

Харківський національний університет радіоелектроніки  
Міністерство освіти і науки України

**Шубний Олександр Іванович**



УДК 537.868

**РЕЗОНАТОРНІ ТА ХВИЛЕВОДНІ МЕТОДИ ВИМІРУ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ  
ПРОНИКНОСТІ СЛАБО ТА СИЛЬНО ПОГЛИНАЮЧИХ СЕРЕДОВИЩ  
В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ДІАПАЗОНІ**

01.04.01 - Фізика приладів, елементів і систем

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
Національної академії наук України

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор  
**Фісун Анатолій Іванович**  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України  
провідний науковий співробітник  
відділу твердотільної електроніки

Офіційні опоненти:– доктор фізико-математичних наук, професор  
**Горобець Микола Миколайович**  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,  
завідувач кафедри прикладної електродинаміки

– доктор фізико-математичних наук, професор  
**Бондаренко Ігор Миколайович**  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри мікроелектроніки, електронних  
приладів та пристроїв

Захист відбудеться « 28 » грудня 2017 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14

Автореферат розісланий « 27 » листопада 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради \_\_\_\_\_ Є.А. Разумов-Фризюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Комплексна діелектрична проникність (КДП) є важливою характеристикою, яка описує електричні властивості діелектриків. Аналогічно, для опису магнітних властивостей існує поняття комплексної магнітної проникності. У техніці надвисоких частот (НВЧ) для опису поширення електромагнітної хвилі в діелектрику вводиться поняття комплексної сталої поширення, яка пов'язана з комплексною діелектричною і комплексною магнітною проникністю певним співвідношенням, до якого входять коефіцієнт загасання  $\alpha$  та фазова стала поширення  $\beta$ . Проводячи вимірювання цих компонент, можна робити висновки про склад і фізичні властивості досліджуваного діелектрика, умови, в яких він знаходиться.

Однією з найважливіших характеристик газових середовищ є комплексний показник заломлення, який залежить від комплексної діелектричної і комплексної магнітної проникностей. Дослідження залежності показника заломлення від складу і стану газового середовища є досить важливими, наприклад, при вивченні впливу параметрів тропосфери на помилки у визначенні координат приймачами систем глобальної навігації. Тому, при дослідженні рефракції у газах, необхідно проводити досить точні вимірювання дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності.

Метод вимірювання діелектричних властивостей різних біологічних рідин є одним з найбільш поширених методів в біологічних дослідженнях, оскільки такі рідини є водними розчинами органічних речовин. Визначення КДП є ефективним способом отримання інформації про властивості рідин на молекулярному рівні. Різноманітні кінетичні процеси в рідині, що пов'язані із взаємодією розчинених в ній молекул, безпосередньо впливають на поглинання електромагнітного поля. Діелектрометрія в області дисперсії вільної води дозволяє отримати інформацію про стан води в біологічних об'єктах в умовах, що виключають їх руйнування. Останнім часом методи діелектрометрії все більше знаходять своє застосування в медичних дослідженнях.

Можливості діелектрометрії з успіхом застосовуються при аналізі якості нафтопродуктів, зокрема, для дослідження експлуатаційних характеристик автомобільних палив. За допомогою вимірювання діелектричної проникності можна визначити вміст вологи в різних об'єктах, у зв'язку з чим, такі вимірювання знаходять застосування при визначенні вологості природного газу, в деревообробній та сільськогосподарській галузях.

Контроль якості продуктів харчової промисловості з великим вмістом рідини є важливою проблемою, оскільки якість продукції безпосередньо впливає на здоров'я споживачів. Не існує універсального методу контролю таких продуктів. Кожен з відомих способів (методи аналітичної хімії, дегустація, фізико-хімічні методи), маючи свої переваги і недоліки, передбачають певну область використання. Тому, розробка нових методів контролю, до яких може бути віднесена і діелектрометрія, продовжує залишатися актуальною.

Дисертацію виконано у відділі твердотільної електроніки ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка твердотільного генератора квазіоптичного типу підвищеної стабільності» (№ державної реєстрації 0283070551); «Створення напівпровідникових генераторів міліметрового діапазону квазіоптичного типу» (№ державної реєстрації 81.093.674); «Дослідження взаємодії електромагнітних полів короткохвильової частини міліметрового діапазону хвиль з напівпровідниковими структурами в квазіоптичних коливальних системах з метою створення твердотільних генераторів» (№ державної реєстрації 01.86.0086550); «Розробка та дослідження високостабільних напівпровідникових квазіоптичних генераторів міліметрового і субміліметрового діапазону довжин хвиль і систем амплітудної, фазової та частотної модуляції» (№ державної реєстрації 01.9.20.000605); «Дослідження квазіоптичних резонансних систем міліметрового діапазону, антен і дослідження впливу випромінювання міліметрового діапазону на біологічні об'єкти» (№ державної реєстрації 0100U006441); «Теоретичне і експериментальне дослідження хвильових процесів в системах мікрохвильового діапазону» (№ державної реєстрації 0103U002267); «Дослідження і синтез нових пристроїв квазіоптичної і хвилеводної техніки. Діелектрометрія сильно поглинаючих середовищ» (№ державної реєстрації 0106U011975); «Моделювання збудження і зв'язку квазіоптичних резонансних, антенних і хвилеведучих систем (пристроїв). Дослідження електрофізичних властивостей слабо і сильно поглинаючих середовищ методами діелектрометрії. Активація електромагнітним випромінюванням обмінних і регуляторних процесів в клітині і організмі» (№ державної реєстрації 0112U000210). Дисертаційна робота також виконувалася в ході виконання науково-дослідної роботи, що проводилася за постановою Кабінету міністрів України «Розробка методів і технологій зниження впливу умов поширення радіохвиль на точність визначення координат приймачами систем глобальної навігації» (№ державної реєстрації 01111U005998). Робота була частково підтримана грантом УНТЦ № 3870.

**Цілі і завдання роботи.** Теоретично та експериментально дослідити і визначити вплив змін компонент комплексної діелектричної проникності речовини, що заповнює об'єм квазіоптичного резонатора, на його амплітудні і частотні характеристики. Створити новітній апаратурний комплекс в галузі геофізичних досліджень для вимірювання КДП газових середовищ з використанням квазіоптичних резонаторів. Дослідити фізичний процес генерації електромагнітних коливань в твердотільних квазіоптичних генераторах з метою використання їх в створюваних апаратурних комплексах по вимірюванню КДП. Дослідити фізичний процес перетворення електромагнітного поля в хвилеводних системах, що заповнені сильно поглинаючою рідиною. Розробити новий компактний автоматизований прилад для експрес-аналізу КДП рідин в інтересах народного господарства.

Виходячи з цілей роботи, були поставлені наступні завдання:

1. Визначити фізичні фактори, що впливають на добротність і стабільність частоти резонаторів квазіоптичного типу. Розробити високодобротний термостабільний квазіоптичний резонатор, пристосований для розташування в його об'ємі досліджуваної газоподібної речовини з можливістю безперервного прокачування її крізь об'єм резонатора і такий, що дозволяє розміщувати в області електромагнітного поля досліджувану порошкоподібну речовину.

2. Дослідити фізичні процеси, супутні роботі твердотілого підсилювача міліметрового діапазону і розробити на його основі активну вимірювальну систему (АВС), тобто систему, що заснована на наявності зв'язку між вимірювальним резонатором і джерелом НВЧ потужності, за допомогою якої можна проводити вимірювання КДП середовищ з істотною (близько 10 дБ) зміною поглинання потужності в об'ємі вимірювального резонатора.

3. Проаналізувати фізичні фактори, що визначають короткочасну і довготривалу стабільність частоти квазіоптичних твердотілих генераторів. Розробити твердотілий квазіоптичний генератор (КОГ) з низьким рівнем частотного шуму, частота генерації і вихідна потужність якого залежать від комплексної діелектричної проникності речовини, що заповнює об'єм квазіоптичного резонатора, або частину його об'єму. Для досягнення максимальної чутливості АВС на основі квазіоптичного генератора розробити генератори з мінімальними втратами на частоті вимірювань КДП.

4. Промоделювати вплив розмірів і положення кювети з досліджуваною речовиною в об'ємі квазіоптичного резонатора на характеристики вимірювального резонатора. Розробити кювету для заповнення порошкоподібною речовиною. Провести математичне моделювання з метою оптимізації параметрів відкритого резонатора з кюветою за критерієм максимальної крутості перетворення змін КДП в зміни резонансної частоти відкритого резонатора.

5. Встановити залежність сталої поширення хвилі, що розповсюджується в запропонованій хвилеводній комірці, від КДП досліджуваної рідини, що заповнює комірку. Розробити хвилеводний диференційний діелектрометр, що представляє собою новий автоматизований компактний прилад для експрес-аналізу діелектричної проникності сильно поглинаючих рідин на основі водних розчинів.

**Об'єктом дослідження є:** фізичні поля, що виникають при взаємодії електромагнітних хвиль з елементами і вимірювальними структурами складної геометрії, до складу яких входять слабо або сильно поглинаючі речовини.

**Предметом досліджень є:** взаємозв'язок електродинамічних характеристик полів з діелектричними параметрами середовищ.

**Методи досліджень.**

1. Метод матриць розсіювання для проведення чисельного моделювання процесів, що відбуваються в хвилеводних і резонаторних структурах.

2. Експериментальні вимірювання: вимірювання загасання і зсуву фази, вимірювання частоти і потужності, вимірювання добротності, вимірювання лінійного розширення резонаторних елементів.

### Дисертаційна робота містить такі нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано використовувати в активних системах для вимірювання КДП генерацію квазіоптичного генератора на 2-й гармоніці, оскільки при виключенні навантаження на основній частоті генерації (ОЧГ) підвищується добротність резонатора за рахунок усунення дифракції на елементі зв'язку, а зміни електродинамічних властивостей коливальної системи генератора на 1-й гармоніці при взаємодії з вимірюваним середовищем перетворюються з коефіцієнтом 2 в зміни частоти на виході системи, підвищуючи, тим самим, чутливість вимірювань.

2. Вперше оптимізовані розміри хвилеводної узгоджувальної комірочки - трансформатора імпедансів напівпровідникового діода, розташованого в комірці, і відкритого резонатора. Визначено оптимальну конструкцію дзеркала з узгоджувальною комірочкою, що дозволило знизити внесений рівень втрат за подвійний прохід до величини  $\delta_s \sim 0,1\%$ .

3. Вперше встановлено, що в високодобротних вимірювальних квазіоптичних резонаторах, що оптимізовані по дифракційним втратам на краях дзеркал і омичним втратам, важливим фактором, який впливає на чутливість і точність вимірювань, є втрати на нерезонансне випромінювання і розсіювання резонансного поля на елементах зв'язку резонатора з хвилеводами.

4. Вперше встановлено, що при збудженні хвиль в системі прямокутний хвилевід – діелектричний циліндр, занурений в сильно поглинаючу рідину, можуть бути збуджені сімейства хвиль чотирьох типів, однак, тип хвилі  $HE_{11}$  збуджується в циліндрі з найменшими втратами і поширюється уздовж циліндра з найменшим загасанням. Цей результат було використано в розробці нової диференційної кювети при створенні діелектрометра 8-мм діапазону для експрес-аналізу сильно поглинаючих рідин.

**Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:** на основі проведених в дисертаційній роботі досліджень розроблені експериментальні зразки квазіоптичних генераторів на діоді Ганна з виходом сигналу першої або другої гармоніки, з рівнем частотного шуму  $\delta f_{rms} \sim 0,028 \text{ Гц} / \sqrt{\text{Гц}}$  при відстройці на 10 кГц від несучої частоти, що представляють собою основу перетворювача флуктуацій КДП речовин, поміщених у відкритий резонатор генератора, в флуктуації частоти та амплітуди коливань. Вимірювання малих варіацій діелектричної або магнітної проникності засноване на спектральному аналізі вихідного сигналу.

Розроблено прототип нової автогенераторної вимірювальної системи для геофізичних досліджень на основі відкритого резонатора Фабрі-Перо в колі зворотного зв'язку твердотільного підсилювача мікрохвильового діапазону, який застосований для вимірювання динаміки нестационарних змін індексу заломлення тропосфери.

Розроблено простий в експлуатації диференційний діелектрометр для експрес-аналізу КДП сильно поглинаючих рідин, придатний для роботи в умовах біохімічних лабораторій. Диференційна чутливість приладу склала 0,1% за коефіцієнтом загасання і 0,05% за фазовою сталою. Це відповідає

диференційній чутливості по КДП кращій, ніж 0,5%. Вимірювання КДП автоматизовані, а час повного циклу вимірювань не перевищує три хвилини.

**Особистий внесок здобувача.** Автором розроблений підхід, що дозволяє досліджувати механізми втрат в квазіоптичних напівпровідникових генераторах, які призводять до зниження добротності коливальної системи генератора і, як наслідок, до зниження чутливості побудованої на його основі активної вимірювальної системи [1 - 3]. Проаналізовано причини нестабільності резонансної частоти резонаторів типу Фабрі-Перо і розроблений спосіб термостабілізації такого резонатора з метою проведення прецизійних вимірювань діелектричної проникності резонаторним методом [7 - 11]. Також автором досліджена залежність сталої поширення хвилі, що поширюється уздовж осі діелектричного циліндра, який поміщено в сильно поглинаючу рідину від КДП рідини, що його оточує і проведена розробка автоматизованого апаратно-програмного комплексу для вимірювання комплексної діелектричної проникності сильно поглинаючих рідин хвилеводно-диференційним методом. [4 - 6, 12 - 14]. В написанні та обговоренні опублікованих наукових результатів автор приймав безпосередню участь.

**Апробація результатів дисертації.** Наукові результати та основні положення дисертаційної роботи були представлені та опубліковані в матеріалах наступних конференцій: 20th European Microwave Conference, Budapest, 1990; 3rd Asia-Pacific Microwave conference, Tokyo, 1990; 16-та Міжнародна конференція «НВЧ техніка і телекомунікаційні технології» (CriMiCo 2006), Севастополь, 2006; 22-га Міжнародна конференція «НВЧ техніка і телекомунікаційні технології» (CriMiCo 2012), Севастополь, 2012; The Seventh International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10), Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2010; The Ninth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16), Kharkov, Ukraine, June 20-24, 2016; IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 18-20 April, 2017; The IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017), Kyiv, Ukraine, May 29 - June 2, 2017; IX Міжнародна наукова конференція «Функціональна база наноелектроніки», Одеса, Україна, 18-23 вересня, 2017; The 47th European Microwave Conference, Nuremberg, Germany, 10-12 October, 2017.

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 14 наукових роботах, з них 7 статей у вітчизняних і зарубіжних фахових наукових виданнях за обраною спеціальністю і 7 в матеріалах і тезах міжнародних конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається з переліку умовних скорочень і позначень, вступу, 4 розділів, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 134 сторінки, з яких 123 сторінки основного тексту. Список використаних джерел на 15 сторінках включає 123 найменування. Всього в дисертації 71 рисунок і 2 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, викладено відомості про апробацію результатів, публікації, зміст та структуру дисертації.

У першому розділі розглянуті фізичні основи побудови приладів для вимірювання комплексної діелектричної проникності. Окремо розглянуті резонаторні та хвилеводні методи вимірювання. Щодо резонаторних методів показано особливості побудови пасивних та активних вимірювальних систем. Особливу увагу приділено розгляду фізичних основ роботи активної вимірювальної системи з резонатором в колі зворотного зв'язку підсилювача, що використана в дослідженнях, результати яких наведені в наступному розділі дисертації. Щодо хвилеводних методів наведено узагальнену схему вимірювання діелектричної проникності, показано при яких умовах доречно використовувати диференційні вимірювання.

Також у розділі розглянуто сучасний стан техніки вимірювання КДП, наведені приклади застосування різними авторами резонаторних та хвилеводних методів для виміру КДП слабо та сильно поглинаючих речовин. Зроблені висновки щодо доречності використання тих чи інших методів при вимірюванні КДП речовин в залежності від тангенсу діелектричних втрат.

У другому розділі описано побудову і роботу активної вимірювальної системи з використанням резонатора Фабрі-Перо в колі зворотного зв'язку підсилювача НВЧ діапазону. Висвітлені особливості застосування стандартного модуля твердотільного НВЧ-підсилювача в складі АВС. Налаштуванням живлення мікросхеми було досягнуто розширення динамічного діапазону підсилювача, для чого було замовлено виготовлення спеціального примірника підсилювача з можливістю зміни параметрів живлення трьох каскадів (рис. 1).

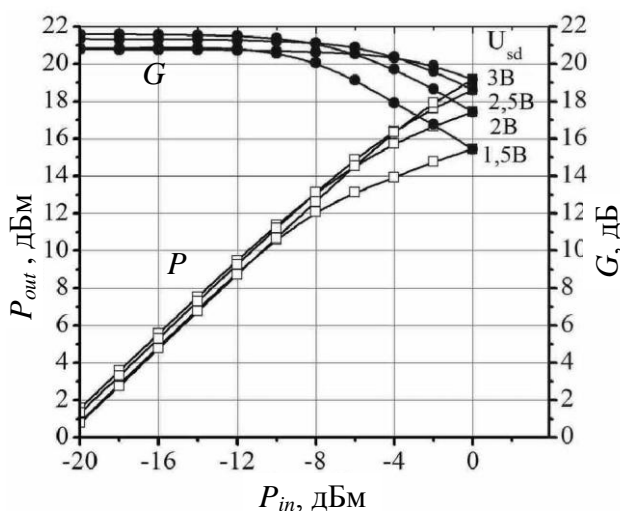


Рис. 1 – Коефіцієнт підсилення  $G$  та вихідна потужність  $P$  підсилювача для ряду напруг «стік-витік»

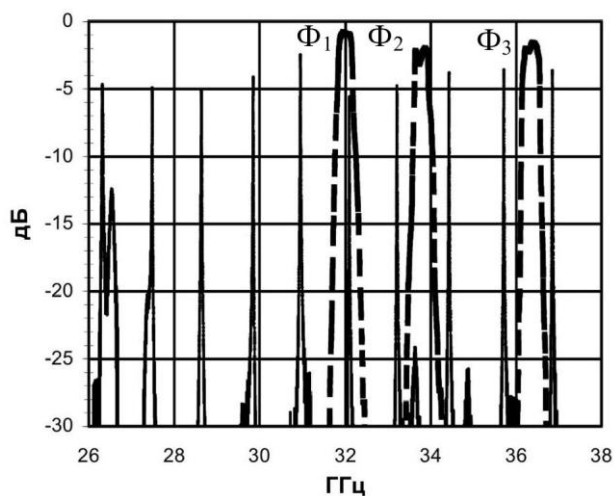


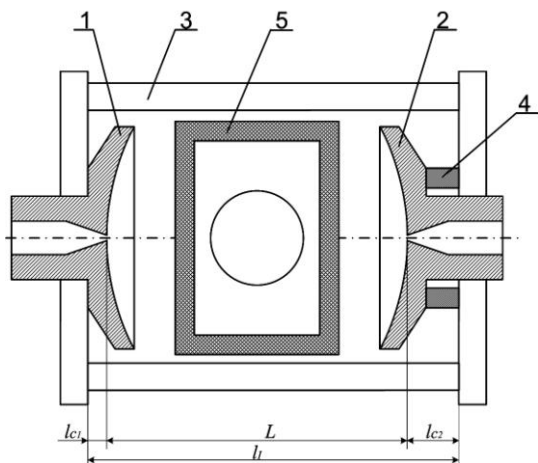
Рис. 2 – Ділянка спектра резонатора та АЧХ фільтрів  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  та  $\Phi_3$



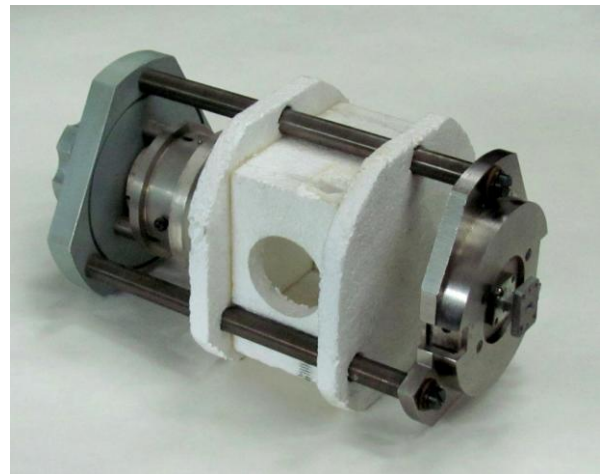
Таким чином, було отримано динамічний діапазон роботи автогенераторної схеми більш ніж 10 дБ при рівні вихідної потужності 50...80 мВт, що дає можливість досліджувати в динаміці середовища, у яких в умовах експерименту коефіцієнт поглинання змінюється в таких же межах.

Щоб уникнути небажаних перескоків частоти між різними гілками дисперсійних кривих резонатора діапазон частот, на яких може статися самозбудження генератора, був обмежений за допомогою розробленого смугопропускаючого фільтра (рис. 2).

Висвітлено питання розробки квазіоптичного вимірювального резонатора Фабрі-Перо для такої системи (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3 – Схема конструкції а) та зовнішній вигляд б) вимірювального резонатора Фабрі-Перо для радіорефрактометра. 1, 2 - сферичні дзеркала; 3 - інварові стрижні; 4 - латунні вставки; 5 - пінопластова камера (кювета) для прокачування повітря через резонатор

Щоб зменшити втрати енергії внаслідок розсіювання на елементах зв'язку (ЕЗ) резонатора з хвилеводами були досліджені ЕЗ у вигляді щілини і у вигляді отвору в діафрагмі. Показано, що оптимізуючи розміри елементів ЕЗ, можна підвищувати добротність резонатора, а через це і чутливість вимірювань діелектричної проникності.

Оскільки внаслідок теплового розширення корпусу резонатора при зміні температури навколишнього середовища буде відбуватися зміна резонансної частоти, що може замаскувати корисний ефект зміни резонансної частоти внаслідок зміни діелектричної проникності повітря в об'ємі резонатора, було розроблено систему термокомпенсації зміни довжини резонатора. Проведені експерименти показали можливість досягнення температурного коефіцієнта зміни резонансної частоти порядку  $10^{-7} / ^\circ\text{C}$ .

За допомогою побудованого радіорефрактометра було в умовах лабораторії проведено вимірювання слабких змін КДП газового середовища, які моделювалися шляхом прокачування повітря через камеру, змонтовану в об'ємі резонатора Фабрі-Перо (рис. 4), (рис. 5).

Наведено також результати натурального експерименту по вимірюванню індексу заломлення повітря в природних умовах за допомогою лабораторного прототипу рефрактометра автоколивального типу. З аналізу отриманих результатів зроблено висновок, що природні флуктуації показника заломлення тропосфери впевнено реєструються лабораторним прототипом рефрактометра і складають кілька сотих  $N$ -одиниць.

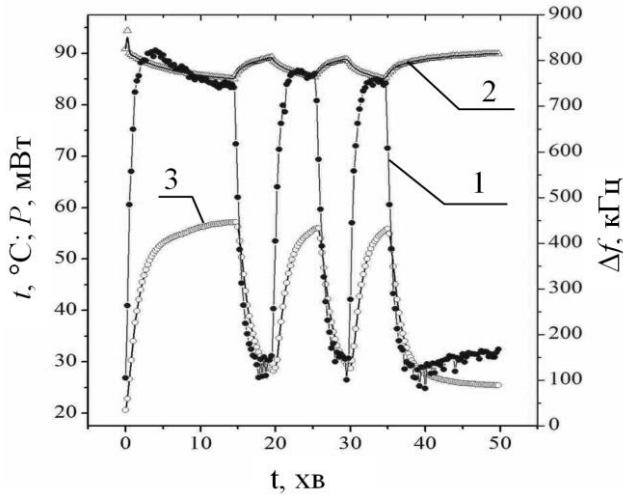


Рис. 4 – Динаміка зміни частоти (1) і потужності (2) АВС при нагріванні-охолодженні повітря, що прокачується через кювету, (3) - температура

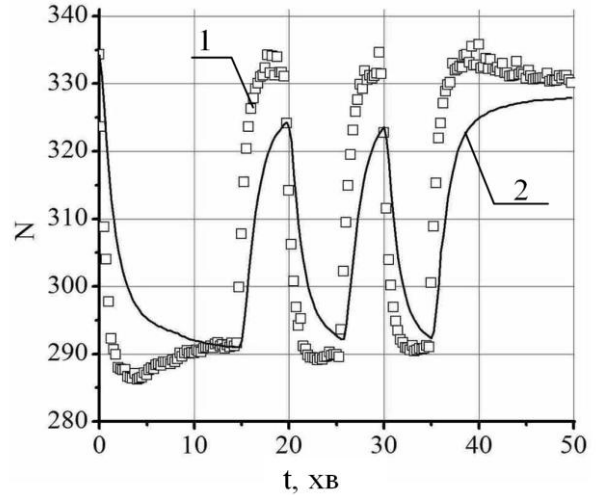


Рис. 5 – Розрахунок індексу заломлення повітря з даних вимірювань (рис. 4): частоти (1) та температури (2) при незмінному тиску

Запропоновано диференційний принцип побудови радіо-рефрактометра автоколивального типу, в опорному каналі якого використовується вакуумований резонатор Фабрі-Перо, а в вимірювальному каналі - ідентичний за конструкцією резонатор, що заповнюється атмосферним повітрям.

У третьому розділі розглянуті автогенераторні вимірювальні системи, розроблені на основі відкритих резонаторів та твердотільних напівпровідникових елементів. Флуктуації діелектричної проникності викликають флуктуації резонансної частоти стабілізуючого резонатора, які переносяться на флуктуації частоти квазіоптичного генератора. Виміривши частотний шум генератора, ми, тим самим, отримаємо інформацію про флуктуації діелектричної проникності. В експериментальних дослідженнях динаміки зміни діелектричної проникності повітря використовувалася АВС, що представляє собою КОГ на діоді Ганна (рис. 6).

Використовуючи еквівалентну схему резонатора Фабрі-Перо, в якій враховані особливості моделювання апертури зв'язку у відкритих системах, були розраховані залежності добротності резонатора як функції амплітуди і фази хвилі, відбитої від кола узгодження. Внесені в резонатор втрати будуть нехтовно малі, якщо коефіцієнт відбиття  $\Gamma \rightarrow \exp(j\pi n)$ . До цього критерію близьким виявився спосіб узгодження штирем з діаметром  $0,2 \cdot \lambda$ , в результаті,

внесений рівень втрат за подвійний прохід зменшився до  $\delta_s \sim 0,1\%$ , що дозволило суттєво знизити рівень частотних шумів використовуваного КОГ, підвищивши, тим самим, чутливість АВС до виміру флуктуацій КДП (табл. 1).

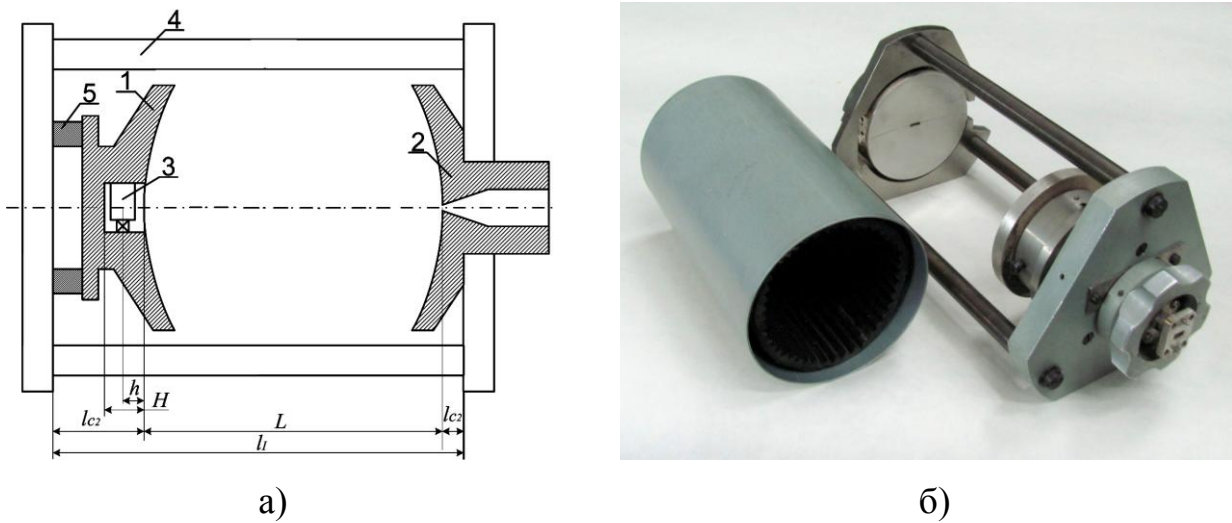


Рис. 6 – Схема побудови АВС на основі квазіоптичного генератора а) та зовнішній вигляд КОГ зі знятим кожухом б). 1 - дзеркало з діодом Ганна; 2 - дзеркало з виводом енергії; 3 - коло узгодження імпедансів; 4 - інварові стрижні; 5 - латунні вставки

Таблиця 1

Рівень частотних флуктуацій АВС як функція відстройки від несучої частоти

$F_m, \text{кГц}$	1	5	10	50	100
$\delta f_{rms}, \text{Гц} / \sqrt{\text{Гц}}$	0,063	0,032	0,028	0,016	0,014

Розглянуто такий спосіб підвищення чутливості АВС, як створення КОГ з виведенням сигналу другої гармоніки ОЧГ. В результаті проведених досліджень була розроблена оптимізована конструкція квазіоптичного генератора з виділенням другої гармоніки генерації, схема якої представлена на рис. 7а.

На рис. 7б показаний виготовлений макет такого генератора, що дозволяє отримати вихідну потужність біля 10 мВт на частоті 60 ГГц з рівнем частотного шуму не гірше -115 дБ / Гц.

Для вивчення електрофізичних властивостей порошкоподібних речовин було розроблено пінопластову кювету, що встановлюється на трьох несучих стрижнях конструкції з можливістю переміщення її уздовж осі відкритого резонатора (ВР). Проведено математичне моделювання з метою оптимізації параметрів ВР з кюветою за критерієм максимальної крутості перетворення показника заломлення в резонансну частоту ВР. Внаслідок математичного моделювання показано, що при повному заповненні об'єму відкритого резонатора газоподібною речовиною з малими втратами можна досягнути

граничних вимірювань відносних змін показника заломлення  $\sim 5 \cdot 10^{-11}$ . Для шару речовини завтовшки однієї довжини хвилі  $\sim 4 \cdot 10^{-9}$ .

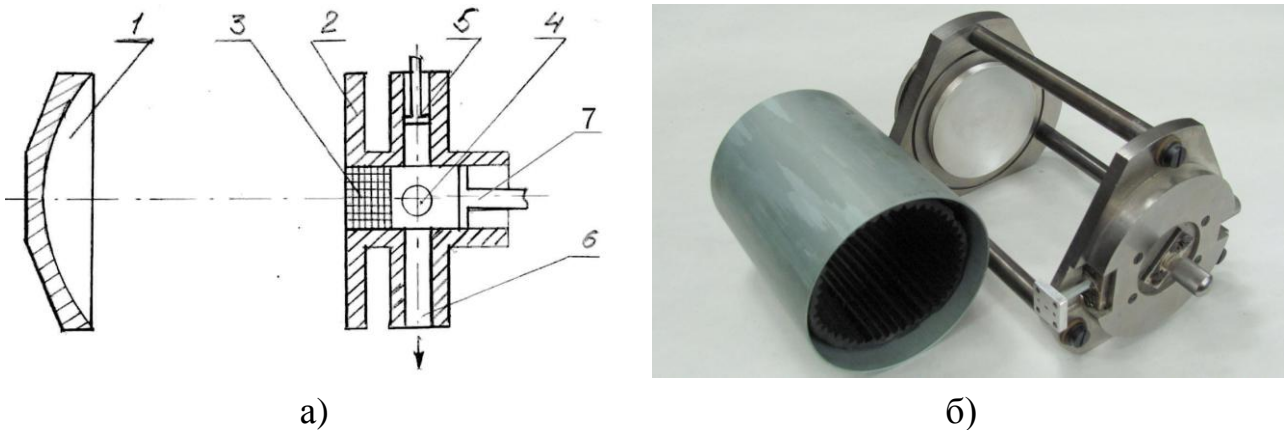


Рис. 7 – Устрій а) та зовнішній вигляд б) КОГ з виходом енергії другої гармоніки. 1 - сферичне дзеркало; 2 – плоске дзеркало; 3 – режекторний фільтр; 4 - генераторний діод; 5 – поршень 2-ї гармоніки; 6 – вихід 2-ї гармоніки; 7 - поршень 1-ї гармоніки

У четвертому розділі представлені фізичні основи побудови, устрій і робота диференційного діелектрометра (рис. 8), а також результати його використання для вимірювання КДП водних розчинів хімічних компонентів.

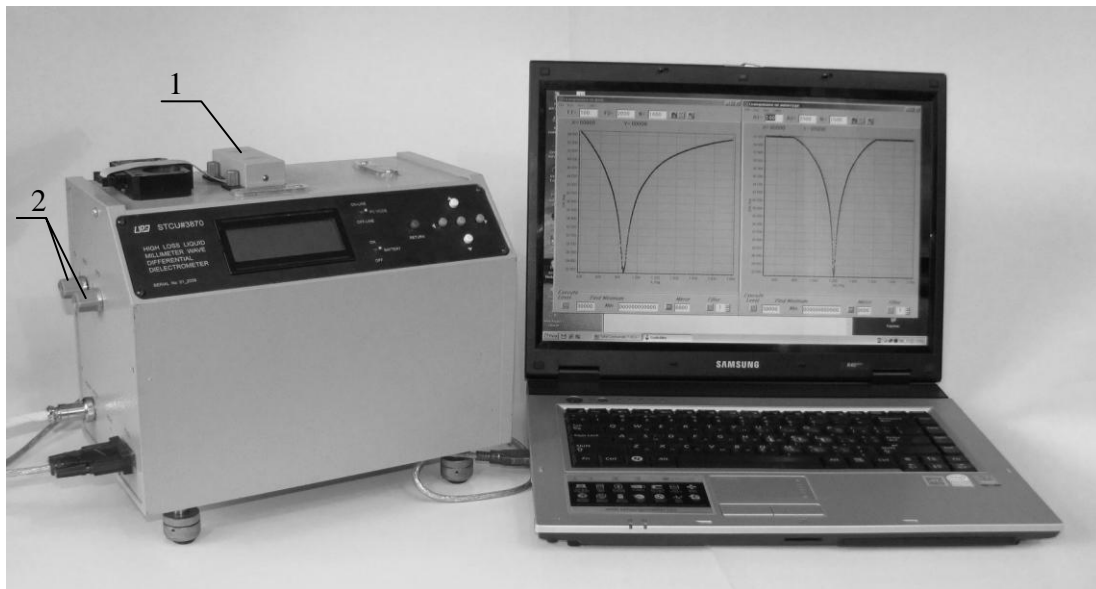
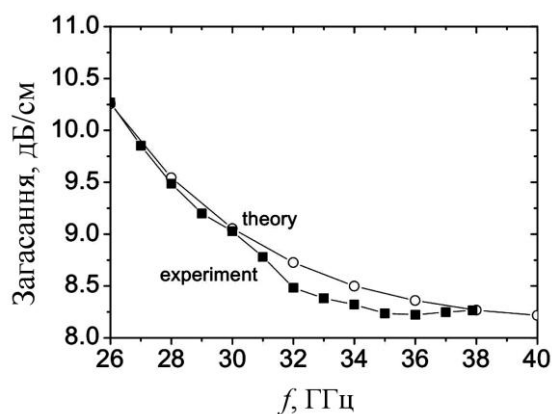


Рис. 8 – Фотографія автоматизованого діелектрометра. 1 - датчики температур рідин; 2 - ручки вентилів зливних отворів комірок кювети

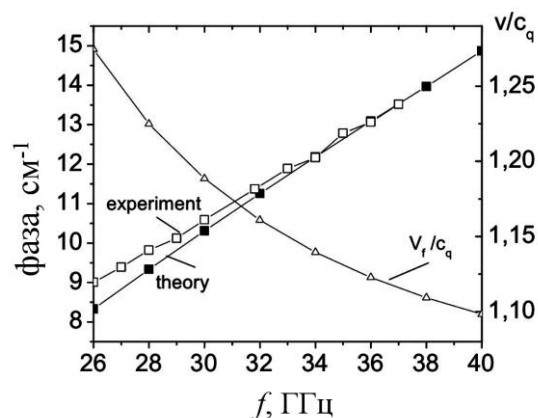
Фізичною основою пропонованого методу вимірювання КДП сильно поглинаючої рідини з використанням діелектричного циліндра, поміщеного в рідину, є залежність сталої поширення хвилі, що поширюється вздовж осі циліндра, від КДП оточуючої його рідини.

Зусилля були зосереджені на дослідженні властивостей  $HE_{11}$  типу хвилі (рис. 9), оскільки її легко збуджувати з торця прямокутного хвилеводу з хвилею  $H_{10}$  типу і вона має найменше загасання.

Вимірювальна схема приладу являє собою НВЧ міст, в два плеча якого включені дві комірки вимірювальної кювети (рис. 10). Одна з комірок заповнена рідиною КДП якої відома, а друга – рідиною, що підлягає виміру. Розрахунок КДП проводиться з даних вимірювання різниці коефіцієнтів загасання і фазових сталих електромагнітних хвиль в комірках кювети.

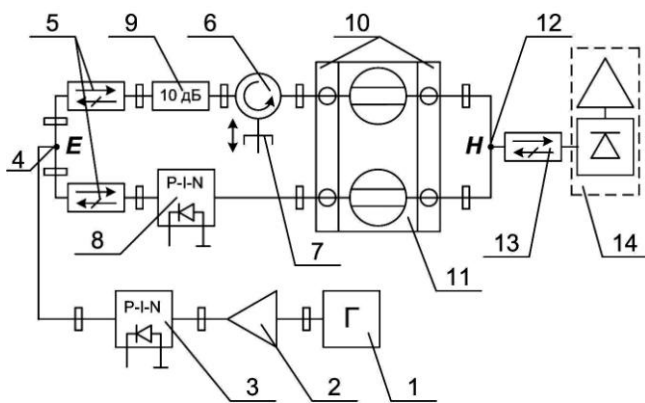


а)

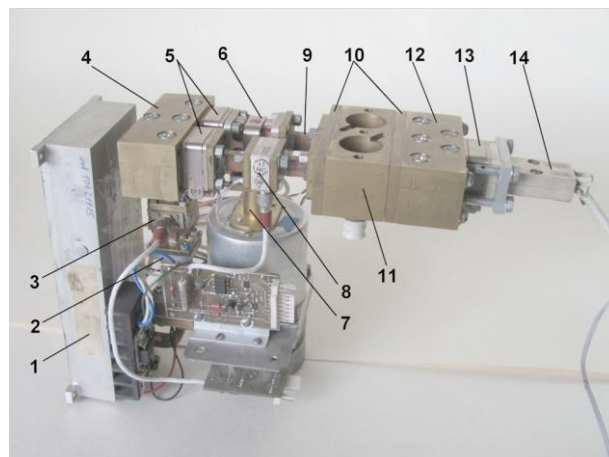


б)

Рис. 9 – Частотна залежність коефіцієнта поглинання а) і фазової сталої б) хвилі  $HE_{11}$  типу в кварцовому стрижні, зануреному в дистильовану воду. На графіку б) також показано фазову швидкість, нормовану на швидкість світла в кварці



а)



б)

Рис. 10 – Схема а) та зовнішній вигляд б) НВЧ-тракту діелектрометра

При одній і тій же еталонній рідині можна гарантувати достовірні вимірювання малих відмінностей КДП різних досліджуваних рідин. У цьому випадку бажано приводити результати вимірювань у вигляді відхилень КДП досліджуваних рідин від КДП дистильованої води. Був проведений детальний аналіз джерел і величин випадкових і систематичних похибок вимірювань

різниці коефіцієнта загасання і фазової сталої в діелектрометрі та зроблена оцінка точності вимірювань. Отримано середньоквадратичні величини випадкових похибок прямих вимірювань коефіцієнта загасання і фазової сталої, що склали 0,1% і 0,05%, відповідно. Розрахункова похибка вимірювання дійсної та уявної частин КДП не перевищує 0,5%.

Результати вимірювань різниці між КДП води і КДП водних розчинів глюкози, гліцерину та етанолу на частоті 31,82 ГГц при температурі 25 °С представлені на рис 11.

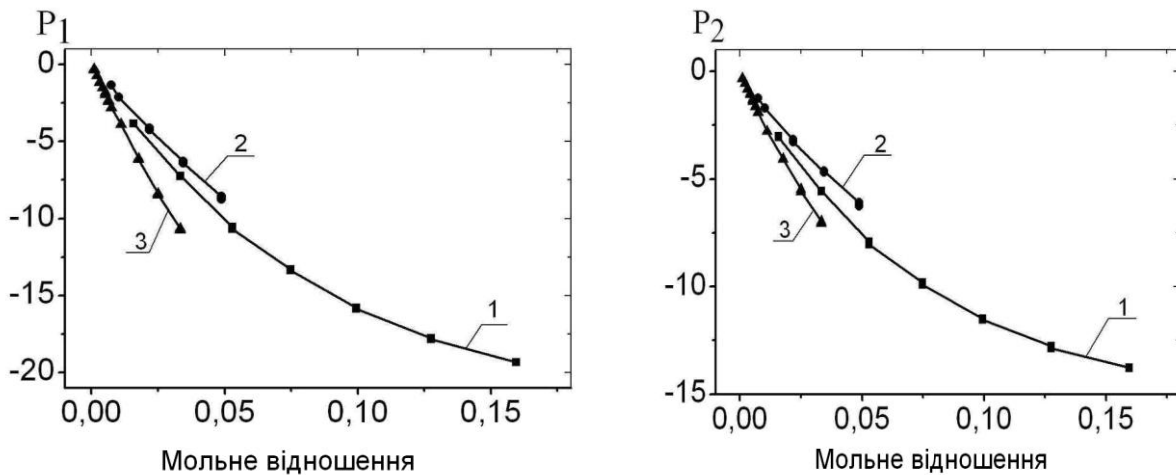


Рис. 11 – Різниці дійсних  $P_1 = \varepsilon'_x - \varepsilon'_{water}$  і уявних  $P_2 = \varepsilon''_x - \varepsilon''_{water}$  частин КДП води і водних розчинів етанолу (1), гліцерину (2) і глюкози (3) від концентрації

Залежності КДП розчинів різних сахарів (сахарози, фруктози і глюкози) в 10% розчині етилового спирту у воді від масової концентрації сахарів представлені на рис. 12. КДП таких сумішей в першому наближенні імітує КДП напівсолодких і напівсухих вин.

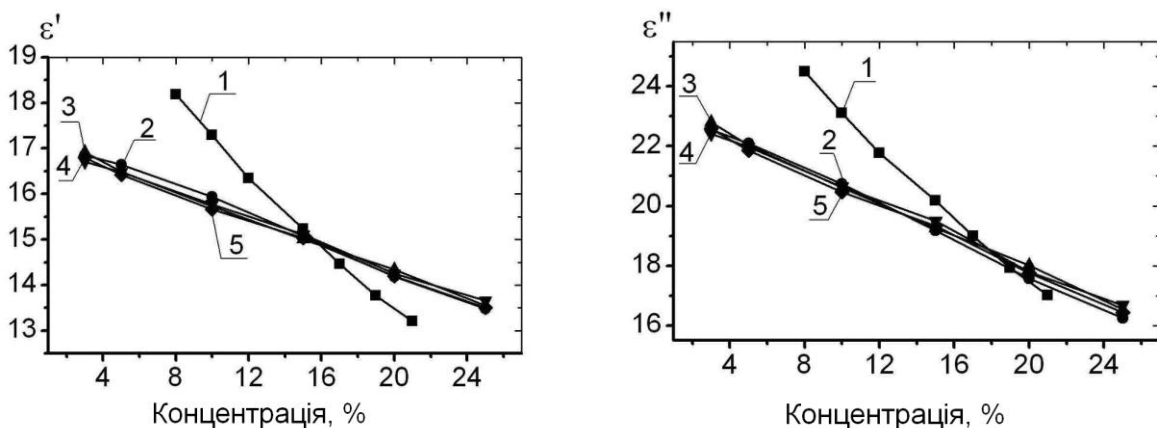


Рис. 12 – Залежності КДП розчинів сахарів в 10-ти відсотковому розчині етанолу у воді від масової концентрації сахарів. Номери кривих відповідають: 2 - сахароза; 3 - фруктоза; 4 - глюкоза; 5 - глюкоза і фруктоза в рівних кількостях. Крива 1 - залежність КДП розчину етанолу у воді від концентрації етанолу (об. відсотки)

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі поставлено та вирішено ряд окремих фізичних та модельних задач для створення апаратурних комплексів по вимірюванню КДП газоподібних середовищ і для експрес-методу контролю діелектричної проникності сильно поглинаючих рідких середовищ.

1. Досліджено електродинамічні властивості квазіоптичних резонаторів, що частково або повністю заповнені середовищем, КДП якого вимірюється. Встановлено, що для досягнення високої короткочасної стабільності таких резонаторів, крім відомих раніше факторів (дифракція на краях дзеркал, омичні втрати в матеріалі дзеркал), необхідно знижувати радіаційні втрати через розсіювання енергії резонансного типу коливань на елементах зв'язку відкритих резонаторів з хвилеводами та через нерезонансне випромінювання. Такі втрати знижують добротність резонатора, обмежуючи, тим самим, точність вимірювань електрофізичних параметрів середовищ.

2. З метою розширення динамічного діапазону вимірювання КДП досліджені режими роботи твердотільного мікрохвильового підсилювача і досягнуто збільшення його динамічного діапазону до 10 дБ шляхом зміни штатного режиму живлення мікросхеми.

3. На основі твердотільного підсилювача і квазіоптичного резонатора розроблений і виготовлений прототип АВС для вимірювання показника заломлення газового середовища, що заповнює квазіоптичний резонатор. В якості вимірювальної комірки використовувався сферичний резонатор з набором дзеркал діаметром 75 мм і радіусом кривизни 150 мм, в яких були виконані діафрагми або щілини зв'язку з шириною 7,2 мм, що відповідає ширині використовуваного хвилеводу, і висотою від 0,1 мм до 0,6 мм, що дозволяло варіювати величину зв'язку резонатора з хвилеводом.

4. Досліджено фізичні фактори, які впливають на короткочасну і довготривалу стабільність частоти ВР і на добротність резонатора, з якою пов'язана чутливість вимірювань КДП.

5. Підтверджено, що основним чинником, що визначає довготривалу стабільність резонатора, є його довжина, яка, в першу чергу, може змінюватися в результаті зміни температури навколишнього середовища. Розроблена спеціальна система термокомпенсації зміни довжини резонатора дозволила отримати температурний коефіцієнт частоти термокомпенсованого резонатора Фабрі-Перо не більше  $(1-2) \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ , що дозволило застосувати такий резонатор для вимірювання флуктуацій показника заломлення повітря в умовах атмосфери яка оточує вимірювальну комірку.

6. Запропоновано рефрактометр на основі твердотільного квазіоптичного генератора для вимірювання малих варіацій показника заломлення, принцип дії якого заснований на спектральному аналізі сигналу квазіоптичного напівпровідникового генератора, в коливальну систему якого (відкритий резонатор) вноситься досліджувана речовина.

Досліджено фізичні процеси дифракції електромагнітного поля на хвилеводній комірниці в активному дзеркалі генератора, де розташований діод

Ганна. Показано, що саме дифракція на хвилеводному отворі є основним чинником, що знижує чутливість АВС, побудованої на основі КОГ. На основі проведених вимірювань визначена оптимальна конструкція активного дзеркала. Застосування такого дзеркала дозволило знизити внесений рівень втрат за подвійний прохід до величини  $\delta_s \sim 0,1\%$  і, тим самим, отримати на частоті 30 ГГц напівпровідниковий квазіоптичний генератор з величиною частотного шуму  $0,028 \text{ Гц}/\sqrt{\text{Гц}}$  при відстройці на 10 кГц від несучої.

7. Створено квазіоптичний генератор на діоді Ганна, вихідна частота якого є 2-ю гармонікою основної частоти генерації. Використання такого генератора дозволяє зменшити втрати в резонаторі на основній частоті генерації і, тим самим, підвищити чутливість автогенераторної вимірювальної системи. Зсув основної частоти генерації гармонійного КОГ в результаті внесення в його об'єм досліджуваної речовини викликає в 2 рази більший зсув його вихідної частоти, що також підвищує чутливість вимірювальної системи.

8. Для вивчення електрофізичних властивостей порошкоподібних речовин розроблено радіопрозору кювету. На основі математичної моделі кювети проведено аналіз закономірностей перетворення варіацій діелектричної та магнітної проникностей речовини в варіації частоти сигналу рефрактометра. Показано, що для заданої речовини можна розрахувати оптимальні розміри кювети і її положення у ВР за критерієм максимуму коефіцієнта перетворення.

З використанням математичного моделювання радіопрозорої кювети і отриманих при цьому коефіцієнтів перетворення варіацій діелектричної та магнітної проникності речовини в варіації частоти сигналу рефрактометра, показано, що при досягнутій величині частотних шумів генератора можна виміряти флуктуації показника заломлення  $\sim 5 \cdot 10^{-11}$  при повному заповненні об'єму відкритого резонатора газоподібною речовиною.

9. За допомогою розробленого прототипу АВС були проведені вимірювання показника заломлення повітря, що прокачується через об'єм відкритого резонатора в умовах лабораторії, і продемонстрована впевнена реєстрація флуктуацій показника заломлення в стаціонарному потоці атмосферного повітря. Були проведені натурні випробування прототипу АВС в ході добового експерименту з вимірювання показника заломлення повітря в природних умовах. Флуктуації показника заломлення тропосфери в умовах проведення натурального експерименту, які впевнено реєструються лабораторним прототипом рефрактометра, склали  $\Delta N \approx 3 \cdot 10^{-2}$  при  $N \approx 300$ .

10. Досліджено залежність сталої поширення хвилі, що поширюється вздовж осі діелектричного циліндра поміщеного в сильно поглинаючу рідину від КДП оточуючої його рідини. Встановлено, що поглинання електромагнітної хвилі при проходженні через об'єм кювети і зміна її фази сильно залежать від діелектричних властивостей рідини. Наявність такої залежності використовується для вимірювання КДП рідини.

11. На основі отриманої залежності розроблено простий в експлуатації диференційний діелектрометр 8 мм діапазону для експрес-аналізу сильно



поглинаючих рідин із застосуванням диференційної кювети і використанням в якості референсної рідини дистильованої води.

Проведено вимірювання модельних рідин, що представляють собою водні розчини етанолу різних концентрацій, сахарів і гліцерину. Встановлено, що диференційна чутливість приладу складає 0,1% за коефіцієнтом загасання і 0,05% за фазовою сталою. Це відповідає диференційній чутливості по КДП кращій, ніж 0,5%.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. А. И. Бородкин, Б. М. Булгаков, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов, и А. И. Шубный, “Двухчастотный двухдиодный квазиоптический генератор миллиметрового диапазона”, *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, № 3, с. 96-98, 1991.
2. В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов, и А. И. Шубный, “Эффективность возбуждения квазиоптического открытого резонатора из волновода”, *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, Т. 52, № 3, с. 231-249, 2009.
3. В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов и А. И. Шубный, “Радиационные потери сосредоточенных элементов связи открытых резонаторов”, *Радиофизика та електроніка*, т. 2(16), №3, с. 12-25, 2011.
4. Z. E. Eremenko, V. N. Skresanov, A. I. Shubnyi, V. G. Gerzhikova, T. A. Zhilyakova and N. S. Anikina, “Complex Permittivity Measurement of High Loss Liquids and Its Application to Wine Analysis”, *In book: Electromagnetic Waves. Edited by V. Zhurbenko*, Chapter 19, [pp. 403-422], INTECH, ISBN 978-953-307-304-0, 2011.
5. Valery N. Skresanov, Zoya E. Eremenko, Vladimir V. Glamazdin and Alexander I. Shubnyi, “Improved differential Ka band dielectrometer based on the wave propagation in a quartz cylinder surrounded by high loss liquid under test”, *Measurement Science and Technology*, 22, 065403, pp. 1-9, 2011.
6. В. Н. Скресанов, З. Е. Еременко, В. В. Гламаздин и А. И. Шубный, “Измерение комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов компонентов виноградных вин на частоте 31,82 ГГц”, *Наукоёмкие технологии*, №1, с. 60-72, 2013.
7. V. N. Skresanov, V. V. Glamazdin, A. I. Fisun and A. I. Shubnyi, “Active Quasi-optical Refractometer in the Extremely High Frequencies (EHF) band”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 83-98, 2016.
8. В. Н. Скресанов и А. И. Шубный, “Автогенераторный спектральный метод исследования электрофизических свойств веществ в миллиметровом диапазоне”, *Тезисы докл. 16-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекомм. технологии»*, Севастополь, т. 2, с. 741-742, 2006.
9. В. Н. Скресанов, В. А. Золотарёв и А. И. Шубный, “Применение автогенераторного метода для измерения коэффициента преломления воздуха в потоке”, *Тезисы докл. 22-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекомм. технологии»*, Севастополь, т. 2, с. 849-850, 2012.

10. В. Н. Скрасанов, В. В. Гламаздин, Е. В. Луценко, В. И. Луценко и А. И. Шубный, “Применение многослойных полудисковых диэлектрических резонаторов в качестве сенсоров показателя преломления тропосферы”, *Тезисы докл. 22-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекомм. технологии»*, Севастополь, т. 2, с. 851-852, 2012.
11. M. P. Natarov, V. N. Skresanov, V. V. Glamazdin and A. I. Shubnyi, “Fabri-Perot Open Resonator Application for the Investigations of a Weak Anisotropy in Dielectric Films”, *Proc. of the 9-th Int. Symp. “Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves”*, Kharkov, D-13, 2016.
12. Valery Skresanov, Zoya Eremenko, Vladimir Glamazdin and Alexander Shubnyi, “Millimeter Wave Measurement of High Loss Liquids Permittivity”, *Proc. of the 7-th Int. Symp. “Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves”*, Kharkov, pp. 21-26, 2010.
13. Z. E. Eremenko, E. S. Kuznetsova, V. V. Glamazdin, M. P. Natarov and A. I. Shubnyi, “Determination method of water - glucose solution concentration at microwaves”, *Proc. IEEE 37-th Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2017)*, Kyiv, pp. 259-262, 2017.
14. E. S. Kuznetsova, Z. E. Eremenko, V. V. Glamazdin, M. P. Natarov and A. I. Shubnyi, “Dielectrometry of pharmaceutical ingredient solutions at microwaves”, *Proc. IEEE First Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017)*, Kyiv, pp. 257-260, 2017.

## АНОТАЦІЯ

Шубний О. І. Резонаторні та хвилеводні методи виміру діелектричної проникності слабо та сильно поглинаючих середовищ в мікрохвильовому діапазоні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.01 – «Фізика приладів, елементів та систем». Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України, 2017. Харківський національний університет радіоелектроніки, м Харків, 2017 р.

В дисертаційній роботі вирішена задача визначення впливу змін компонент комплексної діелектричної або магнітної проникності речовини, що заповнює об'єм квазіоптичного резонатора, на його амплітудні і частотні характеристики, а також досліджено поширення електромагнітних хвиль в хвилеводних системах, що заповнені сильно поглинаючою рідиною.

### **В роботі отримані наступні нові наукові результати:**

1. Вперше запропоновано використовувати в активних системах для вимірювання КДП генерацію квазіоптичного генератора на 2-й гармоніці, оскільки при виключенні навантаження на основній частоті генерації підвищується добротність резонатора за рахунок усунення дифракції на елементі зв'язку, а зміни електродинамічних властивостей коливальної системи генератора на 1-й гармоніці при взаємодії з вимірюваним середовищем

перетворюються з коефіцієнтом 2 в зміни частоти на виході системи, підвищуючи, тим самим, чутливість вимірювань.

2. Вперше оптимізовані розміри хвилеводної узгоджувальної комірки – трансформатора імпедансів напівпровідникового діода і відкритого резонатора. Визначено оптимальну конструкцію дзеркала з узгоджувальною коміркою, що дозволило знизити внесений рівень втрат за подвійний прохід до величини  $\delta_s \sim 0,1\%$ .

3. Вперше встановлено, що в високодобротних вимірювальних квазіоптичних резонаторах, що оптимізовані по дифракційним втратам на краях дзеркал і омичним втратам, важливим фактором, який впливає на чутливість і точність вимірювань, є втрати на нерезонансне випромінювання і розсіювання резонансного поля на елементах зв'язку резонатора з хвилеводами.

4. Встановлено, що при збудженні хвиль в системі “прямокутний хвилевід–діелектричний циліндр”, занурений у сильно поглинаючу рідину, можуть бути збуджені сімейства хвиль чотирьох типів, однак, тип хвилі  $HE_{11}$  збуджується в циліндрі з найменшими втратами і поширюється уздовж циліндра з найменшим загасанням.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що на основі проведених в дисертаційній роботі досліджень розроблені експериментальні зразки квазіоптичних генераторів на діоді Ганна з виходом сигналу першої або другої гармоніки, з рівнем частотного шуму  $\delta f_{rms} \sim 0,028 \text{ Гц} / \sqrt{\text{Гц}}$  при відстройці на 10 кГц від несучої частоти, що представляють собою основу активного перетворювача. Вимірювання малих варіацій діелектричної або магнітної проникності речовин, поміщених у відкритий резонатор генератора, засноване на спектральному аналізі вихідного сигналу.

Розроблено прототип автогенераторної вимірювальної системи на основі відкритого резонатора Фабрі-Перо в колі зворотного зв'язку твердотілого підсилювача мікрохвильового діапазону, який застосований для вимірювання динаміки нестационарних змін індексу заломлення повітря.

Розроблено простий в експлуатації диференційний діелектрометр для експрес-аналізу сильно поглинаючих рідин, придатний для роботи в умовах біохімічних лабораторій. Диференційна чутливість приладу склала 0,1% за коефіцієнтом загасання і 0,05% за фазовою сталою. Це відповідає диференційній чутливості по КДП кращій, ніж 0,5%. Вимірювання КДП автоматизовані, а час повного циклу вимірювань не перевищує три хвилини.

**Ключові слова:** діелектрична проникність, вимірювання, резонатор, добротність, генератор, хвилевід, кювета, рефрактометр, мікрохвилі.

## ANNOTATION

Shubnyi O.I. Resonant and waveguide methods for permittivity measurement of low-loss and high-loss materials in the microwave range. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for a degree of Candidate of Sciences (Ph.D.) in speciality 01.04.01 “Physics of devices, components, and systems”. O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2017. Kharkiv National University of Radio Electronics. Ministry of Education of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The thesis deals with a problem of determining the effect of changing permeability in material filling the volume of the quasi-optical resonator on its amplitude and frequency characteristics. It has been also investigated the propagation of electromagnetic waves in waveguide systems filled with a high-loss liquid.

**The following new scientific results were obtained in the work:**

1. It was first suggested to use second-mode oscillation for permittivity measuring active systems; this is because of the off-loaded fundamental frequency generation increases the Q-factor of the resonator by eliminating the diffraction on the coupling elements and allows increasing sensitivity of measurements.

2. The dimensions of waveguide matching cell which is the impedance transformer of a semiconductor diode with open resonator have been optimized for the first time. Thus, the defined optimum design of an active mirror with a matching cell provides a reduction of losses introduced by a two-way passage to 0.1 %. This, in turn, allowed obtaining the semiconductor quasi-optical oscillator with a frequency noise of  $0.028 \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$  tuning out 10 kHz of the carrier frequency 30 GHz.

3. It was found for the first time that an important factor in increasing the quality factor for a high-Q resonator optimized for diffraction loss at the edges of the mirrors and for ohmic losses is energy loss decreasing in coupling elements.

4. It was established that a family of four wave modes can be excited in a system “rectangular waveguide-dielectric cylinder” immersed in a high-loss liquid; however, the  $HE_{11}$ -mode is a minimum-loss and least attenuated one.

**The practical significance of the results obtained here** implies in the follows: it was developed the experimental models of low-noise quasi-optical generators based on Gunn-diode with the output first- or second-mode signal and serve as a basis of the active transducer. Due to spectral analysis of the output signal, they allow performing measurements of small variations in dielectric or magnetic permeability of substances placed in the open resonator of the generator.

It was designed a prototype of autogeneration measuring system based on Fabry-Perot open resonator in the 8-mm solid-state amplifier feedback loop, which is used to measure the dynamics of non-stationary changes in air refraction index.

An easy-to-use differential dielectrometer of 8-mm range was developed for rapid analysis of high-loss liquids and suitable for operation under biochemical laboratories conditions. The differential sensitivity of the device is 0.1% at the attenuation coefficient and 0.05% in phase constant. This corresponds to a differential sensitivity of the permittivity at least 0.5%. Permittivity measurements are automated, full testing time does not exceed three minutes.

**Keywords:** permittivity, measurement, resonator, quality-factor, generator, waveguide, cavity, refractometer, microwave.

Наукове видання

**Шубний Олександр Іванович**

**РЕЗОНАТОРНІ ТА ХВИЛЕВОДНІ МЕТОДИ ВИМІРУ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ  
ПРОНИКНОСТІ СЛАБО ТА СИЛЬНО ПОГЛИНАЮЧИХ СЕРЕДОВИЩ  
В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ДІАПАЗОНІ**

Відповідальний за випуск О.І. Білоус

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 0,9 Тир. 100 прим. Зам. 22.  
Підписано до друку 24.10.2017 Папір офсетний.

---

Надруковано з макету замовника  
Ротапринт ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України  
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків

Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру видавців  
та виготовників видавничої продукції: серія ДК №1 133 від 27.11.2002 р.