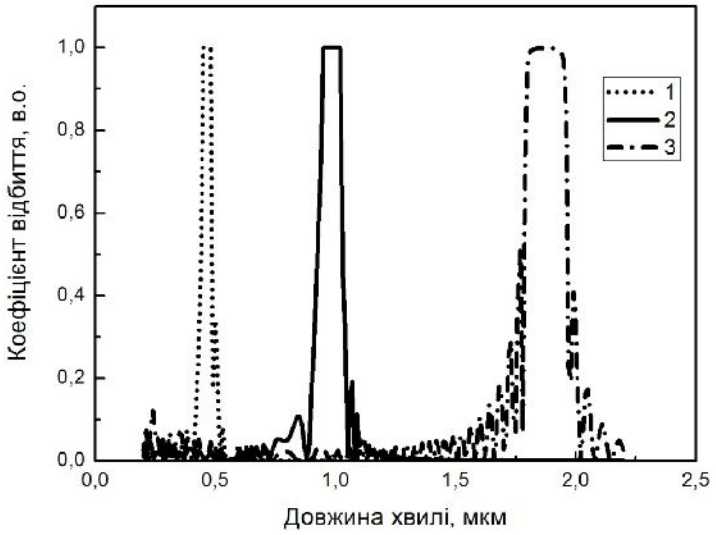



Рис.5.13. Обчислені спектри селективного відбивання ХРК при зміні кроку Р:0.3 мкм (1), 0.63 мкм (2), 1.2 мкм (3)

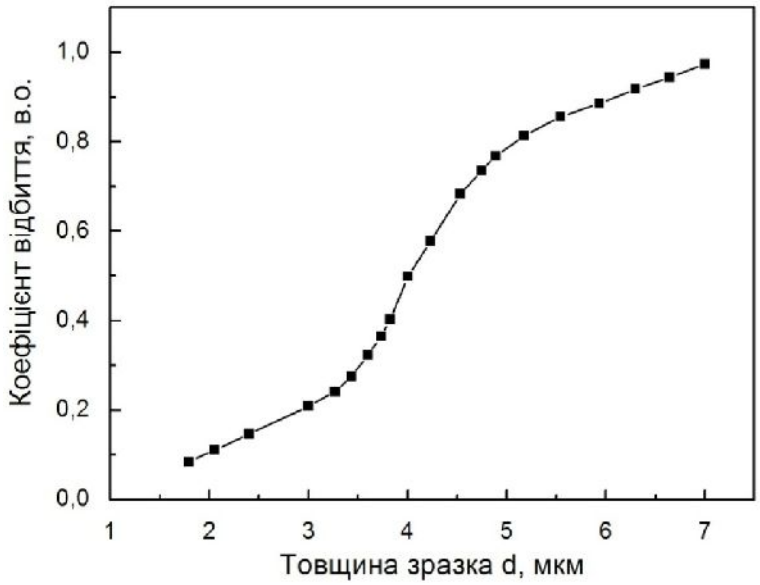



Рис.5.14. Залежність коефіцієнта відбиття від товщини РК зразка

Порівнюючи отримані результати з обчисленими значеннями для зразка завтовшки 10Р (R~0,99), ми бачимо, що в нашому випадку зразку завтовшки 10Р відповідає коефіцієнт відбиття 0,97. Отже, можна стверджувати, що для отримання високого коефіцієнта відбиття необхідно використовувати зразки ХРК, товщина яких не менша ніж 10 кроків спіралі.

## 5.3. Моделювання проходження світла крізь структуровану матрицю

Для врахування оптичних властивостей окремих елементів системи структурована матриця-РК на параметри первинного перетворювача було проведено моделювання проходження світла в таких структурах за допомогою програмного продукту ZEMAX [214].

ZEMAX – програма призначена для аналізу оптичних систем на основі послідовного чи непослідовного розрахунку променів. Дозволяє виконувати глобальну й локальну оптимізацію параметрів оптичної системи. Програма має всі необхідні можливості для проектування сучасних оптичних систем. Програма створена Zemax Development Corporation of Bellevue, Washington (перед тим Focus Software). Вона використовується для моделювання й аналізу оптичних елементів, трасування непрямих променів випадкового світла, поширення випромінювання в рамках фізичної оптики. За її допомогою можна змоделювати поширення світла через оптичні елементи: лінзи (включаючи асферичні та градієнтні), дзеркала й елементи дифракційної оптики. За допомогою програми Zemax можна змоделювати ефекти оптичних покриттів на поверхнях компонентів і створити стандартні діаграми розподілу інтенсивності для аналізу, зокрема точкові діаграми та тривимірні графіки. Особливості поширення світла в межах геометричної оптики будуть корисними там, де необхідно враховувати дифракцію, включаючи поширення лазерних променів, голографію та введення світла до одномодових оптичних волокон. Програма Zemax має потужні засоби для оптимізації моделювання лінз, автоматично коректує параметри для оптимізації продуктивності та зменшення аберацій.

Додатковий програмний модуль ZELUM можна використати для розроблення освітлювальної оптичної системи. А модулі ZEBASE і LensVIEW дозволяють працювати з найбільшою бібліотекою оптичних систем, що створена й постійно обновляється фахівцями компанії.

У ході моделювання не враховувались хвильові властивості випромінювання. Як тестовий нами був вибраний об’єкт, зображений на рис.5.15. Як видно з рисунка, об’єкт складається з 9 пор, заповнених ХРК,

оточених матрицею. Зважаючи на анізотропні властивості РК, для моделювання вибиралось усереднене значення його показника заломлення. Співвідношення між показниками заломлення обирались так, щоб реалізувати випадки $n_{рк}>n_{м}$ та $n_{рк}<n_{м}$. Випадок коли $n_{рк}= n_{м}$ нецікавий для моделювання, оскільки тоді не відбувається перерозподіл випромінювання між порами та матрицею і задача зводиться до геометричного співвідношення, описаного на початку розділу.

На рис. 5.15-5.18 зображено результати моделювання для випадку падіння на поверхню структури пучка світла із синусоїдальною діаграмою направленості. На рис. 5.15 зображено результати моделювання для випадку $n_{рк}>n_{м}$ та товщини структури 0.5 мм. У цьому разі випромінювання, яке проходить крізь структуру під кутом, відмінним від нормального падіння, зазнає заломлення та перерозподілу між матрицею та порами на користь останніх. На рис. 5.15 а зображено розподіл інтенсивності на виході структури. На рисунку виділяються 9 чорних кіл, які своїм розташуванням відповідають розташуванню рідкокристалічних пор. У цьому разі пори, заповнені РК, відіграють роль серцевини світловода, а матриця – роль оболонки. Розподіл інтенсивності для такої структури наведено на рис.5.15 б. Детальний аналіз ходу променів, зображений на рис.5.16 в, показав що перерозподіл відбувається переважно за рахунок зміни напрямку поширення променів із малими (відносно нормалі) кутами поширення. Потрапляючи із середовища з меншою величиною показника заломлення в середовище з більшим показником заломлення, промені, внаслідок повного внутрішнього відбивання, продовжують поширення саме в цій області. Промені, які поширюються в матриці, не виходять за межі структури внаслідок значної різниці показників заломлення матриці й оточуючого структуру повітря. Очевидно, що тенденція перерозподілу буде проявлятися все більше з ростом товщини структури і тим самим збільшувати її коефіцієнт ефективності. Однак на практиці реалізувати таке співвідношення показників заломлення між матрицею та РК капілярами складно, оскільки найпоширеніші структуровані матриці на сьогодні мають високі значення показників заломлення.

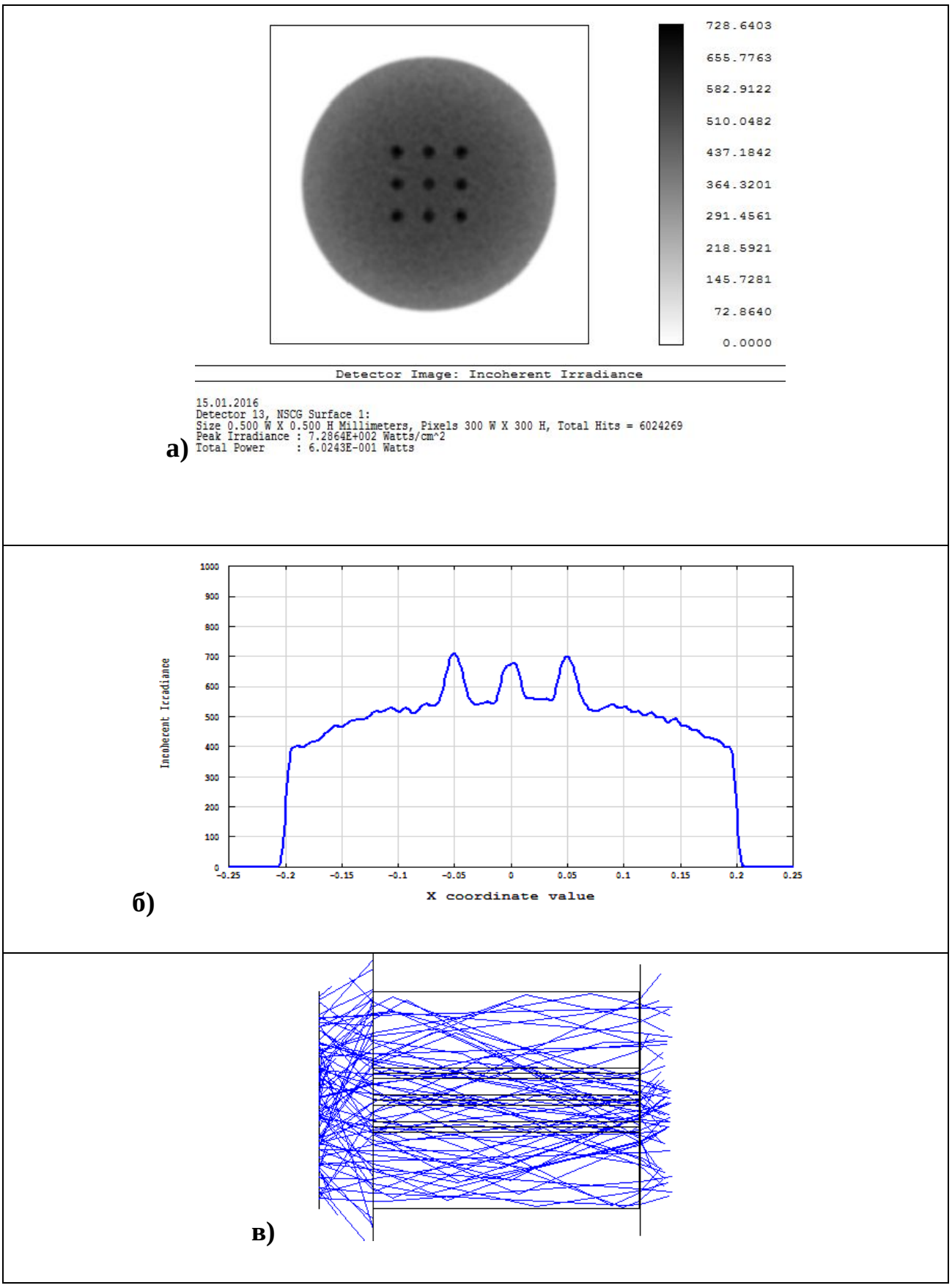



Рис.5.15. Результати моделювання структури для випадку l=0.5 мм, $n_м$=1.76, $n_{рк}$=1.92.

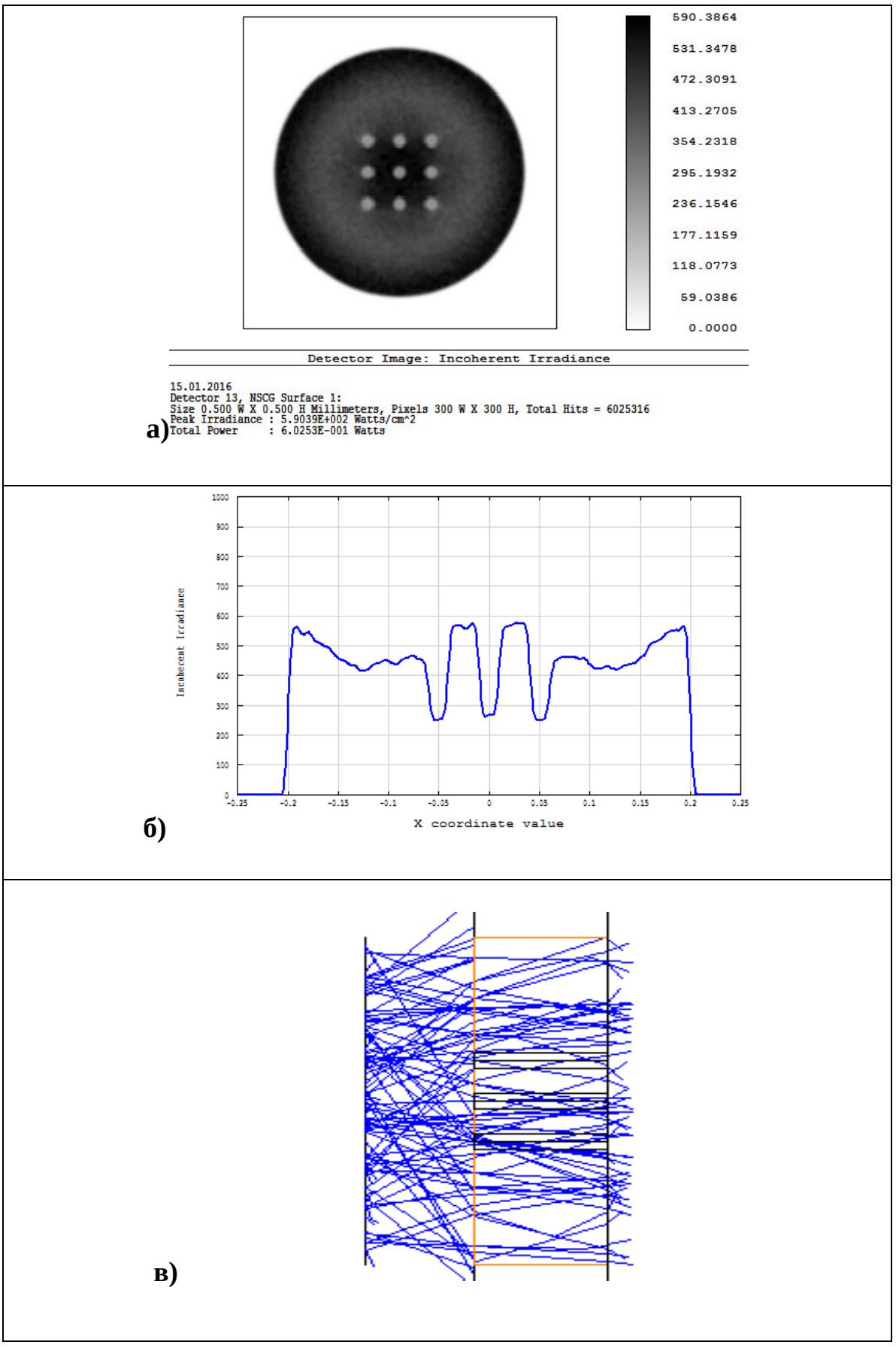



Рис.5.16. Результати моделювання структури для випадку l=0.125, $n_м$ =1.76, $n_{рк}$ =1.51

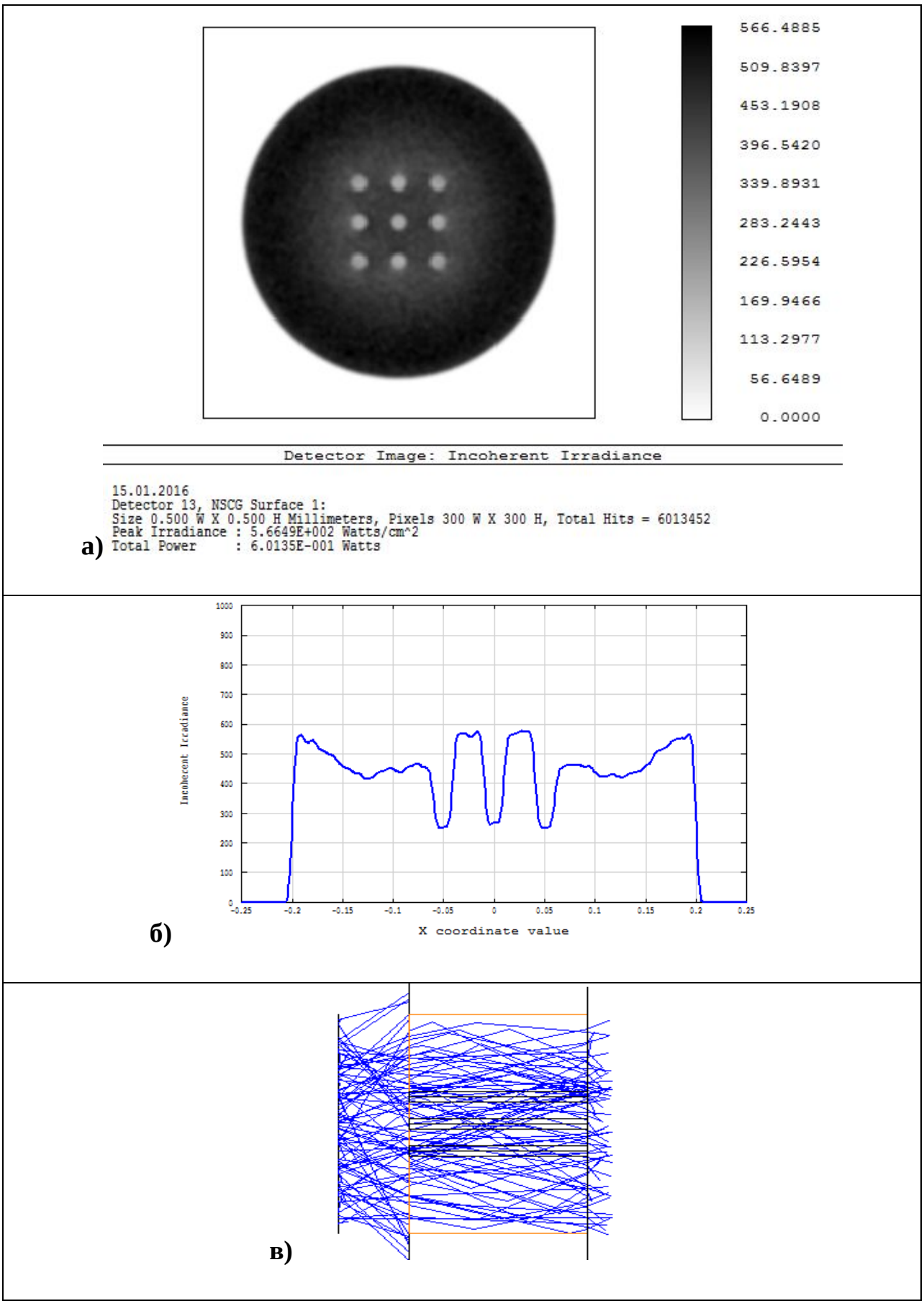



Рис.5.17. Результати моделювання структури для випадку l=0.25, $n_м$ =1.76, $n_{рк}$ =1.51

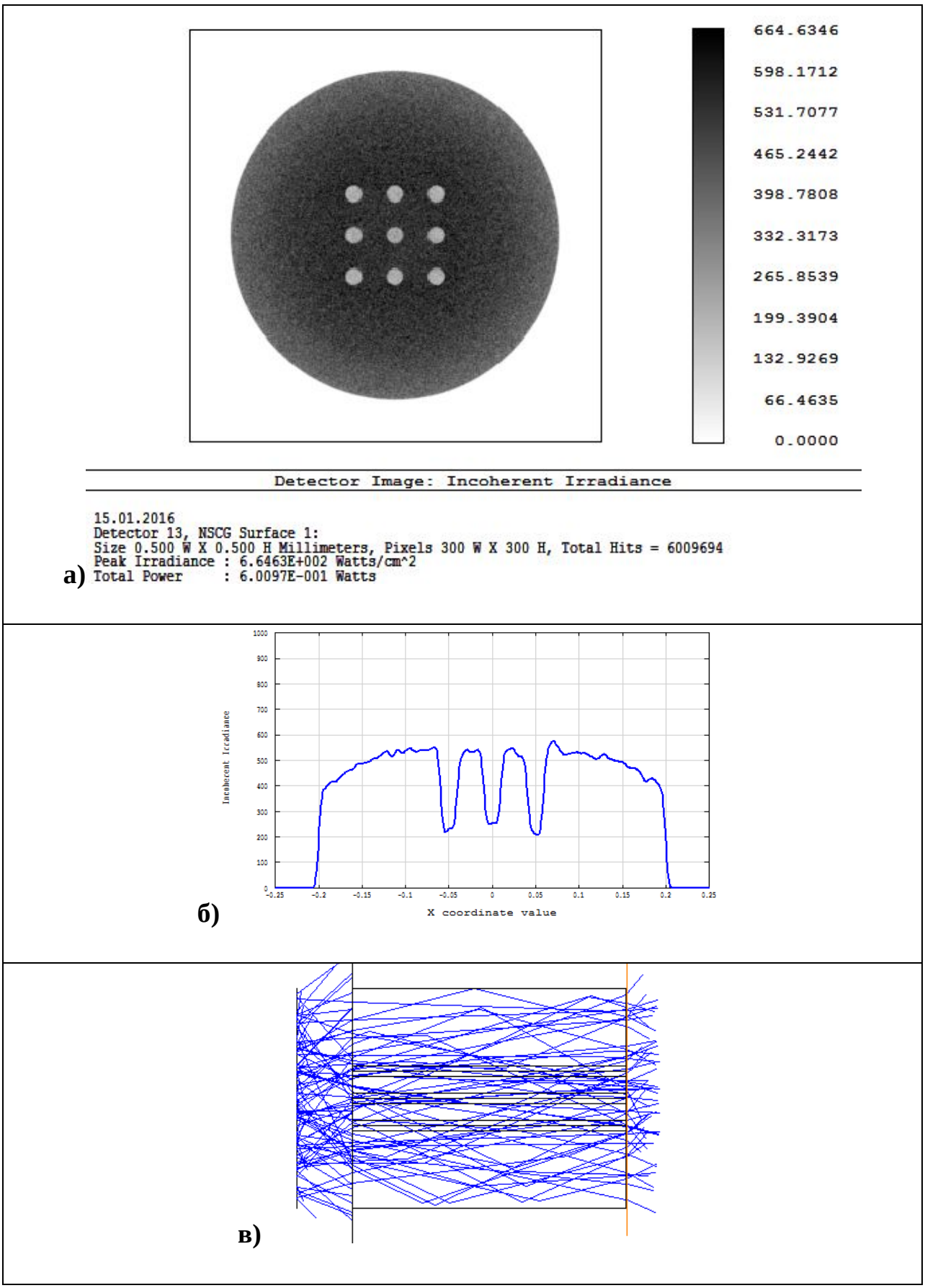



Рис.5.18 Результати моделювання структури для випадку l=0.5, $n_м$ =1.76, $n_{рк}$ =1.51

На рис. 5.16-5.18 зображено результати моделювання для випадку $n_{рк}<n_м$ для товщини структури відповідно 0,125; 0,25 та 0,5 мм. У цьому разі спостерігається протилежна картина. Для всіх товщин спостерігається видавлювання променів із капілярів з меншим показником заломлення в матрицю з більшим показником заломлення, причому зростання товщини структури тільки посилює цю тенденцію. На всіх розподілах яскраво виражені плями низької інтенсивності, розташування яких відповідає розташуванню пор. Можна також спостерігати зміну розподілу інтенсивності випромінювання безпосередньо в матриці. Так, у структурі завтовшки 0,125 мм спостерігаються зони підвищеної інтенсивності в центрі та на периферії матриці. Перша зона виникає внаслідок перерозподілу випромінювання між порами та центральною частиною матриці, а друга зумовлена явищем повного внутрішнього відбивання на межі матриця-повітря. При зростанні товщини шару спостерігається тенденція до вирівнювання інтенсивності випромінювання по всій площі матриці. Очевидно, такий результат показує, що запропоновані умови приводять до різкого зменшення коефіцієнта ефективності структури, причому зростання товщини лише посилює цю тенденцію. У таблиці 1 наведено чисельні значення інтенсивності випромінювання, яке пройшло крізь окремі елементи структури.

Отримані результати показали необхідність детальнішого дослідження внеску в сумарний розподіл випромінювання, яке проходить крізь структуру під відчутними кутами. На рис. 5.19-5.22. наведено результати моделювання для випадків $n_{рк}>n_м$ та $n_{рк}<n_м$ для кутів падіння променя $45^o$ та $60^o$ . На рис. 5.19, 5.21 показано результати моделювання для випадку $n_{рк}>n_м$ . Незважаючи на те, що відношення показників заломлення елементів структури вказує на її світловодні властивості, більшість випромінювання проходить повз пори, приводячи до різкого зниження $K_{е.}$ Зменшення кута падіння (відносно площини структури) та зростання її товщини лише погіршує ситуацію. На рис. 5.20, 5.22 наведено результати моделювання для випадку $n_{рк}<n_м$. Тут спостерігається подібна тенденція. Однак ефективна складової випромінювання

(яке пройшло крізь пори з РК) повністю відсутня, оскільки співвідношення показників заломлення приводить до повного виходу випромінювання з пор у матрицю.

*Таблиця 5.1.*

Розподіл інтенсивності випромінювання, яке пройшло крізь окремі ділянки модельованої структури

| Параметри структури | Відсоток випромінювання, що пройшло крізь структуру, (%) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | матриця | пори з РК | | |
| *l=0.5мм* $n_м$ *=1.76* $n_{рк}$ *=1.51* | 0,3569 | 0,0145 | 0,0135 | 0,0134 |
| | | 0,0127 | 0,0137 | 0,0131 |
| | | 0,0129 | 0,0134 | 0,0128 |
| *l=0.25мм* $n_м$ *=1.76* $n_{рк}$ *=1.51* | 0,3568 | 0,0177 | 0,0145 | 0,0146 |
| | | 0,0157 | 0,0144 | 0,0156 |
| | | 0,0157 | 0,0144 | 0,0159 |
| *l=0.125мм* $n_м$ *=1.76* $n_{рк}$ *=1.51* | 0,3571 | 0,0137 | 0,0176 | 0,0178 |
| | | 0,0155 | 0,0175 | 0,0153 |
| | | 0,0155 | 0,0179 | 0,0151 |

Отримані результати показали необхідність детальнішого дослідження внеску в сумарний розподіл випромінювання, яке проходить крізь структуру під відчутними кутами. На рис.5.19-5.22. наведено результати моделювання для випадків $n_{рк}>n_м$ та $n_{рк}<n_м$ для кутів падіння променя $45^o$ та $60^o$ . На рис.5.19, 5.21 показано результати моделювання для випадку $n_{рк}>n_м$ . Незважаючи на те, що відношення показників заломлення елементів структури вказує на її світловодні властивості, більшість випромінювання проходить повз пори, приводячи до різкого зниження $K_e$. Зменшення кута падіння (відносно площини структури) та зростання її товщини лише погіршує ситуацію. На рис.5.20,5 .22 наведено результати моделювання для випадку $n_{рк}<n_м$. Тут спостерігається подібна

тенденція. Однак ефективна складової випромінювання (яке пройшло крізь пори з РК) повністю відсутня, оскільки співвідношення показників заломлення приводить до повного виходу випромінювання з пор у матрицю.

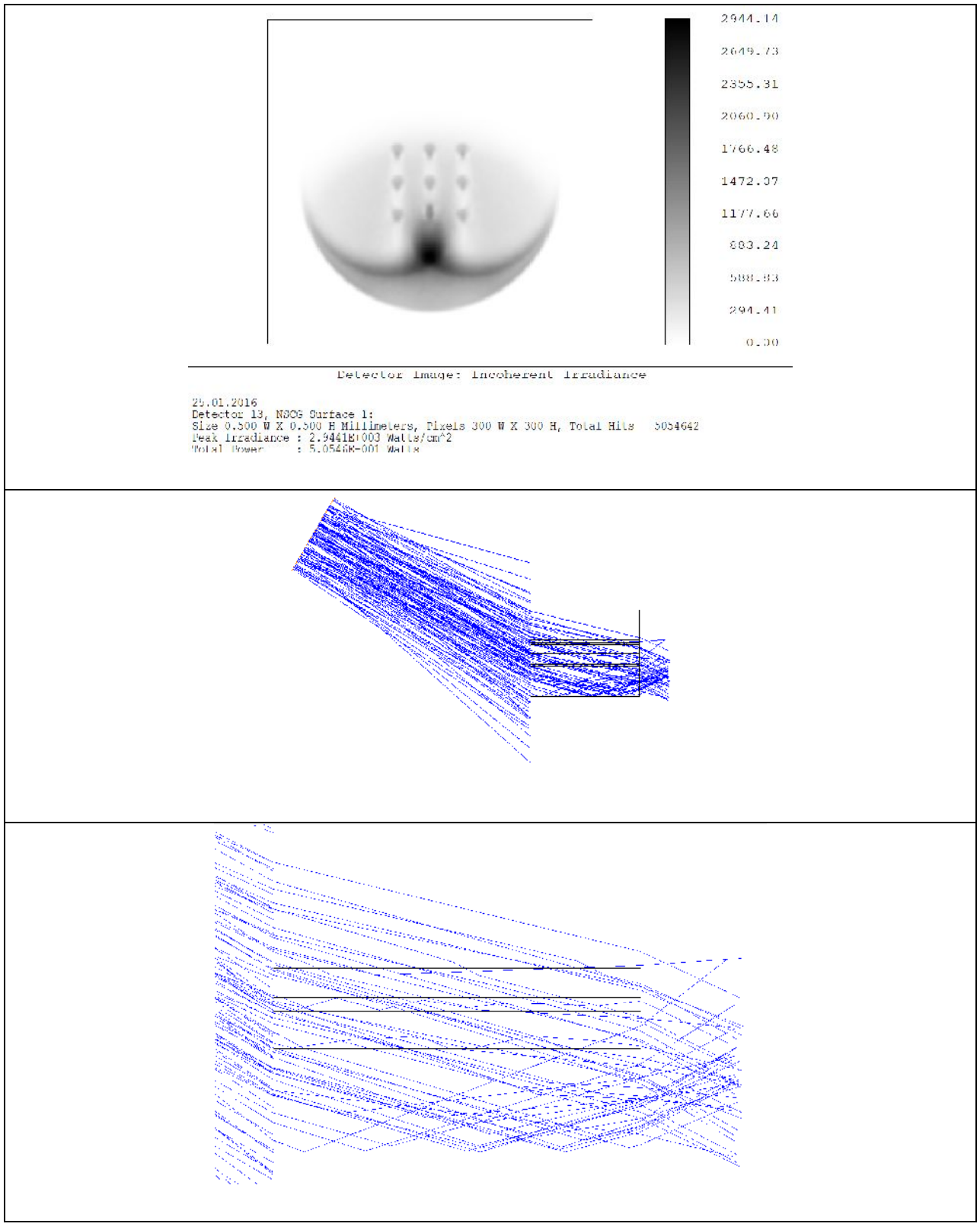



Рис.5.19 Результати моделювання структури для випадку кута падіння променя $60^{o}$, $n_{м}$=1.76, $n_{рк}$ =1.92

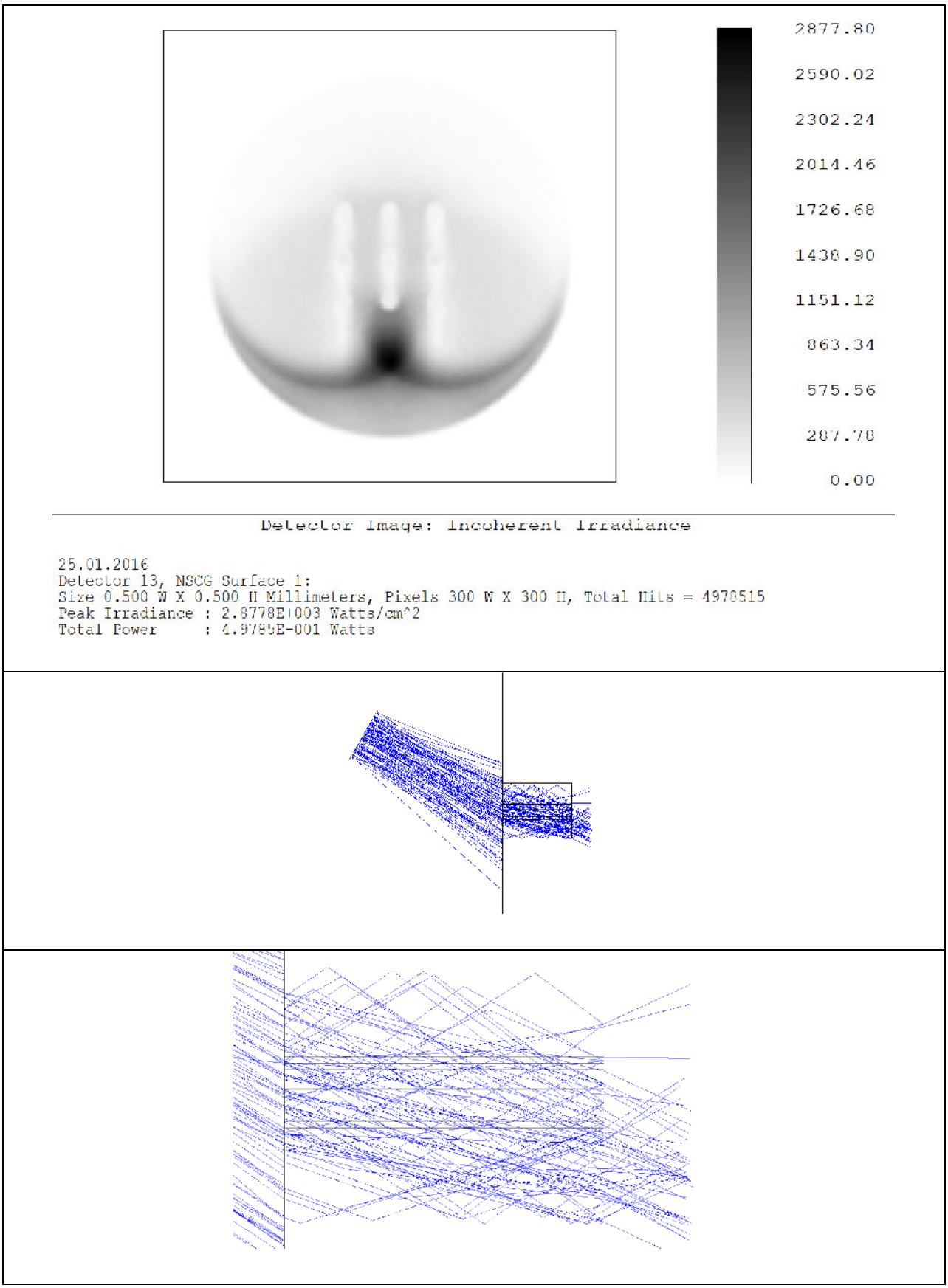



Рис.5.20. Результати моделювання структури для випадку кута падіння променя $60^{o}$, $n_{м}$ =1.76, $n_{рк}$ =1.51

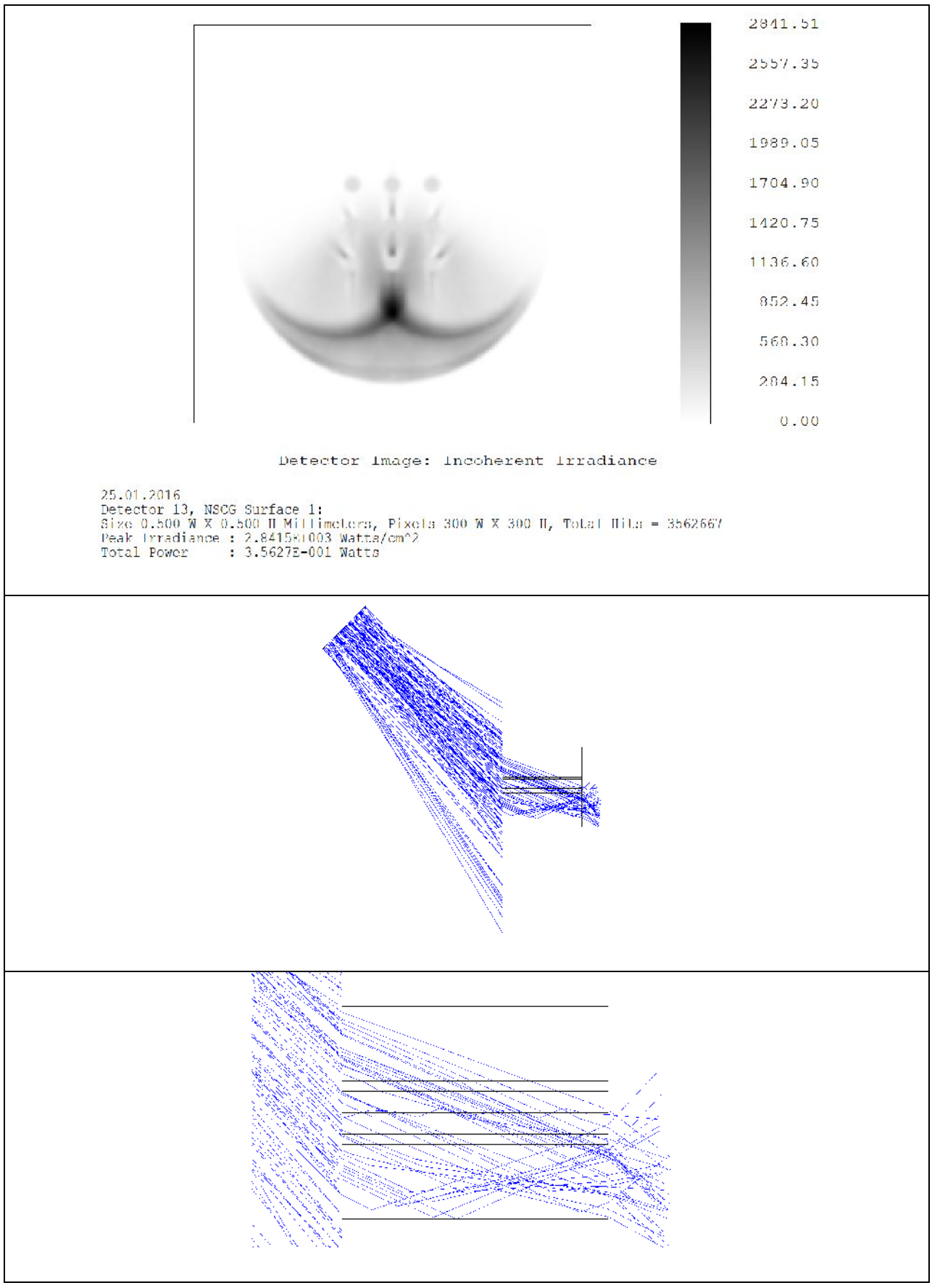



Рис.5.21. Результати моделювання структури для випадку кута падіння променя $45^{o}$, $n_{м}$ =1.76, $n_{рк}$ =1.92

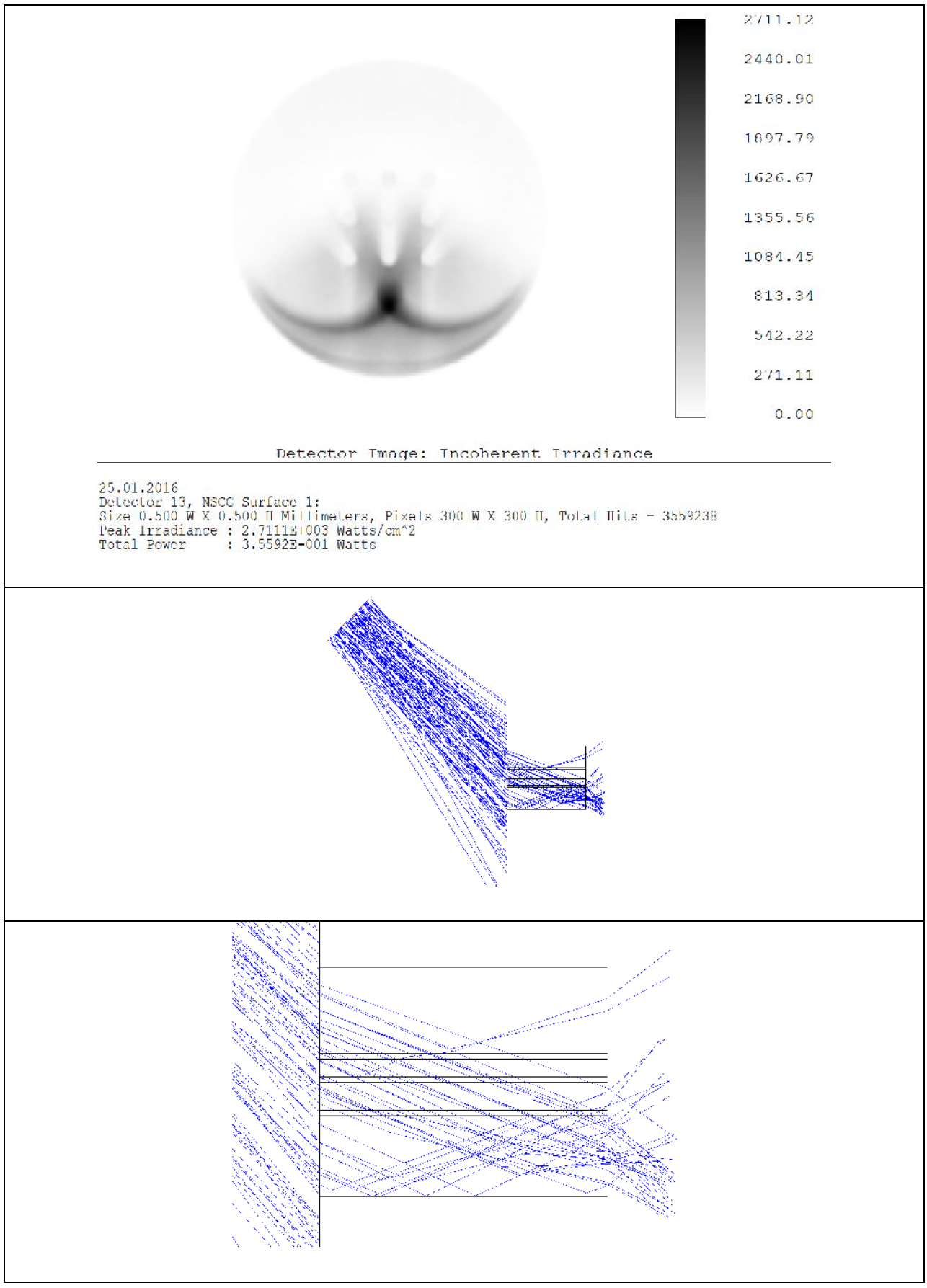



Рис.5.22. Результати моделювання структури для випадку кута падіння променя $45^{o}$, $n_{м}$ =1.76 $n_{рк}$ =1.51

Для всіх змодельованих випадків у матриці формується максимум високої інтенсивності, який на практиці приведе до різкого погіршення співвідношення сигнал/шум.

На рис.5.23 зображено спектр пропускання системи пористий $Al_2O_3$-холестеричний рідкий кристал.

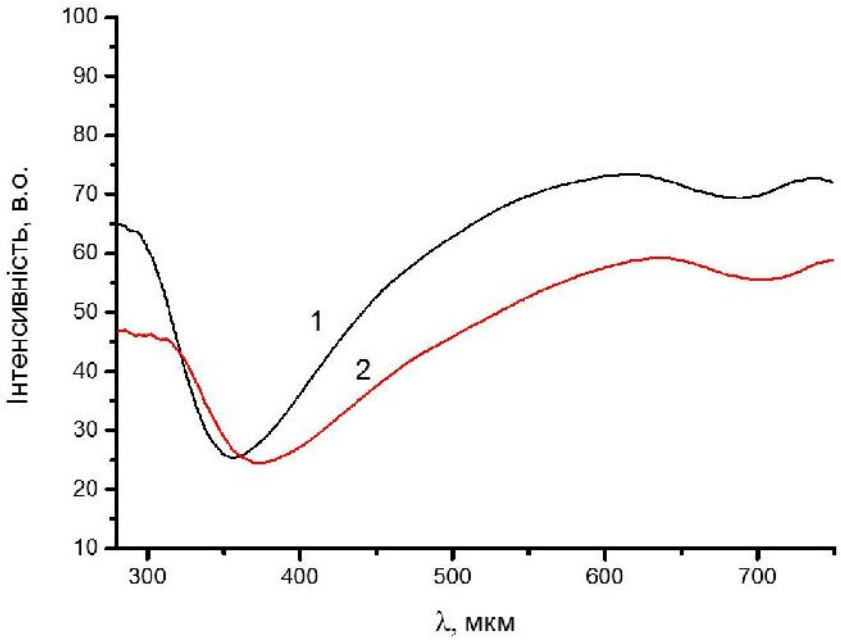



Рис.5.23.Спектр пропускання системи пористий $Al_2O_3$-холестеричний РК:
1– нормальне падіння променя; 2 – кут падіння променя $30^o$.

Процес моделювання та експериментальні дослідження оптичних властивостей систем структурована матриця-РК виявили ряд особливостей, урахування яких необхідне під час створення реальних первинних перетворювачів на їх основі.

Аналіз існуючих математичних моделей показав, що вони адекватно описують результати експериментальних досліджень для тонких зразків (d = 5P). У товстих зразках (d=21P) спостерігаються розбіжності між експериментальними та розрахунковими значеннями. Це можна пояснити тим, що математичні моделі не враховують поглинання випромінювання в шарі рідкокристалічного матеріалу. Необхідною умовою для отримання задовільного коефіцієнта відбиття, якщо товщина $d \le 10P$, є використання рідкокристалічних матеріалів із високим двозаломленням (0.3 ÷ 0.4).

Моделювання проходження променя крізь структуру матриця-РК показало, що наявність променів, які поширюються під значним кутом до поверхні структури приводить до різкого зниження коефіцієнта ефективності структури і, як наслідок, зменшення співвідношення сигнал/шум. Наявність променів, що поширюються під кутом до поверхні системи, приводить до збільшення ширини максимуму селективного відбивання і, як наслідок, зменшення чутливості структури до детектованої речовини. Оптимальним у подальшому є використання як опорного джерела випромінювання пристрою з мінімальним кутом розходження пучка.

Проведені дослідження показали, що, підбираючи в певний спосіб товщину рідкокристалічної комірки, коефіцієнт двозаломлення та крок спіралі, можна змінювати коефіцієнт відбиття, ширину смуги селективного відбивання, впливаючи тим самим на параметри первинного перетворювача.

**Висновки до розділу 5.**

1. Методом комп’ютерного моделювання проходження світла в системі світлодіод-активне середовище-фотодіод розроблено рекомендації щодо конструктивних особливостей перетворювача для оптичного сенсора.
2. Проведено розрахунок коефіцієнта відбиття та встановлено, що для забезпечення максимального селективного відбивання світла мінімальна товщина нанокомпозиту повинна становити 10Р при величині анізотропії показника заломлення холестеричного рідкого кристала 0,2.
3. Для забезпечення максимального значення сигнал/шум необхідно використовувати джерела випромінювання з кутом розходження променя меншим ніж $10^{o}$, оскільки наявність у структурі випромінювання, що поширюється під кутами понад $10^{o}$ від нормалі, має місце перерозподіл випромінювання між активними ділянками холестеричного рідкого кристала та пасивною матрицею, що значно зменшує співвідношення сигнал/шум..

4. У результаті дослідження встановлено, що, шляхом підбору в певний спосіб товщини рідкокристалічної комірки, коефіцієнту двозаломлення та кроку спіралі, можна змінювати коефіцієнт відбиття, ширину смуги селективного відбивання, впливаючи цим на параметри активного середовища.

# РОЗДІЛ 6. РОЗРОБЛЕННЯ НОВИХ ЗАВАДОСТІЙКИХ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПТИЧНИХ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ

## 6.1. Проблеми створення завадостійких сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорів

Основною проблемою сигнального перетворення оптоелектронних сенсорних пристроїв є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Так, інтенсивність випромінювання сторонніх джерел світла (сонця, ламп освітлення тощо) в сотні, навіть тисячі разів перевищує корисну складову зміни оптичного сигналу від активного середовища, спектральна характеристика якого несе інформацію про досліджувану хімічну чи біохімічну речовину.

Типове вирішення вказаної проблеми за допомогою «затемнення» сторонніх джерел світла суперечить вимозі до «відкритості» активного середовища, яка передбачає ефективну взаємодію цього середовища з оточенням. Малоефективним є вирішення проблеми на оптичних фільтрах. По-перше, ефективність спектральної селекції оптичних фільтрів невисока, а по-друге, використання таких фільтрів обмежує інформативність корисного сигналу.

Паразитний вплив електромагнітних завад обумовлений насамперед випромінюванням силової електромережі частотою 50 Гц. Інтенсивність такого випромінювання значна, а екранування оптоелектронної пари сенсорного пристрою суперечить вимозі щодо її «відкритості». Електромагнітна завада найбільше проявляється у високоомних колах, якими і є вхідні кола сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорних пристроїв – для забезпечення чутливості вхідний опір останніх звичайно становить десятки мегаом.

Тому необхідно проводити модифікування сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорних пристроїв у напрямку підвищення завадостійкості, а відтак, покращення їхніх експлуатаційних характеристик.

Розглянемо узагальнену блок-схему оптоелектронного сенсорного пристрою (рис. 6.1). Інформативний сигнал сенсорного пристрою формується

модуляцією спектральної характеристики активного середовища AM (Active Medium), що взаємодіє з досліджуваною речовиною. Спектральна характеристика вимірюється оптопарою, яка складається з керованого, здебільшого імпульсного джерела світлового випромінювання LE (Light Emitter) та фоточутливого елемента PE (Photo Element). Залежно від параметрів пристрою, джерелом світла можуть бути світлодіод, група світлодіодів зі зміщеними спектральними характеристиками, лазери, фотолюмінесцентні випромінювачі тощо, а фоточутливими елементами – фотодіоди, фототранзистори, фоторезистори тощо.

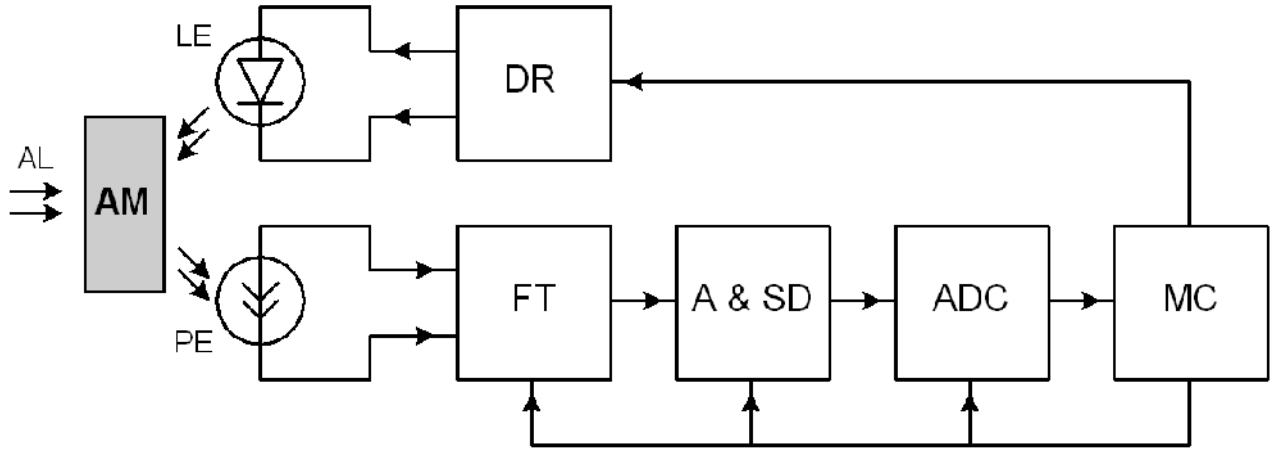



Рис. 6.1. Узагальнена блок-схема оптоелектронного сенсорного пристрою

Крім інформативного сигналу LE ⇒ PE, на вході фоточутливого елемента присутній паразитний потік світла AL (Ambient Light) від сторонніх об’єктів, зокрема Сонця чи джерел освітлення. Під час подальшого сигнального перетворення вплив цього паразитного потоку світла повинен бути мінімізованим.

Режим роботи джерела світлового випромінювання LE задає драйвер DR (Driver), який, зокрема, стабілізує струм живлення та випромінювальну характеристику цього джерела. Струм фоточутливого елемента PE селективно перетворюється на напругу вхідним перетворювачем FT (Front Transducer), далі він підсилюється, синхронно детектується A&SD (Amplifier and Synchro-Detector) та перетворюється на цифровий код ADC (Analog to Digit Converter).

Процесом вимірювання керує мікроконтролер MC (Microcontroller).

Вузли розглянутої узагальненої блок-схеми є традиційними для більшості сенсорних пристроїв, а процес їх розроблення не вимагає спеціальних досліджень та нових рішень. Тому надалі ці вузли розглядаються лише в загальному вигляді у ході висвітлення експериментальних досліджень створеного сигнального перетворювача оптоелектронних сенсорних пристроїв.

Натомість, як зазначалося вище, основна увага приділена задачам підвищення завадостійкості опотоелектронного сенсора, що забезпечується оригінальними рішеннями та відповідно оптимізованими режимами роботи вхідного перетворювача FT. Основою цього перетворювача є конвертер імпедансу з використанням принципу функціонування гіратора.

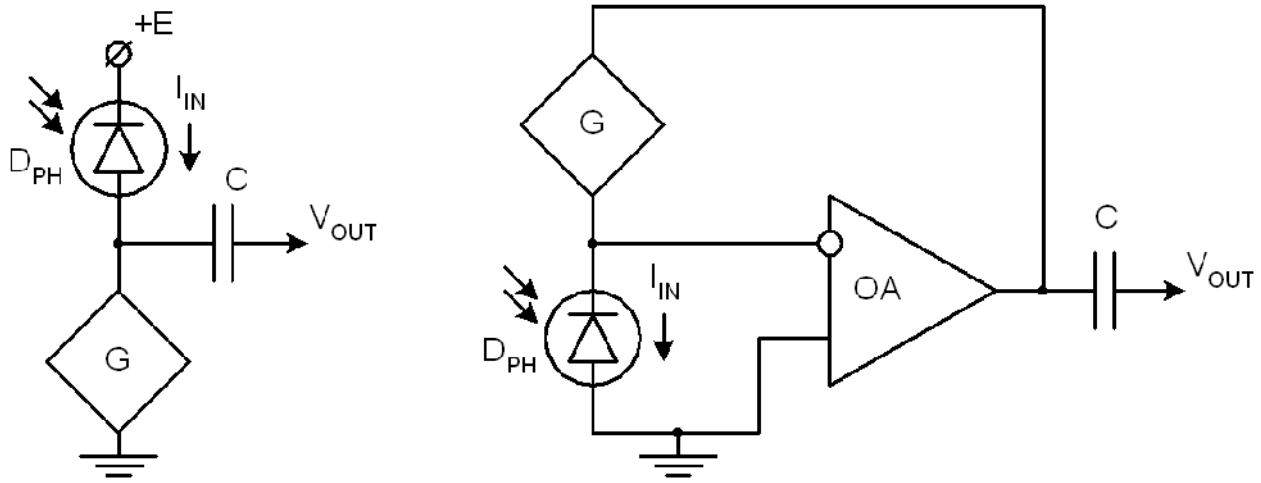
У сигнальному перетворювачі опотоелектронного сенсора конвертер імпедансу реалізує реактивне навантаження фоточутливого елемента, здебільшого фотодіода чи фототранзистора. Елементарна схема такого навантаження наведена на рис. 6.2, а. На відміну від резистивного навантаження конвертер імпедансу G забезпечує частотну селекцію сигналу – фотоструму $I_{IN}$, зокрема фотодіода $D_{PH}$, придушуючи паразитний вплив сторонніх джерел світла та електромагнітних завад.

Принципово важливими є такі фактори:

- по-перше, реалізація частотної селекції відбувається відразу в сигнальному колі фоточутливого елемента, формуючи високий імпеданс на частоті корисної складової фотоструму та низький імпеданс на частотах паразитних складових, що забезпечує максимально високе відношення сигнал-завада;
- по-друге, схема конвертера не потребує індуктивних елементів, що відповідає вимогам до інтегральної мікроелектроніки;
- по-третє, крутизна функції частотної селекції, тобто, амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) перетворення фотострум – напруга, може бути значно вищою порівняно з індуктивним навантаженням і оптимізованою відповідно до параметрів сигнального перетворення.

Схема фотоприймача з використанням конвертера імпедансу в колі

від’ємного зворотного зв’язку операційного підсилювача ОА наведена на рис. 6.2, б. Перевагою такої схеми є стабілізація напруги на фотодіоді, а недоліком – вужча смуга робочих частот внаслідок обмеження АЧХ ОА.




а) б)

Рис. 6.2. Вхідні кола фотоприймачів на основі конвертерів імпедансу

У відповідності до задач дисертаційної роботи в даному розділі висвітлені питання [215]:

- подальшого розвитку принципів функціонування та методів аналізу конвертерів імпедансу з від’ємним струмовим зворотним зв’язком та резистивним додатним зворотним зв’язком;
- структурно-параметричного модифікування конвертерів імпедансу для підвищення коефіцієнта підсилення, крутизни АЧХ та стабілізації корисної складової сигналу фоточутливого елемента;
- реалізації та експериментальних досліджень сигнального перетворювача для оптоелектронних сенсорних пристроїв.

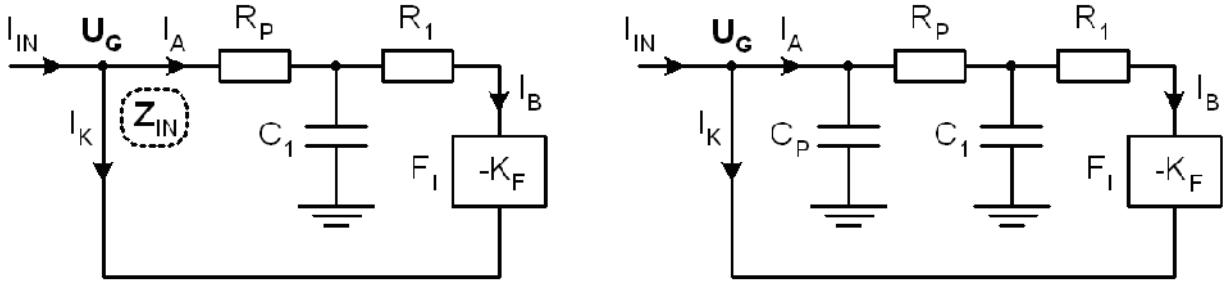
## 6.2. Конвертери імпедансу з від’ємним струмовим зворотним зв’язком

Елементарна схема конвертера імпедансу зі струмовим зворотним зв’язком наведена на рис. 6.3, а. Активним компонентом цієї схеми є інвертуючий струмовий конвеєр $F_I$ з від’ємним коефіцієнтом передачі струму – $K_F$ [216].

Функціонування конвертера описується системою рівнянь взаємних залежностей векторів (комплексних амплітуд) напруг $\dot{U}$, струмів $\dot{I}$ та комплексних імпедансів $\dot{Z}$:

$$\begin{cases} \dot{U}_G = (\dot{I}_A + \dot{I}_K)\dot{Z}_{IN} & (1) \\ \dot{I}_K = K_F \dot{I}_B & (2) \\ \dot{I}_A = \dot{I}_{RP} = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_B & (3) \\ \dot{I}_{C1} Z_{C1} = \dot{I}_B R_1 & (4) \end{cases}, \qquad (6.1)$$

де $\dot{Z}_{IN}$ – вхідний комплексний імпеданс конвертера; $\dot{Z}_{C1} = 1/j\omega C_1$ – імпеданс конденсатора $C_1$; $\dot{I}_{IN}$, $\dot{I}_B$ - відповідно, вхідний та вихідний струм струмового конвеєра $F_I$ з коефіцієнтом передачі – $K_F$; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота;
f – частота.




а) б)

Рис. 6.3. Функціональні схеми конвертерів імпедансу першого порядку з від’ємним струмовим зворотним зв’язком

Для аналітичного розрахунку вхідного імпедансу $\dot{Z}_{IN}$ в граничних умовах приймемо наближення, при яких фазовий зсув напруг та струмів у вузлах схеми прямує до нуля. Тоді, замінивши в першому наближенні вектори струмів, напруг та комплексних опорів на їхні модульні значення $\dot{U} \Rightarrow U$, $\dot{I} \Rightarrow I$, $\dot{Z} \Rightarrow Z$, знайдемо розв’язок системи (6.1).

Для цього, визначивши вхідну напругу як

$$U_G = I_A (R_P + R_1 \| Z_{C1}), \text{ де } R_1 \| Z_{C1} = \frac{R_1 Z_{C1}}{R_1 + Z_{C1}},$$

знаходимо вхідний струм конвеєра $I_B = I_A \frac{R_1 \| Z_{C1}}{R_1}$ (позначення || відповідає еквівалентному опору паралельно з'єднаних $R_1$ та $Z_{C1}$).

Тоді вхідний імпеданс конвертера без врахування фазового зсуву розраховується за формулою

$$Z_{IN} = \frac{R_P + \frac{R_1 Z_{C1}}{R_1 + Z_{C1}}}{1 + K_F \frac{Z_{C1}}{R_1 + Z_{C1}}},$$

яка після відповідного зведення встановлює залежність

$$Z_{IN} = \frac{R_P + R_1 + \omega R_P R_1 C_1}{K_F + 1 + \omega R_1 C_1} \qquad (6.2)$$

Ця формула дає змогу визначити певні закономірності сигналів, зокрема, граничні значення вхідного імпедансу на низьких $\omega \to 0$ та високих $\omega \to \infty$ частотах. Так, при $\omega \to 0$ $Z_{IN} \to \frac{R_P + R_1}{K_F + 1}$, а при $\omega \to \infty$ $Z_{IN} \to R_P$.

Приклад розрахунку частотної характеристики конвертера імпедансу з використанням формули (6.2) наведено на рис. 6.4. Розглянуто чотири варіанти параметрів елементів схеми: (A) - $C_1$ = 100 n, $K_F$ = 10; (B) - $C_1$ = 100 n, $K_F$ = 100; (C) - $C_1$ = 100 n, $K_F$ = 1000; (D) - $C_1$ = 10 n, $K_F$ = 1000. Для всіх варіантів опори резисторів $R_1$ та $R_P$ є сталими: $R_1$ = 10 k, $R_P$ = 100 k. Тут і далі в наведених схемах використовуються умовні позначення порядків у відповідності до SPICE стандарту, зокрема: p ≡ $10^{-12}$ (піко-), n ≡ $10^{-9}$ (нано-), u ≡ $10^{-6}$ (мікро-), m ≡ $10^{-3}$ (мілі-), k ≡ $10^3$ (кіло-), M або MEG ≡ $10^6$ (мега-).

Наведено частотну залежність імпедансу $Z_{IN}$ (Ом) та коефіцієнта перетворення «напруга-струм» в дБ, $K_I = 20\mathrm{Log}\frac{V_G}{I_{IN}} = 20\mathrm{Log}Z_{IN}$. Фактично, ці два параметри відображають одну характеристику, адже коефіцієнт перетворення «напруга-струм» і є імпедансом конвертера. Проте використання обох параметрів дає більшу наочність - імпеданс $Z_{IN}$ характеризує ефективність конвертера, а коефіцієнт перетворення $K_I$ – ефективність сигнального перетворювача

оптоелектронного пристрою (фотострум $I_{IN}$ – напруга $V_G$ інформативного сигналу).

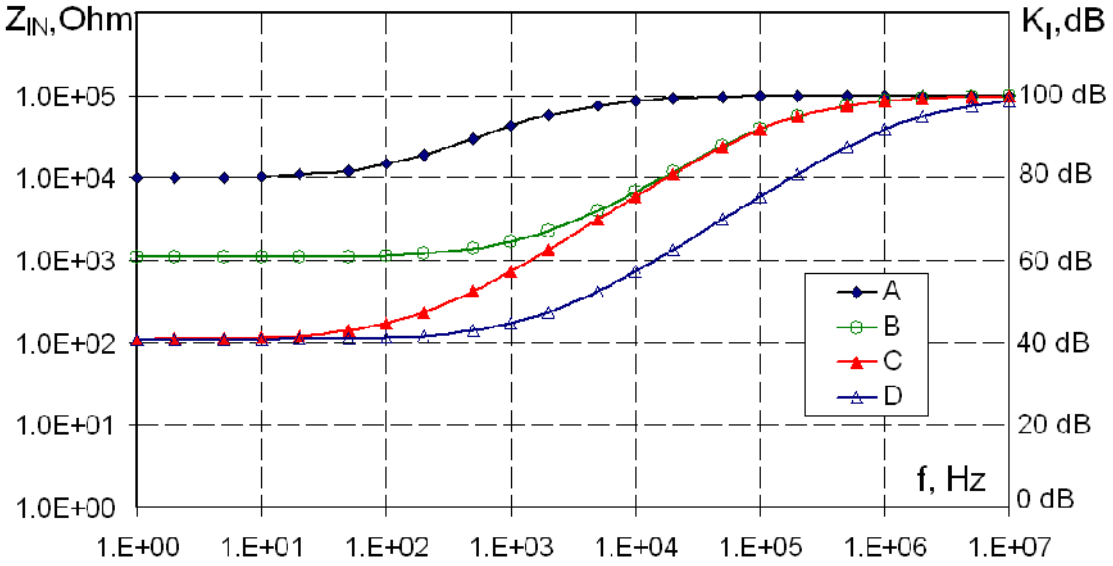



Рис. 6.4. Частотна залежність імпедансу $Z_{IN}$ та коефіцієнта перетворення $K_I$ конвертера зі струмовим зворотним зв'язком (наближений розрахунок)

Видно, що імпеданс $Z_{IN}$ конвертера зростає зі збільшенням частоти f. Так, у варіанті «С» імпеданс зростає на три порядки – з $Z_{IN}(f\to 0) = 100$ Ом до $Z_{IN}(f\to\infty) = 100$ kОм. Величина зростання здебільшого визначається коефіцієнтом передачі струму $K_F$ струмового конвеєра $F_I$. Натомість, частота переходу з низькоімпедансного стану до високоімпедансного визначається постійною $R_P R_1 C_1$ кола. В області найбільшої крутизни функції зі збільшенням частоти на порядок має місце зростання опору на порядок чи коефіцієнта перетворення на 20 дБ.

Отже, існує необхідна для вирішення поставленої задачі інверсія імпедансу – на противагу до конденсатора (в цій схемі – $C_1$), у якому імпеданс спадає зі зростанням частоти, імпеданс $Z_{IN}$ конвертера зростає. Це, своєю чергою, забезпечує індуктивний характер імпедансу кола навантаження фоточутливого сенсора, а відтак, заглушення зумовленої стороннім світлом постійної (паразитної) складової фотоструму.

Наведені результати розрахунку дають лише наближені значення, адже, як це вже вище було відзначено, формула (6.2) не враховує фазовий зсув векторів

напруг і струмів в $R_P R_1 C_1$ колі. Тому, для більш точного аналізу, використаємо методи схемного SPICE моделювання. Наведені далі результати SPICE моделювання проведені в MicroCAP, який є одним з найпоширеніших програмних пакетів і підтримує роботу не лише зі стандартизованими SPICE моделями, але також зі спеціалізованими функціональними моделями, бібліотеками (Analogand Digit Library) та макросами (Macros). Зокрема, ефективними з погляду поставлених у роботі задач є моделі керованих джерел напруги та струму.

Синтезована у відповідності до рис. 6.3,а SPICE схема заміщення конвертера наведена на рис. 6.5. Кероване джерело струму, джерело гармонічної напруги Vin (у цьому разі корисної складової сигналу) та постійної напруги Vdc (у цьому разі паразитної складової) заміщає вихідне коло фоточутливого сенсора. Кероване джерело Fi заміщає струмовий конвеєр. Керуюче коло джерела Gin є потенціальним (напруговим), а джерела Fi – струмовим. Відтак, Gin є джерелом типу Linear Dependentsource IofV (рис. 6.6), а Fi – типу Linear Dependentsource IofI (рис. 6.7). У всіх наведених далі варіантах схем коефіцієнт перетворення «напруга-струм» джерела Gin є одиничним: K(Gin) = 1.

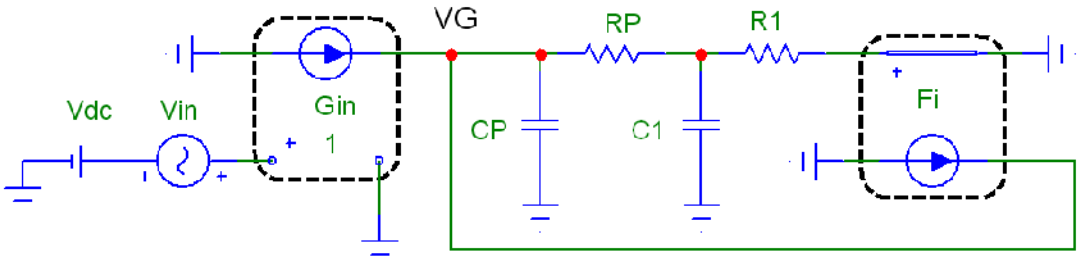



Рис. 6.5. SPICE схема заміщення конвертера імпедансу першого порядку зі струмовим зворотним зв’язком

Приклади результатів модельних SPICE досліджень амплітудно-частотної (АЧХ) $K_I$, dB та фазо-частотної (ФЧХ) Ph, deg (°) характеристик конвертера імпедансу наведені на рис. 6.6 та рис. 6.7. Для обох результатів досліджень незмінними є значення опорів $R_1$ = 10 k, $R_P$ = 100 k.

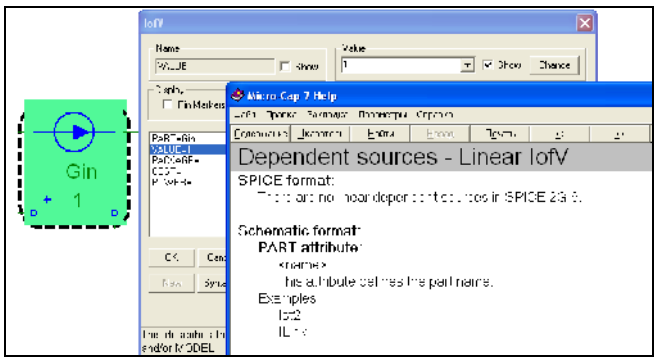



Рис. 6.6. Специфікація керованого джерела струму типу IofV

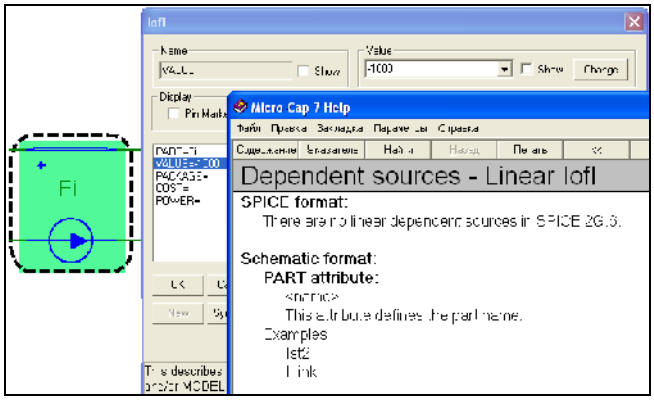



Рис. 6.7. Специфікація керованого джерела струму типу IofI

У першому дослідженні (рис. 6.8) проводилася дискретна зміна коефіцієнта передачі струму $K_F$ струмового конвеєра $F_I$ ($K_F$ = -1 (1), -10 (2), -100 (3), -1000 (4)), а ємність конденсатора $C_1$ залишалася сталою $C_1$ = 100n. У другому дослідженні (рис. 6.9) змінювалося значення ємності $C_1$ конденсатора ($C_1$ = 1 u (1), 100 n (2), 10 n (3)), а коефіцієнт $K_F$ залишався сталим $K_F$ = -1000.

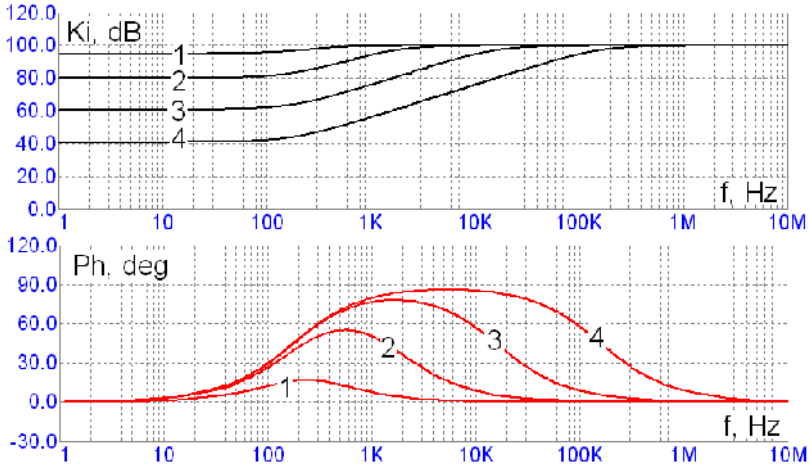



Рис. 6.8. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:

$K_F$ = -1 (1), -10 (2), -100 (3), -1000 (4)

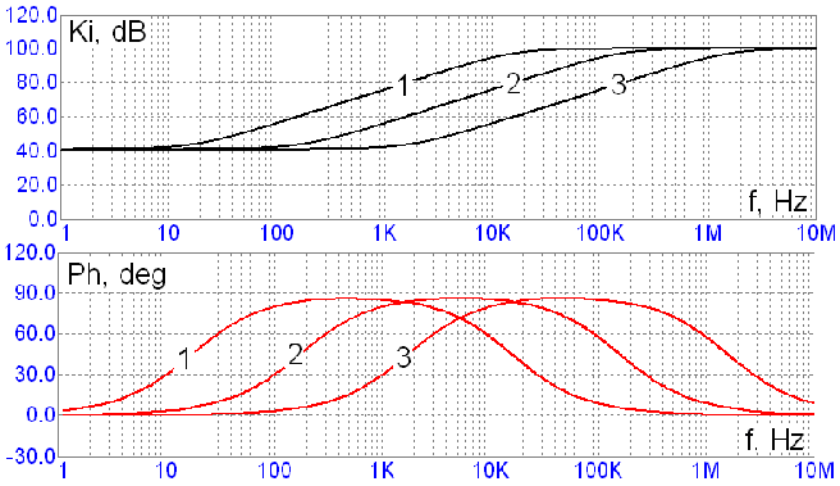



Рис. 6.9. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:

$C_1$ = 1 u (1), 100 n (2), 10 n (3)

Видно характерну залежність фазової затримки Ph від коефіцієнта від'ємного зворотного зв'язку за струмом $K_F$. Зокрема, збільшення коефіцієнта $K_F$ відповідає зменшенню імпедансу $Z_{IN}$ на низьких частотах та збільшенню фазової затримки на частотах переходу між низькоімпедансним та високоімпедансним станами [217].

Важливими є такі результати:

- фазова затримка між напругою та струмом є додатною, що відповідає індуктивному характеру імпедансу конвертера;
- максимальне значення фазової затримки, яке досягається при $|K_F \rightarrow| \infty$, становить 90°;
- зі зменшенням коефіцієнта $K_F$ максимальне значення фазової затримки спадає і, зокрема при $K_F$ =-10, становить приблизно 55°;
- зміна ємності конденсатора $C_1$ призводить зо зсуву АЧХ та ФЧХ, не змінюючи при цьому граничних значень імпедансу $Z_{IN}$, коефіцієнта перетворення $K_I$ та фазового зсуву Ph;
- АЧХ та ФЧХ конвертерів на моделях ідеалізованих джерел струму Gin, Fi не залежать від постійного рівня сигналу (такі дослідження проводять із використанням джерела Vdc; для зменшення кількості графічних ілюстрацій результати відповідних модельних досліджень опущені).

Отже, отримані результати SPICE досліджень підтверджують коректне функціонування схеми конвертера імпедансу та достатню точність наближеного аналітичного розрахунку.

Детальніший аналіз точності наближеного аналітичного розрахунку буде наведено під час дослідження розглянутої далі значно складнішої схеми конвертера другого порядку з резистивним додатним зворотним зв’язком. Крім того, в подальших підрозділах будуть розглянуті проблеми залежностей АЧХ та ФЧХ від постійного рівня сигналу в схемах на транзисторних каскадах, параметри яких не відповідають критеріям вищезгаданих ідеалізованих джерел струму.

Натомість, на цьому етапі досліджень доцільно розглянути можливість побудови безіндуктивних частотно-селективних кіл, у яких реалізується резонансний характер поведінки схеми сигнального перетворювача. Така можливість дає змогу мінімізувати паразитний вплив на корисний сигнал фоточутливого елемента не лише низькочастотних коливань («засліплення» стороннім освітленням), але й високочастотних шумів, зокрема електромагнітної завади. Це має неабияке значення, враховуючи той факт, що вхідне коло фоточутливого елемента є високоомним (здебільшого фотострум не перевищує одиниць мікроампера), а отже, вплив електромагнітних завад значний.

Для реалізації частотно-селективної схеми, яка володіє характеристиками резонансного LC контура, паралельно до конвертера імпедансу під’єднують конденсатор $C_P$ (рис. 6.3, б). Важливо те, що таке рішення резонансного контуру не потребує індуктивних елементів, які, як це вже відзначалося, є проблемними з погляду паразитної чутливості до зовнішніх електромагнітних полів (особливо низькочастотних полів силових мереж живлення) і, значною мірою, несумісні з інтегральною електронікою.

Добротність резонансного кола визначається відповідними параметрами конвертера. Умовою резонансного характеру частотно-селективного кола є

рівність імпедансів конвертера $Z_{IN}$ та шунтувального конденсатора $Z_{CP}$ на частотах $\omega_r$, на яких спостерігається зростання імпедансу $Z_{IN}$:

$$\frac{1}{\omega_r C_P} = \frac{R_P + R_1 + \omega_r R_P R_1 C_1}{K_F + 1 + \omega_r R_1 C_1}.$$

Приклади наближеного розрахунку частотних залежностей імпедансів $Z_{IN}$ конвертера та шунтувального конденсатора $C_P$ наведено на рис. 6.10. Були задані вхідні дані розрахунку: $C_1$ = 1 u, $R_1$ = 10 k, $R_P$ = 100 k, $K_F$ = -1000, $C_P$ = 10 p ($Z_{CP1}$), $C_P$ = 10 n ($Z_{CP2}$), $C_P$ = 10 u ($Z_{CP3}$). Показано, що для цих вхідних даних оптимальним значенням ємності шунтувального конденсатора $C_P$ є $C_P$ = 10 n ($Z_{CP2}$), а значення $C_P$ = 10 p ($Z_{CP1}$) та $C_P$ = 10 u ($Z_{CP3}$) є гранично можливими.

Більш конкретизовані результати АЧХ та ФЧХ розглянутого кола частотної селекції, отримані SPICE моделюванням, наведені на рис. 6.11. Видно характерну закономірність - добротність (крутизна підйому АЧХ) кола є максимальною на оптимальній резонансній частоті $\omega_r$, при якій коефіцієнт перетворення $K_I$ дорівнює середньому значенню $K_I(\omega \to 0)$ та $K_I(\omega \to \infty)$. Характерним є також різке спадання фазової затримки Ph на резонансній частоті. У наведеному прикладі оптимальна частота реалізується значенням ємності шунтувального конденсатора $C_P \approx 100$ n.

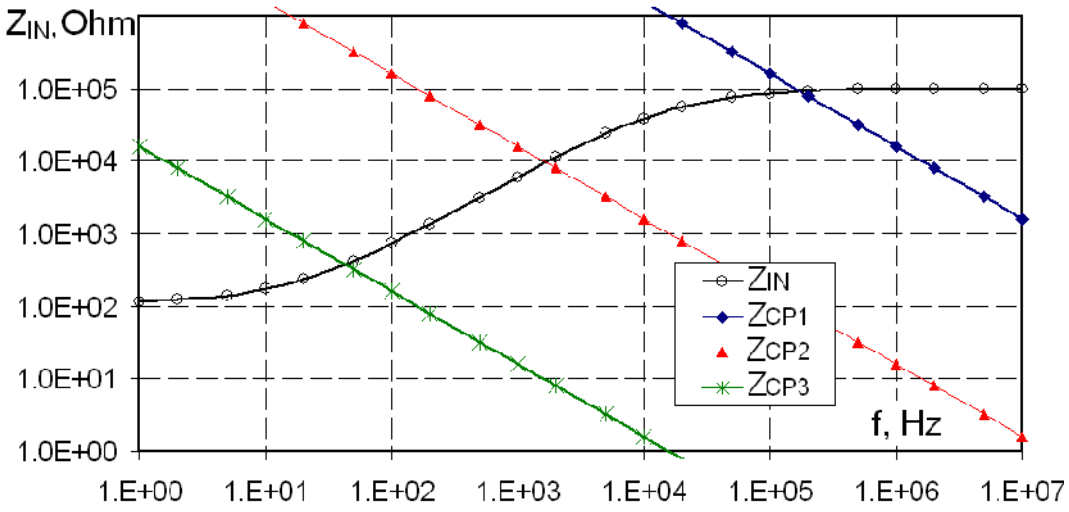



Рис. 6.10. Частотні залежності імпедансів $Z_{IN}$ конвертера та конденсатора $C_P$ : $C_P$ = 10 p ($Z_{CP1}$), $C_P$ = 10 n ($Z_{CP2}$), $C_P$ = 10 u ($Z_{CP3}$).

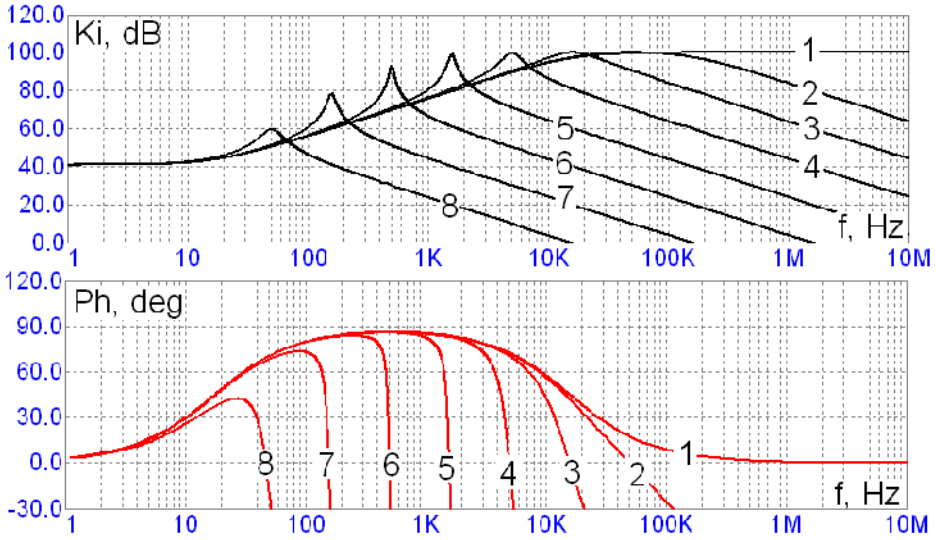
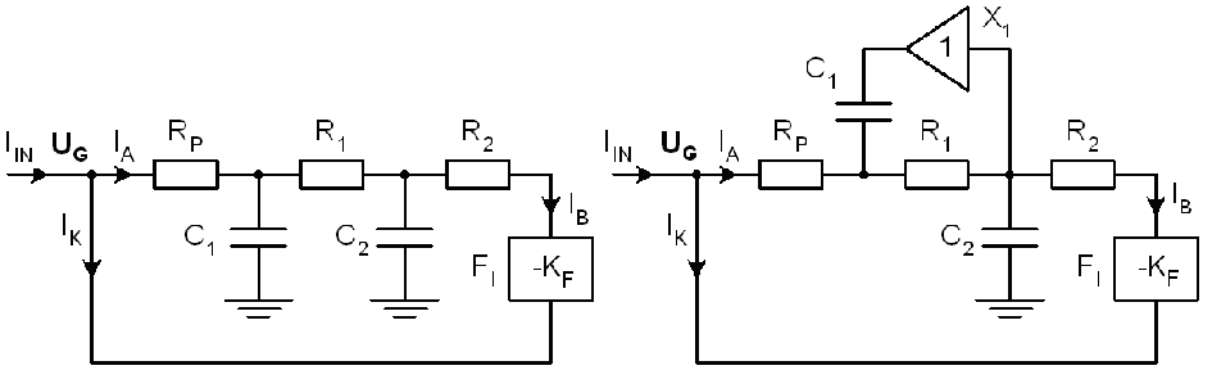



Рис. 6.11. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) схеми частотної селекції при:
$C_P$ = 0 (1), 10 p (2), 100 p (3), 1 n (4), 10 n (5), 100 n (6), 1 u (7), 10 u (8)

Розглянемо можливість побудови та ефективність функціонування конвертера імпедансу на фільтрах другого чи вищого порядків. Відомо, що найбільшу крутизну переходу від смуги пропускання до смуги придушення мають фільтри Чебишева, найменшу нерівномірність у смузі пропускання – фільтри Батерворта, найбільш постійну часову затримку – фільтри Бесселя. Особливістю використання таких фільтрів у конвертерах імпедансу є інверсія смуги пропускання – фільтри високих частот інвертуються в конвертери нижніх частот і навпаки. Крім того, як буде показано далі, інверсія смуги пропускання відкриває нові можливості щодо більш ефективного відділення корисних сигналів від паразитних завад.

Елементарний варіант схеми конвертера імпедансу, що використовує пасивний фільтр низьких частот другого порядку та реалізований на двох ланках - $R_1C_1$ та $R_2C_2$- наведено на рис. 6.12, а. Відповідно до розглянутого вище принципу функціонування конвертера імпедансу такий фільтр низьких частот перетворюється на схему заглушення низьких частот. Як відомо, недоліком пасивних фільтрів є обмежена ефективність селекції, причиною якої є шунтувальний вплив другої $R_2C_2$ ланки на першу $R_1C_1$ ланку.

Більша ефективність досягається використанням активних фільтрів, зокрема фільтра Саллена-Кея. Схема конвертера імпедансу на такому активному фільтрі наведена на рис. 6.12, б.




а) б)

Рис. 6.12. Функціональні схеми конвертерів імпедансу другого порядку зі струмовим зворотним зв’язком

На відміну від пасивних фільтрів, у схемі Саллена-Кея конденсатор $C_1$ приєднують до повторювача напруги (модельний компонент X1), який формує на електроді цього конденсатора потенціал електрода конденсатора $C_2$. Отже, миттєві значення падіння напруги на конденсаторі $C_1$ та резисторі $R_1$ однакові. Однак вказані конденсатор та резистор не шунтують один одного. Це і забезпечує більшу крутизну АЧХ та ФЧХ фільтра другого порядку. Частота зрізу $\omega_C$ та добротність Q такого фільтра визначаються, відповідно, рівностями:

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \quad Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2)}.$$

Очевидно, що такий розрахунок є лише наближеним - характеристики конвертера імпедансу визначаються не лише ланками $R_1C_1$ та $R_2C_2$, але й опором резистора $R_P$. Для точнішого розрахунку проведемо SPICE моделювання, схема та приклад результатів якого наведені на рис. 6.13, 6.14, відповідно.

Моделювання проводилося при фіксованих значеннях $R_P$ = 100k; R1 = R2 =10 k; $C_2$ = 100 n та дискретній зміні ємності конденсатора $C_1$. Отримані результати підтверджують притаманні фільтрам другого порядку

закономірності, зокрема, різкішу зміну АЧХ та збільшення максимального зсуву фази до 180°. Видно, зокрема, що при малих значеннях ємностей ($C_1$ < 100p) схема вироджується у фільтр першого порядку, про що свідчить максимальний зсув фази лише до значення 90°. Збільшення ємності $C_1$ перетворює схему на фільтр другого порядку, причому, залежно від вимог до сигнального перетворювача, можна сформувати більший чи менший викид АЧХ на початку смуги пропускання.

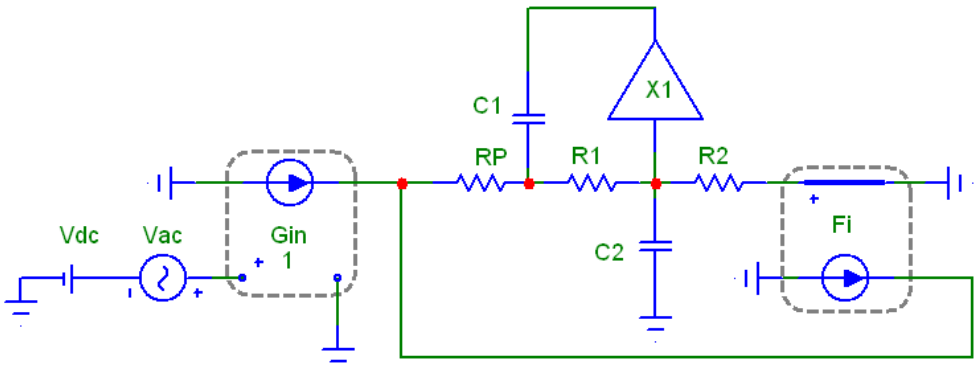



Рис. 6.13. SPICE схема заміщення конвертера імпедансу другого порядку

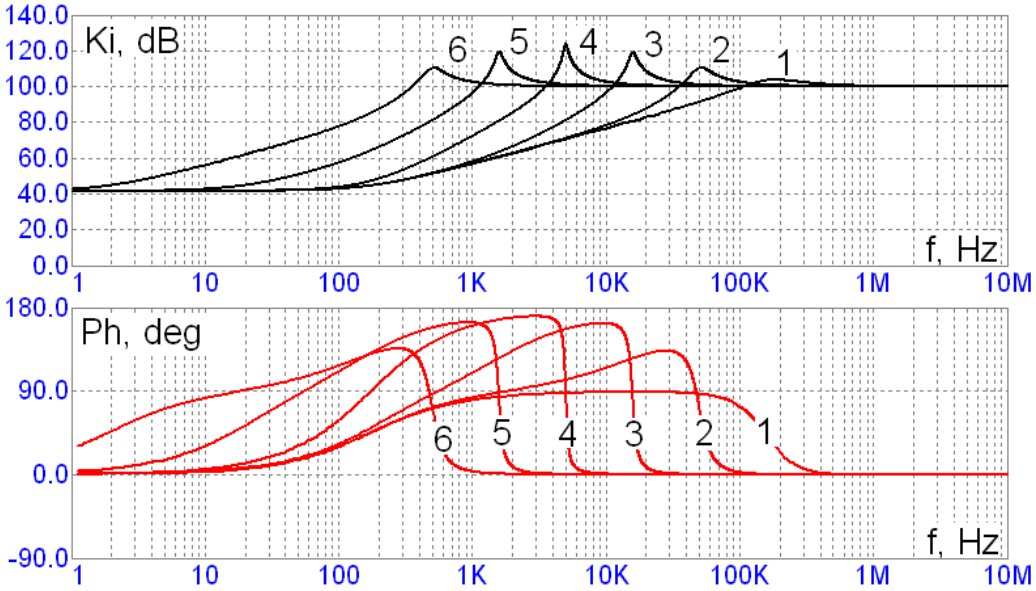



Рис. 6.14. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера на фільтрі Саллена-Кея при: $C_1$ = 100p (1), 1n (2), 10n (3), 100n (4), 1u (5), 10u (6)

Аналізуючи такий викид АЧХ, відзначимо особливість використання його для оптимізації функції перетворення конвертера імпедансу. Якщо мова йде про широкосмуговий сигнал фотоприймача сенсорного пристрою, то АЧХ у

смузі робочих частот повинна бути максимально рівною. Натомість, при використанні вузькосмугового гармонічного інформативного сигналу, сформованого, зокрема, відповідною вузькосмуговою модуляцією світлового потоку, що падає на чутливе середовище сенсора (модуляцією струму світлодіода), доцільно використовувати АЧХ з максимальним викидом. Очевидно, що частота викиду повинна збігатися з частотою модуляції світлового потоку.

При цьому необхідно врахувати два застереження. По-перше, викид повинен бути стабільним. По-друге, при використанні подальшого синхронного детектування сигналу потрібно враховувати значення зсуву фази в точці викиду та стабільність такого зсуву. Ці застереження будуть проаналізовані далі під час розгляду схем конвертера на транзисторних каскадах та реалізації сигнального перетворювача на основі синхронного детектора.

На завершення коротко розглянемо особливості використання конвертера імпедансу другого порядку в схемі з шунтувальним конденсатором $C_P$ (аналогічно до рис. 6.3, б). Як уже було зазначено, використання шунтувального конденсатора дає змогу сформувати безіндуктивну резонансну схему частотної селекції (рис. 6.11). Однак, як це показано на рис. 6.15 та рис. 6.16, резонансна схема селекції на конвертері другого порядку, характеризуючись значно вищою добротністю Q на частоті резонансу, має значну нестабільність.

Про втрату стабільності свідчать, по-перше, «зрив» ФЧХ (рис. 6.13- при 100 p > $C_P$ >10p на частоті f ≈ 4 kHz функція фази сигналу зі спадаючої змінюється на зростаючу), і, по-друге, ефект паразитної модуляції вихідної напруги $V_G$ на конвертері (рис. 6.14 – вхідний $V_{IN}$ та вихідний $V_G$ сигнали отримані Transient аналізом для двох значень ємності $C_{P1}$ ≈ 63 p, $C_{P2}$ ≈ 64 p при Vac = $10^{-6}$ V, $f_{AC}$ = 6 kHz, Vdc = $5 \cdot 10^{-6}$ V).

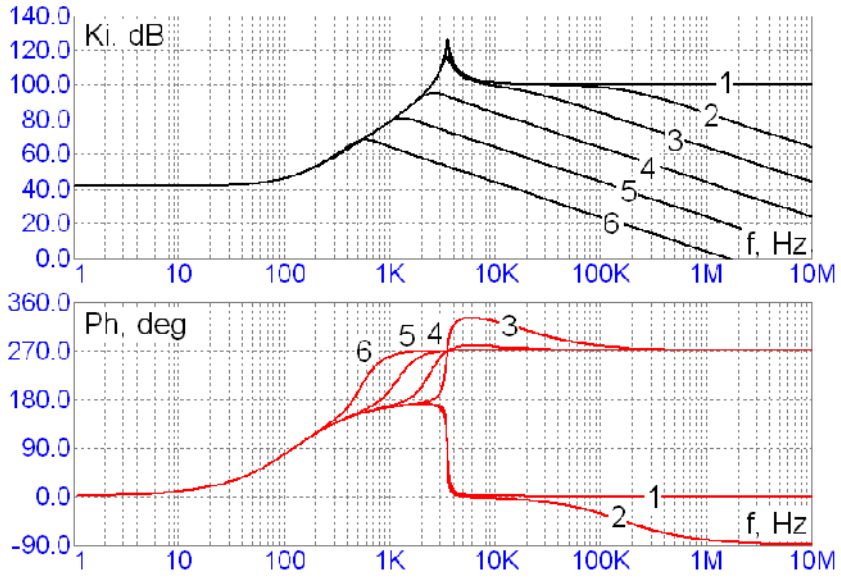



Рис. 6.15. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) схеми частотної селекції другого порядку при: $C_P$ = 0 (1), 10 p (2), 100 p (3), 1 n (4), 10 n (5), 100 n (6)

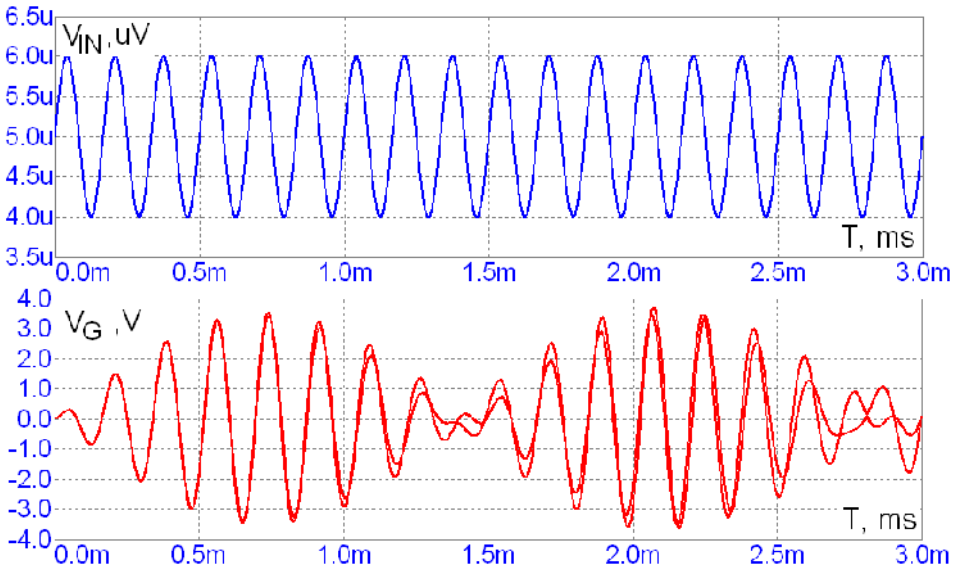


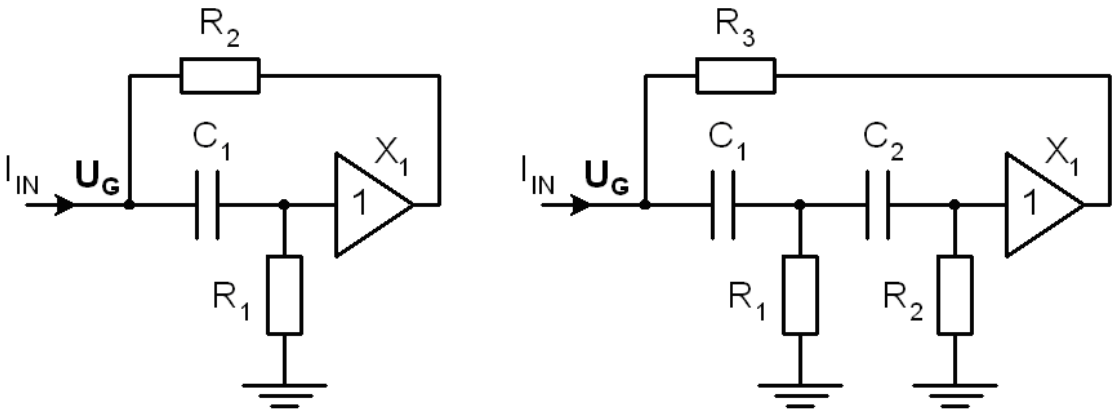

Рис. 6.16. Вхідний $V_{IN}$ та вихідний $V_G$ сигнали (ефект паразитної модуляції)

Отже, під час розроблення та використання резонансних схем на конвертерах імпедансу необхідно враховувати не лише коефіцієнти перетворення $K_I$ та добротність Q, але і стабільність схеми, зокрема ефекти «зриву» ФЧХ, самозбудження чи паразитної модуляції сигналу. Дослідження цих паразитних ефектів із використанням Transient аналізу будуть наводитися в

подальших підрозділах роботи під час розгляду конкретних варіантів схемної реалізації конвертерів імпедансу.

### 6.3. Модифікація і розробка конвертерів імпедансу з резистивним додатним зворотним зв’язком

Елементарна схема конвертера імпедансу з резистивним додатним зворотним зв’язком наведена на рис. 6.17, а. Активним компонентом цієї схеми є неінвертуючий підсилювач $X_1$ з одиничним коефіцієнтом підсилення [217, 218].




а) б)

Рис. 6.17. Функціональні схеми конвертерів імпедансу першого (а) та другого порядків (б) з резистивним додатним зворотним зв’язком

Схема конвертера описується системою рівнянь взаємних залежностей векторів напруг, струмів і комплексних опорів $\dot{U}, \dot{I}, \dot{Z}$ (індекси останніх відповідають позначенням на схемі рис. 6.17, а).

$$\begin{cases} \dot{U}_G = \dot{I}_{IN}\dot{Z}_{IN} & (1) \\ \dot{U}_G = \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{R1} & (2) \\ \dot{U}_{R2} = \dot{U}_{C1} & (3) \\ \dot{I}_{IN} = \dot{I}_{R1} + \dot{I}_{R2} & (4) \end{cases} \qquad (6.3)$$

Аналогічно до попередньо розглянутих схем, для аналітичного розрахунку імпедансу при граничних умовах приймемо наближення нульового фазового зсуву напруг та струмів. Тоді, замінивши в системі (6.3) вектори

струмів, напруг і комплексних опорів на їхні модульні значення $\dot{U} \Rightarrow U$, $\dot{I} \Rightarrow I$, $\dot{Z} \Rightarrow Z$, знайдемо в першому наближенні функціональну залежність вхідного імпедансу $Z_{IN}$.

Для цього запишемо: $U_{C1} = U_G - U_{R1}$; $I_{C1} = \dfrac{U_G}{Z_{C1} + R_1}$;

$\dot{Z}_{C1} = \dfrac{1}{\omega C_1}$; $I_{R2} = U_G \dfrac{Z_{C1}}{(Z_{C1} + R_1)R_2}$; $I_{R2} + I_{C1} = U_G \dfrac{Z_{C1} + R_2}{(Z_{C1} + R_1)R_2}$.

Тоді функціональна залежність імпедансу $Z_{IN}$ наближено визначається виразом

$$Z_{IN} = \frac{(1 + \omega R_1 C_1)R_2}{1 + \omega R_2 C_1}. \qquad (6.4)$$

Вибіркові результати розрахунку аналітичної залежності (6.4) для фіксованого значення ємності $C_1$ = 10 n та чотирьох наборів значень резисторів $R_1$ = 100 k, $R_2$ = 1 k (A), $R_1$ = 100 k, $R_2$ = 100 (B), $R_1$ = 100 k, $R_2$ = 10 (C), $R_1$ = 1000 k, $R_2$ = 100 (D) наведено на рис. 6.18.

Результати наведених досліджень підтверджують задану функціональність конвертера імпедансу, для якої характерний додатний, тобто «індуктивний», зсув фази, та коректність наближеного аналітичного розрахунку.

Зокрема показано, що коефіцієнт перетворення $K_I$ визначається на високих частотах опором резистора $R_1$ (рис. 6.20), а на низьких частотах – опором резистора $R_2$ (рис. 6.21). При зміні цих опорів відбувається відповідне розширення чи звуження діапазону частот, у якому відбувається зсув фази. Натомість, зміна ємності $C_1$ (рис. 6.24) обумовлює зсув АЧХ та ФЧХ по осі абсцис без зміни ширини діапазону частот зсуву фази.

Результати дослідження параметрів конвертера на основі SPICE моделей (схема заміщення конвертера з резистивним зворотним зв’язком - рис. 6.19) з урахуванням фазових характеристик наведено на рис. 6.20 – рис. 6.22.

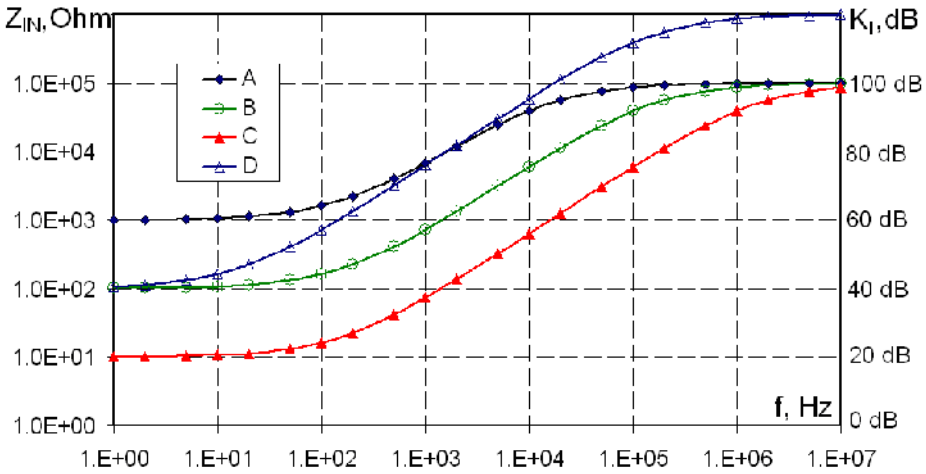



Рис. 6.18. Частотна залежність імпедансу $Z_{IN}$ та коефіцієнта перетворення $K_I$ конвертера з резистивним зворотним зв'язком (наближений розрахунок)

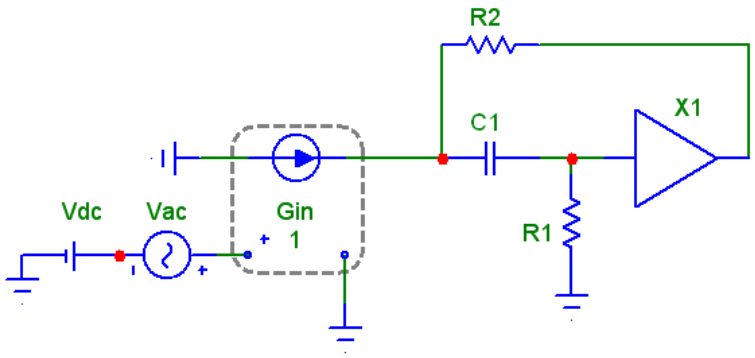



Рис. 6.19. SPICE схема заміщення конвертера імпедансу першого порядку з резистивним зворотним зв'язком

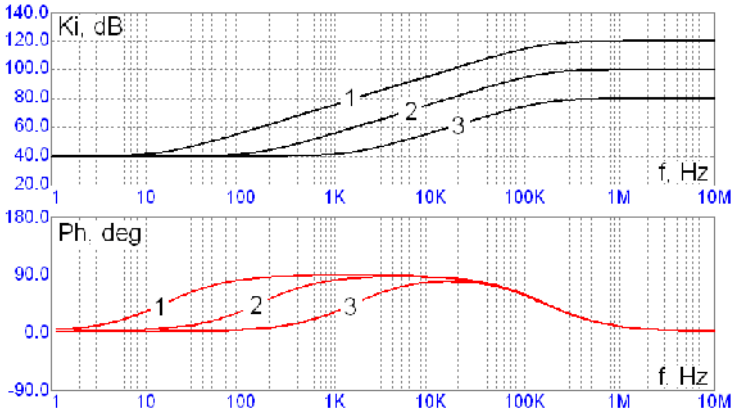



Рис. 6.20. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:

$C_1$ = 10 n; $R_2$ = 100; $R_1$ = 1000 k (1), 100 k (2), 10k (3)

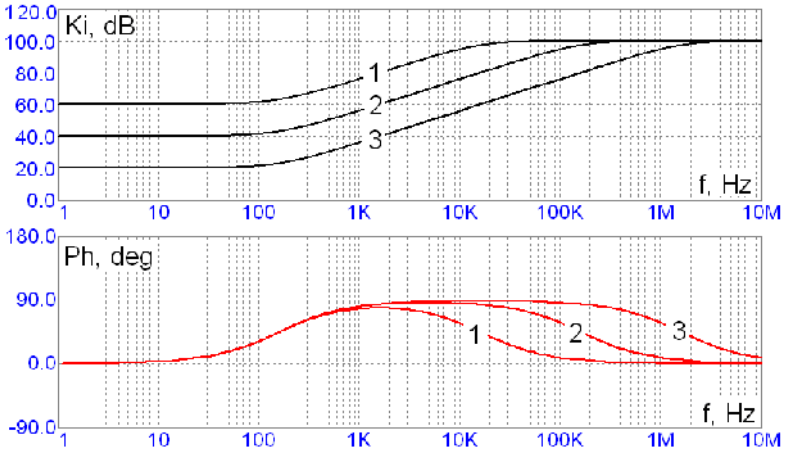



Рис. 6.21. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:

$R_1$ = 100 k; $C_1$ = 10 n;  $R_2$ = 1 k (1), 100 (2), 10 (3)

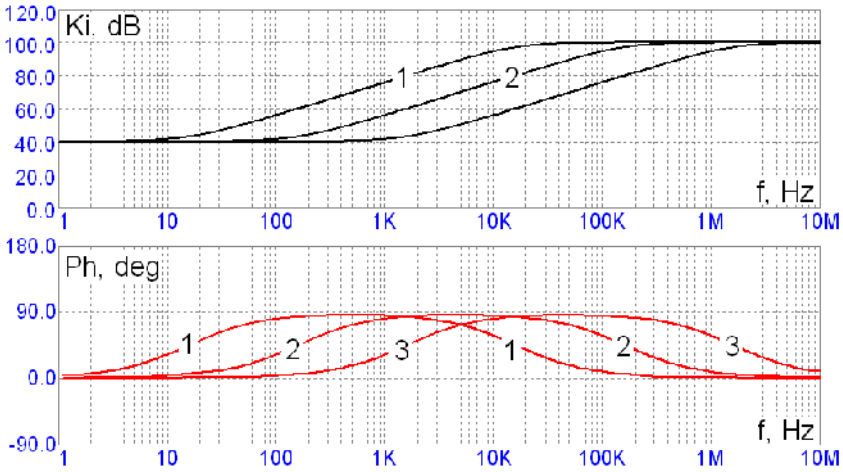



Рис. 6.22. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:

$R_1$ = 100k; $R_2$ = 100; $C_1$ = 100 n (1), 10 n (2), 1 n (3)

Аналогічно до раніше розглянутих схем зі струмовим від’ємним зворотним зв’язком (рис. 6.12, б), проведемо структурно-параметричний аналіз ефективності використання фільтра другого порядку (фільтру Саллена-Кея) в конвертері імпедансу з резистивним додатним зворотним зв’язком. Для реалізації схеми такого конвеєра необхідно використати повторювач напруги ($X_2$, рис. 6.23, а), який забезпечує однакове падіння напруг на резисторі $R_1$ та конденсаторі $C_2$.

Структурний аналіз показує, що в такому разі обидва повторювачі – $X_1$ та $X_2$ – фактично виконують ідентичну функцію. Ця особливість дозволяє, як це показано на рис. 6.23, б, мінімізувати схемне рішення конвертера – повторювач

$X_1$ використовується, як для формування резистивного додатного зворотного зв'язку конвертера імпедансу (резистор $R_3$), так і для формування зворотного зв'язку активного фільтра (резистор $R_1$). Дамо детальний аналіз такого схемного рішення.

Запишемо систему рівнянь векторів напруг, струмів та комплексних опорів $\dot{U}, \dot{I}, \dot{Z}$ (індекси останніх відповідають позначенням на схемі рис. 6.23, б, причому, $\dot{Z}_{C1} = 1/j\omega C_1$, $\dot{Z}_{C2} = 1/j\omega C_2$):

$$\begin{cases} \dot{U}_{OUT} = \dot{I}_{R2} R_2 & (1) \\ \dot{U}_1 = \dot{I}_{R2}(R_2 + \dot{Z}_{C2}) & (2) \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_{OUT} = \dot{I}_{R1} R_1 & (3) \\ \dot{U}_G - \dot{U}_{OUT} = \dot{I}_{R3} R_3 & (4) \\ \dot{U}_G - \dot{U}_1 = (\dot{I}_{R1} + \dot{I}_{R2})\dot{Z}_{C1} & (5) \\ \dot{I}_{IN} = \dot{I}_{R1} + \dot{I}_{R2} + \dot{I}_{R3} & (6) \end{cases} \qquad (6.5)$$

Замінивши в першому наближенні вектори струмів, напруг та комплексних опорів на їхні модульні значення $\dot{U} \Rightarrow U$, $\dot{I} \Rightarrow I$, $\dot{Z} \Rightarrow Z$, знайдемо розв'язок системи (6.5).

З рівнянь (4) та (1) системи (6.5) знаходимо

$$I_{R3} = \frac{U_G - U_{OUT}}{R_3} = \frac{U_G - I_{R2} R_2}{R_3}.$$

Віднявши від рівняння (1) рівняння (2) отримуємо

$$U_1 - U_{OUT} = I_{R2} Z_{C2}.$$

З рівняння (3) системи (6.5) знаходимо

$$U_1 - U_{OUT} = I_{R1} R_1, \quad I_{R1} = I_{R2} \frac{Z_{C2}}{R_1},$$

Сума струмів

$$I_{R1} + I_{R2} = I_{R2}\left(\frac{Z_{C2}}{R_1} + 1\right).$$

Далі, підставивши в рівняння (5) цю суму струмів та рівняння (2), знаходимо:

$$U_G - I_{R2}(R_2 + Z_{C2}) = Z_{C1} I_{R2}\left(\frac{Z_{C2}}{R_1} + 1\right),$$

$$I_{R2}\left[Z_{C1}\left(\frac{Z_{C2}}{R_1} + 1\right) + R_2 + Z_{C2}\right] = U_G.$$

Ввівши значення еквівалентного опору

$$R_A = Z_{C1}\left(\frac{Z_{C2}}{R_1} + 1\right) + R_2 + Z_{C2},$$

отримуємо струм

$$I_{R2} = \frac{U_G}{R_A}.$$

Підставляючи вище визначені залежності струмів у рівняння (5) системи (6.5), отримуємо

$$I_{IN} = \frac{U_G}{R_A}\left(\frac{Z_{C2}}{R_1} - \frac{R_2}{R_3} + 1\right) + \frac{U_G}{R_3}.$$

Далі, провівши відповідні спрощення, знаходимо наближене рівняння вхідного імпедансу конвертера:

$$Z_{IN} = \frac{U_G}{I_{IN}} = R_3 \frac{R_1(Z_{C1} + Z_{C2} + R_2) + Z_{C1}Z_{C2}}{R_1(Z_{C1} + Z_{C2} + R_3) + Z_{C2}(R_3 + Z_{C1})}. \quad (6.6)$$

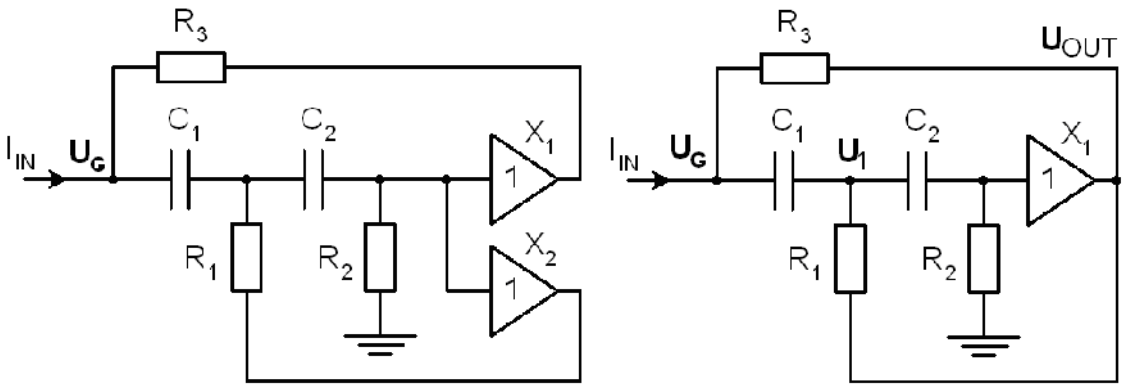
Це рівняння дає змогу визначити певні закономірності сигналів, зокрема, граничні значення вхідного імпедансу на низьких та високих частотах:

при $\omega \to 0$, $(Z_{C1} \to \infty, Z_{C2} \to \infty)$, $Z_{IN} \to R_3$;

при $\omega \to \infty$, $(Z_{C1} \to 0, Z_{C2} \to 0)$, $Z_{IN} \to R_2$.

SPICE схему заміщення конвертера другого порядку з резистивним додатним зворотним зв’язком наведено на рис. 6.24. Як і в попередньо наведених схемах, кероване джерело струму Gin, джерело постійної напруги Vdc та джерело гармонічної напруги Vac утворюють вихідне коло

фоточутливого сенсора, а макромодель X1 – неінвертуючий підсилювач напруги з одиничним коефіцієнтом підсилення.




а) б)

Рис. 6.23. Функціональні схеми конвертерів імпедансу з резистивним додатним зворотним зв’язком на основі активного фільтра другого порядку

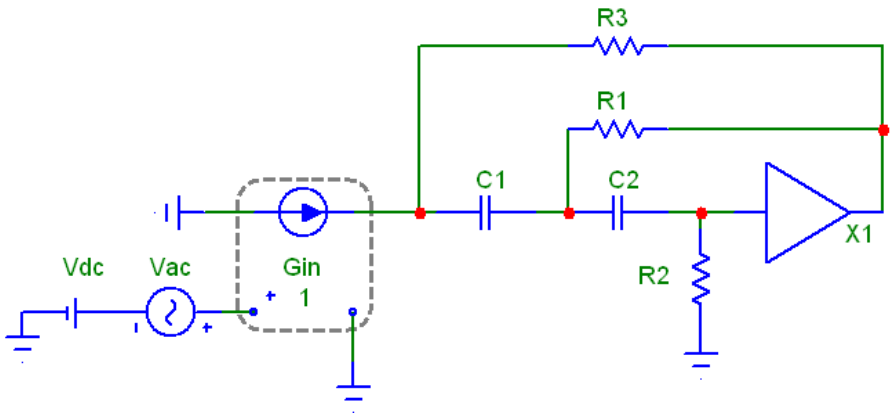



Рис. 6.24. SPICE схема заміщення конвертера імпедансу другого порядку з резистивним додатним зворотним зв’язком

Порівняння результатів наближеного розрахунку за формулою (6.6) з результатами модельного SPICE дослідження наведено на рис. 6.25. Характеристики AC та BC відображають результати наближеного розрахунку, а AS та BS – результати SPICE досліджень. Значення $C_1$ = 100 n, $C_2$ = 1000 n, $R_3$ = 100 є незмінними для всіх наведених результатів, а значення $R_1$ та $R_2$ - дискретно змінювалися:

- для AC (Calculation) та AS (SPICE) характеристик - $R_1$ = 100 k, $R_2$ = 100 k;
- для BC (Calculation) та BS (SPICE) характеристик - $R_1$ = 10, $R_2$ = 1000 k.

Видно, що при граничних умовах ($\omega \to 0$, $\omega \to \infty$) результати наближеного розрахунку та модельного SPICE дослідження збігаються. Збігаються також частоти переходу з низьким і високим імпедансом. Однак наближений розрахунок не дає можливості виявити виникнення екстремуму функції перетворення на частотах указаного переходу.

Саме модельні SPICE дослідження, які, на відміну від наближеного розрахунку, враховують фазові затримки в RC колах, вказують на можливість формування функції перетворення конвертера імпедансу з екстремальним зниженням імпедансу на низьких частотах. Результати модельних SPICE досліджень показують, зокрема, що на характеристиці AS ($R_1$ = 100 k, $R_2$ = 100 k) екстремум не спостерігається, натомість, на характеристиці BS ($R_1$ = 10, $R_2$ = 100 k) існує ефект екстремального зниження імпедансу. Отже, вказаний ефект спостерігається лише при певних параметрах RC кіл конвертера.

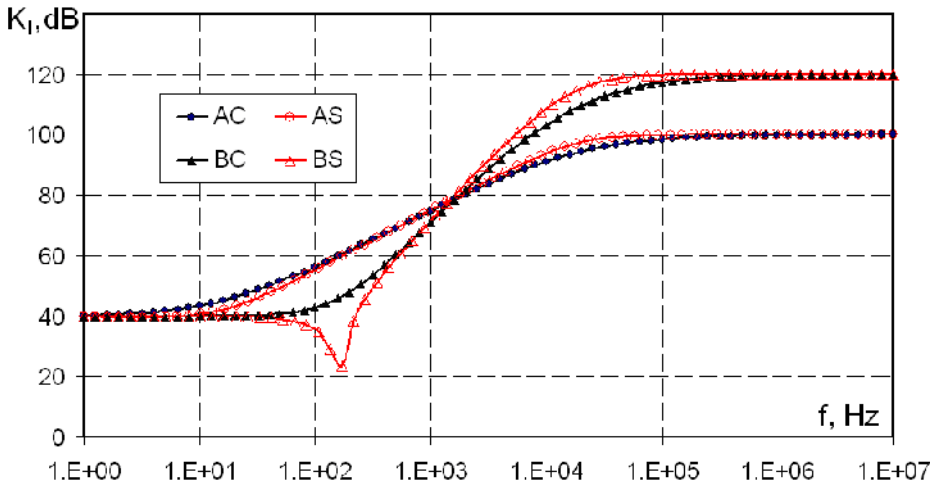



Рис. 6.25. Порівняння результатів наближеного розрахунку (AC та BC) з результатами модельного SPICE дослідження(AS та BS)

Необхідно відзначити важливість виявленого ефекту в сигнальних перетворювачах оптоелектронних сенсорів. Її обумовлює можливість істотного заглушення (режекції) паразитних електромагнітних завад силової енергомережі (50 Гц чи 60 Гц, залежно від стандартизованої частоти енергомережі). Отже, сигнальний перетворювач на відповідно оптимізованому

конвертері імпедансу дає змогу не лише мінімізувати паразитний вплив постійних складових сигналу («засвічення» сторонніми джерелами світла), але й провести ефективну режекцію завад частотою енергомережі.

Наочну демонстрацію принципової відмінності між параметрами представленого конвертера імпедансу з ефектом режекції та високочастотного активного фільтра Саллена-Кея показано на рис. 6.26 (схеми заміщення) та рис. 6.27 (порівняння АЧХ та ФЧХ). Конвертер імпедансу реалізовано на елементах $R_1$, $R_2$, $R_3$, $C_1$, $C_2$ та повторювачі напруги $X_1$ (рис. 6.26, зверху). Натомість, активний фільтр Саллена-Кея реалізовано на $R_4$, $R_5$, $R_6$, $C_3$, $C_4$ та повторювачі напруги $X_2$ (рис. 6.26, знизу). Оскільки на відміну від конвертера імпедансу, вхід фільтра є потенціальним, останній під'єднано безпосередньо до вхідної напруги $V_{IN}$ (як зазначалося раніше, кероване джерело струму $G_{IN}$, яке формує сигнал конвертера імпедансу, відтворює струмовий вихід фоточутливого елемента сенсора – фотодіода чи фототранзистора).

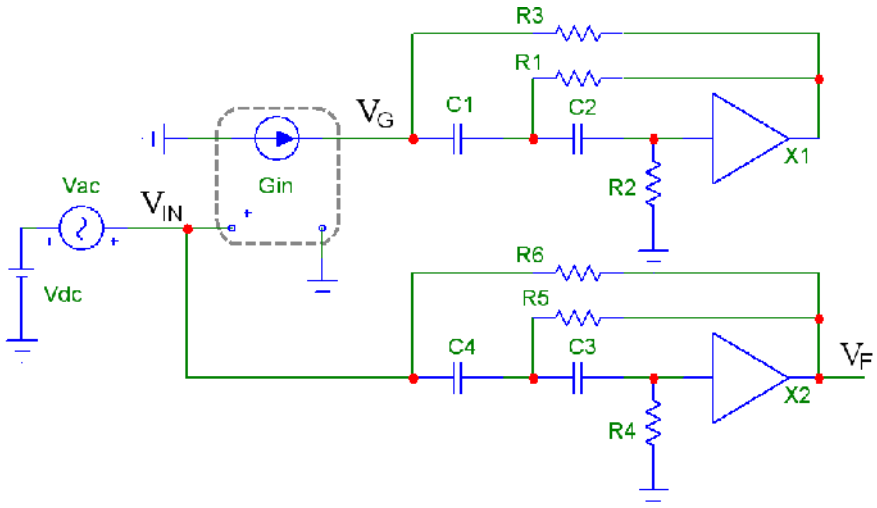


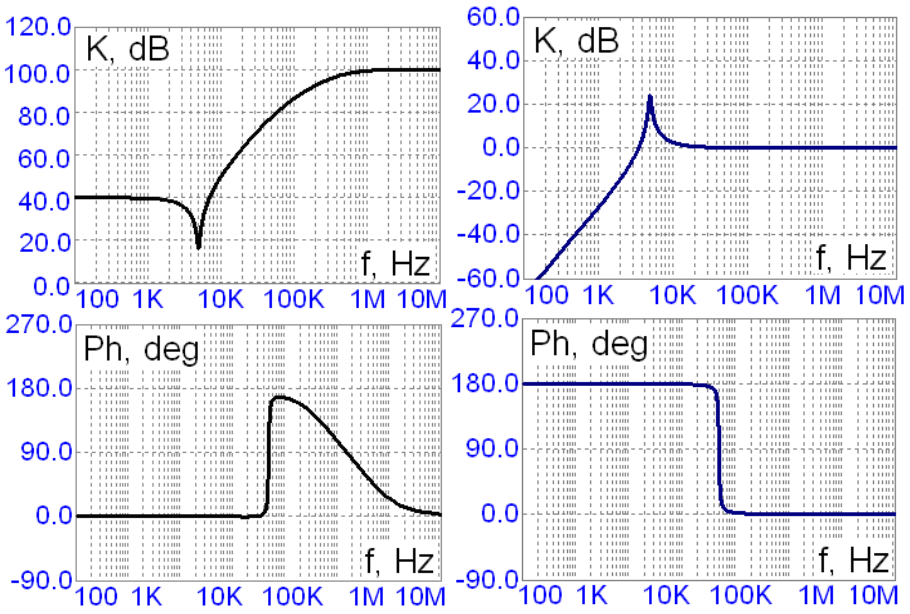

Рис. 6.26. SPICE схеми заміщення конвертера імпедансу другого порядку (зверху) високочастотного фільтра Саллена-Кея (знизу)

Приклади результатів порівняльного аналізу характеристик конвертера та фільтра Саллена-Кея отримані при взаємній рівності параметрів відповідних елементів цих схем, а саме: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 10$ n; $R_2 = R_4 = 100$ k; $R_1 = R_3 = R_5 = R_6 = 100$. Видно, що перевага конвертера імпедансу над фільтром Саллена-Кея полягає в наявності корисного ефекту додаткової режекції на частотах, що

передують переходу від низького до високого імпедансу.

Враховуючи проблематичність високоточного аналітичного розрахунку, оптимізацію параметрів конвертера з режекцією проводять модельними SPICE дослідженнями. Приклади таких досліджень наведено на рис. 6.28 (при зміні $R_2$) та рис. 6.29 (при зміні $C_1$).

Наведені приклади результатів досліджень показують, що в ході оптимізації можна визначити параметри RC кіл так, щоб характеристика перетворення конвертера поєднувала високу крутизну наростання імпедансу (до 40 дБ на декаду) та ефективне заглушення завади (до -40 дБ на частоті режекції).




а) б)

Рис. 6.27. Порівняння АЧХ та ФЧХ конвертера (а) та фільтра Саллена-Кея (б)

Зокрема, як випливає з наведеного на рис. 6.28 прикладу, оптимальне значення резистора $R_1$ становить приблизно 10 Ом (АЧХ (5)).

При цьому, на частоті режекції ~150 Гц коефіцієнт перетворення – приблизно 0 дБ, а смуга частот пропускання – від 30 кГц і вище. Натомість, при більших значеннях резистора добротність (крутизна та глибина режекції) спадає, а при менших значеннях – виникає зсув АЧХ в область вищих частот.

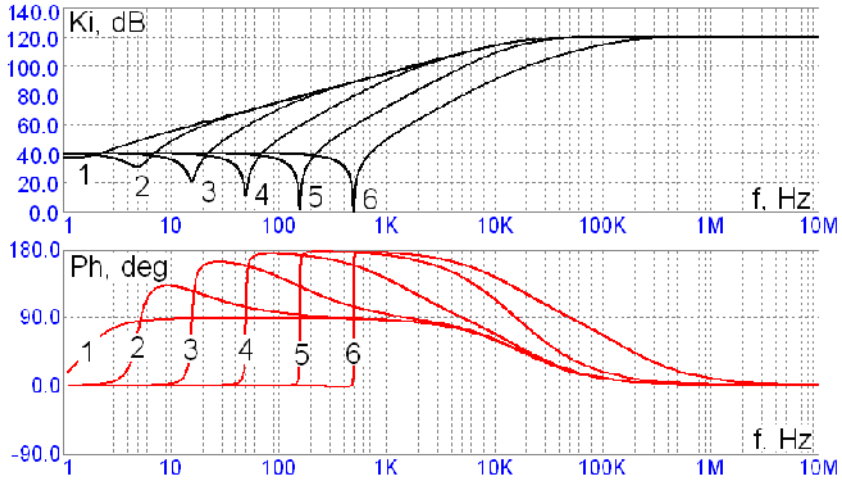



Рис. 6.28. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при: $R_1$ = 1000 k, $C_1$ = 1000 n, $C_2$ = 100 n, $R_3$ = 100; $R_2$ = 100 k (1), 10 k (2), 1 k (3), 100 (4), 10 (5), 1 (6)

Приклад дослідження конвертера при зміні ємності $C_1$ (рис. 6.29) демонструє оптимізацію параметрів щодо вже згаданої режекції електромагнітної завади, обумовленої силовою енергомережею. Показано, що при $R_1$ = 1000 k, $R_2$ = 10 Ом, $R_3$ = 100 Ом, $C_1 = 10^{-6}$Ф (АЧХ (4)) частота режекції становить 50 Гц ($K_I$ = 0 дБ), а смуга частот пропускання при $K_I$ = 120 дБ (що відповідає коефіцієнту перетворення $10^6$ В/А) починається з 30 кГц.

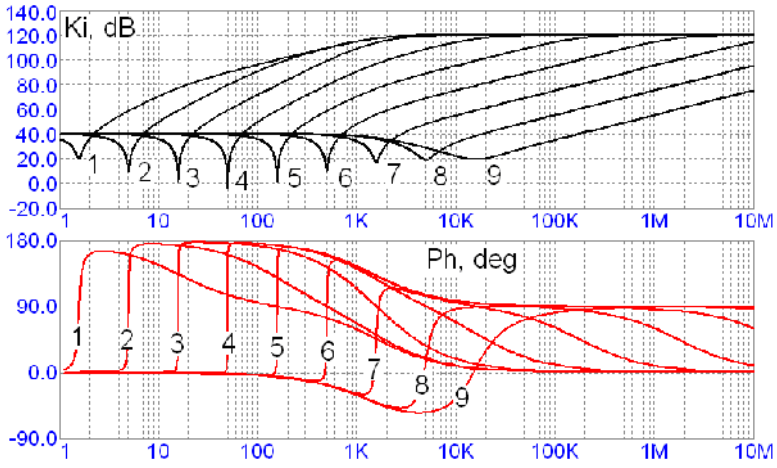



Рис. 6.29. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при: $C_1$ = 0.01 n (9), 0.1 n (8), 1 n (7), 10 n (6), 100 n (5), 1000 n (4), 10 u (3), 100u (2), 1000u (1)

Під час оптимізації параметрів конвертера імпедансу важливим є коректний вибір активного елемента – в цьому разі повторювача напруги. Так, при використанні повторювача на операційному підсилювачі потрібно

врахувати обмеження навантажувальної здатності останнього. Вихідний струм переважної більшості операційних підсилювачів обмежений на рівні 20 мА, що не допускає низькоомного навантаження (менше декількох сотень Ом). Крім того, потрібно враховувати обмеження функціонування операційних підсилювачів з RC колами внаслідок перевищення допустимого ємнісного навантаження та паразитного збудження (спотворення сигналу чи автоколивання) через недопустимий поворот фази в колі зворотного зв'язку. Далі, по мірі розгляду конкретних схем конвертерів, ці проблеми аналізуються більш детально.

На завершення, на рис. 6.30 наведено аналіз проблеми стабільності функціонування конвертера в резонансному колі з шунтувальним конденсатором $C_P$. У цьому разі аналізується АЧХ та ФЧХ конвертера імпедансу другого порядку з резистивним додатним зворотним зв'язком у колі (рис. 6.24). Загалом результати такого аналізу збігаються з уже розглянутим конвертером другого порядку зі струмовим зворотним зв'язком (рис. 6.13, 6.15).

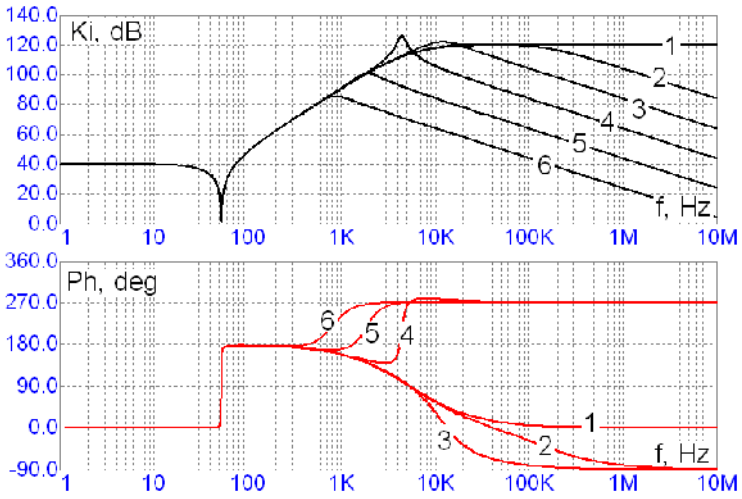


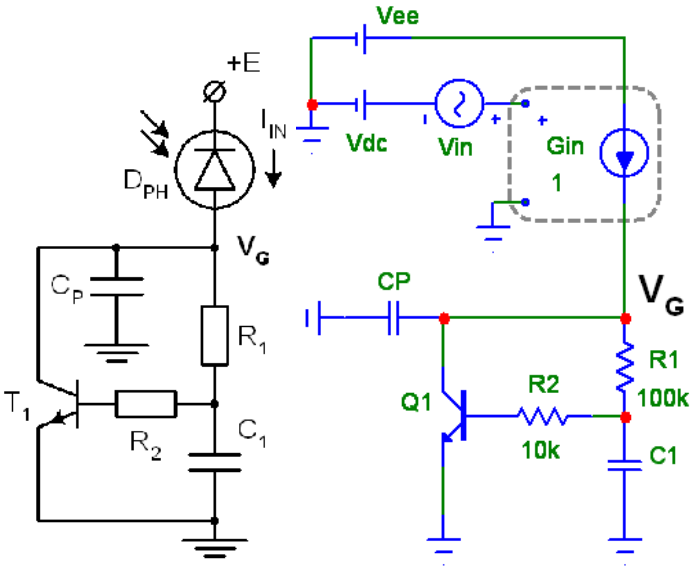

Рис. 6.30. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера з шунтувальним конденсатором $C_P$ = 0 (1), 1 p (2), 10 p (3), 100 p (4), 1 n (5), 10 n (6)

Встановлено, що зі збільшенням ємності $C_P$ понад допустиме значення – в цьому разі кілька десятків пікоФарад (рис. 6.30) спостерігається «зрив» ФЧХ - схема переходить у нестабільний режим функціонування (аналогічно до

показаного на рис. 6.16). Питання забезпечення стабільних режимів функціонування на прикладі конкретних реалізацій конвертерів імпедансу будуть розглянуті в наступному розділі.

### 6.4. Модифікування та реалізація конверторів імпедансу на транзисторних каскадах

Базовий варіант схеми конвертера імпедансу оптоелектронного сенсора на елементарному транзисторному каскаді наведено на рис. 6.31, а. Схема забезпечує придушення постійного рівня та низькочастотних складових струму $I_{IN}$ фотодіода $D_{PH}$. Зворотне зміщення останнього та функціонування транзисторного каскаду здійснює джерело живлення +E.




а) б)

Рис. 6.31. Схема (а) та SPICE модель (б) базового варіанту конвертера імпедансу на транзисторному каскаді

Основою цього варіанту конвертера є відома схема з використанням біполярного транзистора та RC ланки, зокрема [219]. Натомість, у рамках цієї роботи нами поставлено завдання параметричного аналізу такої схеми при зміні режимів роботи. Далі, використовуючи отримані результати таких досліджень, конкретизуються задачі структурно-параметричної модифікації конвертерів імпедансу на транзисторних каскадах.

Відповідно до розглянутих вище принципів функціонування конвертерів імпедансу елементарний варіант схеми на біполярному транзисторі належить до конвертерів зя струмовим від'ємним зворотним зв'язком. На постійному струмі колекторний струм транзистора $T_1$ (рис. 6.31) шунтує резистор навантаження $R_1$ фотодіода $D_{PH}$.

На низьких частотах ($\omega \to 0$) імпеданс конденсатора $C_1$ прямує до нескінченності $Z_{C1} \to \infty$, а відтак, у першому наближенні коефіцієнт передачі $K_F$ струмового від'ємного зворотного зв'язку за модулем приблизно дорівнює коефіцієнту підсилення базового струму транзистора $K_F \approx B_F$, де $B_F = I_C/I_B$, $I_C$ та $I_B$ – відповідно, колекторний та базовий струми. На високих частотах ($\omega \to \infty$) імпеданс конденсатора прямує до нуля $Z_{C1} \to 0$, а отже, відбувається шунтування базового кола транзистора. Це, своєю чергою, призводить до мінімізації зміни колекторного струму $\Delta I_C \to 0$, а отже, $K_F \to 0$.

Резистор $R_2$ введено для покращення функціональності –зміною опору цього резистора забезпечується можливість точнішого налаштовування схеми під бажану характеристику. Конденсатор $C_P$, як і в попередньо розглянутих функціональних схемах, уможливлює формування резонансної характеристики перетворення, що підвищує селективність до частоти корисного сигналу.

Наведені далі результати модельних досліджень такої схеми конвертера базуються на SPICE схемі заміщення відповідно до рис. 6.31, б. Джерело Vee задає напругу живлення схеми, а джерела Vdc та Vin – постійну (паразитну) та змінну (корисну) складові сигналу. Кероване джерело Gin моделює вихідний струм фотодіода $D_{PF}$. Приклади АЧХ та ФЧХ аналізованої схеми наведені на рис. 6.32 (при зміні ємності $C_1$) та рис. 6.33 (при зміні ємності $C_P$).

Видно, що при заданих параметрах елементної бази, зокрема $B_F = 300$, $R_1 = 100$ k, елементарний варіант конвертера на біполярному транзисторі забезпечує зростання коефіцієнта перетворення $K_I$ та імпедансу $Z_{IN}$ ($Z_{IN} = K_I$) з 65 дБ при $\omega \to 0$ до 100 дБ при $\omega \to \infty$. Крутизна АЧХ відповідає фільтрам першого порядку і становить 20 дБ на декаду. Зсув фази є додатним, що підтверджує індуктивний характер імпедансу $Z_{IN}$. Максимальне значення зсуву

становить 75°. Важливим є факт, що зменшення ємності $C_1$ не лише зсуває АЧХ в область вищих частот, але і звужує смугу робочих частот. Граничне значення ємності $C_1$, при якому зберігається максимальне значення імпедансу (100 дБ), становить $C_1 \approx 10$ n (АЧХ (3), рис. 6.32). Подальше зменшення $C_1$ є неефективним. Таке явище зумовлене частотними обмеженнями транзистора і буде детальніше аналізуватися дещо далі.

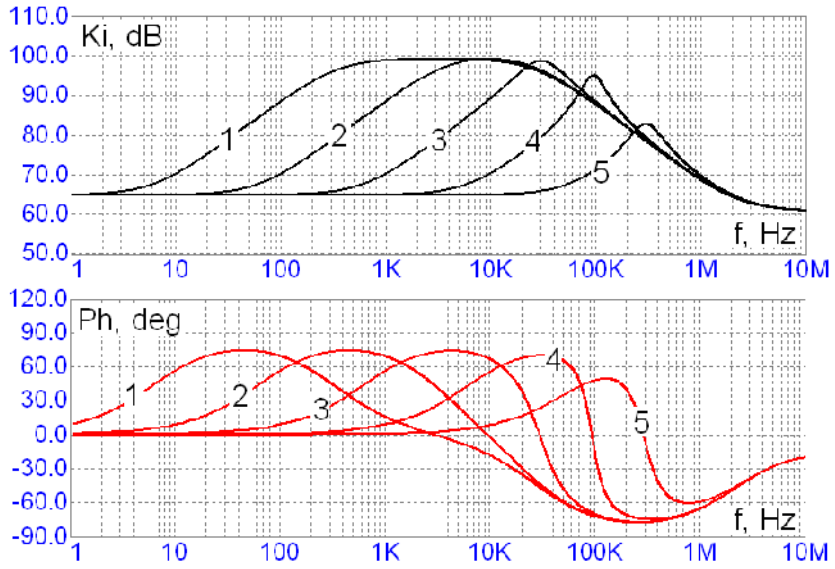



Рис. 6.32. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) елементарного конвертера при $B_F = 300$, $R_1 = 100$ k; $C_p = 0$; $C_1 = 1$ u (1), 100 n (2), 10 n (3), 1 n (4), 100 p (5)

Під час реалізації резонансних схем селекції з використанням шунтувального конденсатора $C_P$ АЧХ зсувається в область нижчих частот При цьому, внаслідок резонансного викиду АЧХ, можна дещо підвищити коефіцієнт передачі на низьких частотах (АЧХ (2), рис. 6.33).

Крім того, результати досліджень показують, що зсув фази в транзисторному каскаді з резонансною характеристикою не перевищує допустимих меж стабільності функціонування конвертера.

У ході структурно-параметричної оптимізації конвертера на транзисторних каскадах першим етапом є встановлення залежностей характеристик схеми від параметрів елементної бази. Для цього, крім дослідження АЧХ та ФЧХ, необхідно визначити робочу точку (початкове

зміщення) та режими роботи схеми на постійному струмі $I_{IN}(\omega = 0)$, тобто провести її DC (Direct Current) аналіз.

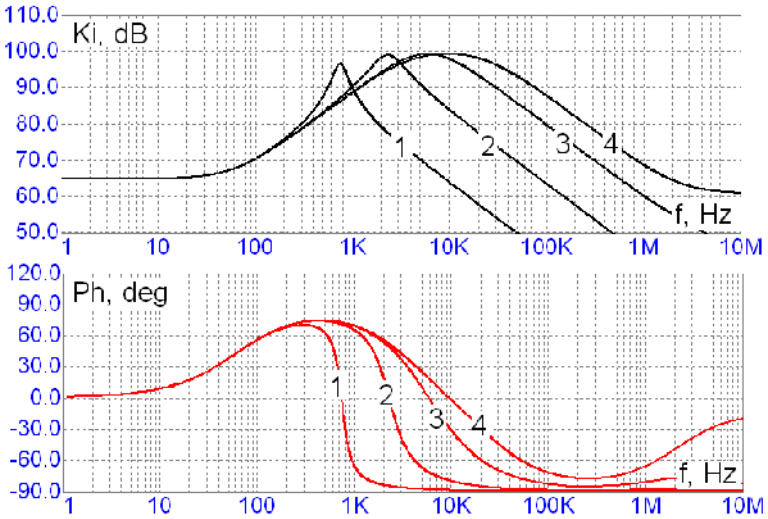
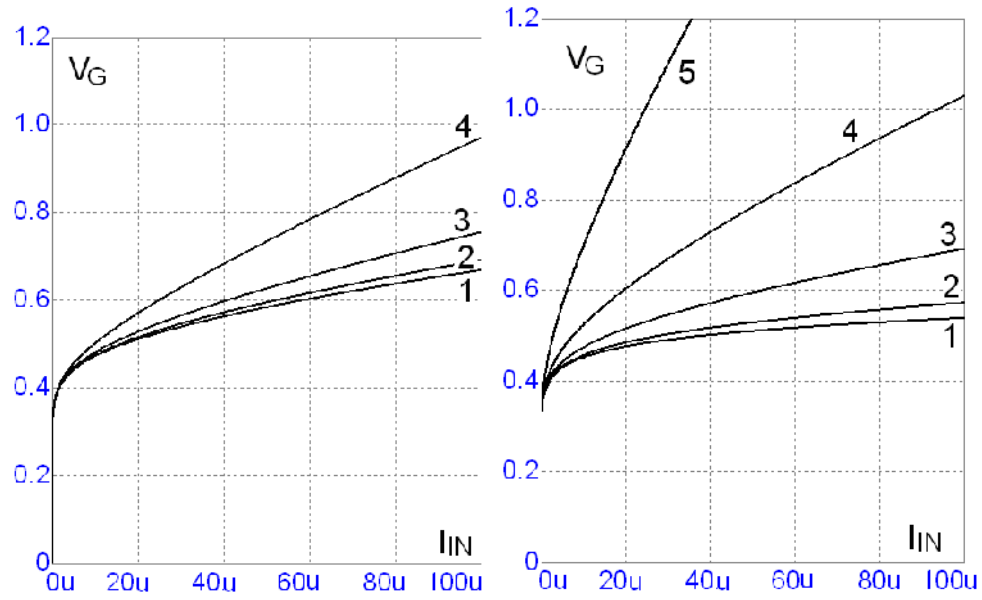



Рис. 6.33. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) елементарного конвертера при $R_1$ = 100 k; $C_1$ =100 n; $C_P$ = 10 n (1), 1 n (2), 100 p (3), 0 (4)

Характерні приклади DC аналізу наведені на рис. 6.34, де показано залежності вихідної напруги $V_G$ від вхідного струму $I_{IN}(\omega = 0)$ при різних значеннях коефіцієнта підсилення транзистора (рис. 6.32, а - $B_F$ = 30 (4), 100 (3), 300 (2), 1000 (1)) та опору резистора (рис. 6.32, б - $R_1$ = 10 k (1), 30 k (2), 100 k (3), 300 k (4), 1000 k (5)).

Спостерігаються дві характерні ділянки. На першій з них при гранично малих значеннях вхідного струму (порядку мікроампер і менше) спостерігається різке наростання вихідної напруги $V_G$. Очевидно, що на цій ділянці шунтувальний ефект транзистора є недостатнім, а схема не забезпечує характерної для конвертера імпедансу компресії низькочастотного сигналу. На другій ділянці, при збільшенні вхідного струму приблизно до 10 мкА і вище, транзистор, шунтуючи коло навантаження фотодіода, обмежує вихідну напругу $V_G$. Саме ефективність такого обмеження визначає коефіцієнт компресії на постійному струмі.




а) б)

Рис. 6.34. Результати DC аналізу залежностей напруги $V_G$ від струму $I_{IN}$:

Видно, що при зростанні вхідного струму $I_{IN}(\omega = 0)$ від 50 мкА до 100 мкА ($\Delta I_{IN}$ = 50 мкА) зростання вихідної напруги залежить від параметрів елементної бази, і, зокрема, становить $\Delta V_G \approx 0{,}1$ В (рис. 4.4, б - $R_1$ = 100 k (3)). Отже, характеристичний імпеданс на постійному струмі при вказаних параметрах становить $Z_{IN}(\omega = 0) = \Delta V_G / \Delta I_{IN} \approx 2\text{k}$. Це значення відповідає коефіцієнту компресії на постійному струмі $R_1 / Z_{IN}(\omega = 0) \approx 50$.

Зазначимо, що зменшення ефекту обмеження вихідної напруги $V_G$ зі збільшенням опору $R_1$ чи зменшенням коефіцієнта підсилення $B_F$ не означає погіршення ефективності функціонування конвертера загалом. Для коректного оцінювання такої ефективності необхідно, як це показано на рис. 6.35, встановити залежність АЧХ конвертера від параметрів $R_1$ та $B_F$ в комплексі. Показано, зокрема, що зі збільшенням опору $R_1$ спостерігається збільшення коефіцієнта $K_I$, як на постійному струмі $K_I(\omega \to 0)$ (аналогічно до наведених на рис. 6.34, б результатів DC аналізу), так і на робочих частотах сенсорного пристрою $K_I(\Delta\omega_S)$, де $\Delta\omega_S$ – смуга робочих частот.

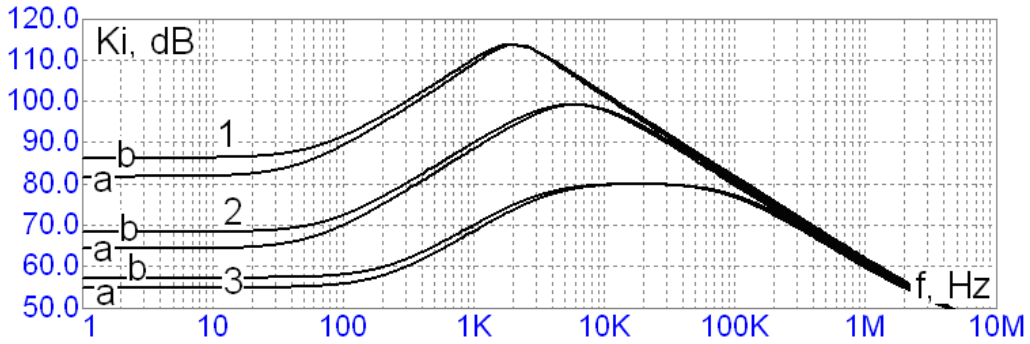



Рис. 6.35. АЧХ конвертера на транзисторному каскаді при:

$R_1$ = 1000 k (1), 100 k (2), 10 k (3); $B_F$ = 1000 (a), 100 (b)

Ефективність конвертера оцінюється за різницею коефіцієнтів перетворення $K_I(\Delta\omega_S) - K_I(\omega \to 0)$. Зі збільшенням $R_1$ ця різниця дещо зростає: від 80-55=25 дБ (при $R_1$ = 10 k (3), $B_F$ = 1000 (a)) до 112-82=30 дБ (при $R_1$ = 1000 k (1), $B_F$ = 1000 (a)), а отже, зростає і ефективність. Однак очевидним є звуження смуги робочих частот: $\Delta\omega_S \approx$ 10 кГц…40 кГц (при $R_1$ = 10 k (3), $B_F$ = 1000 (a)) та 1,5 кГц…2,5 кГц (при $R_1$ = 1000 k (1), $B_F$ = 1000 (a)). Отже, в ході оптимізації необхідно враховувати не лише вимоги до різниці коефіцієнтів перетворення $K_I(\Delta\omega_S) - K_I(\omega \to 0)$, але й до смуги частот $\Delta\omega_S$.

Іншою важливою характеристикою, яка має бути предметом дослідження під час оптимізації конвертера, є паразитний вплив постійного рівня вхідного струму $I_{IN}(\omega \to 0)$ на стабільність імпедансу чи коефіцієнта перетворення в смузі робочих частот $K_I(\Delta\omega_S)$. Результати таких досліджень наведено на рис. 6.36.

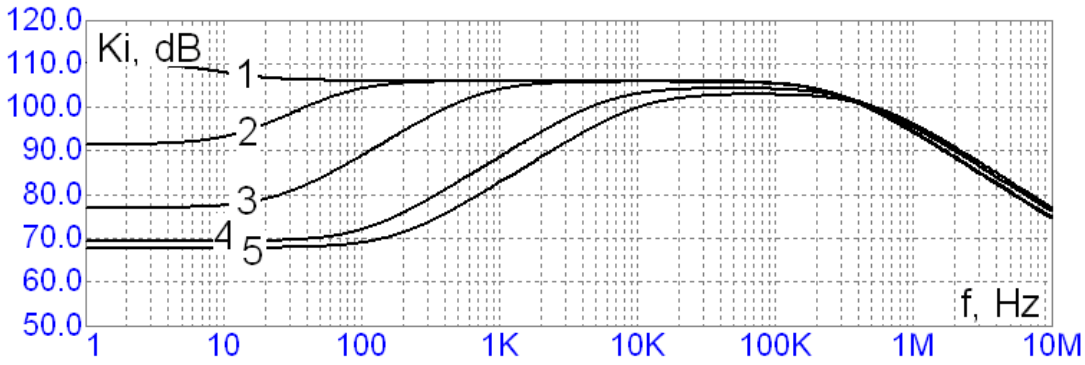



Рис. 6.36. АЧХ конвертера на транзисторному каскаді при:

$C_P$ = 0; $C_1$ = 70 n, $R_1$ = 200 k; $V_{DC}$= 0.1 u (1), 1 u (2), 10 u (3), 100 u (4), 200 u (5)

Відповідно до SPICE схеми заміщення (рис. 6.31, б) конвертера зміна постійного рівня струму задається відповідною зміною напруги $V_{DC}$ джерела Vdc (у цьому прикладі напруга 1 мкВ відповідає струму 1 мкА). Видно, що спостерігається критичне значення постійного рівня, при якому $K_I(\Delta\omega_S)$ виявляє деяку нестабільність, що недопустимо з погляду точності функціонування сенсорного пристрою. Таку нестабільність демонструють АЧХ (4) та (5), в яких $K_I(\Delta\omega_S)$ спадає приблизно на -2 дБ. Крім того, очевидним є вплив $I_{IN}(\omega \to 0)$ на ширину смуги робочих частот $\Delta\omega_S$.

Повертаючись до попередньо викладеного матеріалу, в ході аналізу функціональних схем конвертерів на ідеалізованих моделях керованих джерел струму чи повторювачів напруги паразитне явище впливу постійного рівня $I_{IN}(\omega \to 0)$ на $K_I(\Delta\omega_S)$ не спостерігалося, а відтак, не розглядалося [218].

В подальшому, під час аналізу конкретних схем конвертерів на реальній елементній базі вказане явище нестабільності $K_I(\Delta\omega_S)$ стане предметом детальнішого дослідження. Також будуть розглянуті методи компенсації цього явища. Приклад такої часткової компенсації показано, зокрема, на рис. 6.37. Позитивний ефект досягається використанням конденсатора шунтування $C_P$, що, обмежуючи високі частоти та забезпечуючи певний підйом АЧХ на частоті резонансу, частково компенсує зменшення $K_I(\Delta\omega_S)$ зі збільшенням постійного рівня вхідного струму $I_{IN}(\omega \to 0)$.

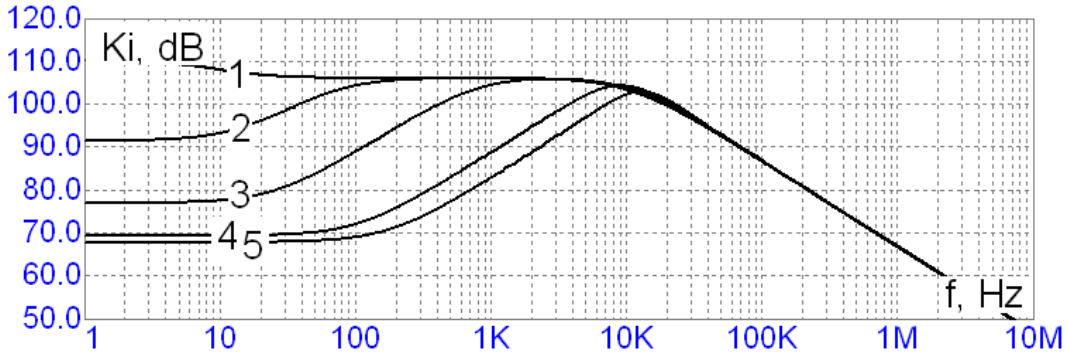



Рис. 6.37. АЧХ конвертера на транзисторному каскаді при: $C_P$ = 70 p; $C_1$ = 70 n, $R_1$ = 200 k; $V_{DC}$= 0.1 u (1), 1 u (2), 10 u (3), 100 u (4), 200 u (5)

Аналізуючи конвертери імпедансу на транзисторних каскадах, необхідно також дослідити обмеження смуги робочих частот, обумовлене високочастотними параметрами транзисторів та режимом їх роботи. Здебільшого наближену оцінку такого обмеження можна провести за граничною частотою $f_T$ коефіцієнта підсилення. При цьому важливо врахувати істотну залежність смуги робочих частот від струму емітера $I_E$. Приклад таких залежностей у логарифмічній шкалі K, дБ наведено на рис. 6.38.

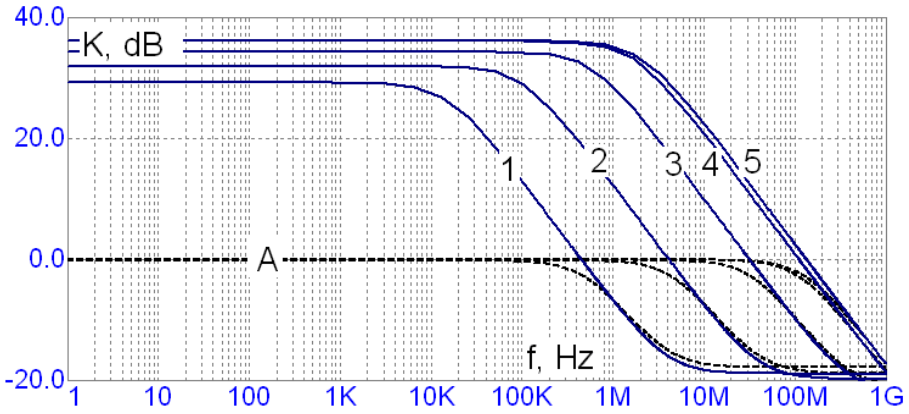



Рис. 6.38. АЧХ коефіцієнтів переносу (А) та коефіцієнтів підсилення транзистора при : $I_E = 10^{-6}$ А (1), $10^{-5}$ А (2), $10^{-4}$ А (3), $10^{-3}$ А (4), $10^{-2}$ А (5)

АЧХ (А) демонструють функції коефіцієнта переносу емітерного струму $\alpha = I_C / I_E$, $(\alpha(\omega \to 0) \approx 0{,}99)$, а АЧХ (1)..(5) – функції коефіцієнта підсилення базового струму $\beta = I_C / I_B$, $(\beta(\omega \to 0) \approx 100)$ при струмах емітера $10^{-6}$ А (1), $10^{-5}$ А (2), $10^{-4}$ А (3), $10^{-3}$ А (4), $10^{-2}$ А (5).

Проведений аналіз показує, що в деяких задачах оптимізації конвертера доцільніше використовувати параметри моделі транзистора, які характеризують паразитні ємності структури (ємності колекторного $C_C$ та емітерного $C_E$ p-n переходів) та час прольоту носіїв заряду через область бази $T_F$. При цьому важливо проводити порівняльний аналіз параметрів схеми з урахуванням реальних режимів роботи транзисторного каскаду.

Приклад схеми, за допомогою якої проводять такий порівняльний аналіз, наведено на рис. 6.39. Крім уже розглянутого конвертера на транзисторному

каскаді (Q1, R1,C1), схема місить каскад порівняння (Q2, Q3, R2), АЧХ вихідної напруги якого $V_A$ визначається виключно високочастотними параметрами транзисторів. Каскад порівняння реалізовано за схемою струмового дзеркала.

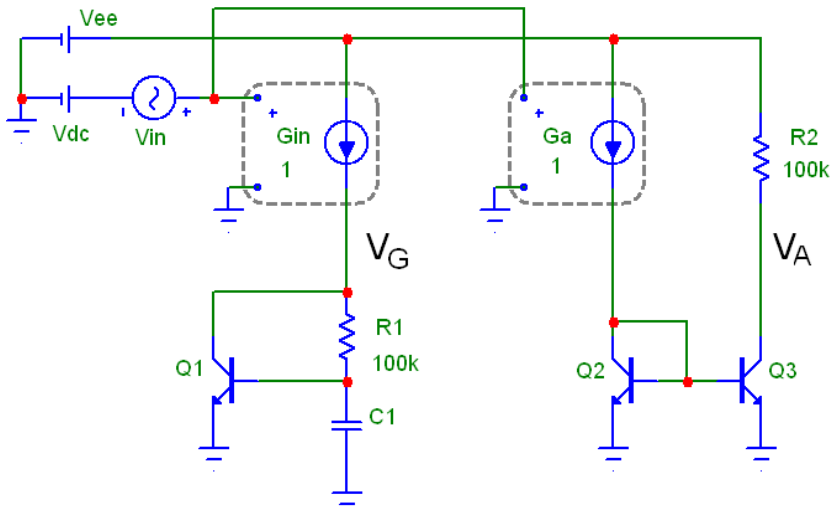



Рис. 6.39. Схема порівняльного дослідження частотних характеристик

Результати досліджень для деяких наборів параметрів ємностей $C_E$, $C_C$ $T_F$ транзисторної структури наведено на рис. 6.40 - 6.41 (АЧХ напруги $V_A$ зображено пунктирною лінією А).

Усі наведені на цих графіках АЧХ отримані при: $B_F$ =300; $C_1$ = 100 n (1), 10 n (2), 1 n (3), 100 p (4), 10 p (5). Спостерігається різний характер зміни АЧХ зі збільшенням ємностей структури транзистора. Так, збільшення ємності емітерного p-n переходу (з $C_E$ = 1 пФ, рис. 6.40 до з $C_E$ = 10 пФ, рис. 6.42) призводить до більшої крутизни спадання АЧХ (пунктирна лінія А) в каскаді порівняння (Q2, Q3, R2), однак АЧХ каскаду конвертера (зокрема, суцільна лінія 5) отримує додаткове підвищення на високих частотах (від 1 МГц до 10 МГц). Натомість, збільшення ємності колекторного p-n переходу з $C_C$ = 1 пФ (рис. 6.40) до з $C_C$ = 10 пФ (рис. 6.42) призводить до істотного спадання АЧХ вихідної напруги як каскаду порівняння, так і досліджуваного конвертера. Пояснюється таке явище значним впливом ємності колекторного p-n переходу на колекторну (вихідну) напругу транзисторного каскаду.

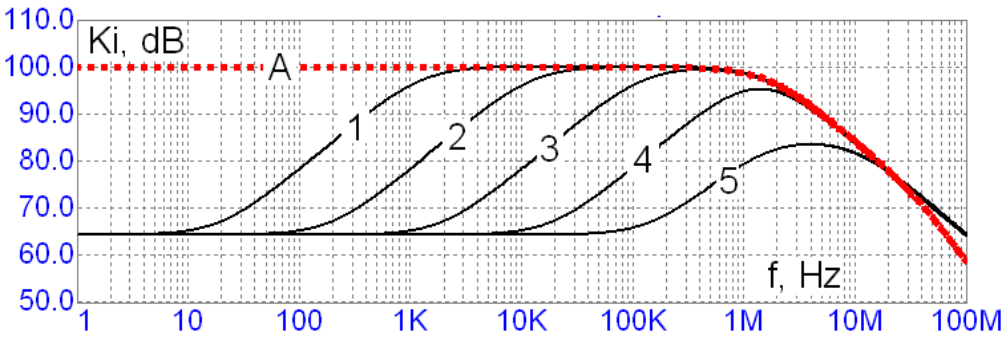



Рис. 6.40. Порівняння АЧХ при $C_E$ = 1 p, $C_C$ = 1 p, $T_F$ = 1 ns

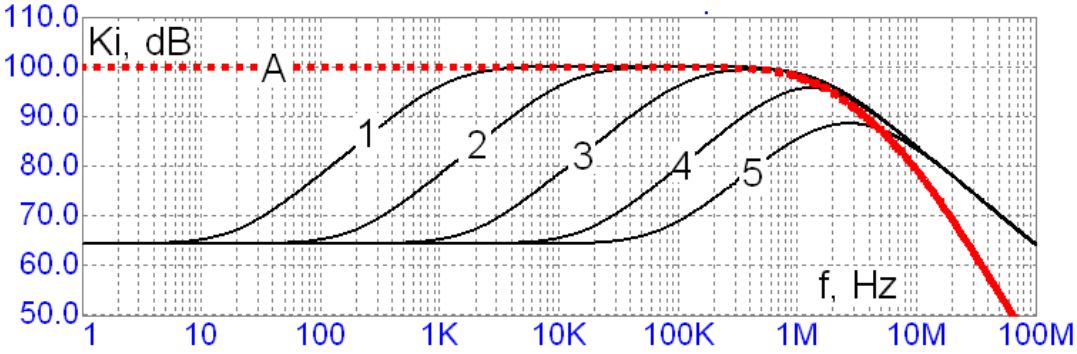



Рис. 6.41. Порівняння АЧХ при $C_E$ = 10 p, $C_C$ = 1 p, $T_F$ = 1 ns

Задачею структурно-параметричного модифікування є аналіз схемних рішень транзисторних каскадів для покращення характеристик конвертерів імпедансу. Такий аналіз здебільшого проводиться з метою підвищення коефіцієнта підсилення (коефіцієнта перетворення $K_I$), крутизни АЧХ (селективності) та стабілізації корисної (змінної) складової при значних змінах паразитної (постійної) складової сигналу оптоелектронного сенсора.

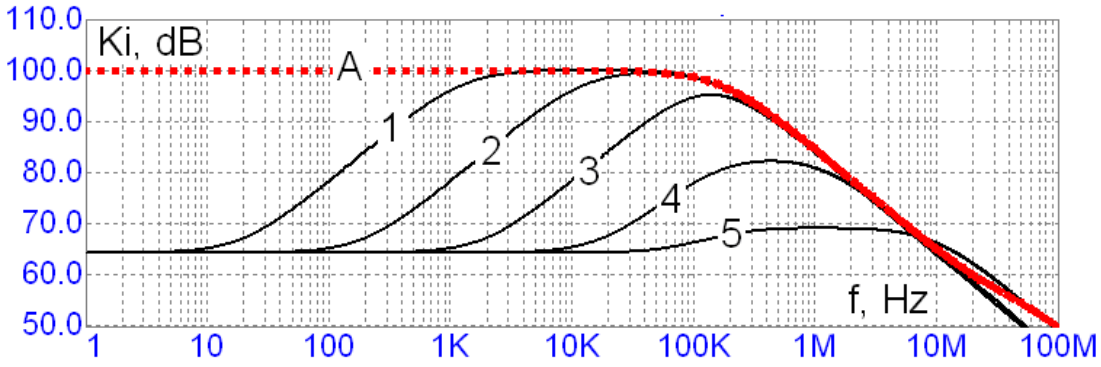



Рис. 6.42. Порівняння АЧХ при $C_E$ = 1 p, $C_C$ = 10 p, $T_F$ = 1 ns

Способи підвищення коефіцієнта перетворення $K_I$ конвертерів імпедансу

на транзисторних каскадах забезпечуються схемами на складених транзисторах. Перший спосіб передбачає використання транзисторного каскаду Дарлінгтона. На рис. 6.43 показано схему порівняльного дослідження частотних характеристик елементарного конвертера (транзистор $Q_1$, вихідна напруга – $V_{GA}$) та конвертера на каскаді Дарлінгтона (транзистори $Q_1$ та $Q_2$, вихідна напруга – $V_{GB}$).

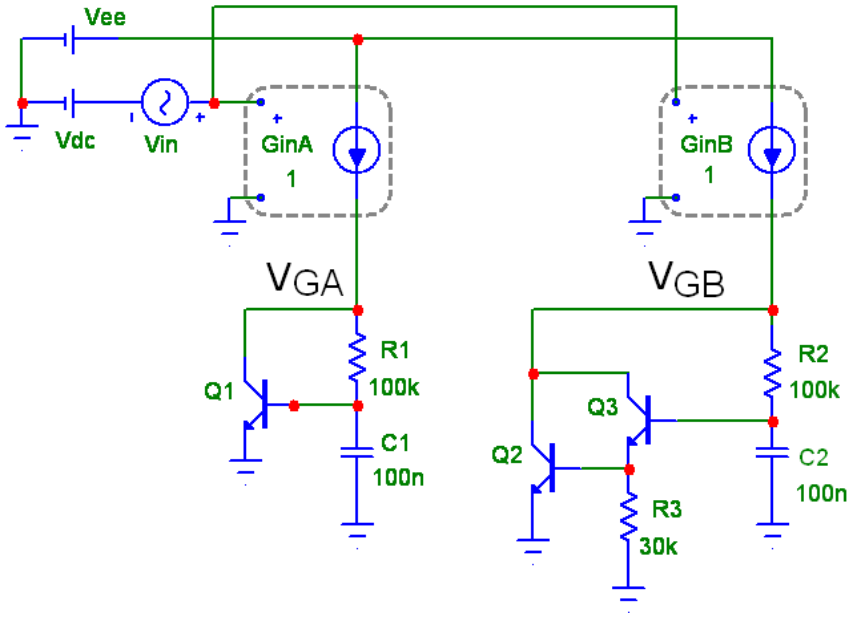



Рис. 6.43. Схема порівняльного дослідження частотних характеристик елементарного конвертера ($V_{GA}$) та конвертера на каскаді Дарлінгтона ($V_{GB}$)

Результат дослідження показано на рис. 6.44, де графіки «А» - це АЧХ елементарного конвертера, а графіки «В» - АЧХ конвертера на каскаді Дарлінгтона. Для більшої наочності дослідження проводилися при низьких значеннях коефіцієнта підсилення транзисторів $B_F = 30$. Для обох конвертерів показано АЧХ при чотирьох значеннях постійного рівня струму $I_{IN}(\omega \to 0)$ = 1 u (1), 30 u (2), 100 u (3) та 300 u (4). Видно позитивний ефект – у схемі на каскаді Дарлігтона забезпечується більша різниця коефіцієнтів перетворення $K_I(\Delta\omega_S) - K_I(\omega \to 0)$. Зокрема, при $I_{IN}(\omega \to 0)$ = 300 u (4) вказана різниця в схемі елементарного конвертера становить 100-52 = 48 дБ, а в схемі на каскаді Дарлігтона - 100-40 = 60 дБ.

Однак використання схеми на каскаді Дарлігтона обумовлює звуження смуги робочих частот. У пристроях із фіксованою частотою корисного сигналу (зокрема, для даного прикладу f = 30 кГц) таке звуження забезпечує перевагу – підвищується селективність. Натомість, У пристроях із широким спектром робочих частот таке рішення є проблематичним.

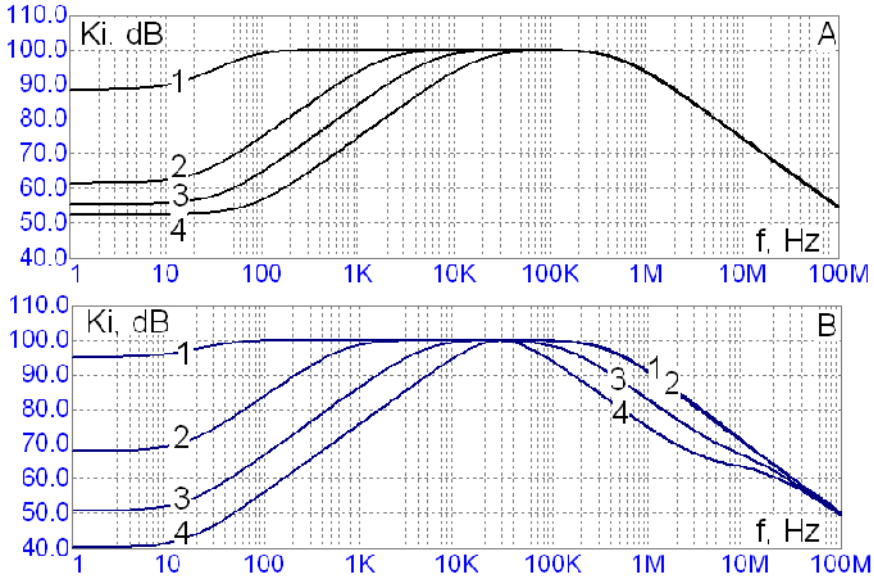



Рис. 6.44. Порівняння АЧХ елементарного конвертера (А) та конвертера на каскаді Дарлігтона (В) при $I_{IN}(\omega \to 0)$ = 1 u (1), 30 u (2), 100 u (3) та 300 u (4)

Другий спосіб підвищення коефіцієнта перетворення $K_I$ базується на використанні попереднього підсилювача струму. Для зменшення структурних затрат таке рішення реалізується каскадом на доповнювальних (комплементарних) за типом провідності транзисторах (рис. 6.45), зокрема, попередній підсилювач струму – на n-p-n транзисторі ($Q_2$), а конвертер імпедансу – на p-n-p транзисторі ($Q_3$). Результат дослідження АЧХ (зокрема, рис. 6.46) показує, що мають місце ті самі закономірності, які були показані в схемі на каскаді Дарлігтона – підвищення коефіцієнта передачі та звуження смуги робочих частот. Відмінністю є той факт, що ФЧХ у схемі з попереднім підсиленням на доповнювальних за типом провідності транзисторах має зміщення на 180 ° (крива «В»). Це пояснюється інверсією сигналу в каскаді підсилення струму.

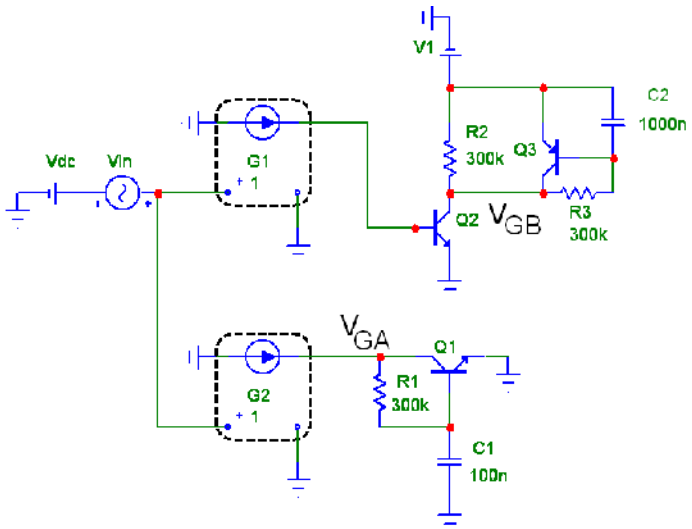



Рис. 6.45. Схема порівняльного дослідження частотних характеристик елементарного конвертера ($V_{GA}$) та конвертера з попереднім підсиленням ($V_{GB}$)

В обох розглянутих способах підвищення коефіцієнта $K_I$ проблемою є певна нестабільність функції перетворення, зокрема залежність $K_I$ від $B_F$ транзисторів та режимів роботи схеми. Мова про таку проблему та її вирішення піде далі.

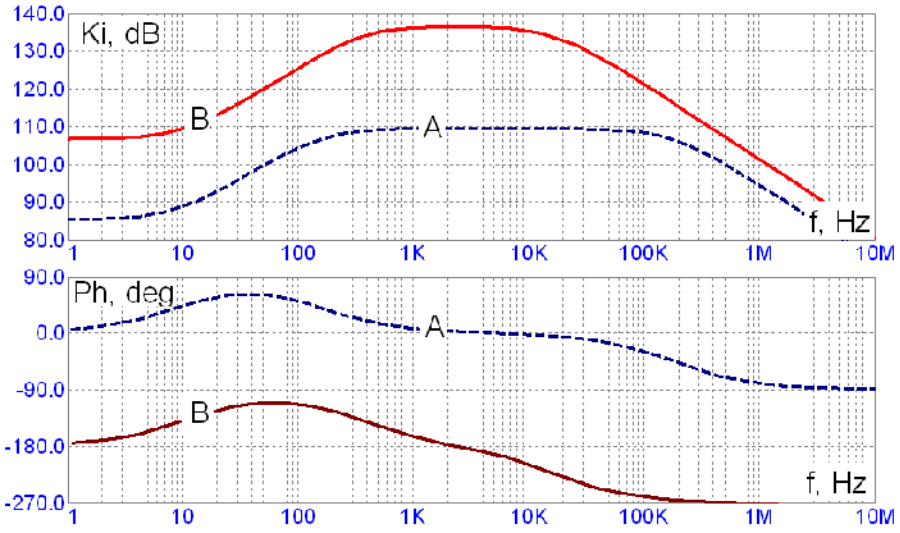



Рис. 6.46. Порівняння АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) елементарного конвертера (А) та конвертера з попереднім підсиленням струму (В)

Підвищення селективності конвертерів імпедансу, як уже відзначалося під час розгляду функціональних схем, досягається використанням фільтрів вищих порядків. Приклад реалізації схеми конвертера з активним фільтром другого

порядку наведено на рис. 6.47 (вихідна напруга – $V_{GB}$). Схему утворюють транзистор $Q_2$ та RC кола – $R_2$, $R_3$, $R_4$, $C_2$, $C_3$, $C_4$. Використовується вже розглянуте на рис. 6.24 рішення з повторювачем напруги, який виконує функцію як додатного зворотного зв'язку конвертера, так і активного елемента фільтра другого порядку.

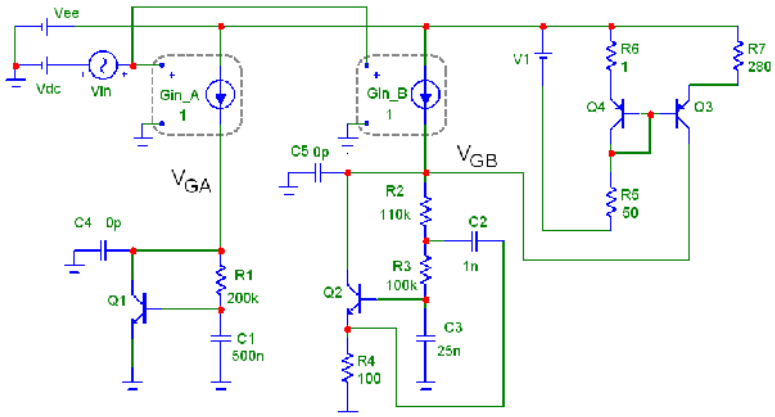



Рис. 6.47. Базовий варіант схеми конвертера (зліва) та схема конвертера з активним фільтром другого порядку та каскадом стабілізації (справа)

Схему конвертера доповнено каскадом температурної стабілізації на $Q_4$, $Q_5$, $R_5$, $R_6$, $R_7$, $V_1$, мова про призначення та ефективність функціонування якого піде далі. Для порівняльного аналізу на схемі також наведено базовий варіант конвертера на $Q_1$, $R_1$, $C_1$, C4 (вихідна напруга - $V_{GA}$).

Порівняння результатів дослідження АЧХ та ФЧХ конвертера другого порядку (криві В) та базового варіанту (криві А) при $C_4$ =0, $C_5$ = 0 наведено на рис. 6.48, а при $C_4$ =30 р, $C_5$ = 30 р – на рис. 6.49. Ці результати підтверджують високу ефективність функціонування запропонованого конвертера, зокрема підвищення значення крутизни АЧХ (до 40 дБ на декаду) та коефіцієнта перетворення (до 140 дБ) на резонансній частоті (в цьому варіанті – 10 кГц).

Каскад стабілізації, реалізований на температурозалежному струмовому дзеркалі ($Q_4$, $Q_5$, $R_5$, $R_6$, $R_7$, $V_1$), призначений для мінімізації паразитного впливу температури T та постійного рівня вхідного струму $I_{IN}(\omega \to 0)$ на стабільність коефіцієнта перетворення в смузі робочих частот $K_I(\Delta\omega_S)$. Зокрема, вплив

постійного рівня $I_{IN}(\omega \to 0)$ на АЧХ конвертерів уже розглядався раніше (рис. 6.36 ).

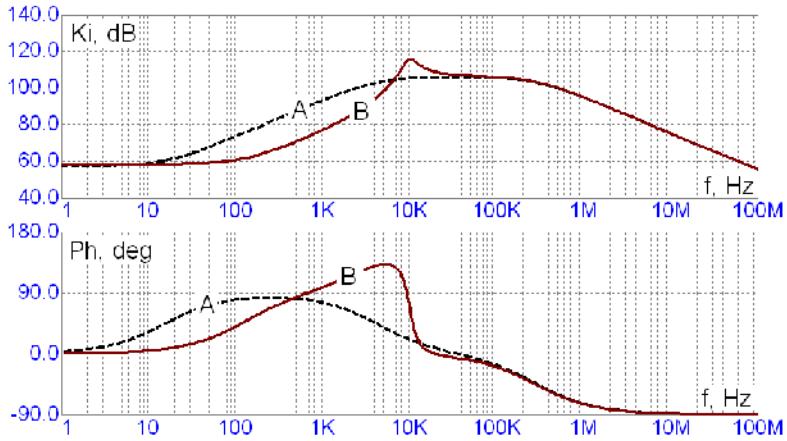



Рис. 6.48. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера з активним фільтром другого порядку при $C_4$ =0, $C_5$ = 0

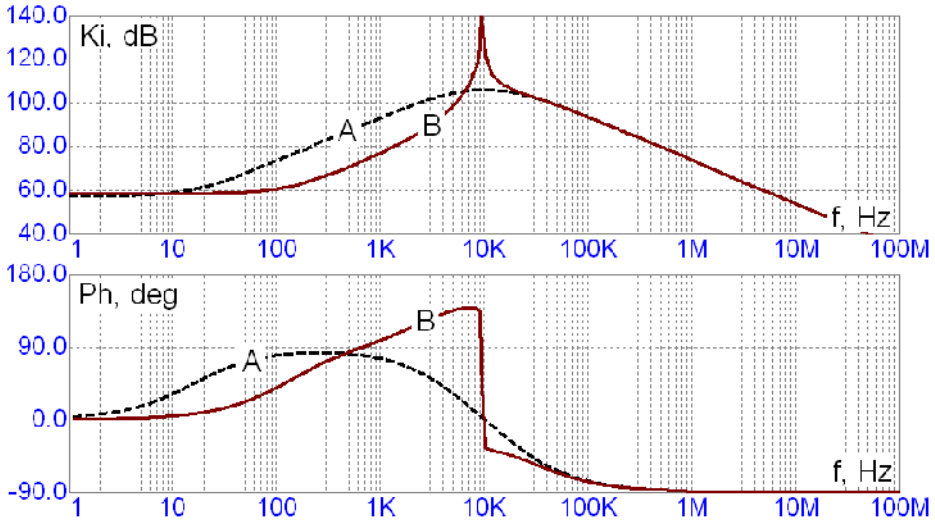
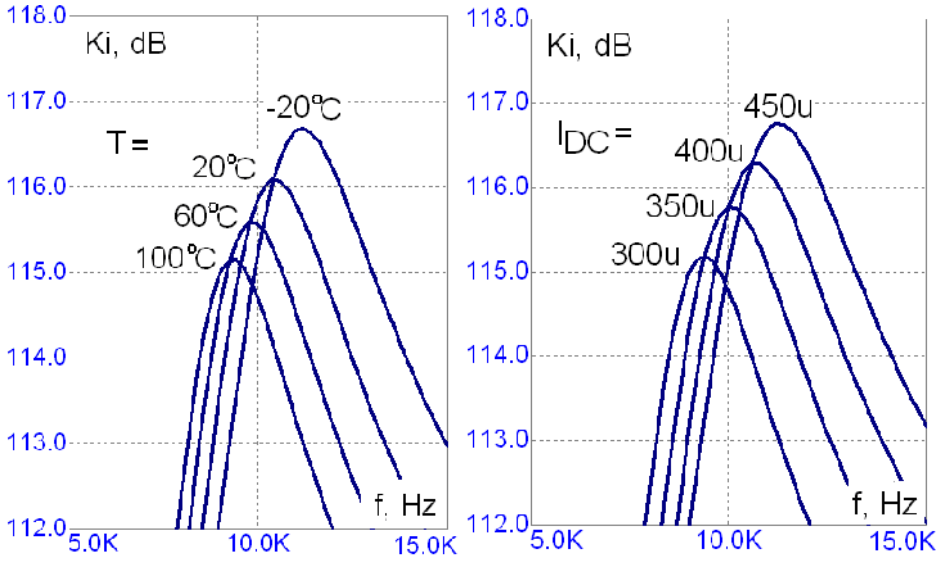



Рис. 6.49. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера з активним фільтром другого порядку при $C_4$ =30 p, $C_5$ = 30 p

У ході проведених досліджень нами було показано, що стабілізація АЧХ досягається додатковим зміщенням конвертера джерелом температурозалежного струму, який мінімізує температурний дрейф імпедансу та його паразитну модуляцію постійним рівнем вхідного сигналу [220,221].

Для досягнення такої стабілізації проводять дослідження дрейфу АЧХ при зміні температури T та початкового зміщення $I_{DC}$. Приклад результатів таких досліджень показано на рис. 6.50. Видно, що збільшення температури від -20°C

до 100°C призводить, по-перше, до зменшення частоти резонансу з 12 кГц до 9 кГц і, по-друге, до спадання коефіцієнта передачі $K_I$ з 116.7 дБ до 115.1 дБ (рис. 6.50, а).

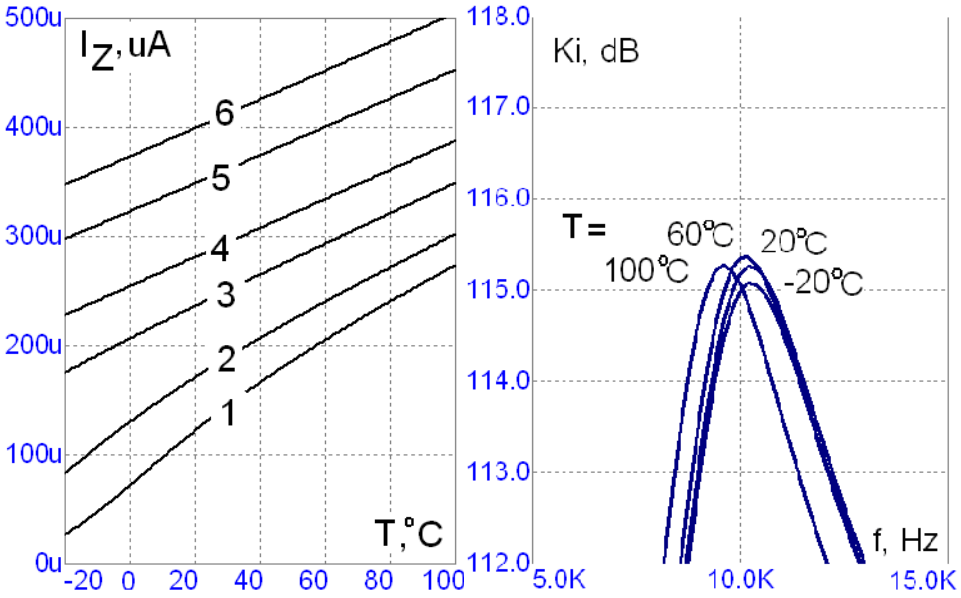



а) б)

Рис. 6.50. Дрейф АЧХ в точці резонансу при зміні температури T (а) та постійного рівня струму $I_{DC}$ (б)

Приблизно такий самий дрейф АЧХ спостерігається при зменшенні постійного рівня струму $I_{DC}$ з 450 мкА до 300 мкА (рис. 6.50, б). Отже, стабілізація АЧХ конвертера передбачає оптимізацію режимів роботи температурозалежного струмового дзеркала, в результаті якої з ростом температури від -20°C до 100°C струм $I_{DC}$ зростає в зворотному напрямку з 300 мкА до 450 мкА.

Схема струмового дзеркала реалізована так, що температурний коефіцієнт вихідного струму $I_Z$ характеризується відповідною залежністю від напруги опорного джерела $V_1$. Цю залежність показано на рис. 6.51, а. Видно, зокрема, що збільшення значення опорної напруги $V_1$, зумовлюючи збільшення вихідного струму $I_Z$, водночас призводить до зменшення його похідної за температурою $dI_Z / dT$. У результаті оптимізації опорної напруги (в наведеному прикладі оптимальне значення становить$V_1$ = 1.105 В) досягають, як показано на рис. 6.51, б, температурної стабілізації АЧХ на рівні ±0.1 дБ.




а) б)

Рис. 6.51. Температурна залежність $I_Z$ при $V_1$ = 0.65 В (1), 0.7 В (2), 0.8 В (3), 0.9 В (4), 1.105 В (5), 1.3 В (6) (а) та АЧХ після оптимізації опорної напруги (б)

### 6.5. Розроблення конвертерів імпедансу на операційних підсилювачах

Висока ефективність реалізації конвертерів імпедансу забезпечується схемами на операційних підсилювачах. Базові варіанти таких схем, гіратори на операційних підсилювачах, є добре відомими [98-101]. Аналізуючи можливість побудови сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорів на гіраторах та проводячи їхній структурно-параметричний аналіз, нами були визначені задачі подальшого розвитку конвертерів імпедансу [220- 222]. Такими задачами є:

– параметричний аналіз конвертерів імпедансу з урахуванням реальних характеристик операційних підсилювачів;
– схемна модифікація конвертерів на операційних підсилювачах для підвищення їхньої селективності;
– аналіз можливості реалізації та дослідження параметрів конвертерів на широкосмугових підсилювачах зі струмовим зворотним зв’язком.

Параметричний аналіз схем на операційних підсилювачах базується на SPICE моделях трьох рівнів (найпростіша модель – Level = 1, модель середнього рівня – Level = 2 та модель найвищого рівня -Level = 3) та схемах

заміщення (SUBCKT), які враховують специфіку тієї чи іншої структурно-схемної реалізації операційного підсилювача. Розглянемо типові приклади параметричного аналізу конвертерів імпедансу з використанням відповідних моделей та схем заміщення.

Схема дослідження базового варіанту конвертера імпедансу на операційному підсилювачі наведена на рис. 6.52. Конвертер базується на вищерозглянутій схемі з резистивним зворотним зв'язком і описується системою рівнянь (6.3). У першому наближенні частотна залежність імпедансу визначається рівнянням (6.4). Роль повторювача напруги виконує операційний підсилювач ХОА. Частотну характеристику конвертера задає конденсатор С1. Коефіцієнт перетворення на високих частотах $K_I(f \to \infty)$ визначається опором резистора $R_1$, а на низьких частотах $K_I(f \to 0)$ – опором резистора $R_2$. Конденсатор $C_P$ шунтує вхідне коло конвертера (вузол $V_G$), що, як уже згадувалося раніше, забезпечує частотну селекцію схеми.

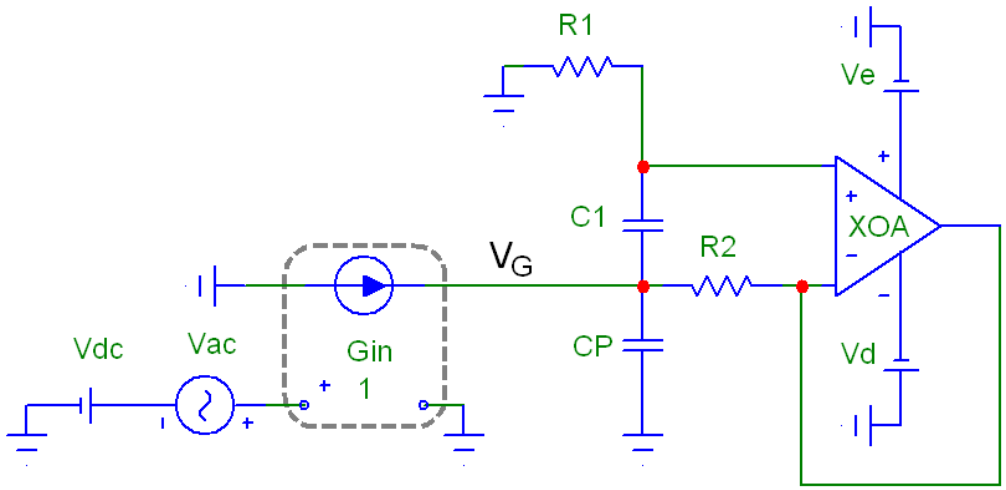



Рис. 6.52. Базовий варіант схеми конвертера на операційному підсилювачі

Результати параметричних досліджень такого конвертера з використанням найпростішої SPICE моделі Level = 1 (рис. 6.53– 6.55) збігаються з відповідними результатами досліджень конвертера з ідеалізованим з резистивним зворотним зв'язком (рис. 6.20– 6.23). Дослідження проводилися без урахування впливу шунтувального конденсатора ($C_P = 0$). Видно, зокрема, що інверсія імпедансу, тобто його індуктивний характер, виникає за умови

$R_1 > R_2$. Крутизна наростання АЧХ становить 20 дБ на декаду. Якщо вказана умова не виконується, імпеданс має ємнісний характер, а при $R_1 = R_2$ в першому наближенні АЧХ та ФЧХ є частото-незалежними.

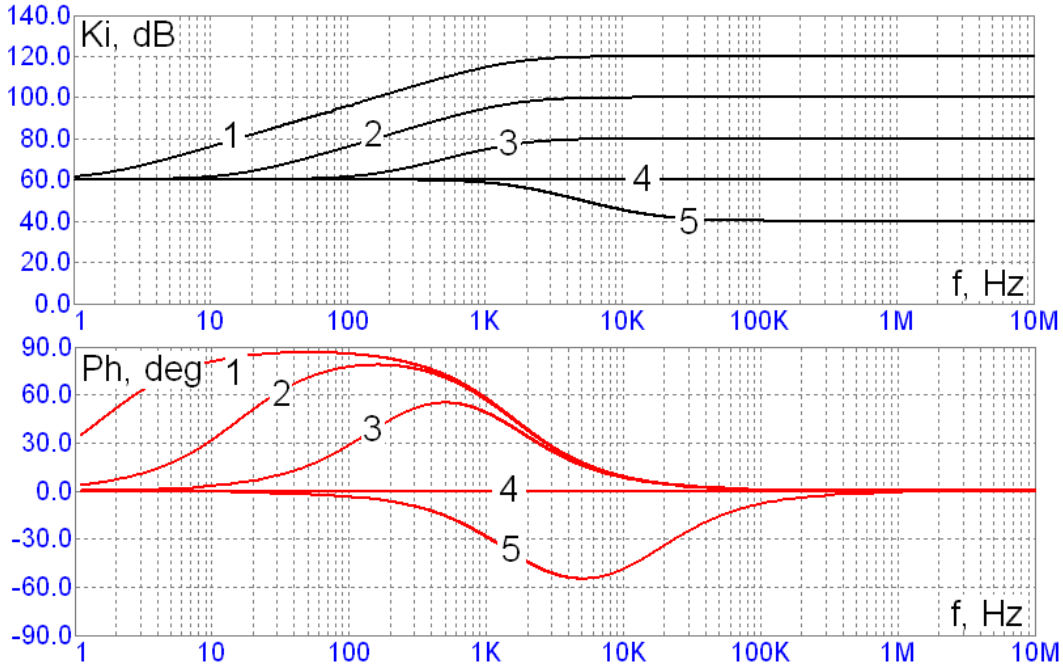



Рис. 6.53. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при: Level =1; $R_2$ = 1 k; $C_P$ = 0; $C_1$ = 100 n; $R_1$ = 100 (5), 1 k (4), 10 k (3), 100 k (2), 1000 k (1)

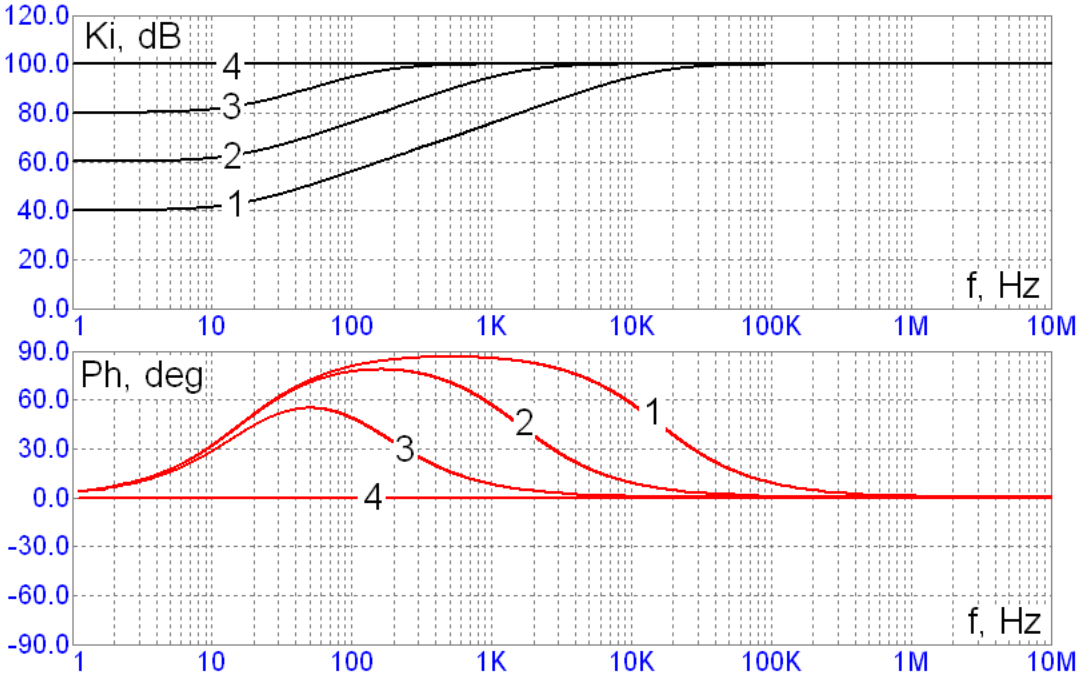



Рис. 6.54. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при: Level = 1; $R_1$ = 100 k; $C_P$ = 0; $C_1$ = 100 n; $R_2$ = 100 (1), 1 k (2), 10 k (3), 100 k (4)

Показано, що на високих частотах коефіцієнт передачі $K_I$ чисельно дорівнює значенню опору $R_1$, зокрема при $R_1 = 10^5$ Ом коефіцієнт дорівнює $K_I = 100$ дБ, що відповідає $K_I = 10^5$ В / А. Натомість, на низьких частотах $K_I$ чисельно дорівнює значенню опору $R_2$, зокрема при $R_2 = 10^2$ Ом коефіцієнт дорівнює $K_I = 40$ дБ, що відповідає $K_I = 10^2$ В / А.

Результати аналізу з використанням моделей Level = 1 у повній мірі відтворюють функціональність схеми конвертера, однак такий аналіз не враховує реальних, насамперед частотних характеристик операційних підсилювачів.

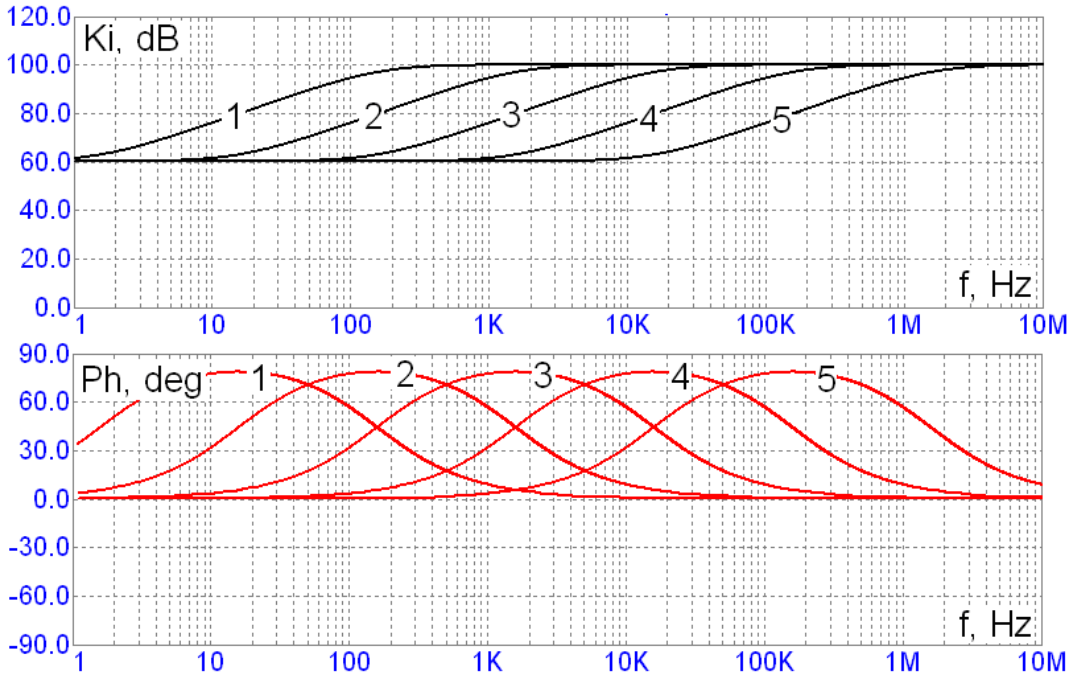



Рис. 6.55. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при: Level = 1; $R_1$ = 100 k; $R_2$ = 1 k; $C_P$ = 0; $C_1$ =0.1 n (5), 1 n (4), 10 n (3), 100 n (2), 1000 n (1)

Основним параметром SPICE моделей операційних підсилювачів, що відповідає за їхню частотну характеристику в малосигнальному аналізі є ширина смуги робочих частот при одиничному коефіцієнті підсилення GBW (Unitygain Band Width). Крім того, в ході параметричного аналізу з урахуванням швидкості наростання/спадання вихідної напруги необхідно врахувати параметри моделей - SRP (Maximum Positive Slew Rate ) та SRN (Maximum Negative Slew Rate). Розмірність цих параметрів – В / с.

У такому аналізі частотних характеристик використовуються моделі Level = 2 та Level = 3. Приклади дослідження АЧХ та ФЧХ конвертерів імпедансу на операційних підсилювачах з використанням моделі Level 3 наведено на рис. 6.56– 6.58.

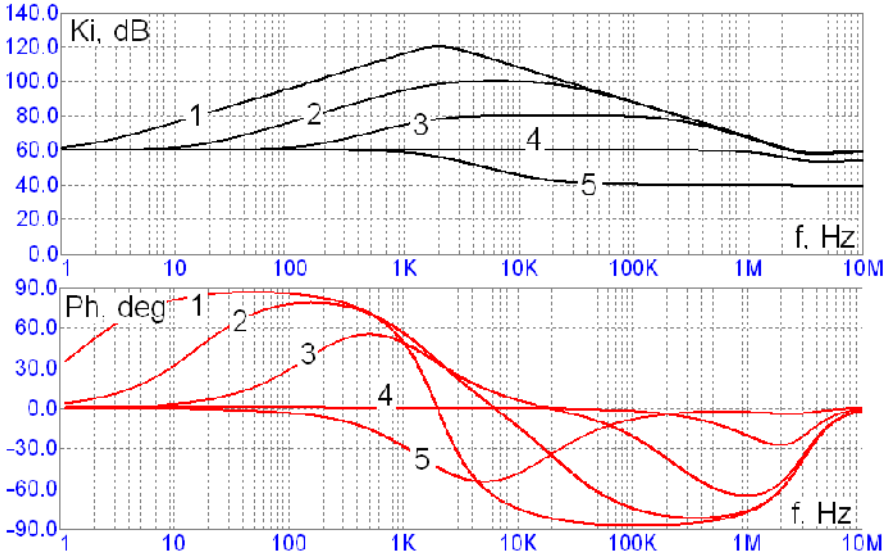



Рис. 6.56. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) базового варіанту конвертера при: Level =3; $R_2$ = 1 k; $C_1$ = 100 n; $R_1$ = 100 (5), 1 k (4), 10 k (3), 100 k (2), 1000 k (1)

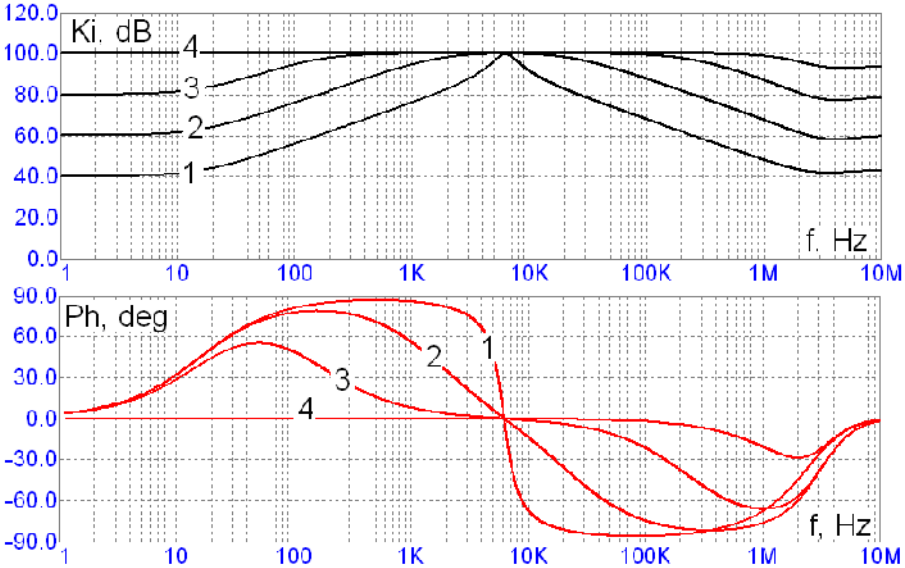



Рис. 6.57. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) базового варіанту конвертера при: Level = 3; $R_1$ = 100 k; $C_1$ = 100 n; $R_2$ = 100 (1), 1 k (2), 10 k (3), 100 k (4)

Дослідження проводилися при $C_P$ = 0, GBW = $2.5 \cdot 10^6$, SRP = SRN = $5 \cdot 10^6$. Видно, що в результаті обмеження смуги робочих частот операційного

підсилювача спостерігається, по-перше, обмеження максимального значення різниці коефіцієнтів перетворення $K_I(\Delta\omega_S) - K_I(\omega \to 0)$ і, по-друге, резонансний характер частотної характеристики. На частоті резонансу (дослідження проводилися без урахування ємності $C_P$) відбувається різке спадання ФЧХ з додатних значень з індуктивним характером імпедансу до від'ємних значень з ємнісним характером імпедансу.

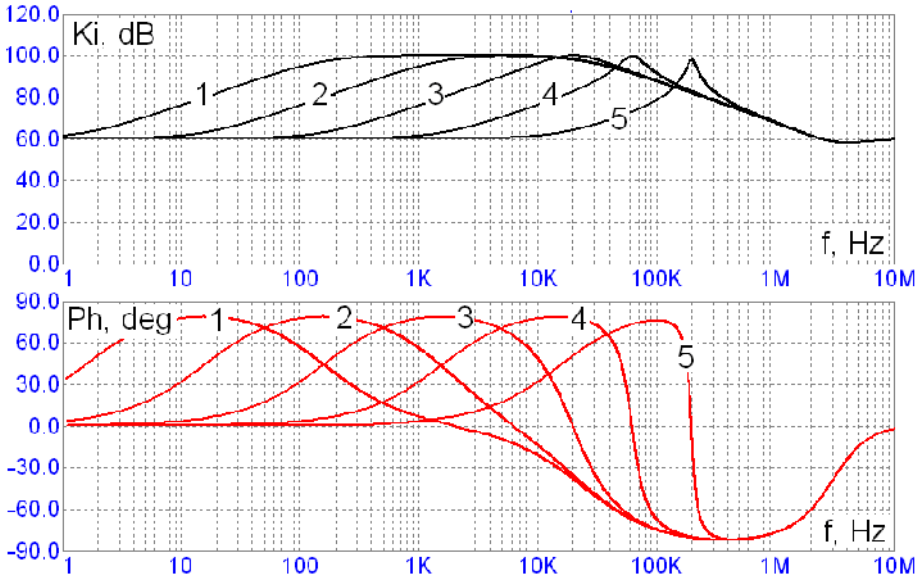



Рис. 6.58. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) базового варіанту конвертера при: Level = 3; $R_1$ = 100 k; $R_2$ = 1k; $C_1$ =0.1 n (5), 1 n (4), 10 n (3), 100 n (2), 1000 n (1)

Отже, нами показана можливість та ефективність побудови частотно-селективних схем конвертерів імпедансу, в яких, на противагу до раніше розглянутих схем, резонансна характеристика реалізується без шунтувального конденсатора $C_P$ і формується на ділянці спадання АЧХ операційного підсилювача. Результати досліджень показують, що в точці резонансу модуль крутизни АЧХ може досягати 20 дБ на октаву (при зміні частоти вдвічі).

Для більшості операційних підсилювачів крутизна спадання АЧХ (у смузі частот з високими значеннями коефіцієнтів підсилення $K_V$ за напругою) становить мінус 20 дБ на декаду. Отже, залежність граничного значення $K_{VF}$ (в дециБелах) від частоти f на ділянці спадаючої АЧХ можна визначити за рівністю

$$K_{VF}(f) = -20 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{f}{GBW}\right) = 20 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{GBW}{f}\right).$$

Розглянемо наведене на рис. 6.59 співставлення результатів модельних досліджень АЧХ конвертера та традиційного підсилювача (без реактивних елементів у колі зворотного зв'язку) з використанням моделі Level = 3 (GBW =2.5MEG). Для конвертера представлені АЧХ при $R_1$ = 100 k; $C_1$ = 10 n; $R_2$ = 100 (1A), 1 k (2A), 10 k (3A), 100 k (4A), а для підсилювача - АЧХ при коефіцієнтах підсилення $K_V$ = 1 (4B), 10 (3B), 100 (2B), 1000 (1B). Видно, що резонансний характер АЧХ конвертера проявляється при накладанні ділянки наростаючої АЧХ конвертера на ділянку спадаючої АЧХ підсилювача.

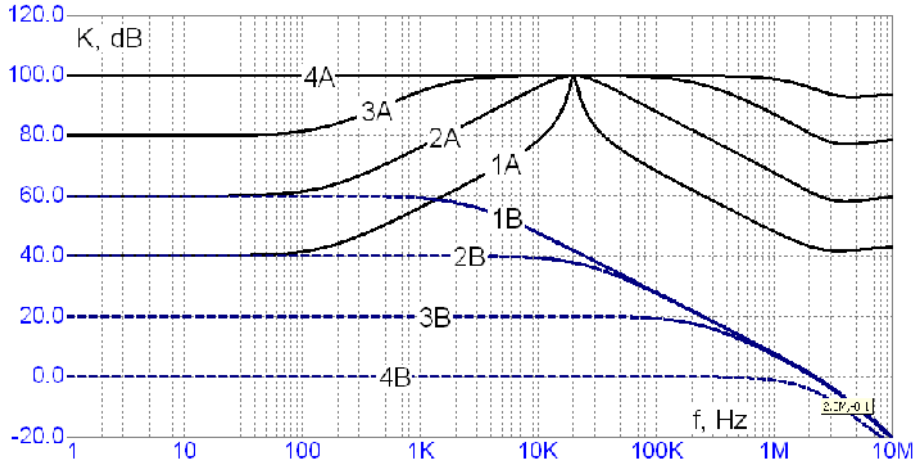



Рис. 6.59. Співставлення АЧХ конвертера (криві 1A…4A) та підсилювача при $K_V$ = 1 (4B), 10 (3B), 100 (2B), 1000 (1B)

Аналіз показує, що спадаючу ділянку АЧХ підсилювача можна зобразити еквівалентною ємністю

$$C_{EP} = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot GBW}.$$

Відтак, це значення еквівалентної ємності може використовуватися для наближеного розрахунку частотно-селективних схем конвертерів імпедансу на ділянці спадаючої АЧХ операційного підсилювача.

Для підтвердження такої можливості були проведені модельні дослідження сімейства частотних характеристик конвертера при наборі значень ємності $C_P$ без урахування АЧХ операційного підсилювача (Level = 1). Ці

характеристики були порівняні з частотною характеристикою конвертера без конденсатора при $C_P$ ($C_P$ = 0) при заданому значенні ширини смуги частот GBW (Level = 3). Результат порівняння наведено на рис. 6.60. Криві 1…4 зображають сімейство частотних характеристик при: Level =1; $C_1$ = 10 n; $R_1$ = 100 k; $R_2$ = 100; $C_P$ = 0 (4), 0.1 n (3) , 1.6 n (2), 10 n (4). Натомість, крива A отримана при: Level =3; GBW = $10^6$; $C_1$ = 10 n; $R_1$ = 100 k; $R_2$ = 100; $C_P$ = 0.

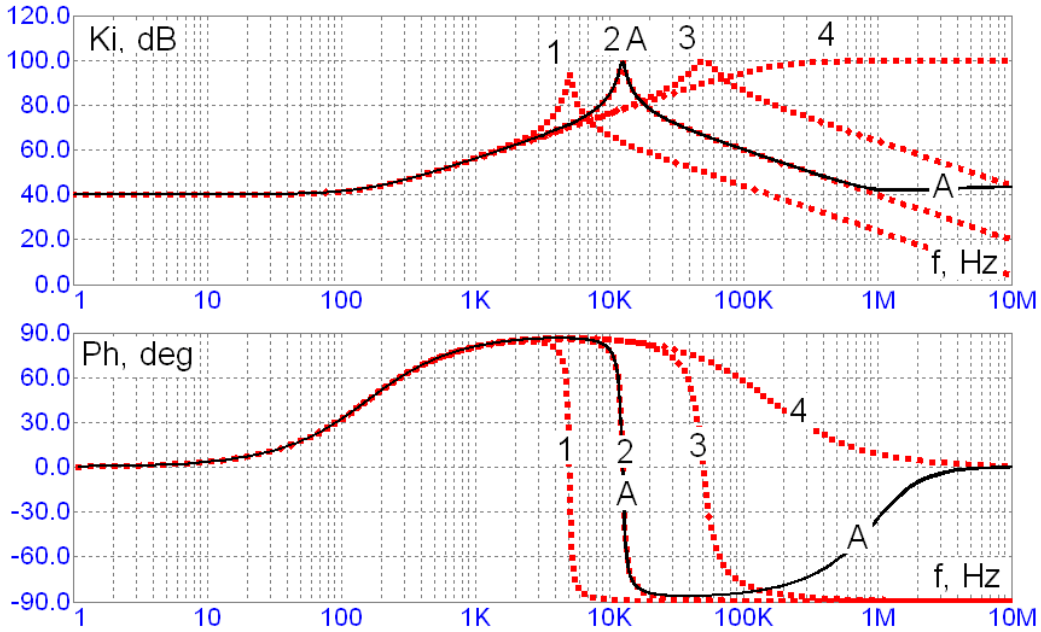



Рис. 6.60. Порівняння АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) при: пунктирні лінії - Level =1, $C_1$ = 10 n, $R_1$ = 100 k, $R_2$ = 100, $C_P$ = 0 (4), 0.1 n (3) , 1.6 n (2), 10 n (4); суцільні лінії -Level =3, GBW = $10^6$, $C_1$ = 10 n, $R_1$ = 100 k, $R_2$ = 100, $C_P$ = 0 (A)

Можна бачити, що в смузі робочих частот при $R_2$ = 100, GBW = $10^6$ криві (2) та (A) повністю збігаються при значенні еквівалентної ємності

$$C_{EP} = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot GBW} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^2 \cdot 10^6} \approx 1.59 \cdot 10^{-9}\ \Phi.$$

Для вказаних параметрів резонанс спостерігається на частоті приблизно 12 кГц. Підтвердженням коректності функціонування схеми є різка зміна фазової затримки поблизу цієї частоти з плюс 90° до мінус 90°.

Все це підтверджує представлену можливість формування резонансних схем селективних конвертерів імпедансу на спадаючій ділянці частотної

характеристики операційних підсилювачів та коректність аналогії з використанням еквівалентної ємності $C_{EP}$.

Як було зазначено раніше, ефективна реалізація сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорів передбачає використання конвертерів імпедансу другого порядку. Розглянемо реалізацію та характеристики такого конвертера на операційному підсилювачі з резистивним додатним зворотним зв'язком.

Для порівняльного дослідження частотних характеристик на рис. 6.61 наведено схеми конвертера першого та другого порядків. Конвертер першого порядку (аналогічно до рис. 6.52) реалізовано на $XOA_2$, $R_4$, $R_5$, $C_3$ (вихідна напруга $V_A$), а другого порядку (аналогічно функціональної схеми рис. 6.24) – на $XOA_1$, $R_1$, $R_2$, $C_1$, $C_2$ (вихідна напруга $V_G$). Новизною конвертера другого порядку є використання операційного підсилювача для формування додатного зворотного зв'язку відразу по двох колах. Перше коло, аналогічно до елементарної схеми гіратора на операційному підсилювачі, повторює напругу на резисторі $R_2$, а друге, аналогічно до фільтра Селена-Кея, – на резисторі $R_3$.

Приклади результатів порівняльного дослідження конвертерів наведено на рис. 6.62, де крива (A) відображає частотну характеристику конвертера першого порядку, а криві (1)…(4) - конвертера другого порядку при $R_3$ = 100 (4), 1 k (3), 10 k (2), 100 k (1). Дослідження проводилися при: GBW=$10^7$; $C_1 = C_2 = C_3$ = 100 n; $R_1 = R_4$ = 1000 k; R2 = R5 = 1 k. Видно, що конвертер другого порядку не тільки підвищує крутизну частотної характеристики, але й забезпечує режекцію частоти на межі між смугою придушення та смугою пропускання.

Така властивість особливо актуальна в задачах побудови завадостійких сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорів з режекцією електромагнітної завади на частоті енергетичної мережі. Приклад оптимізованої частотної характеристики конвертера другого порядку з режекцією на частоті 50 Гц наведено на рис. 6.63. Показано, що відповідним способом оптимізована схема (при $R_1$ = 1000 k; $R_2$ = 1 k; $R_3$ = 100; $C_1 = C_2$ = 320 n) забезпечує значне зниження імпедансу (коефіцієнта перетворення $K_I$) на

частоті режекції $K_I(f = 50\ Гц) \approx 30$ дБ відносно частоти корисного сигналу $K_I(f = 2{,}2\ кГц) \approx 120$ дБ.

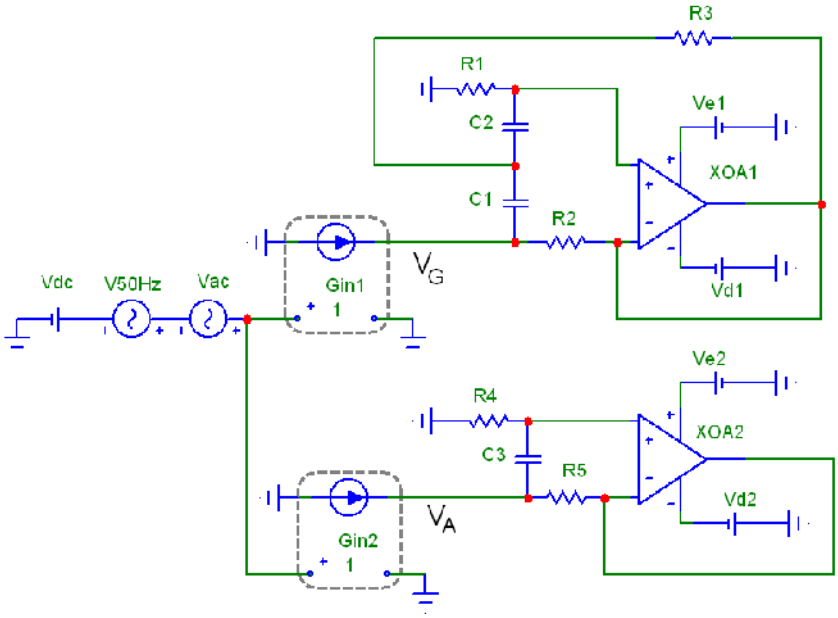



Рис. 6.61. Схема конвертерів першого (знизу) та другого (зверху) порядку на операційних підсилювачах з резистивним додатним зворотним зв’язком

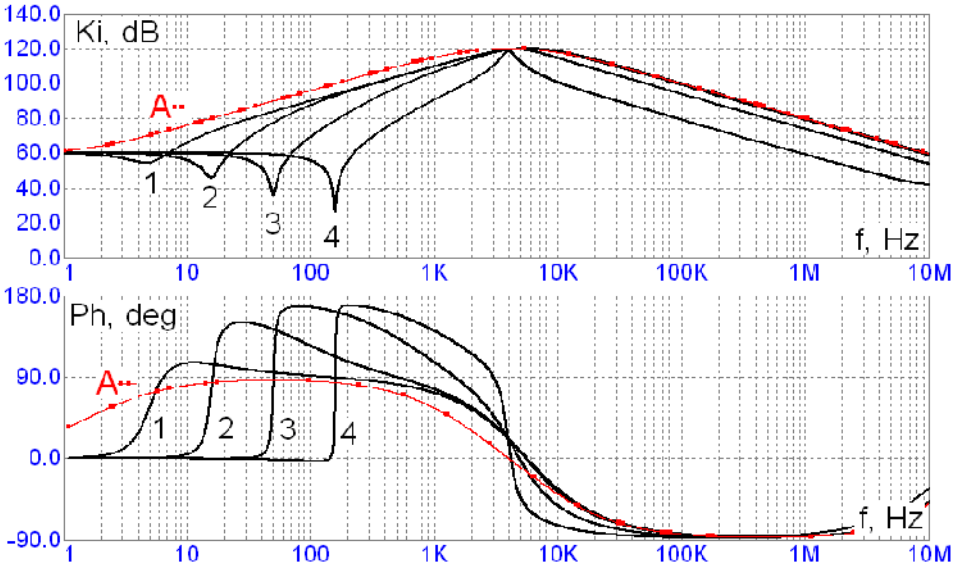



Рис. 6.62. Порівняння АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертерів першого (крива А) та другого порядку при $R_3 = 100$ (4), 1 k (3), 10 k (2), 100 k (1)

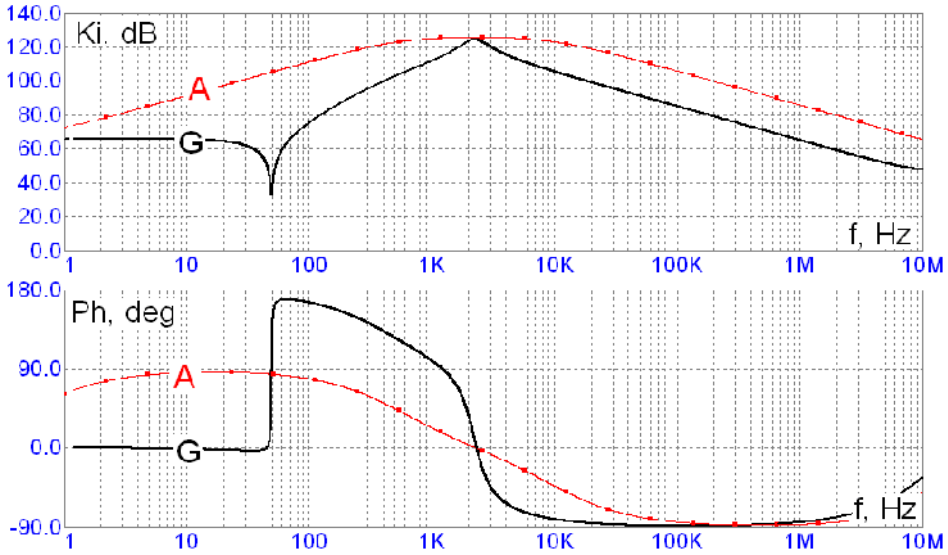



Рис. 6.63. Порівняння АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертерів першого (крива A) та другого (G) порядку з оптимізованими параметрами

Високу ефективність функціонування схеми запропонованого конвертера другого порядку підтверджують наведені на рис. 6.64 результати Transient аналізу вихідних сигналів. Порівнюються напруги на конвертері першого ($V_A$) та другого ($V_G$) порядків. На вхідний корисний сигнал f = 2,2 кГц амплітудою $V_{AC} = 10^{-8}$В накладалася завада f = 50 Гц амплітудою $V_{50HZ} = 10^{-6}$В (завада на два порядки більша за корисний сигнал).

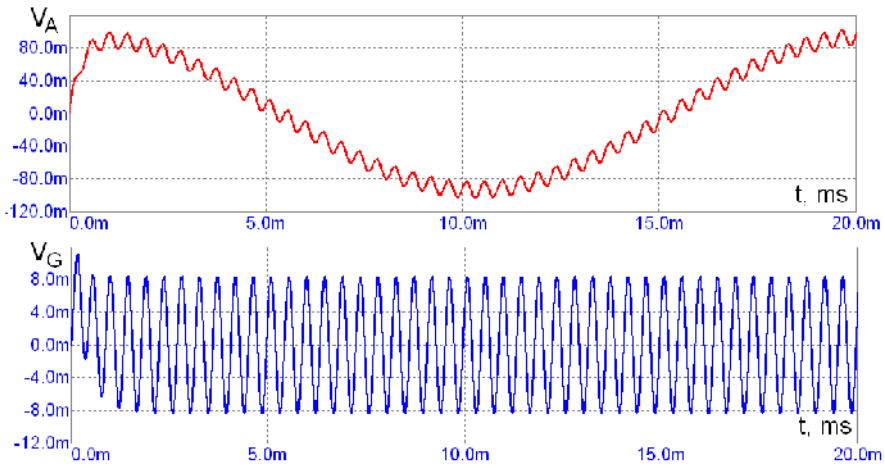



Рис. 6.64. Вихідні напруги конвертера першого ($V_A$) та другого ($V_G$) порядків

Видно, що існує значна паразитна модуляція частотою f = 50 Гц напруги $V_A$ конвертера першого порядку. Натомість, такої модуляції напруги $V_G$

конвертера другого порядку не спостерігається, що свідчить про високу завадостійкість останнього до електромагнітної завади силової енергомережі.

Характерний процес перетворення форми імпульсів вхідного струму $I_{IN}$ прямокутної форми на вихідну напругу $V_G$ високоселективних конвертерів показано на рис. 6.65. Таке перетворення обумовлене їхньою вузькою смугою частот, що необхідно враховувати, розробляючи відповідні схеми оптоелектронних сенсорів.

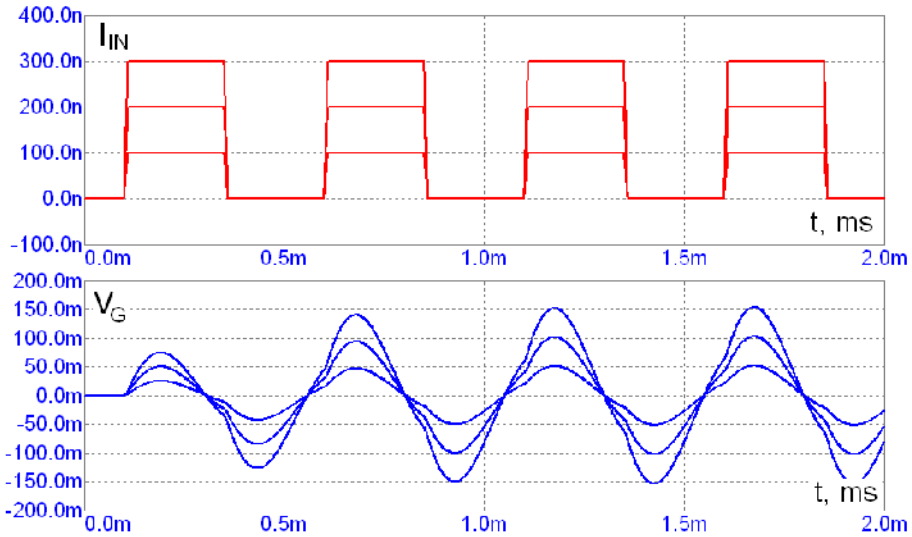



Рис. 6.65. Форма імпульсів вхідного струму ($I_{IN}$) та вихідної напруги ($V_G$) конвертера другого порядку при трьох значеннях $I_{INA} = 10^{-7}$ А, $2 \cdot 10^{-7}$ А, $3 \cdot 10^{-7}$ А

Розглянемо задачу побудови конвертерів імпедансу на однокаскадних схемах повторювачів напруги. Постановка такої задачі обумовлена двома факторами.

Першим фактором є зменшення енергоспоживання. Значна кількість каскадів (вхідний каскад, каскад зсуву рівня, каскад формування частотної характеристики, вихідний каскад тощо) в операційних підсилювачах обумовлюють їхнє значне енергоспоживання. Натомість, зі зменшенням струмів у цих каскадах значно звужується смуга частот.

Другим фактором є розширення смуг робочих частот. Здебільшого, для забезпечення високої стабільності функціонування при зміні в широких межах коефіцієнта підсилення, частотна характеристика більшості операційних

підсилювачів обмежується шириною смуги робочих частот при одиничному коефіцієнті підсилення GBW=$10^6$..$10^7$. Таке обмеження унеможливлює реалізацію конвертерів з високим коефіцієнтом перетворення на частотах понад (10..100) кГц. Оскільки конвертери імпедансу базуються повторювачах напруги, доцільним є використання не універсального операційного підсилювача, а його спрощеної реалізації з одиничним коефіцієнтом передачі.

Отже, вирішення згаданих протиріч полягає в зменшенні кількості каскадів операційного підсилювача. Такого зменшення можна досягти, реалізуючи конвертер імпедансу в спеціалізованих напівпровідникових чипах сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорів (у вигляді спеціалізованої кремнієвої інтегральної схеми).

Схема конвертера імпедансу на однокаскадному операційному підсилювачі, що виконує функцію повторювача напруги, наведена на рис. 6.66. Функцію повторювача напруги виконує диференціальний каскад (транзистори $Q_1$, $Q_2$) з динамічним навантаженням (транзистори $Q_3$, $Q_4$) та колом зворотного зв’язку (транзистор $Q_5$). Резистор $R_1$ задає струм диференціального каскаду, $R_2$ та $R_3$ – струм зміщення кола формування напруги $V_P$, а $R_4$ та $Q_5$- струм зміщення кола формування напруги $V_N$. Напруга $V_P$ відповідає напрузі неінвертуючого входу, а напруга $V_N$ – напрузі в колі з’єднання інвертуючого входу з виходом операційного підсилювача.

Завдяки високому коефіцієнту підсилення диференціального каскаду з динамічним навантаженням ($K_V > 1000$) та 100 %-му від’ємному зворотному зв’язку напруга $V_N$ балансується на рівні вхідної напруги $V_P$ ($V_P \approx V_N$). Результат модельного дослідження залежності між напругами $V_N$ та $V_P$ при трьох значеннях напруги живлення Vee = 3, 4 та 5 В наведено на рис. 6.67. Видно, що умова рівності $V_P \approx V_N$ виконується в широкому діапазоні зміни напруги живлення (від 0,4 В і до Vee). Коло зворотного зв’язку конвертера реалізовано на $R_L$ (відповідає $R_2$ на рис. 6.52) та $C_L$ (аналогічно відповідає $C_1$).

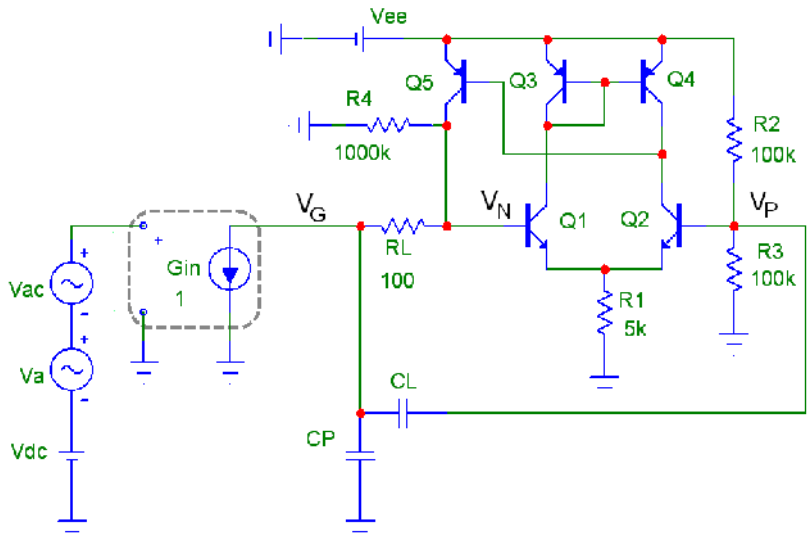



Рис. 6.66. Схема конвертера на однокаскадному операційному підсилювачі

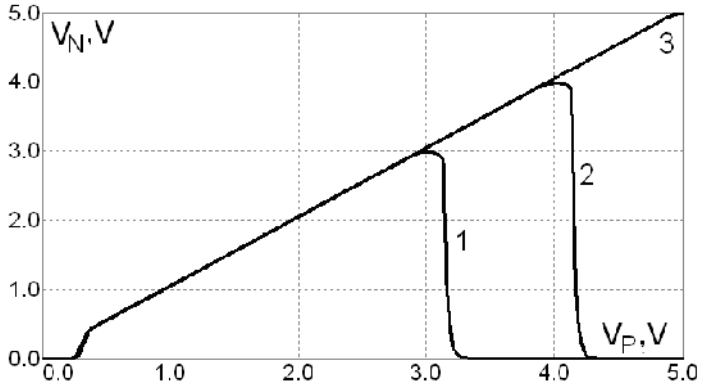



Рис. 6.67. Залежності між напругами $V_N$ та $V_P$ при Vee = 3 В (1), 4 В (2), 5 В(3)

Результати досліджень частотних характеристик конвертера імпедансу на однокаскадному операційному підсилювачі при $C_L$ = 100 n, $R_L$ = 100 та наборі дискретних значень ємності $C_P$ наведені на рис. 6.68, а при зміні постійного рівня вхідного сигналу $V_{DC}$ – на рис. 6.69.

Результати наведених досліджень підтверджують функціональність конвертера імпедансу на однокаскадному повторювачі напруги та можливість реалізації на його основі сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорів, як із широкою смугою частот, так і селективних перетворювачів із резонансною характеристикою. Ширина смуги частот такого конвертера визначається

граничними частотами використаних транзисторів, а відтак, може бути значно ширшою (до 10 раз), ніж у схемах на типових операційних підсилювачах.

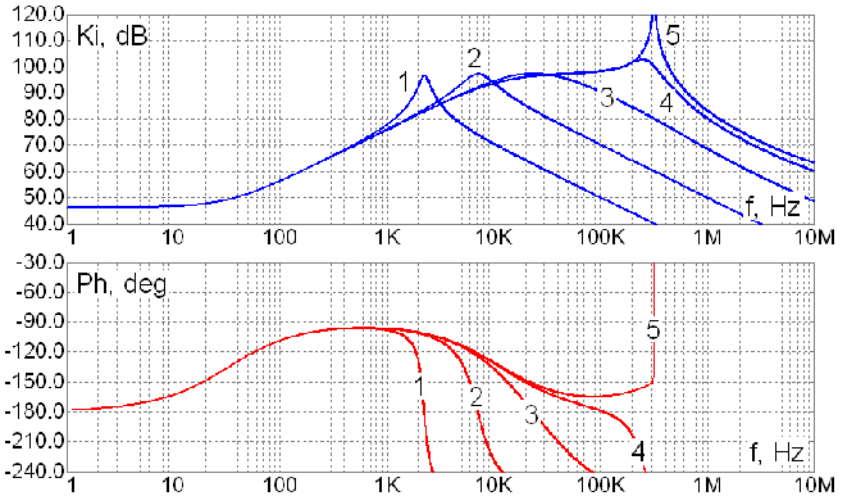



Рис. 6.68. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера на однокаскадному операційному підсилювачі при $C_P$ = 10 n (1), 1 n (2), 100 p (3), 10 p (4), 0 (4)

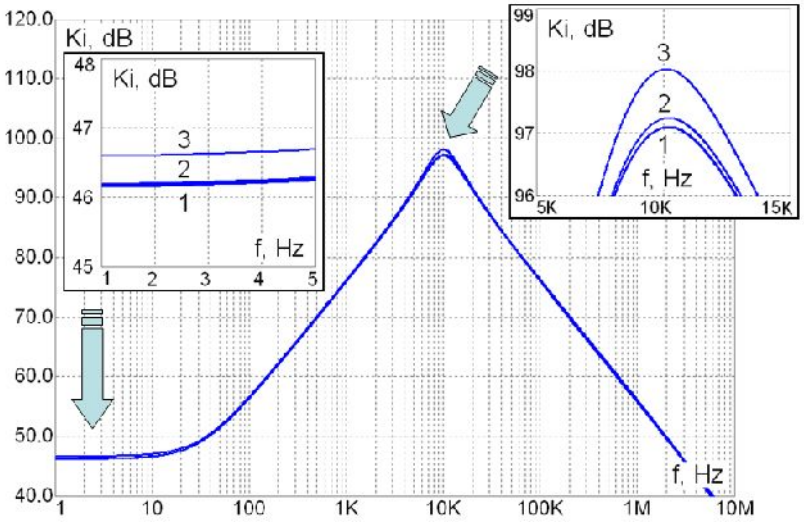



Рис. 6.69. АЧХ конвертера на однокаскадному операційному підсилювачі при $C_L$ =100 n, $C_P$ = 0.5 n, $R_L$ = 100, $V_{DC}$ = 0 (3), 100 u (2), 200 u (1)

## 6.6. Реалізація та експериментальні дослідження сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів

Для експериментальної перевірки та дослідження запропонованих у роботі структурно-схемних рішень завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорних пристроїв розроблено апаратно-програмний USB-

сумісний комплекс «GIRATO». У комплексі використано сучасну елементну базу сигнального перетворення, зокрема мікропотужні Rail-to-Rail операційні підсилювачі AD8542 та ключі ADG736, мікроконвертер ADuC431, USB інтерфейс FT232R тощо.

Як зазначалося в розділі 1 дисертаційної роботи, забезпечення високої завадостійкості сигнальних перетворювачів оптичних сенсорних пристроїв базується на нових схемних рішеннях, що забезпечують компенсацію як паразитного впливу стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання, так і електромагнітних завад. Інтенсивність випромінювання сторонніх джерел світла в сотні, навіть тисячі разів може перевищувати корисну складову зміни оптичного сигналу від активного середовища сенсора. Паразитний вплив електромагнітних завад обумовлений значним рівнем випромінювання силової електромережі частотою 50 Гц. Така завада найбільше проявляється у високоомних колах сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорних пристроїв.

Відтак, у відповідності до вирішуваних у цій роботі задач, основним вузлом сигнального сигнального перетворення є конвертери імпедансу, які, реалізуючи реактивне навантаження фоточутливого елемента, забезпечують селекцію корисних складових сигналу. Реалізація частотної селекції відбувається відразу в сигнальному колі фоточутливого елемента, формуючи високий імпеданс на частоті корисної складової фотоструму та низький імпеданс на частотах паразитних складових, що й забезпечує максимально високе відношення сигнал-завада. Принципово важливо, що відповідно до вимог інтегральної мікроелектроніки таке рішення не потребує використання індуктивних елементів, а крутизна функції частотної селекції є значно вищою порівняно з індуктивним навантаженням і оптимізованою відповідно до параметрів сигнального перетворення.

Структурну схему комплексу «GIRATO» наведено на рис. 6.70. Інформативний сигнал формується модуляцією спектральної характеристики активного середовища AM (Active Medium), яке взаємодіє з досліджуваною

речовиною. В якості джерел світла використовуються світлодіоди зі зміщеними спектральними характеристиками - $LED_1$ (червоний, R), $LED_2$ (зелений, G) та $LED_3$ (голубий, B), а фоточутливим елементом служить фотодіод PD. Струми світлодіодів задаються стабілізаторами струмів на операційних підсилювачах $OA_1$, $OA_2$ та$OA_3$.

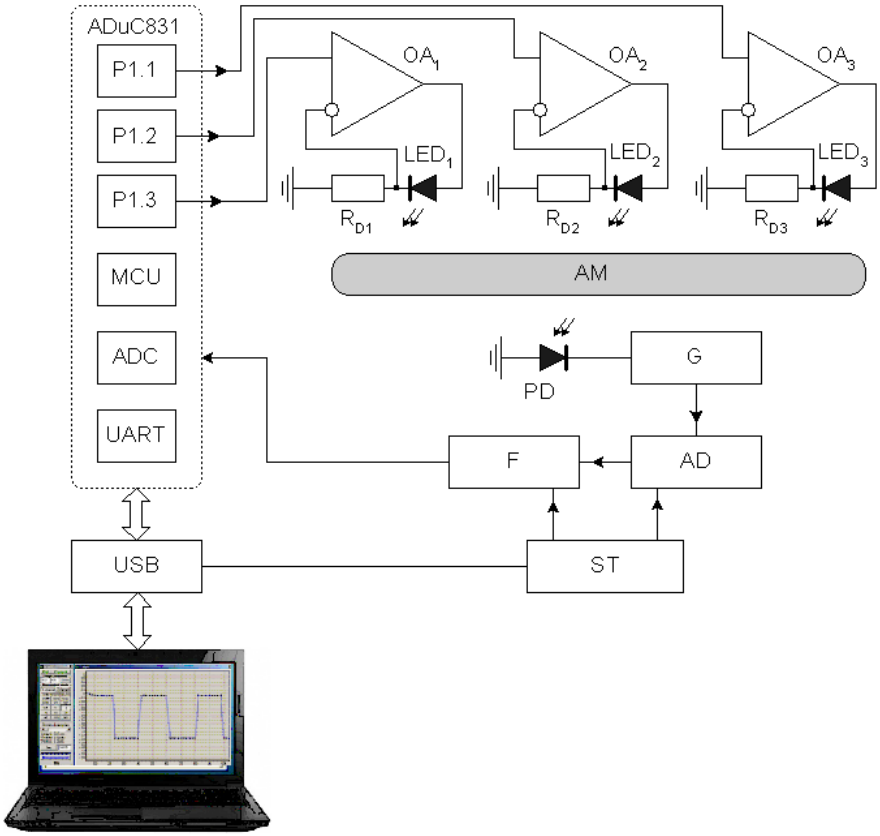



Рис. 6.70. Структурна схема апаратно-програмного комплексу «GIRATO»

Завадостійкість сигнального перетворення забезпечувалась конверторами імпедансу G, структурно-схемні рішення та параметри яких були предметом дослідження цієї роботи. Отриманий сигнал підсилювався та детектувався AD, а далі фільтрувався за допомогою F. Стабілізація живлення схеми забезпечувалася стабілізатором ST. Аналого-цифрове перетворення та керування процесом вимірювання здійснювалося мікроконтролером ADuC831. Основними вузлами мікроконтролера, що використовувалися в ході вимірювання, є: P1.1, P1.3, P1.3 – порти керування світлодіодами; MCU – мікропроцесор; ADC – аналого-цифровий перетворювач; UART – інтерфейс.

Зв’язок із персональним комп’ютером та живлення пристрою здійснювався через USB порт.

Вікна програмного забезпечення «GIRATO» зображено на рис. 6.71. Основне вікно – RGB Noise Immune Sensor – забезпечує керування процесом вимірювання загалом. Передбачені функції вибору та встановлення: параметрів порту комп’ютерного USB інтерфейсу; часових параметрів вимірювання; коефіцієнта підсилення; режимів вимірювання, зокрема перемикання між вимірюванням корисних компонент сигналу (R) (G), (B) та завади від сторонніх джерел світла (A), вимірювання рівня сумарного сигналу (S+) та різницевих компонент (R-G), (R-B), (G-B). Саме з використанням цих різницевих компонент проводиться вимірювання спектральної характеристики активного оптичного середовища сенсорного пристрою.

Візуалізація результатів вимірювання проводиться у вікні Graph, а керування процесами вимірювання та режимами роботи сигнальних перетворювачів – у вікні Control.

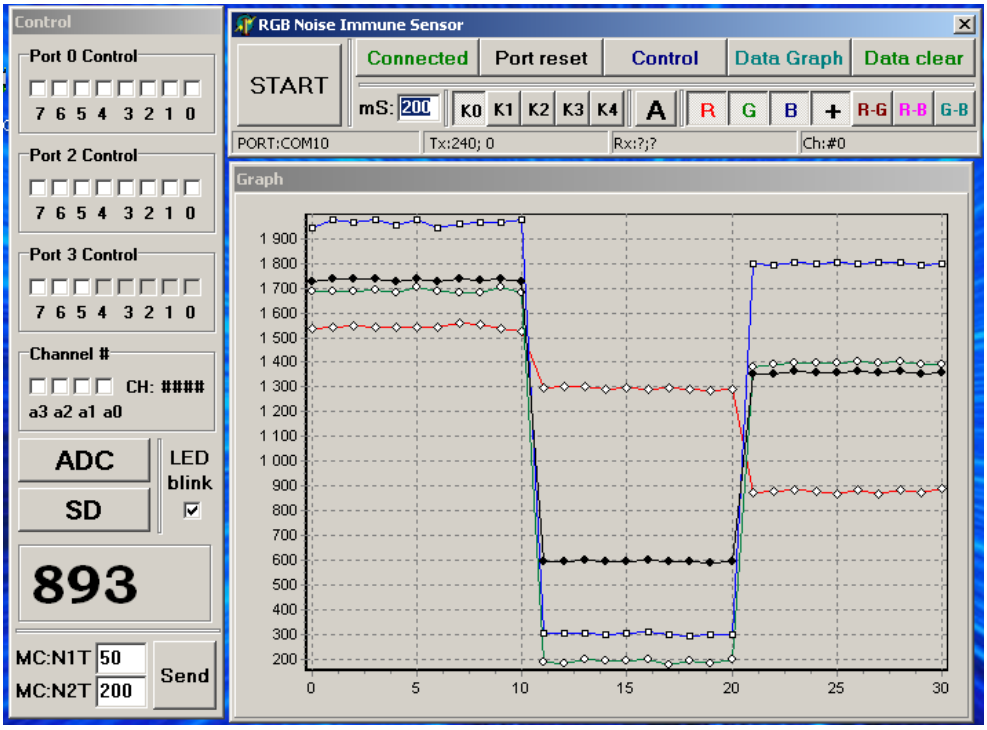



Рис.6.71. Вікна програмного забезпечення «GIRATO»

Проводилися численні експериментальні дослідження розглянутих у попередніх підрозділах сигнальних перетворювачів. Результати таких досліджень порівнювалися з відповідними результатами модельних досліджень. За результатами таких порівнянь проводилася корекція SPICE моделей схем сигнальних перетворювачів.

У результаті проведених досліджень та параметричної оптимізації був розроблений та виготовлений дослідний зразок сигнального перетворювача, який найкраще відповідає задачам дисертаційної роботи, а саме, поєднує високу завадостійкість до зовнішніх (паразитних) джерел світла та електромагнітної завади енергетичної мережі 50 Гц. Крім того, такий сигнальний перетворювач відповідає вимогам сучасної електроніки з погляду мінімального енергоспоживання, здатності функціонувати з однополярними низьковольтними джерелами світла, високої стабільності функціонування тощо.

Плата такого завадостійкого сигнального перетворювача (умовна назва - GX) наведена на рис. 6.72. Його основою є розглянутий у підрозділі 6.4 (рис. 6.59) конвертер імпедансу другого порядку. Як уже зазначалося, новизною схемного рішення конвертера імпедансу другого порядку є використання операційного підсилювача для формування комплексного зворотного зв’язку.

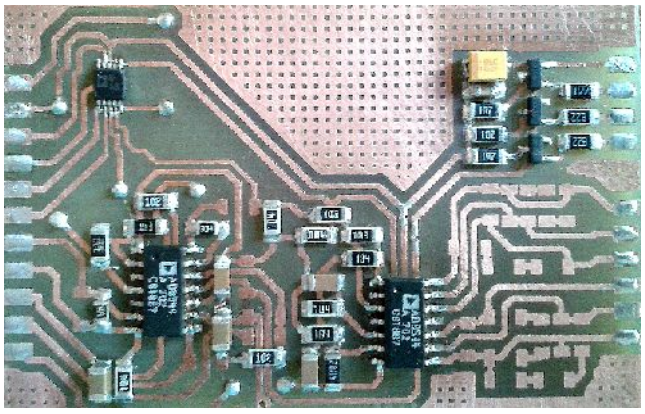


Рис.6.72. Плата завадостійкого сигнального перетворювача GX

Досліджувалося декілька типів операційних підсилювачів та проводилася оптимізація режимів функціонування. Розглянемо характерний приклад та результат таких робіт.

Так, на рис. 6.73 наведено результати модельних досліджень завадостійкого сигнального перетворювача GX на мікропотужних Rail-to-Rail операційних підсилювачах AD8542 (GBW = 0,98, SRP = SRN = 0,7 В / с). Приведено порівняння частотної залежності імпедансу конвертера першого (інформативний параметр імпедансу - V(10)/I(Gin1)), та другого (інформативний параметр імпедансу - V(4)/I(Gin1)) порядків. Видно, що на відміну від відомої схеми першого порядку, запропонована в дисертаційній роботі схема конвертера імпедансу другого порядку характеризується істотно вищою крутизною частотної характеристики.

Так, крутизна характеристики конвертера першого порядку становить 20 дБ на декаду, що типово для таких схем. Натомість, функція частотної залежності імпедансу конвертера другого порядку має два екстремуми, в першому з яких відбувається режекція завади мережі живлення частотою 50 Гц , а в другому – селективне виділення інформативного сигналу частотою 700 Гц. Відношення значень імпедансу на частоті інформативного сигналу Z(F=700Гц) та частоті завади Z(F=50Гц) перевищує значення $10^4$, що відповідає 80 дБ.

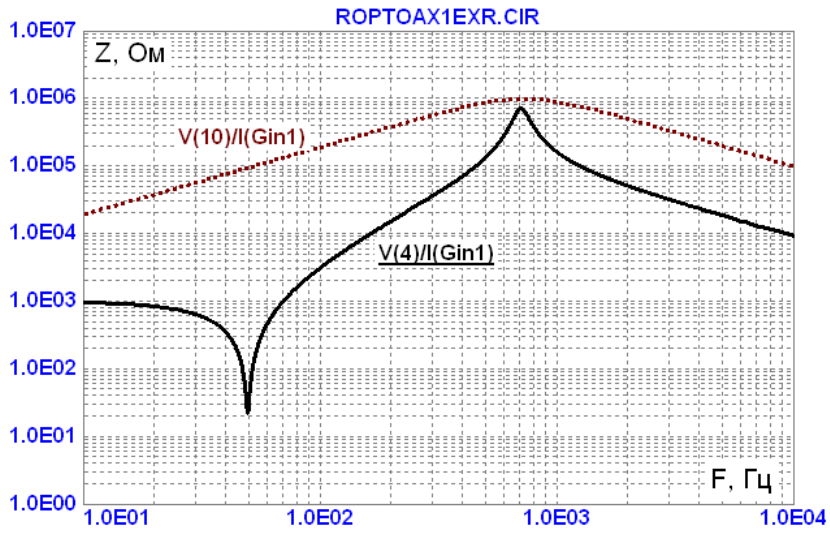



Рис.6.73. Результат модельного дослідження характеристик сигнальних перетворювачів на конвертерах імпедансу першого та другого порядків

Результат експериментальних досліджень частотної характеристики дослідного зразка завадостійкого сигнального перетворювача GX на конвертері імпедансу другого порядку показано на рис. 6.74. Видно високу відповідність результатів експериментальних та модельних досліджень, що свідчить про високу якість запропоноввних в роботі SPICE моделей та підходів до модельних досліджень. Крім того, на вставці рис. 6.74 показано ділянку характеристики у смузі пропускання корисного сигналу.

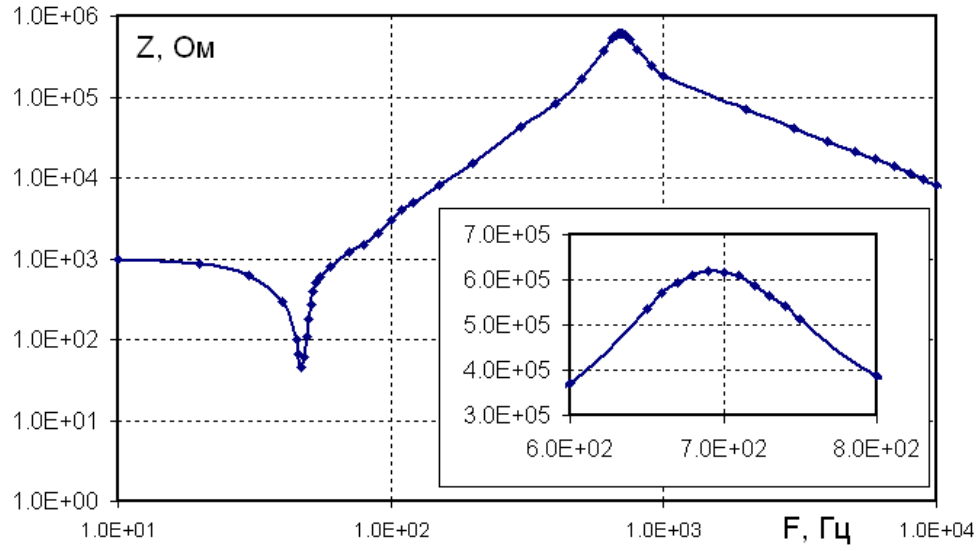



Рис.6.74. Результат експериментального дослідження характеристики сигнального перетворювача на конвертері імпедансу другого порядку

Приклад результатів вимірювання сигналів, отриманих за допомогою розробленого апаратно-програмного комплексу «GIRATO» наведено на рис. 6.75 та рис. 6.76.

Позначення ADC (в умовних одиницях) відповідає двійковому коду аналого-цифрового перетворювача, а Nm – порядковому номеру послідовності вимірювань. Ділянка F0 відповідає початковим умовам вимірювання, а ділянки F1 та F2 – відповідній зміні спектральної характеристики активного середовища оптичного сенсора, де: R, G, B – компоненти корисного сигналу, відповідно від червоного, зеленого та синього світлодіодів, S – сумарний рівень корисного сигналу.

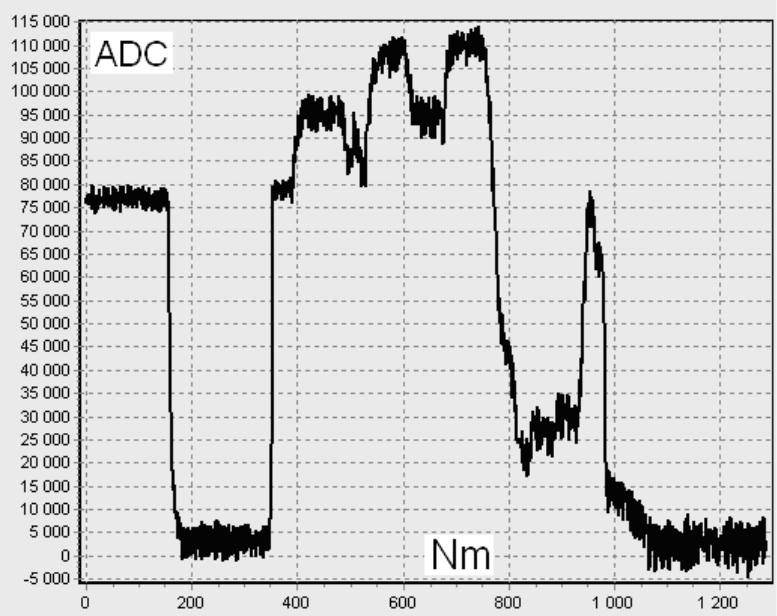



Рис.6.75. Приклад результату вимірювання паразитного сигналу від сторонніх джерел світла (при зміні рівня кімнатного освітлення)

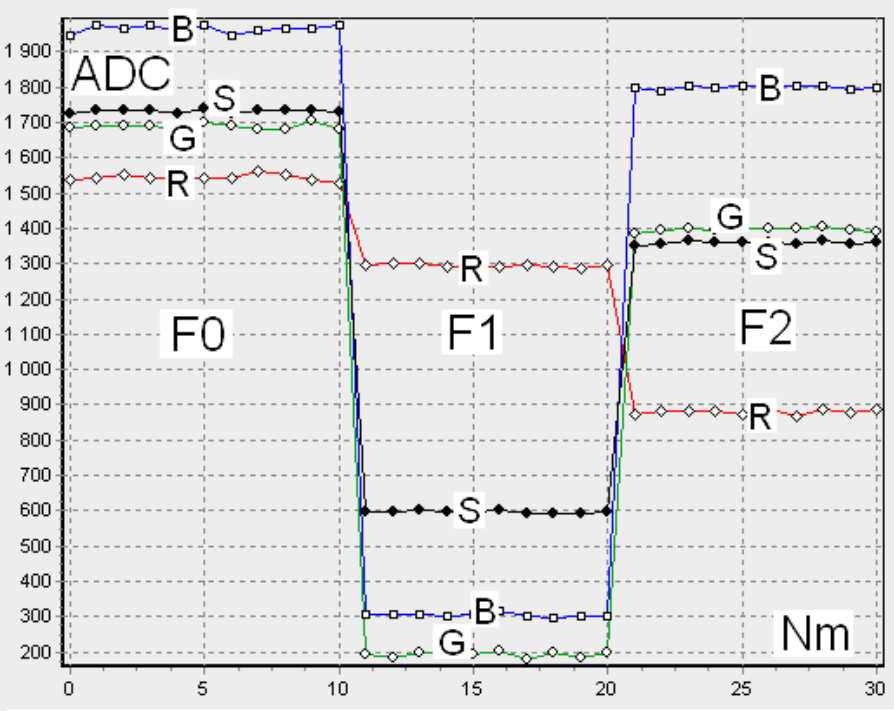



Рис.6.76. Приклад результату вимірювання корисних сигналів (ADC – сигнал у двійковому коді аналого-цифрового перетворювача; No – номер вимірювання)

Видно, що рівень паразитного сигналу від сторонніх джерел світла (рис. 6.75, режим вимірювання - A) перевищує $A \approx 10^5$ і, що очевидно, залежить від зміни рівня освітлення активного середовища оптичного сенсорного пристрою. Водночас спостерігається значний шум (розкид результатів

вимірювання при фіксованому освітленні), рівень якого, як уже зазначалося, обумовлюється електромагнітними завадами енергетичної мережі 50 Гц. Рівень такого шуму в умовах проведених експериментів (розміщені поруч блоки живлення, комп'ютери, джерела світла тощо) становить приблизно $Ns \approx 5 \cdot 10^3$.

Натомість, використання режимів завадостійкого вимірювання (рис. 6.76, режими – R, G, B, S) забезпечує можливість вимірювання рівня корисного сигналу (спектральної характеристики оптичного середовища сенсорного пристрою) в діапазоні до $M \approx 2 \cdot 10^3$, значення якого сумірне з вищезгаданим рівнем шуму Ns та на два порядки менше за рівень завади від сторонніх джерел світла. Роздільна здатність на рівні залишкового шуму становить приблизно $\Delta \approx 10$, що відповідає $\approx 1\%$ від діапазону вимірювання корисного сигналу та $\approx 0{,}01\%$ від рівня завади.

В якості активного середовища АМ була використана наноструктура на основі пористого $Al_2O_3$ з діаметром пор 20 нм допована ХРК ЕЕ1 з 0,3 % магнетиту $Fe_3O_4$. В діапазоні чутливості такої нанаоструктури приблизно 140 нм (максимальне зміщення спектральної характеристики) коефіцієнт спектральної чутливості становить $\approx 1{,}4$ нм/мг/м$^3$, що відповідає роздільній здатності $\approx 1\%$. Таким чином, параметри розробленого сигнального перетворювача GX відповідають поставленій задачі реалізації оптичного сенсора на вищезгаданій наноструктурі.

Отже чином, отримані результати підтверджують високу ефективність використання розроблених в дисертаційній роботі завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів та високу відповідність реальних параметрів цих перетворювачів результатам SPICE модельних досліджень.

**Висновки до розділу 6**

1. Вирішено задачу подальшого розвитку сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорних пристроїв у напрямку підвищення завадостійкості, а відтак, покращення їхніх експлуатаційних характеристик. Запропоновано

теоретичні засади побудови та розроблено широкий ряд конвертерів імпедансу сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів, перевагою яких є висока селективність інформативного сигналу та ефективне заглушення паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад. Розроблено конвертери імпедансу, які базуються на схемах з від'ємним струмовим та резистивним додатним зворотними зв'язками з RC-колами фільтрів другого порядку. Показано, що перевагою запропонованих конвертерів імпедансу є корисний ефект додаткової резонансної режекції на частотах, що передують переходу від низького до високого імпедансу. Зокрема, різниця між коефіцієнтами перетворення на робочій частоті f = 2,2 кГц та частоті електромагнітної завади f = 50 Гц перевищує 80 дБ.

2. Модельними та експериментальними дослідженнями виявлено резонансний характер функції перетворення конвертера імпедансу на спадаючій ділянці амплітудно-частотної характеристики операційного підсилювача, що дозволяє реалізувати частотно-селективні схеми сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів з заглушенням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла. Показано, що функція частотної залежності імпедансу запропонованого конвертера другого порядку (на операційному підсилювачі з граничною частотою 1 МГц) має два екстремуми, в першому з яких відбувається режекція завади мережі живлення частотою 50 Гц, а в другому – селективне виділення інформативного сигналу частотою 700 Гц. Відношення значень імпедансу на частоті інформативного сигналу Z(F=700Гц) та частоті завади Z(F=50Гц) перевищує значення $10^4$, що відповідає значенню понад 80 дБ.

3. Проведено структурно-параметричне модифікування транзисторних каскадів конвертерів імпедансу, які, завдяки запропонованим методам оптимізації режимів роботи, дозволяють підвищити в 2..3 рази стабільність та частотну селективність функції перетворення. Ефект стабілізації досягається додатковим зміщенням транзисторного каскаду конвертера джерелом

температурно-залежного струму, який мінімізує температурний дрейф імпедансу та його паразитну модуляцію постійним рівнем вхідного сигналу.

4. Для експериментальної перевірки та дослідження запропонованих у роботі структурно-схемних рішень завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорних пристроїв розроблено апаратно-програмний USB-сумісний комплекс «GIRATO». В комплексі використана сучасна елементна база сигнального перетворення, зокрема мікропотужні Rail-to-Rail операційні підсилювачі AD8542 та ключі ADG736, мікроконвертер ADuC431, USB інтерфейс FT232R тощо. Експериментально показано, що рівень паразитного сигналу від сторонніх джерел світла (режим вимірювання - A) перевищує $A \approx 10^5$. Водночас існує значний шум, рівень якого, як уже зазначалося, обумовлюється електромагнітними завадами енергетичної мережі 50 Гц. Рівень такого шуму в умовах проведених експериментів приблизно становить $Ns \approx 5 \cdot 10^3$. Натомість, використання режимів завадостійкого вимірювання (режими – R, G, B, S) забезпечує можливість вимірювання рівня корисного сигналу (спектральної характеристики оптичного середовища сенсорного пристрою) в діапазоні до $M \approx 2 \cdot 10^3$, значення якого є сумірне з вищезгаданим рівнем шуму Ns та на два порядки менше за рівень завади від сторонніх джерел світла. Роздільна здатність на рівні залишкового шуму становить $\Delta \approx 10$, що відповідає $\approx 1\%$ від діапазону вимірювання корисного сигналу та $\approx 0{,}01\%$ від рівня завади. Отримані результати підтверджують високу ефективність використання розроблених у дисертаційній роботі завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів та високу відповідність реальних параметрів цих перетворювачів результатам SPICE модельних досліджень.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено нові нанокомпозити та наноструктури на основі ХРК (ЕЕ1, CLC-2101L, CLC-2103L, CLC-2101L+5CB, KET90600, KET90700, BLO-61), нанодомішок ($Fe_2O_3$, $Fe_3O_4$, AlN) та пористих матриць ($Al_2O_3$, $SiO_2$), як активне середовище завадостійких оптичних сенсорів з підвищеною чутливістю. У таких сенсорах інформативний сигнал, яким є довжина хвилі, формується селективним пропусканням оптичного випромінювання крізь активне середовище, яке взаємодіє з газами та біооб'єктами.

2. Встановлено, що в нанокомпозитах на основі ХРК ЕЕ1, легованих магнетитом, під впливом монооксиду вуглецю спостерігаються зміни в оптичних спектрах пропускання, а саме, відбувається зміщення мінімуму пропускання. Максимальне значення коефіцієнта спектральної чутливості досягнуто для концентрації CO 20 мг/м$^3$. Зі збільшенням концентрації $Fe_2O_3$ від 0,5 % до 3 % коефіцієнт спектральної чутливості зростає від 0,67 нм/мг/м$^3$ до 1,71 нм/мг/м$^3$, а для $Fe_3O_4$ збільшення концентрації від 0,17 % до 1 % зумовлює зміну коефіцієнта спектральної чутливості від 0,28 нм/мг/м$^3$ до 1,2 нм/мг/м$^3$. У разі використання нанокомпозиту на основі CLC-2103L збільшення концентрації $Fe_3O_4$ від 0,25 % до 2 % приводить до зростання коефіцієнта спектральної чутливості від 0,28 нм/мг/м$^3$ до 0,6 нм/мг/м$^3$.

3. Введення нанокомпозиту до наноструктурованих пористих матриць на основі $SiO_2$ та $Al_2O_3$ уможливило розроблення твердотільного газочутливого активного середовища оптичних сенсорів. Коефіцієнт спектральної чутливості набуває максимального значення 1,45 нм/мг/м$^3$ до концентрації монооксиду вуглецю 20 мг/м$^3$ для матриці на основі $Al_2O_3$ при діаметрі пор 20 нм. Для матриці на основі $SiO_2$ максимальний коефіцієнт спектральної чутливості досягається в інтервалі 22,5- 42,4 мг/м$^3$ і становить 1,47 нм/мг/м$^3$.

4. Вперше встановлено основні закономірності спектральних характеристик ХРК після введення в них водних розчинів білків і вуглеводів. Виявлено, що зі збільшенням концентрації водного розчину білків і вуглеводів у рідкому кристалі відбувається зсув мінімуму пропускання в короткохвильову

область на 10–80 нм. Спектральна чутливість лежить у межах від 0,54 до 2,11 нм/% для білків та від 1,17 до 4,5 нм/% у вуглеводів, що покладено в основу створення сенсорів.

5. Встановлено, що зменшення кроку холестеричної спіралі та, відповідно, зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область пов'язані з тим, що у водних розчинах білків під час взаємодії між білками та молекулами ХРК змінюється спіральна структура РК. Використано ХРК із наявною смугою селективного відбивання у видимій області як індикатор наявності білків та інших біологічних речовин. Встановлено, що найбільший коефіцієнт спектральної чутливості спостерігається у водних розчинах фруктози та лежить у діапазоні від 2,5 до 4,5 нм/%, що покладено в основу виявлення, ідентифікації та діагностики біооб'єктів.

6. Встановлено, що величину петлі гістерезису, яка визначається співвідношенням $U_п = \Delta U/U_{CN}$, (де $\Delta U$ – різниця порогової напруги прямого та оберненого переходів, $U_{CN}$ – порогова напруга прямого переходу) можна змінювати в широких межах, від 0,1 до 0,8 за рахунок зміни констант пружності $K_{22}$ і $K_{33}$ та величини $d/P_o$. Запропоновано використати автогенератор на основі рідкокристалічної комірки як формувач оптичного сигналу сенсора фізичних величин. Величина петлі гістерезису, яку можна змінювати за рахунок температури, тиску тощо впливає на частоту генерації, а відповідно, частота генерації визначає параметри вимірюваної фізичної величини. РК комірку використано як частотозадаючий елемент активного середовища сенсора температури, тиску. Розроблено сенсор температури на основі оптичного РК автогенератора, який дає змогу визначати температуру в діапазоні існування мезофази (-10…+70$^oC$) з чутливістю 0,1$^oC$/Гц.

7. На основі комп'ютерного моделювання проходження світла в системі первинного перетворювача (світлодіод–активне середовище–фотодіод) розроблено рекомендації для створення оптичних сенсорів. Встановлено, що максимальне селективне відбивання світла здійснюється при товщині нанокомпозиту, яка становить 10 кроків спіралі та величині анізотропії

показника заломлення ХРК 0,2. Показано, що джерело випромінювання повинне забезпечувати кут розходження випромінювання, менший ніж $10^o$, оскільки наявність у структурі випромінювання, що поширюється під кутами понад $10^o$ від нормалі, приводить до значного зменшення співвідношення сигнал/шум, зумовленого перерозподілом випромінювання між активними ділянками ХРК та пасивною матрицею.

8. Розроблено ряд конвертерів імпедансу сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів, перевагою яких є висока селективність інформативного сигналу та ефективне заглушення паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад. Розроблені конвертери імпедансу базуються на схемах з від'ємним струмовим та резистивним додатним зворотними зв'язками з RC-колами фільтрів другого порядку. Показано, що перевагою запропонованих конвертерів імпедансу є корисний ефект додаткової резонансної режекції на частотах, що передують переходу від низького до високого імпедансу. Зокрема, на основі SPICE моделей встановлено, що відношення між коефіцієнтами перетворення на робочій частоті та частоті електромагнітної завади сягає значень понад 80 дБ.

9. Вперше моделюванням та експериментальними дослідженнями виявлено резонансний характер функції перетворення конвертера імпедансу на спадаючій ділянці АЧХ операційного підсилювача, що дозволяє реалізувати частотно-селективні схеми сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів із заглушенням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла. Теоретично та експериментально показано, що функція частотної залежності імпедансу розробленого конвертера другого порядку (на операційному підсилювачі з граничною частотою 1 МГц) має два екстремуми. В околі першого екстремуму відбувається режекція завади мережі живлення частотою 50 Гц, а другого – селективне виділення інформативного сигналу частотою 700 Гц. Відношення значень імпедансу на частоті інформативного сигналу $Z(F = 700Гц)$ та частоті завади $Z(F = 50Гц)$ перевищує значення 104, що відповідає значенню понад 80 дБ.

10.Проведено структурно-параметричне моделювання конвертерів імпедансу на транзисторних каскадах з метою покращення характеристик конвертерів імпедансу. Завдяки розробленим методам оптимізації режимів роботи вдалось підвищити в 2…3 рази параметричну стабільність і частотну селективність функції перетворення. Ефект стабілізації досягається додатковим зміщенням транзисторного каскаду конвертера джерелом температурно-залежного струму, який мінімізує температурний дрейф та його паразитну модуляцію постійним рівнем вхідного сигналу.

## ЛІТЕРАТУРА

1.Vetelino J. Introduction to Sensors / Veletino J., Aravind R. – CRC Press, 2010. – 208 P.

2.Fraden. J. Handbook of modern sensors / J. Fraden. – Springer: Physics, design, and applications, 2004. – 580 p.

3.Вуйцік В. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / Вуйцік В. [та ін.]; за ред. З.Ю. Готри. – Л.: Ліга-Прес, 2002. – 474 с.

4.Готра З.Ю. Мікроелектронні теплові сенсори потоку в біомедичних дослідженнях / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Павлов С.В., Куленко С.С.// Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах".- Хмельницький. – 2008. – №2. – С. 122-128.

5.Готра Зенон. Сенсор різницевої температури біомедичного диференційного скануючого калориметра / Готра Зенон, Голяка Роман, Бойко Оксана, Вісьтак Марія// Вимірювальна техніка та метрологія. – 2014. - Вип. 75.- С. 73-78. - [Електронний ресурс] Режим доступу: http://science.lp.edu.ua/uk/node/2364

6. Лантух Ю. Д. Оптические методы в информатике / Ю. Д. Лантух. – Учебное пособие: Оренбург, 1999. – 104 с.

7. Takai I. LED and CMOS image sensor based optical wireless communication system for automotive applications. IEEE Photon. J. / I. Takai. – 2013. – № 5

8. Guasta M.D. A Photodiode-Based Low-Cost Telemetric Lidar for the Continuous Monitoring of Urban Particulate Matter / Guasta M.D., Baldi M., Castagnoli F. – Photodiodes - Communications, Bio-Sensings, Measurements and High-Energy Physics. Edited by Jin-Wei Shi, 2011. – 284 p.

9. Danakis C., M. Afgani, G. Povey, I. Underwood, and H. Haas. Using a CMOS camera sensor for visible light communication / Danakis C., Afgani M., Povey G. // Proc. IEEE GC Wkshps. – 2012. – P. 1244-1248.

10. Depeng Mao; Peng Liu; Dong, Liang. All-optical programmable photonic integrated circuit: An optical analogy to electronic FPGA // 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS). – 2011. – P. 2674-2677.

11. Shih-Hao Chen and Chi-Wai Chow. Color-Shift Keying and Code-Division Multiple-Access Transmission for RGB-LED Visible Light Communications Using Mobile Phone Camera. – IEEE Photonics Journal. – 2014. – Vol. 6, N. 6.

12. Shirshov Y.M. Optical parameters of thin calixarene films and their response to benzene, toluene and chloroform adsorption / Y.M. Shirshov, S.A. Zynio, E.P. Matsas // Supramolecular science. – 2000. – № 3-4. – P. 491-494.

13. Саввин С. Б. Оптические химические сенсоры (микро- и наносистемы) для анализа жидкостей / С. Б. Саввин, В. В. Кузнецов, С.В. Шереметьев, А. В. Михайлова // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2008. – № 2. – С. 7-16.

14. Кабацій В.М. Оптичні сенсори газу на основі напівпровідникових джерел ІЧ-випромінювання / В.М. Кабацій // Технологія та конструювання в електронній апаратурі. – 2008. – № 4 (76). – С. 30-35.

15. Пеньков М. Н. Оптические датчики кислорода / М. Н. Пеньков // Системы контроля окружающей среды. – 2010. – Вып. 14. – С. 22-25.

16. Вахула А.А. Использование тонких пленок каликсаренов в качестве чувствительных слоев в интерференционном газовом сенсоре / А.А. Вахула, В.Ю. Хоруженко, А.Л. Кукла, И.А. Самойлова // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. - 2007. – Вып. 42. – С. 89-95.

17. Вахула О.А. Оптоелектронна сенсорна система для визначення парів аміаку та місць його витоків з промислових об’єктів / О.А. Вахула, В.Ю. Хоруженко, І.О. Самойлова, О.Л. Кукла, П.А. Манорик, О.В. Шульженко, Ю.М. Посипайко // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ). – Славське, 16-21 лютого 2009. – С. 47-48.

18. Кобзева И.Н. Оптические сенсоры для биосенсорных диагностических систем на основе поверхностно-плазмонного резонанса / И.Н. Кобзева // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вип. 4. – С. 53-56.

19. Kukla O.L. Interference calixarene films as sensitive elements for “optoelectronic nose”/ O.L. Kukla, Yu. A. Tzyrkunov, L.M. Matvyenko, O.O. Vahula, O.M. Fedchenko // Abstract of the XIII International Conference on Physics and

Technology of Thin Films and Nanostructures (ICPT-TFN-XIII), Ivano—Frankivsk, Ukraine,16-21 May 2011. – P. 278.

20. Хоруженко В.Ю. Багатоелементні аналізатори газових сумішей на основі ефектів інтерференційного забарвлення тонких плівок та поверхневого плазмонного резонансу / В.Ю. Хоруженко, О.А. Вахула, О.Л. Кукла, К.В. Костюкевич та ін. // Збірник наукових праць за комплексною програмою НАН України “Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій”, за ред. Г.В. Єльської, В.Д. Походенка, Київ, НАНУ, 2006. – С. 77-87.

21. Yongbin Lin; Yang Zou; Dan Ke; Jun Namkung; Lindquist, R.G. Enhanced sensitivity using liquid crystals for optical fiber-based localized surface plasmon resonance sensor / Yongbin Lin; Yang Zou; Dan Ke; Jun Namkung; Lindquist, R.G. // Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS). – 2010. – P. 1-2.

22. Вахула А.А. Оптимизация оптических параметров тонких пленок для колориметрического анализа газовых сред / А.А. Вахула, А.Л. Кукла, В.Ю. Хоруженко, И.А. Самойлова // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 2008. – Вып.43. – С. 58-66.

23. Белов Н. П. Колориметрический датчик на основе трехэлементного RGB-фотодиода / Н. П. Белов, В. Н. Грисимов, Ю. Ю. Смирнов, А. С. Шерстобитова, А. Д. Яськов. // Изв. вузов. приборостроение. – 2013. – № 3. – С. 76-80.

24. Белов Н. П. Лабораторный спектрометр для исследования коэффициента отражения и определения параметров цветности диффузно отражающих объектов / Н. П. Белов, А. Д. Яськов, В. Н. Грисимов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – № 7. – С. 74-78.

25. Кабацкий В.Н. Оптические сенсоры газов на основе полупроводниковых источников ИК-излучения / В.Н. Кабацкий // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 4 (76). – С. 30-35.

26. Moore P.J. Remote sensing of overhead line conductor temperature using an infra-red sensor / P.J. Moore, D.B. Grace // International Conference on Advances in

Power System Control, Operation and Management, APSCOM-00. – 2000. – Vol. 2. – P. 385-389.

27. Guacheta M.C. Design and implementation of a portable infra-red sensor for hydrogen sulfide ($H_2S$) / M.C. Guacheta, A.P. Ascencio, J.F. Osma, J.D.Gamarra // IEEE 9th Ibero-American Congress on Sensors (IBERSENSOR). – 2014. – P. 1-4.

28. Allsop T. Multilayered coated infra-red surface plasmon resonance fibre sensors for chemical sensing / T. Allsop, R. Neal, C. Mou, P. Brown, S. Rehman, K. Kalli, D.J. Webb, D. Mapps, I. Bennion // European Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO Europe. – 2009. – P. 1-1.

29. Pei Gee Chua. Infra-red image detection with a Si-CCD image sensor due to the two-photon absorption process / Pei Gee Chua, Y. Tanaka, M. Takeda, T. Kurokawa // The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO/Pacific Rim, 2001. – Vol: 1. –P.1.

30. Parker M.A. Practical online condition monitoring of gearbox oil using non-dispersive infra-red sensors / M.A. Parker, A.Cleary, A.W. Hamilton // 3rd Renewable Power Generation Conference, RPG. – 2014. – P. 1-6.

31. Kumar V.M. Design and implementation robots for industrial and medical applications / V.M. Kumar, R. Balamurugan, S.N. Krishnan, S.D. Kumar, P.N. Kumar // International Conference on Current Trends in Engineering and Technology (ICCTET). – 2013. – P. 346-348.

32. Fiorini M. Multi sensor tracking function on modern anti-air-warfare (AAW) frigates / M. Fiorini, G. Filoni // IEE Target Tracking, Algorithms and Applications. – 2004. – P. 39-50.

33. Nakamura R. In-home monitoring Sensor using stepped-FM UWB-IR / R. Nakamura, A. Kajiwara // IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO). – 2013. – P. 1-3.

34. Граттан К.Т.В. Волоконно-оптические датчики и измерительные системы / К.Т.В. Граттан // Датчики и системы. – 2001. – № 3. – С. 46-50.

35. Egorov A.A. Study of the integrated-optical concentration sensor for gaseous substances / A.A. Egorov, M.A. Egorov, Yu.I. Tsareva, and T.K. Chekhlova // Laser Physics. – 2007. – V. 17. – P. 50-53.

36. Egorov A.A. Integrated-optical lowloss $PbO_2$ diffusion waveguide sensitive chemical sensor / A.A. Egorov, M.A. Egorov, R.B. Smoliakov, T.K. Chekhlova, A.G. Timakin // Journal of Radio Electronics. – 2007. – N. 5.

37. Егоров А.А. Исследование компьютеризированного интегрально-оптического датчика концентрации газообразных веществ / А.А. Егоров, М.А. Егоров , Т.К. Чехлова, А.Г. Тимакин // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – С. 787-790.

38. Shum Yu. Evanescent field absorption sensor in aqueous solutions using microstructured polymer optical fiber / Yu. Shum, G.B. Ren, Ye, Q., Z.J. Ding, G.H. Wang // Opto-Electronics and Communications Conference, 2008 and the 2008 Australian Conference on Optical Fibre Technology. OECC/ACOFT, 2008. – P. 1-2.

39. Surdo S. Silicon micromachined photonic crystal integrated in an opto-fluidic microsystem / S. Surdo, L.M. Strambini, G. Barillaro, F.M. Carpignano, S. Merlo // International Workshop on BioPhotonics. – 2011. – P. 1-3.

40. Wang Y. Temperature Sensing Using Photonic Crystal Fiber Filled With Silver Nanowires and Liquid / Y. Wang, M.T. Hao, C.J. Zhao, Z.Q.Yao // IEEE Photonics Journal. – 2014. – Vol: 6, Issue: 3. – P. 1-3.

41. Craddock R.J. Sensor fusion for smart containers / R.J. Craddock, E.V. Stansfield // The IEE Seminar on Signal Processing Solutions for Homeland Security. – 2005. – P. 12.

42. Gracheva I.E. AFM technicques for nanostructured materials used in optoelectronic and gas sensors / I.E. Gracheva, Y.M. Spivak, V.A.Moshnikov // EUROCON ’09. – IEEE Conference Publications, 2009. – P. 1246-1249.

43. Po-Cheng Chou. Nitrogen Oxide ($NO_2$) Gas Sensing Performance of ZnO Nanoparticles (NPs) /Sapphire-Based Sensors./ Po-Cheng Chou; Huey-Ing Chen; I-Ping Liu. // IEEE Sensors Journal. – 2015. -Vol. 15,.-Issue 7. – P. 3759-3763.

44. Yeonsung Lee. A -Si:H Thin-Film Phototransistor for a Near-Infrared Touch Sensor / Lee Yeonsung, I. Omkaram, J. Park, Hyun-Suk Kim, Ki-Uk Kyung, Park Wook, Kim Sunkook // IEEE Electron Device Letters – 2015. – Vol. 36, Issue: 1. – P. 41-43.

45. Sang Youn Han. Optical Properties of a-SiGe:H Thin Film Transistor for Infrared Image Sensors in Touch Sensing Display / Sang Youn Han; Kyung Tea Park; Ho Sik Jeon; Yang Wook Heo; Byung Seong Bae. // Journal of Display Technology. – 2012. – Vol. 8, Issue: 10. – P. 617-622. .

46 Sang Youn Han. Design of a Multifunctional Double-Active-Layer Thin-Film Transistor for Photosensing Applications/ Sang Youn Han; Kyung Sook Jeon; Seung Mi Seo; Mi Seon Seo; Suk-Won Jung// IEEE Electron Device Letters. – 2013. – Vol. 34, Issue: 1. – P. 66-68.

47. Tai. Gap-Type a-Si TFTs for Front Light Sensing Application / Tai, Ya-Hsiang, Lu-Sheng Chou, Hao-Lin Chiu//Journal of Display Technology. – 2011. – Vol. 7, Issue: 12. – P. 679-683.

48. Lei-Guang Chen. An integrated micromanipulation and biosensing platform built in glass-based LTPS TFT technology / Lei-Guang Chen, Dong-Yi Wu, Lu, M.S.-C.// IEEE Sensors. – 2012. – P. 1-4.

49. Jun Namkung. Application to shear force sensors by homeotropic liquid crystal (LC) orientation (non-reviewed) / Jun Namkung, Lindquist R., Abu-Abed A.// IEEE Southeastcon. – 2008. – P. 80.

50. Hassanzadeh A. Liquid Crystal Sensor Microchip / A. Hassanzadeh, R.G. Lindquist // IEEE Sensors Journal. – 2012. – Vol. 12, Issue: 5. – P. 1536-1544.

51. Wolinski T.R. Development of fiber optic liquid crystal sensor for pressure measurement / T.R. Wolinski, W.J. Bock, A. Jarmolik // Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/95, 1995. – P. 664.

52. Ha, Dohyuk. 3D packaging technique on liquid crystal polymer (LCP) for miniature wireless biomedical sensor / Ha, Dohyuk; Byung Guk Kim; Lin, Tse-Yu; Yuehui Ouyang; Irazoqui, P.P.; Chappell, W.J. // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). – 2010. – P. 612-615.

53. Algorri J.F. Modal liquid crystal temperature sensor / J.F. Algorri, P.C. Lallana, V.Urruchi, J.M. Sánchez-Pena // IEEE SENSORS. – 2014. – P. 1960-1963.

54.Qiang Liu, Shuguang Li, Hailiang Chen, Zhenkai Fan, Jianshe Li. Photonic Crystal Fiber Temperature Sensor Based on Coupling Between Liquid-Core Mode and Defect Mode // IEEE Photonics Journal. – 2015. – Vol. 7, Issue: 2.

55. Vazquez, C. Optical router for optical fiber sensor networks based on a liquid crystal cell / Vazquez, C.; Pena, J.M.S.; Vargas, S.E.; Aranda, A.L.; Perez, Isabel// IEEE Sensors Journal. – 2003. – Vol. 3, Issue: 4. – P. 513-518.

56. Abu-Abed, A. Capacitive Transduction for Liquid Crystal-Based Sensors, Part I: Ordered System / Abu-Abed, A.; Lindquist, R.G.; Woo-Hyuck Choi// IEEE Sensors Journal. – 2007, Vol. 7, Issue: 12. –P. 1617-1624.

57. Jun Namkung. Sensing characteristics of chemical agents by using liquid crystal-based chemical and biological sensors / Jun Namkung; Yang Zou; Dan Ke; Yongbin Lin; Lindquist, R.G.// Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2010. – P. 1-2.

58. Sridharamurthy S.S. A Liquid Crystal Based Gas Sensor Using Microfabricated Pillar Arrays as a Support Structure / S.S. Sridharamurthy, K.D. Cadwell, N.L. Abbott, Jiang Hongrui // IEEE Sensors. – 2007. – P. 1044-1047.

59. Jing Feng. Fiber-Optic Pressure Sensor Based on Tunable Liquid Crystal Technology / Jing Feng; Yun Zhao; Su-Shan Li; Lin, Xiao-Wen; Fei Xu; Lu, Yan-qing// IEEE Photonics Journal. – 2010, Vol. 2, Issue: 3. – P. 292-298.

60. Hassanzadeh, A. A new method for orientation angle measurement of anisotropic medium of liquid crystal chemical and biological sensors / A. Hassanzadeh // 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2014. – P. 190-192.

61. Chia-Yi Huang. Calibration-free force sensors using liquid crystal arrays / Chia-Yi Huang, Liang Lou; Chengkuo Lee // IEEE Sensors. – 2012. – P. 1-4.

62. Yu-Tse Lai. A novel gas sensor using polymer dispersed liquid crystal doped with carbon nanotubes / Yu-Tse Lai; Yao-Joe Yang// IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2013. – P. 977-980.

63. Yang Zou. Enhanced chemical and biological sensor based on liquid crystal using a bias electric field / Yang Zou; Jun Namkung; Yongbin Lin; Dan Ke; Lindquist, R.// Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2010. – P. 1-2.

64.Готра З.Ю. Сигнальні перетворювачі сенсорних пристроїв на інтегральних структурах магнітотранзисторів з ємнісним навантаженням /Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Годинюк І.М. // Складні системи та процеси.- 2012.-№1.-С.14-24.

65.Hotra Z. Signal transducers of capacitive microelectronic sensors /Z. Hotra , R.Holyaka, T.Marusenkova, J.Potencki // Electronika. Rzeszow. Poland. – 2010.- № 8.- P.129-132.

66. Brodzeli, Z. Sensors at Your Fibre Tips: A Novel Liquid Crystal- Based Photonic Transducer for Sensing Systems / Brodzeli, Z.; Silvestri, L.; Michie, A.; Qi Guo; Pozhidaev, E.P.; Chigrinov, V.; Ladouceur, F.// Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Vol. 31, Issue: 17. – P. 2940-2946.

67. Peizerat A. Tchagaspanian M. An 88dB SNR, 30µm pixel pitch Infra-Red image sensor with a 2-step 16 bit A/D conversion / Peizerat A., Rostaing J., Zitouni N., Baier N., Guellec F., Jalby R.// Symposium on VLSI Circuits (VLSIC). – 2012. – P. 128-129.

68. Гельжинський І.І. Мікросхемотехніка / Гельжинський І.І., Голяка Р.Л., Марусенкова Т.А.; за ред. З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-прес, 2015. – 492 с.

69. C. W. Chow. Digital signal processing for light emitting diode based visible light communication / C. W. Chow, C. H. Yeh, Y. Liu, and Y. F. Liu //IEEE Photon. Soc. Newslett. – 2012. – Vol. 26. – P. 9-13.

70. Chow C. W.. Mitigation of optical background noise in light-emitting diode (LED) optical wireless communication systems / C. W. Chow, C. H. Yeh, Y. F. Liu, and P. Y. Huang // IEEE Photon. J. – 2013. – Vol. 5, N. 1.

71. I. Bolshakova Experimental Evaluation of Stable Long Term Operation of Semiconductor Magnetic Sensors at ITER Relevant Environment / I. Bolshakova, V. Coccorese,. Holyaka, N. Kargin// Nuclear Fusion – 2015. Vol. 55. N. 8.

72.Большакова І.А. Сенсорні пристрої магнітного поля на сенсорах Холла з розщепленою структурою /Большакова І.А., Голяка Р.Л., Мороз А.П., Єрашок В.Е., Марусенкова Т.А.// Електроніка. Вісник Національного університету „Львівська політехніка”.– 2009. – № 646 – С.38-45.

73. Готра З.Ю. Фізичні основи електронної техніки: підручник / З. Ю. Готра, І. Є. Лопатинський, Б. А. Лукіянець, З. М. Микитюк, І. В. Петрович. – Львів: “Бескид Біт”, 2004. – 880 с.

74. Беляков В.А. Оптика холестерических ЖК / В. А. Беляков, А. С. Сонин. – М.:Наука, 1982. – 360 с.

75. Mikityuk Z. Multifunctional sensor with a liquid crystal probe / Z. Mikityuk, R. Zayats, O. Gotra // Proceedings of 2-nd International Symposium on Microelectronics Technologies and Microsystems, Lviv. – 1998. – P. 221-224.

76.Wolinski T.R. Development of fiber optic liquid crystal sensors for pressure measurement/T.R. Wolinski ,W.J.Bock, A.Jarmolik// Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/95,1995.-P.664.

77. Parmar D.S. Pressure sensor using liquid crystals / D. S. Parmar, H. K. Holmes // US Patent. – 1994. – No. 5,309,767.

78. Parmar D.S. A Novel Technique for Response Function Determination of Shear Sensitive Cholesteric Liquid Crystals for Boundary Layer Investigations / D. S. Parmar // Review of Scientific Instruments. – 1991. – Vol. 62, No. 6. – P. 1596-1608.

79. Микитюк З.М. Багатофункціональний рідкокристалічний сенсор / З. М. Микитюк, О. З. Готра, О. Є. Сушинський, В. В. Черпак, В. Г. Іваницький, Б. Даланбаяр // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки. 2001.– № 427. – С. 143-149.

80. Антонян Т.П. Спектрофотометрический анализ взаимодействия паров немезогенных веществ с холестерическим растворителем/ Т.П.Антонян, Л.Н.Лисецкий//Журнал физической химии.-1981.-№5.-с.1169-1173.

81. Mykytyuk Z. Liquid crystal as active elements of sensors based on planar waveguide / Z. Mykytyuk, A. Fechan, V. Cherpak, V. Ivanytskyy, B. Dalanbayr // Opto-Electronics Review. – 2002. – Vol. 10(1). – P. 79-82.

82. Клюева В.В. Неразрушающий контроль и диагностика / В. В. Клюева. – М.: Машиностоение. – 1995. – 216 с.

*83.* Гик Л.Д. Акустическая голография / Л. Д. Гик – Новосибирск.:Наука,1981, – 109 с.

84. Фергасон Дж.Л. Жидкокристаллические детектори. Акустическая голография / Дж. Л. Фергасон . – Пер.с англ., Л., “Судостроение”, 1975, – 518 с.

85. Casesent D. Spatial Light modulators / D. Casesent // Proc. IEEE. – 1977. – Vol. 65. – P. 143-157.

86. Городков В.Е. Контактная жидкость для передачи ультразвуковых колебаний / В. Е. Городков, Р. Я. Зелинский, Я. М. Олих // Авторское свидетельство СССР, № 1311405.

87.Готра З.Ю. Рідкокристалічна електроніка/ Готра З.Ю.,Зелінський Р.Я.,Микитюк З.М.,Сорокін В.М.,Сушинський О.Є., Фечан А.В.;за ред.Готри З.Ю.-Львів, Апріорі,2010.-531с.

88. Маглеванный В.И. Жидкокристаллический детектор для визуализации акустических полей / В. И. Маглеванный // Авторское свидетельство СССР, № 516994, БИ №21, 1976.

89. Фечан А.В. Чутливі елементи сенсорів шкідливих речовин на основі холестеричних рідких кристалів / А. В. Фечан, О. Й. Ясиновська, В. І. Коцун // Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців “Комп’ютерний моніторинг та інформаційні технології”. – Донецьк, Україна, 12-15 травня 2009. – С. 54 – 55.

90. Готра З.Ю. Спосіб виготовлення рідкокристалічного пристрою / З. Ю. Готра, З. М. Микитюк, А. В. Фечан, О. Є. Сушинський, М. О. Шимчишин // Патент України № u 200812146, МПК(2006) G02F 1/13. – № 133/1: заяв. 14.10.2008, опубл. 12.01.2009.

91. Spreeta-R TSPR2KXY-R. Refractive Index Sensor. Product Bulletin. Texas Instruments Inc. – 2003. – 2 p. [Електронний ресурс] – Режим доступу:www.spreeta.com.

92. CNY70 - Reflective Optical Sensor with Transistor Output. Document Number:

93. Phototransistors [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.opto-electronics.perkinelmer.com

94. Оптические беспроводные выключатели. Промышленная группа «СЕНСОР».–Режимдоступу: http://www.sensor.dp.ua/?catalog&dep=609&id=1290

95. TLC5971 -12-Channel, 16-Bit, Enhanced Spectrum, PWM, RGB, LED Driver with 3.3-V Linear Regulator. – 43 p. [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.ti.com

96.Мікроелектронні сигнальні перетворювачі теплових сенсорів потоку: монографія / З.Ю.Готра, С.В.Павлов, Р.Л.Голяка та ін. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 240 с.

97.Готра З.Ю. Исследование и повышение стабильности работы операционных усилителей в схемах драйверов емкосных сенсоров /Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Гельжинський І.І// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008.- №3 (75).- С.20-24.

98.Готра З.Ю. Контролер температурного режиму термоанемометричних сенсорів протоку /ГотраЗ.Ю.,ГолякаР.Л.,КуленкоС.С.,Єрашок В.Е. //Электроника и связь. – 2009. – №2-3. С.22-27.

99.Готра З.Ю. Повышение электромагнитной помехоустойчивости сигнальных преобразователей на сенсорах Холла / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Ильканич В.Ю., Марусенкова Т.А., Бойко О.В. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. –№4.– С.13-18.

100.Готра З.Ю. Аналіз ефективності придушення електромагнітних завад в холлівських сенсорних пристроях /Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Ільканич В.Ю., Марусенкова Т.А // Електроніка. - 2013. - № 764.- С.13-22.

101.Готра З.Ю. Алгоритми мультитактного сигнального перетворення в холлівських сенсорних пристроях /Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Ільканич В.Ю.,

Марусенкова Т.А.// Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2013.- № 6/12(66) ч.2. - С. 86-90.

102.Bolshakova, I. Magnetic Measuring Instrumentation With Radiation-Resistant Hall Sensors for Fusion Reactors: Experience of Testing at JET /Bolshakova, I.; Holyaka, R.; Duran, I. // IEEE Transactions on Nuclear Science. - 2012. Volume: 59, Issue: 4. Part 2.- P. 1224 – 1231.

103.Готра З.Ю.Завадостійкий сигнальний перетворювач на базі синхронного детектора / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Готра О.З., Гельжинський І.І., Марусенкова Т.А. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2010. – № 71. – С. 110 – 117.

104. Macdonald R. A new photoelectric reorientation effect for the realization of highly sensitive photorefraction in liquid crystals / Macdonald R.; Meindl P.// Nonlinear Optics '98: Materials, Fundamentals and Applications Topical Meeting. – 1998. – P. 92-94.

105. Byeong Kwan Yang. A photopolarimeter for real-time analysis of dynamic characteristics of LC cells / Byeong Kwan Yang; Bong Gyu Rho; Jae Ki Kim; Jin Seung Kim // The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO/Pacific Rim '99. – 1999. – Vol. 1. – P. 68-69.

106. Saitoh K. Tunable Photonic Crystal Fiber Couplers Infiltrated with Highly-Thermo-Responsive Liquid Crystal Substances / K. Saitoh, N.J. Florous, S.Varsheney, M. Koshiba// Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007. – P. 1-2.

107. Multi SMD LED RGB VLMRGB343 // # 81742 20014. - 7P [Електро-нний ресурс] – Режим доступу:www.vishay.com

108. Быстродействующий фотодиод PD24-01-HS. IBSG Co., Ltd. 2012. – 5 p. [Електронний ресурс] – Режим доступу:www.ibsg.ru

109. Sets for the analysis of gases and liquids. Photodiode amplifier with TEC AMP24-10. IBSG Co. Ltd. – 2014. [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.ibsg.ru.

110. Smart Sensor Solutions powered by IO-Link // SICK Sensor Intelligence 8011727/2013-11. – 68 P. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.mysick.com/saqqara/pdf.aspx?id=im0018712

111.Vistak M. Basic regularities of chance of time characteristics of liquid-crystal mixtures // Europian conference of liquid crystal, Marebor. – 2011. – P. 63.

112.Вісьтак М.В. Рідкокристалічні матеріали для біосенсорів // IV Міжнародна науково-практична конференція, Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки. Чернівці.- 2014. – С. 205.

113 Vistak M.V. Cholesteric-nematic phase transition for the liquid crystal display/ Vistak M.V., Mikityk Z.M. //SPIE Liquid Crystals Materials, Devices, Applications2.- 1995.-Vol.2652.- USA.- P. 209-216.

114.Mikityk Z.M. Temperature Dependence of Field Hysteresis Loop in Nemato-Cholesteric Mixtures / Mikityk Z.M., Nemerznitska Z.M., Zaremba P.O., Vistak M.V.// Mol.Cryst.Liquid.Cryst.- 1996.- Vol.275.- P.3-14.

115.Vistak M. Induced cholesteric and its application in display devices / Vistak M., Parashchuk Z., Semenova J.// I Sand T's 49 Annual Conference.- 1996.- USA. P.418-419.

116.Greubel W. Bistability behavior of texture in cholesteric liquid crystals electric field/W.Greubel//Appl.Phys.Lett.-1974.-Vol.25-P.5-7.

117.Mikityk Z.M. The field hysteresis of the cholesteric –nematic transition of phase / Mikityk Z.M., Nemerznitska Z.M., Fechan A.V., Vistak M.V.// SPIE Display Systems.- 1993.- Vol. 1988.- P. 210-222.

118.Kurik M. Determination of Elstic Constant of Nematic-Constant Mixtures /.Kurik M., Mikityuk Z., Fechan A. and Nemerznitska O., Vistak M.// Mol.Cryst.Liq.Cryst.- USA .-1997.- Vol.293.- P. 1-6.

119.Gotra Z.J. Hysteresis effect of the cholesteric to nematic phase transition and it's application in liquid crystal displays/ Gotra Z.J.,Mikityuk Z.M.,GretskoI.,Vistak M.V.// SPIE Liquid Crystal Materials, Devices and Applications.- USA .-1992.- Vol.1665.- P.240-242.

120.Vistak M.V. Correlation of structural and elasticity properties of nematic-cholesteric mixtures / Vistak M.V., Gotra Z.J., Mikityuk Z.M., Zaremba P.O.// SPIE

Liquid Crystal Materials, Devices and Applications.- San Jose, USA .-1993.- Vol. 1911.- P. 100-102.

121.Parhomenko V.I. Properties of liquid crystals in liquid crystals substrate beandary lavers /Parhomenko V.I., Vistak M.V.// 7 International Liquid Crystal Conference.- Czechoslovakia, Pardubice.-1987.-P.A.25.

122.Wilson M. Computer simulations of a liquid crystalline dendrimer in liquid crystalline solvents / M. Wilson, J. Ilnytskyi, L. Stimson // Journal of Chemical Physics – 2003. – Vol. 119, no. 6. – P. 3509–3515.

123.Wilson M. The influence of lateral and terminal substitution on the structure of a liquid crystal dendrimer in nematic solution: A computer simulation study / M. Wilson, L. Stimson, J.M.Ilnytskyi // Liquid Crystals. – 2006. – Vol. 33, no. 10. – P. 1167–1175.

124.Saphiannikova M. Molecular-dynamics simulations and X-ray analysis of dye precipitates in the polyelectrolyte microcapsules / M. Saphiannikova, I. Radtchenko, G. Sukhorukov, D. Shchukin, A. Yakimansky, J. Ilnytskyi // Journal of Chemical Physics – 2003. – Vol. 118, no. 19. – P. 9007–9014.

125.Ilnytskyi J. Molecular dynamics simulations of photo-induced deformations in azobenzene-containing polymers / J.M. Ilnytskyi, D. Neher, M. Saphiannikova // Proceedings of Tenth Granada Lectures on Modeling and Simulation of New Materials // Granada, Spain: AIP. – 2008. – P. 57 – 78.

126.Ilnytskyi J. A study of the nematic-isotropic transition in liquid crystals by Monte Carlo simulations of lattice models /J.M. Ilnytskyi // Abstracts of Workshop on Condensed Matter Physics / INTAS. – Lviv, Ukraine: 21-24 May 1998. – P. 93.

127. Chaban O. Studying the Electrically Driven Switching of the Planar Light Guide /O. Chaban , Z. Hotra, J. Ilnytskyi, A. Fechan, V. Kotsun, Z. Mykytyuk, M. Vistak & O. Sushynsky //Molecular Crystals and Liquid Crystals// 2015, Vol 611.- P. 160-170.

128.Чабан О. Комп’ютерне моделювання процесу утворення електрокерованих планарних світловодних структур/ Чабан О., Баштик Ю., Вісьтак М. //Технічні вісті.- 2014.-1 (39).- С.91-94.

129.Mikityuk Z.M. Spease-time modulator of light based on the structure metal-liquid crystal dielectric with electron ray addresation /Mikityuk Z.M., Fechan A.V., Vistak M.V.// SPIE Vol. 1665 Liquid Crystal Materials, Devices and Applications.- USA.- 1992.- P.240-242.

130. М.С.Нуцковський, Особливості модуляції ІЧ випромінювання структурами//Вісник ДУ “Львівська політехніка”.-1998.-N357.-С.56-58.

131. Mikityuk Z. Liquid crystal modulator of laser radiation for high-power lasers of infra-red rande of spectrum./ Mikityuk Z.,Semenova J., Nutskovsky M.,Sushinsky O. // Cryst.Liquid Cryst.-1998.-Vol.1123.-P.1231-1235.

132. Микитюк З.М. Низькочастотний оптичний автогенератор з РК – модулятором / З. М. Микитюк, М.С. Нуцковський// Вісник ДУ «Львівська політехніка». – 1999.-№ 362.–С.16-19.

133.Готра З. Спосіб виготовлення первинного перетворювача оптоволоконного сенсора температури/ Готра З., Микитюк З., Фечан А., Сушинський О., Вісьтак М., Пристай Т. // Патент N94082.- 27.10.2014.

134.Готра З. Спосіб виготовлення первинного перетворювача оптоволоконного сенсора мооксиду вуглецю/ Готра З.,Микитюк З., Фечан А., Сушинський О., Вісьтак М., Пристай Т., Аксіментєва О. // Патент N91552.- 10.07.2014.

135.Микитюк З. Спосіб виготовлення первинного перетворювача оптоволоконного сенсора монооксиду вуглецю/ .Микитюк З., Фечан А., Сушинський О., Вісьтак М., Пристай Т., Чабан О., Гнат А.// Патент N94083.- 27.10.2014.

136.Готра З. Ю. Оптоелектронний сенсор монооксиду вуглецю на основі холестеричного рідкого кристала легованого магнетитом $Fe_2O_3$ / З. Ю. Готра, М. В. Вісьтак, З. М. Микитюк, О. Є. Сушинський, Т. В. Пристай // Міжнародний науково-технічний журнал, Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – №1 (25). – С. 94-100.

137.Yamazoe N. Oxide Semiconductor Gas Sensors. / N. Yamazoe, G. Sakai, D. Shimanoe // Catalysis Surveys from Asia. – 2003. – Vol. 7(1). – P. 63-75.

138.Hotra Z. Silicon dioxide nanoporous structure with liqid crystals for optical sensors. / Z. Hotra, M. Vistak, Z. Mikityuk, A. Fechan, O. Sushynskyi // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 91027. – P. 91027F-1–91027F-6.

139.Вісьтак М. В. Виявлення токсичних концентрацій монооксиду вуглецю на організм людини із використанням нанорозмірних домішок магнетитів, легованих у рідкокристалічну матрицю. / М. В. Вісьтак О. Є. Сушинський // Експериментальна та клінічна фізіологія і біохімія. – 2014. – № 2(66). – С. 38-43.

140.Vistak M. Microelectronic liquid crystal structure of electronic technic for biosensors // XIV International Congress of Medical Science. Abstract Book (May 07-10, 2015). Sofia, Bulgaria. – P.77.

141.Aksimentyeva O. Cholesteric liquid crystal doped nanosized magnetyt as active medium of optical gas sensor. / O. Aksimentyeva, Z. Mykytyuk, A. Fechan, B.Tsizh, O. Sushynskyi // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2014. – Vol. 589. – P. 83-89.

142. Vistak M. Nanotehnology in medicine // XIII Internacional congress of medical sciences. Sofia, Bulgaia 2014. – P. 81.

143.Вісьтак М. Модифікація холестеричних рідких кристалів активними нанодомішками для елементів електронної техніки. / М. Вісьтак, З. Готра О. Сушинський // Львів: Видавництво “Львівська політехніка”. – 2014. – 292 с.

144.Mykytyuk Z. Optoelectronic multi-sensor of $SO_2$ and $NO_2$ gases. / Z. Mykytyuk, A. Fechan, V. Petryshak, G. Barylo, O. Boyko // Proceedings of the International Conference TCSET’2016 .

145.Vistak M. Sensing of carbon monoxide with porous $Al_2O_3$ intercalated with $Fe_3O_4$ nanoparticles-doped liquid crystal. / M. Vistak, O. Sushynskyi, Z. Mykytyuk, O. Aksimentyeva, Y. Semenova // Sensors and Actuators A: Physical. – 2015. – Vol. 235. – P. 165-170.

146.Llobet E. Gas sensor using carbon nanomaterials: a review. / E. Llobet // Sens. Actuators B:Chem. – 2013. – Vol. 179. – P. 32-45

147.Готра З. Явище плазмонного резонансу в металевих наночастинках при низько інтенсивному збудженні /Готра З., Микитюк З., Фечан А., Вісьтак М., Сушинський О., Гнат А.// IV Міжнародна науково-практична конференція, Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки.- Чернівці.- 2014. – С. 182.

148.Fechan A. The primary transducers on the basis of polymer-dispersed cholesteric liquid crystals for optical sensors / Fechan A., Sushynskyi O., Mykytyuk Z., Vistak M. // 13 International conference “Electronic and related properties of organic solids”.- Poland.- 2014. – P. 71.

149.Khoang N.D. On-chip growth of wafer-scale planar-type ZnO nanorod sensors for detection of CO gas. / N.D. Khoang, H.S. Hong, D.D. Trung, N.V. Duy, N.D. Hoa, D.D. Thinh, N.V. Hieu // Sens. Actuators B: Chem. – 2013. – Vol. 181. – P. 529-536.

150.Andrushchak A. Nanostructures on the Basis of Porous Alumina with Intercalated with Cholesteric Liquid Crystal / A. Andrushchak, Z. Hotra, Z. Mykytyuk, T. Prystay, M. Vistak, O. Sushynskyi // Molecular Crystals and Liquid Crystals – 2015. – Vol. 611. – pp. 132-138.

151.Prystay T. Nanocomposite based on a liquid crystal doped with aluminum nitride nanotubes for optical sensor of sulfur dioxide / T. Prystay, M. Vistak, Z. Mykytyuk, O. Sushynskyi, A. Fechan // Journal of the SID. – 2015. – Vol. 23/9. – P. 438-442.

152.Готра З.О. Полімер-диспергований рідкокристалічний матеріал як активне середовище первинного перетворювача оптичного сенсора температури. / З. О. Готра, А. В. Фечан, Г. І. Барило, О.В. Бойко, М.В.Вісьтак, О.Є. Сушинський, Т.В. Пристай // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – №2 (26). – С. 131-135.

153.Микитюк З.М.Дослідження явища плазмонного резонансу в металевих наночастинках при низькоінтенсивному збудженні / З. М. Микитюк, О. Є. Сушинський, М. В. Вісьтак, В. С. Петришак, Т. В. Пристай // Eastern-european journal of enterprise technologies – 2014. – Vol. 6, No. 9(72). – P. 36-42.

154.Daniel L. Michae Nanomaterials, Nanotechnologies and Design: An Introduction for Engineers/.Daniel L. Schodek, Paulo Ferreira// (2009) P.527.

155. L.A. Dykman Gold nanoparticles: preparation, functionalisation and applications in biochemistry and immunochemistry / L.A. Dykman, V.A. Bogatyrev // Uspekhi Khimii – 2007. – Vol. 76. – P. 199–213.

156. X.H. Huang Gold nanoparticles: interesting optical properties and recent applications in cancer diagnostic and therapy / X.H. Huang, P.K. Jain, I.H. El-Sayed, M.A. El-Sayed // Nanomedicine – 2007. – Vol. 2. – P. 681-693.

157.C.X. Yu.Multiplex biosensor using gold nanorods. / C.X.Yu, J. Irudayaraj // Analytical Chemistry – 2007. – Vol. 79. – P. 572–579

158 P.K. Jain Universal scaling of plasmon coupling in metal nanostructures: extension from particle pairs to nanoshells / P.K. Jain, M.A. El-Sayed // Nano Letters – 2007. – Vol. 7. – P. 2854–2858.

159. Schultz D.A. Plasmon resonant particles for biological detection / D. A. Schultz // Current Opinion in Biotechnology – 2003. – Vol. 14. – P. 13–22.

160. P.K. Jain Au nanoparticles target cancer / P.K. Jain, I.H. El-Sayed, M.A. El-Sayed // Nano Today – 2007. – Vol. 2. – P. 18–29.

161. Narayanan R .Catalysis with Metallic Nanoparticles: The Good and the Bad / R. Narayanan, M.A. El-Sayed, Chimica Oggi // Chemistry Today – 2007. – Vol. 25. – P.84–86.

162. Maier S.A..Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures / S.A. Maier, H.A. Atwater // Journal of Applied Physics – 2005. – Vol. 98. – P. 011101-011107.

163. Caseri W. Nanocomposites of polymers and metal or semiconductors historical background and potical properties // Macromolecular Rapid Communications – 2000. –Vol. 21. – P. 705–722.

164.LyashchovaA.G. Nonlinear Optical Properties of New Nanocomposite: Metal Alkanoate Glasses with Semiconductor Quantum Dots Nanomaterials Imaging Techniques, Surface Studies, and Applications / A.G.Lyashchova, D.V.Fedorenko,

G.V.Klimusheva, T.A.Mirnaya and V.N.Asaula// Springer Proccedings in Physics 146.- P.93-101

165. JamesJ.Z. Gold nanoparticle films as sensitive and reusable elemental mercury sensors. / J.Z.James, D. Lucas, C.P. Koshland // Environ Sci Technol. – 2012. – Vol. 46(17). – P. 9557-9562.

166. Вісьтак М.В. Динамічні властивості нелінійних явищ у золотих наночастинках для нанокомпозитів оптоелектроніки. // Оптична і квантова електроніка в комп'ютерних та інтелектуальних технологіях. – 2014 – Т. 26, №2. – С.134-137.

167.Rebecca J. Abbott Chemical and biological sensing using liquid crystals/ Rebecca J. Carlton, Jacob T. Hunter, Daniel S. Miller, Reza Abbasi, Peter C. Mushenheim, Lie Na Tan, and Nicholas L// Liq Cryst Rev.- 2013.-1(1).-P. 29–51.

168.Shah RR. Principles for measurement of chemical exposure based on recognition-driven anchoring transitions in liquid crystals/ Shah RR, Abbott NL// Science-. 2001.-293.-P.1296–1299.

169.Yang KL. Mechanistic study of the anchoring behavior of liquid crystals supported on metal salts and their orientational responses to dimethyl methylphosphonate/ Yang KL, Cadwell K, Abbott NL J.// Phys Chem B.- 2004.-108.-P.20180–20186.

170.Yang KL. Use of self-assembled monolayers, metal ions and smectic liquid crystals to detect organophosphonates/ Yang KL, Cadwell K, Abbott NL// Sens Actuators, B.- 2005.-104.-P.50–56.

171.Wang PH. A novel liquid crystal-based sensor for the real-time identification of organophosphonate vapors /Wang PH, Yu JH, Zhao YB, Li ZJ, Li GQ// Sens Actuators, B.- 2011.-160.-P.929–935.

172.Cadwell KD. Detection of organophosphorous nerve agents using liquid crystals supported on chemically functionalized surfaces /Cadwell KD, Lockwood NA, Nellis BA, Alf ME, Willis CR, Abbott NL. // Sens Actuators, B.- 2007.-128.-P.91–98.

173.Shah RR. Orientational transitions of liquid crystals driven by binding of organoamines to carboxylic acids presented at surfaces with nanometer-scale topography/ Shah RR, Abbott NL.// Langmuir.- 2003.-19.-P.275–284.

174.Bi X. Real-time liquid crystal-based glutaraldehyde sensor /Bi X, Yang KL.// Sens Actuators, B.- 2008.-134.-P.432–437.

175.Xu H. Principles of detecting vaporous thiols using liquid crystals and metal ion microarrays /Xu H, Bi X, Ngo X, Yang K-L// Analyst.- 2009.-134.-P.911–915.

176.Clare BH. Anchoring energies of liquid crystals measured on surfaces presenting oligopeptides /Clare BH., Guzman O., de Pablo J., Abbott NL.// Langmuir.- 2006.-22.-P.7776–7782.

177.Bai YQ. Enantiomeric interactions between liquid crystals and organized monolayers of tyrosine-containing dipeptides. /Bai YQ, Abbott NL J// Am Chem Soc.- 2012.-134.-P.548–558.

178.Nakata M. Liquid crystal alignment on a chiral surface: Interfacial interaction with sheared DNA films /Nakata M, Zanchetta G, Buscaglia M, Bellini T, Clark NA.// Langmuir.- 2008.-24.-P.10390–10394.

179.Chen CH. Detection and quantification of DNA adsorbed on solid surfaces by using liquid crystals/ Chen CH, Yang KL.// Langmuir.- 2010.-26.-P.1427–1430.

180.Lai SL. Detection of DNA targets hybridized to solid surfaces using optical images of liquid crystals /Lai SL, Tan WL, Yang KL// ACS Appl Mater Interfaces.-2011.-3.-P.3389–3395.

181. Govindaraju T. Using measurements of anchoring energies of liquid crystals on surfaces to quantify proteins captured by immobilized ligands/ Govindaraju T, Bertics PJ, Raines RT// Abbott NL J Am Chem Soc.- 2007.-129.-P.11223–11231.

182. Gupta VK. Optical amplification of ligand-receptor binding using liquid crystals/ Gupta VK, Skaife JJ, Dubrovsky TB, Abbott NL// Science.- 1998.-279.-P.2077–2080.

183.Jang CH. Using liquid crystals to report membrane proteins captured by affinity microcontact printing from cell lysates and membrane extracts /Jang CH, Tingey ML,

Korpi NL, Wiepz GJ, Schiller JH, Bertics PJ, et al// J Am Chem Soc.- 2005.-127.-P.8912–8913. [PubMed].

184. Skaife JJ. Quantitative interpretation of the optical textures of liquid crystals caused by specific binding of immunoglobulins to surface-bound antigens / Skaife JJ, Abbott NL// Langmuir.- 2000.-16.-P.3529–3536.

185. Skaife JJ. Influence of molecular-level interactions on the orientations of liquid crystals supported on nanostructured surfaces presenting specifically bound proteins/ Skaife JJ, Abbott NL// Langmuir.- 2001.-17.-P.5595–5604.

186. Raines RT. Imaging the binding ability of proteins immobilized on surfaces with different orientations by using liquid crystals / Raines RT, Abbott NL J// Am Chem Soc.- 2004.-126.-P.9024–9032. [PubMed]

187. Clare BH. Orientations of nematic liquid crystals on surfaces . Luk YY, Tingey ML, Dickson presenting controlled densities of peptides: Amplification of protein-peptide binding events/ Clare BH, Abbott NL //Langmuir.- 2005.-21.-P.6451–6461. [PubMed].

188. Lowe AM. Design of surfaces for liquid crystal-based bioanalytical assays/ Lowe AM, Ozer BH, Bai YQ, Bertics PJ, Abbott NL.// ACS Appl Mater Interfaces.-2010.-2.-P.722–731. [PMC free article] [PubMed].

189. Lowe AM. Quantitative methods based on twisted nematic liquid crystals for mapping surfaces patterned with bio/chemical functionality relevant to bioanalytical assays/ Lowe AM, Bertics PJ, Abbott NL// Anal Chem.- 2008.-80.-P.2637–2645. [PMC free article] [PubMed].

190.Michael J. Whitcombe. The rational development of molecularly imprinted polymer-based sensors for protein detection / Michael J. Whitcombe,a Iva Chianella,a Lee Larcombe,a Sergey A. Piletsky,a James Noble,b Robert Porterb and Adrian Horgan// Chem. Soc. Rev.- 2011- 40.-P. 1547–1571.

191.Scott J.W. Liquid Crystals - Frontiers in Biomedical Applications / J.W. Scott, D.J. Gregory, P. Gregory// Crawford, World Scientific.- 2007.−P. 516.

192. Brake J.M. Biomolecular interactions at phospholipid-decorated surfaces of liquid crystals / J.M. Brake, M.K. Daschner, Y.Y. Luk, N.L. Abbott // Science. – 2003. – Vol. 302. – P. 2094–2097.

193. Dudchenko O. Ye. Biosensors for determination of the most common carbohydrates / Dudchenko O. Ye., Pyeshkova V. N., Soldatkin A. A., Dzyadevych S. V.// Sensor Electronics and Microsystem Technologies.- 2014. – V.11. - № 4.- P.81-96.

194.Dung N. Q. An amperometric glucose biosensor based on a $GO_x$-entrapped $TiO_2$–SWCNT composite /Dung N. Q., Patil D., Duong T.T., Jung H., Kim D., Yoon S.G.// Sensors Actuators B. – 2012. – 166– 167. – P. 103 – 109.

195.Li F. Direct electrochemistry of glucose oxidase and biosensing for glucose based on carbon nanotubes-$SnO_2$-Au composite /Li F., Songa J., Li F., Wang X., Zhang Q., Han D., Ivaska A., Niu L.// Biosens. Bioelectronics. – 2009. – 25. – P. 883–888.

196.Palanisamy S. Amperometric glucose biosensor based on glucose oxidase dispersed in multiwalled carbon nanotubes/graphene oxide hybrid biocomposite /Palanisamy S., Cheemalapati S., Chen S.M.// Materials Science Engineering C. – 2014. – 34. – P. 207–213.

197.Jang H. D. A glucose biosensor based on $TiO_2$ –Graphene composite / Jang H. D., Kim S.K., Chang H., Roh K.M., Choi J.W., Huang J.// Biosens. Bioelectronics. – 2012. –38. – P. 184–188.

198.Zafar M. N. Characteristics of thirdgeneration glucose biosensors based on Corynascus thermophilus cellobiose dehydrogenase immobilized on commercially available screen-printed electrodes working under physiological conditions /Zafar M. N., Safina G., Ludwig R., Gorton L.// Analytical Biochemistry. – 2012. – 425. – P. 36–42.

199.Campuzano S. An integrated bienzyme glucose oxidase–fructose dehydrogenase–tetrathiafulvalene–3– mercaptopropionic acid–gold electrode for the simultaneous determination of glucose and fructose / Campuzano S., Loaiza O.,

Pedrero M., Villena F., Pingarron J.// Bioelectrochemistry. – 2004. – N 63– P. 199–206.

200 Omar B. Ayyub a. Self-assembled block copolymer photonic crystal for selective fructose detection/ Omar B. Ayyub a, Michael B. Ibrahim a, Robert M. Briber b, Peter Kofinas// Biosensors and Bioelectronics.- 2013.-46.- P.124–129.

201 Yuya Egawa a. Electrochemical and optical sugar sensors based on phenylboronic acid and its derivatives/ Yuya Egawa a, Toshinobu Seki, Shigehiro Takahashi, Jun-ichi Anzai// Materials Science and Engineering C.- 2011.-31.-P. 1257–1264.

202. Vidya Raj a. Naked eye detection of infertility using fructose blue–A novel gold nanoparticle based fructose sensor/ Vidya Raj a, Anjaly N. Vijayan b, Kuruvilla Joseph// Biosensors and Bioelectronics.- 2014.-54.-P. 171–174.

203. Koncki, R. Optical biosensors based on Prussian Blue films [Text] / R. Koncki, T. Lenarczuk, A. Radomska, S. Glab // The Royal Society of Chemistry 2001 Analyst. –2001. – Vol. 126. – P. 1080–1085. doi:10.1039/b103044m

204. Sushynskyi O. The Sensitive Element of Primary Transducer of Protein Optical Sensor / O. Sushynskyi, M. Vistak, V. Dmytrah // Proceedings of the International Conference TCSET’2016 .Lviv-Slavsko,Ukraine.P.418-421.

205. Вісьтак М.В.Дослідження спектральних характеристик холестеричних рідких кристалів при взаємодії із вуглеводами / М.В.Вісьтак, В.Є.Дмитрах, Ю.Ю.Горбенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. –2016. – 2/6(80). -С.18-22.

206.Chaban O. Studying the Electrically Driven Switching of the Planar Light Guide /Chaban O., Hotra Z., Ilnytskyi J., Fechan A., Kotsun V., Mykytyuk Z., Vistak M., Sushynskyi O.// Molecular Crystals and Liquid Crystals – 2015. – Vol. 611, Iss. 1. – P. 160-170.

207.Фізичні основи електронної техніки [З.Ю.Готра, І,Є.Лопатинський, Б.А.Лук’янець]: за ред.З.Ю.Готри.-Львів.:»Бескид Бід» ,2004.-879С.

208. Hong Q. Optical wave propagation in a cholesteric liquid crystal using the finite element method/ Q.Hong,T.X.Wu, S.T.Wu//Liq.Cryst.-2003.-V.30.-P.367-375.

.209. Yang D.K. Modelling of the reflection of cholesteric liquid crystals using the Jones matrix/ Deng-Ke Yang, Xiang-Dong Mi//J.Phys.D.Appl.Phys.-2000.V.33.-P.672-676.

210.Bragg reflection from cholesteric liquid crystals/Phys.Rev.-1995.-E51,V.51,Is.2-P.1191-1198.

211.Беляков В.А. Оптика холестерических жидких кристал лов / В.А.Беляков, В.Е.Дмитриенко, В.П.Орлов // Успехи физических наук.-1979.-Т.127,Вип.2.-С.221-261.

212.Mykytuk Z. Cholesteric Liquid crystals in Distributed Feedback Lasers/Z.Mykytyuk, A.Fechan,O.Sushynsky,O.Yasynovska//Proceeding of the IXth International Conference CADSM 2007.-Lviv-Polyana,Ukraine.-2007.-P.104.

213. Robbie K.Chiral nematic order in liquid crystals imposed by an engineered inorganic manostructure/K.Robbie,D.J.Broer,M.J.Brett//Macmillan Magazines Ltd.-1999.-N.24.-P.764-766.

214. Області застосування прогамного пакету ZEMAX OPTIICSTUDIO hltp.//www.zemax.com./os/opticstudio/ opticstudio16/about.

215. Вісьтак М. Завадостійкі сигнальні перетворювачі оптичних сенсорних пристроїв/ Вісьтак М., Голяка Р.,Микитюк З//: монографія Львів: Ліга-Прес, 2015. 152 С.

216.Вісьтак М.В. Параметричний аналіз частотно-селективного конвертера імпедансу сигнального перетворювача оптоелектронних сенсорів /М.В.Вісьтак, Р.Л.Голяка, З.М.Микитюк// Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2015. –С.137-144.

217. Вісьтак М. Підвищення завадостійкості оптичних сенсорних пристроїв на основі конвертера імпедансу зі струмовим зворотним звязком/ Вісьтак М., Голяка Р.,Микитюк З.// Технічні вісті. – 2015. – Вип.1(41), 2(42). – С. 40-42.

218. Вісьтак М. Завадостійкий сигнальний перетворювач оптичних сенсорних пристроїв // Технічні вісті. – 2015. – Вип.1(41), 2(42). –С. 47-49.

219. US Patent 06359517. Stephen F Colaco. Photodiode transimpedance circuit – 2002. Режим доступу: http://patent.ipexl.com/US/06359517.html

220.Готра З. Мікропроцесорна система температурної стабілізації групової міри електрорушійної сили/ З.Готра, Г.Барило, О.Бойко, М.Вісьтак, Р.Матвіїв// Вимірювальна техніка та метрологія. – 2014. – Вип.75. – С.13-19.

221.Висьтак М.В. Высокоэффективный конвертер импеданса оптоэлектронных сенсоров /М.В.Висьтак, Р.Л.Голяка, З.М.Микитюк//Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Том 14.- №2. – С.171-175.

222. Z.Hotra Transient mode characteristics of luminescence photocurrent integrators //Z. Hotra, R. Holyaka, I. Kremer**,** M. Vistak Proceedings of the International Conference TCSET’2016,Lviv-Slavsko,Ukraine,P.342-344.

# Додатки

**ДОВІДКА**

про впровадження у практичну діяльність ДП ВАТ «Концерн-Електрон»
науково-виробничого підприємства «Карат»
основних результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
на тему «Модифікація рідкокристалічних структур та завадостійких сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорних пристроїв»
доцента Львівського національного медичного університету ім.Данила Галицького
Вісьтак Марії Володимирівни

Наукові результати доцента Львівського національного медичного університету ім. Данила Галицького Вісьтак Марії Володимирівни використовуються в якості активного середовища первинних перетворювачів для оптичних сенсорів фізичних величин з використанням пористої кераміки.

Запропоновані автором рекомендації щодо дослідження оптичних характеристик активних середовищ та їх зміни під впливом зовнішніх факторів використано під час проведення досліджень на НВО «Карат».

Розроблені автором методики інтеркаляції оптично активних речовин у пористі структури застосовуються в ході розроблення активних речовин для оптичних сенсорів.

Завадостійкі сигнальні перетворювачі, конструкції яких розроблені автором для використання в оптичних сенсорах, уможливлюють зменшення в десять разів впливу сторонніх завад (зовнішнього світла та електромагнітних полів силової мережі живлення 50 Гц).

Генеральний директор
Науково-виробничого підприємства «Карат»
д.т.н., професор Ваків М.М.

7.04.2016 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор
з наукової роботи
ДВНЗ «Тернопільський державний медичний
університет ім. І.Я.Горбачевського МОЗ України»
доктор. мед. наук, професор Кліщ І.М.
04 2016 р.

# АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Пропозиція для впровадження:модифікація рідкокристалічних струкрур та завадостійких сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорів

1. Установа-розробник: Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького МОЗ України, кафедра біофізики (79010 м. Львів, вул. Пекарська,69), доцент кафедри біофізики Вісьтак Марія Володимирівна.

3. Джерело інформації:

- Вісьтак М.В., Готра З.Ю., Сушинський О.Є. Модифікація холестеричних рідких кристалів активними нанодомішками для елементів електронної техніки. Монографія. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014 р. – 292с.

- Вісьтак М.В. Динамічні властивості нелінійних явищ у золотих наночастинках для нанокомпозитів оптоелектроніки. // Оптична і квантова електроніка в комп'ютерних та інтелектуальних технологіях. – 2014 – Т. 26, №2. – С.134-137.

-Vistak M. Sensing of carbon monoxide with porous $Al_2O_3$ intercalated with $Fe_3O_4$ nanoparticles-doped liquid crystal. / M. Vistak, O. Sushynskyi, Z. Mykytyuk, O. Aksimentyeva, Y. Semenova // Sensors and Actuators A: Physical. – 2015. – Vol. 235. – P. 165-170.

-Вісьтак М.В., Голяка Р.Л., Микитюк З.М. Завадостійкі сигнальні перетворювачі оптичних сенсорних пристроїв: Монографія // Львів: Ліга-Прес, 2015. – 125 с.

4.Базова установа, яка проводить впровадження: ДВНЗ «Тернопільський державний медичний університету імені І.Я. Горбачевського МОЗ України» кафедра фізики.

5.Термін впровадження: березень-травень 2016 року.

6.Форма впровадження: в наукову роботу кафедри.

7.Зауваження та пропозиції: не поступило.

Відповідальний за впровадження:
завідувач кафедри медичної фізики
діагностичного та лікувального обладнання
д.т.н. , доцент Ю. А. Рудяк

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Головний лікар 5-ої міської
клінічної лікарні м. Львова
_____ Б.М. Матвієв
30 03 2016 р.

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Пропозиція для впровадження: підвищення ефективності визначення вмісту глюкози в крові.
2. Установа-розробник: Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького; Національний університет "Львівська політехніка".
3. Джерело інформації: наукові праці:
   3.1 Вісьтак М.В., Дмитрах В.Є., Горбенко Ю.Ю., Сушинський О.Є. Дослідження спектральних характеристик холестеричних рідких кристалів при взаємодії із вуглеводами / Східно-Європейський журнал передових технологій.-2016.-№2/6(80) С.18-22.
   3.2. Вісьтак М.В., Голяка Р.Л., Микитюк З.М. Завадостійкі сигнальні перетворювачі оптичних сенсорних пристроїв: Монографія // Львів: Ліга-Прес, 2015. – 125 с.
4. Базова установа, яка проводить впровадження: 5 міська клінічна лікарня м. Львова
5. Термін впровадження: 2015 – 2016 рік
6. Загальна кількість випадків: 20
7. Форма впровадження: матеріали досліджень використовуються в якості додаткового біохімічного тесту для визначення вмісту глюкози в крові.
8. Ефективність впровадження: у відповідності з даними, викладеними в джерелі інформації відзначено вдосконалення методики визначення вмісту глюкози в крові пацієнтів.

Відповідальний за впровадження:

зав. гематологічним відділенням І.Л. Гумин

**"ЗАТВЕРДЖУЮ"**
**Головний лікар**
**Львівської обласної клінічної лікарні**
**М.М. Гичка**

"___" _____ 2016 р.

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. **Пропозиція для впровадження:** підвищення ефективності визначення вмісту глюкози в крові.
2. **Установа-розробник:** Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького; Національний університет "Львівська політехніка".

**3. Джерело інформації: наукові праці:**

а) Вісьтак М.В., Дмитрах В.Є., Горбенко Ю.Ю., Сушинський О.Є. Дослідження спектральних характеристик холестеричних рідких кристалів при взаємодії із вуглеводами / Східно-Європейський журнал передових технологій.-2016.-№2/6(80) С.18-22.

б) Sushynskyi O. The Sensitive Element of Primary Transducer of Protein Optical Sensor / O. Sushynskyi, M. Vistak, V. Dmytrah // Proceedings of the International Conference TCSET'2016, Lviv-Slavsko, Ukraine, P.418-421.

4. **Базова установа, яка проводить впровадження:** Львівська обласна клінічна лікарня
5. **Термін впровадження**: січень-квітень 2016 року
6. **Загальна кількість випадків**: 30
7. **Форма впровадження:** матеріали досліджень використовуються в якості додаткового біохімічного тесту для визначення вмісту глюкози в крові.
8. **Ефективність впровадження:** у відповідності з даними, викладеними в джерелі інформації відзначено вдосконалення методики визначення вмісту глюкози в крові пацієнтів.

**Відповідальний за впровадження:**
**зав. ревматологічним відділенням ЛОКЛ О.В.Синенький**